

# El Sistema Internacional de Unidades



**SI**

9<sup>a</sup> Edición  
2019

---

Edición en español  
Centro Español de Metrología

# El Sistema Internacional de Unidades



**SI**

9ª Edición  
2019

---

Edición en español  
Centro Español de Metrología

Este documento ha sido redactado después de obtener la autorización del BIPM, que conserva plenamente los derechos de autor internacionalmente protegidos. El BIPM no acepta ninguna responsabilidad derivada de la idoneidad, exactitud, integridad o calidad de la información y los materiales ofrecidos en cualquier traducción. La única versión oficial es la publicada por el BIPM.

El Centro Español de Metrología publica la traducción al español de esta edición del Sistema Internacional de Unidades, tanto en formato impreso como electrónico en [www.cem.es](http://www.cem.es) con autorización expresa del BIPM.

En esta publicación se ha utilizado papel de acuerdo con los criterios medioambientales de la contratación pública vigente.

**9ª Edición** — Edición en español  
**2019** 2019

---

**Oficina Internacional de Pesas y Medidas**  
**Organización Intergubernamental de la Convención del Metro**

## El BIPM y la Convención del Metro

La Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM según sus siglas en francés) fue creada por la Convención del Metro, firmada en París el 20 de mayo de 1875 por diecisiete Estados, en la última sesión de la Conferencia Diplomática del Metro. Esta Convención fue modificada en 1921.

El BIPM tiene su sede cerca de París, en los terrenos (43 520 m<sup>2</sup>) del Pabellón de Breteuil (Parque de Saint-Cloud), puesto a su disposición por el Gobierno Francés; su mantenimiento se financia conjuntamente por los Estados Miembros de la Convención del Metro.

La misión del BIPM es asegurar la unificación mundial de las mediciones, siendo sus objetivos:

- representar a la comunidad metrológica mundial, con el objetivo de maximizar su aceptación e impacto,
- ser un centro de colaboración científica y técnica entre los Estados miembros, proporcionando capacidades para la comparación internacional de las mediciones sobre una base de costes compartidos,
- ser el coordinador del sistema de medición mundial, asegurando que proporcione resultados de medición comparables e internacionalmente aceptados.

El BIPM trabaja bajo la supervisión exclusiva del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), que a su vez está bajo la autoridad de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), a la cual informa sobre los trabajos efectuados por el BIPM.

A la Conferencia General asisten delegados de todos los Estados miembros de la Convención del Metro, los cuales se reúnen normalmente cada cuatro años. Los objetivos de estas reuniones son:

- discutir y propiciar los acuerdos necesarios para asegurar la propagación y la mejora del Sistema Internacional de Unidades (SI), forma moderna del sistema métrico;
- confirmar los resultados de las nuevas determinaciones metrológicas fundamentales y las diversas resoluciones científicas de ámbito internacional;
- adoptar todas las decisiones importantes relativas a la financiación, organización y desarrollo del BIPM.

El CIPM está formado por dieciocho miembros, cada uno de un Estado distinto; en la actualidad se reúnen todos los años. Los miembros del Comité envían a los Gobiernos de los Estados miembros de la Convención del Metro un informe anual sobre la situación administrativa y financiera del BIPM. La misión principal del Comité es asegurar la uniformidad mundial de las unidades de medida, ya sea actuando directamente o presentando propuestas a la CGPM.

A 20 de mayo de 2019 había cincuenta y nueve Estados miembros: Alemania, Arabia Saudita, Argentina, Australia, Austria, Bélgica, Brasil, Bulgaria, Canadá, Chile, China, Colombia, Croacia, Corea (Rep. de), Dinamarca, Egipto, Emiratos Árabes Unidos, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estados Unidos de América, Federación Rusa, Finlandia, Francia, Grecia, Holanda, Hungría, India, Indonesia, Irán (Rep. Islámica), Iraq, Irlanda, Israel, Italia, Japón, Kazajistán, Kenia, Lituania, Malasia, México, Montenegro, Noruega, Nueva Zelanda, Paquistán, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumanía, Serbia, Singapur, Sudáfrica, Suecia, Suiza, Tailandia, Túnez, Turquía, Ucrania y Uruguay.

Cuarenta y dos Estados y Entidades Económicas estaban asociados a la Conferencia General: Albania, Azerbaiyán, Bangladesh, Bielorrusia, Bolivia, Bosnia-Herzegovina, Botswana, CARICOM, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Estonia, Etiopía, Filipinas, Georgia, Ghana, Hong Kong (China), Jamaica, Kuwait, Letonia, Luxemburgo, Macedonia del Norte, Malta, Mauricio, Moldavia (Rep. de), Mongolia, Namibia, Omán, Panamá, Paraguay, Perú, Qatar, Seychelles, Sri Lanka, Siria (Rep. Árabe de), Sudán, Taiwán, Tanzania (Rep. Unida de), Uzbekistán, Vietnam, Zambia y Zimbabue.

Las actividades del BIPM, limitadas en un principio a las mediciones de longitud y masa y a los estudios metrológicos relacionados con estas magnitudes, se han ampliado a los patrones de medidas eléctricas (1927), de fotometría y radiometría (1937), de radiaciones ionizantes (1960), a las escalas de tiempo (1988) y a la química (2000). Para ello en 1929 se ampliaron los primitivos laboratorios, construidos en 1876-1878; en 1963-1964 se construyeron nuevos edificios para los laboratorios de la sección de radiaciones ionizantes, en 1984 para trabajos con láseres, en 1988 para la biblioteca y oficinas. En 2001 se inauguró un nuevo edificio destinado a talleres, oficinas y salas de reuniones.

En los laboratorios del BIPM trabajan alrededor de cuarenta y cinco físicos y técnicos, los cuales realizan fundamentalmente investigaciones metrológicas, comparaciones internacionales de realizaciones de unidades y calibraciones de patrones. Los detalles de estos trabajos se reflejan en un informe anual del Director.

Ante la amplitud de las tareas confiadas al BIPM, en 1927 el CIPM estableció órganos, conocidos como Comités Consultivos, destinados a informar sobre las cuestiones que se les sometían a consideración, para su estudio y recomendaciones. Estos Comités Consultivos, que pueden a su vez formar grupos de trabajo, temporales o permanentes, para el estudio de cuestiones concretas, son responsables de coordinar los trabajos internacionales en sus respectivos campos y de proponer al CIPM recomendaciones referentes a las unidades.

Los Comités Consultivos tienen un reglamento común (Documento CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*). Celebran sus reuniones a intervalos irregulares. El presidente de cada Comité Consultivo es nombrado por el CIPM y suele ser miembro del CIPM. Los miembros de los Comités Consultivos son laboratorios de metrología e institutos especializados, aceptados por acuerdo del CIPM, los cuales envían delegados elegidos por ellos. También hay miembros a título personal designados por el CIPM y un representante del BIPM (Documento CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*). En la actualidad hay diez Comités:

1. Comité Consultivo sobre Electricidad y Magnetismo (CCEM), nuevo nombre dado en 1997 al Comité Consultivo sobre Electricidad (CCE) creado en 1927;
2. Comité Consultivo sobre Fotometría y Radiometría (CCPR), nuevo nombre dado en 1971 al Comité Consultivo sobre Fotometría (CCP) creado en 1933 (de 1930 a 1933 el CCE se ocupó de la fotometría);
3. Comité Consultivo sobre Termometría (CCT), creado en 1937;
4. Comité Consultivo sobre Longitud (CCL), nuevo nombre dado en 1997 al Comité Consultivo para la Definición del Metro (CCDM), creado en 1952;
5. Comité Consultivo sobre Tiempo y Frecuencia (CCTF), nuevo nombre dado en 1997 al Comité Consultivo para la Definición del Segundo (CCDS) creado en 1956;
6. Comité Consultivo sobre Radiaciones Ionizantes (CCRI), nuevo nombre dado en 1997 al Comité Consultivo sobre Patrones de Radiaciones Ionizantes (CCEMRI) creado en 1958 (en 1969 este Comité Consultivo estableció cuatro secciones: Sección I (Rayos X y  $\gamma$ , electrones), Sección II (Medida de radionucléidos),

Sección III (Medida de Neutrones), Sección IV (Patrones de energía  $\alpha$ ); esta última sección fue disuelta en 1975, siendo confiado su campo de actividad a la Sección II;

7. Comité Consultivo sobre Unidades (CCU), creado en 1964 (este Comité Consultivo sustituyó a la “Comisión sobre el Sistema de Unidades” creada por el CIPM en 1954);
8. Comité Consultivo sobre Masa y Magnitudes Relacionadas (CCM), creado en 1980;
9. Comité Consultivo sobre Cantidad de Sustancia: Metrología en Química y Biología (CCQM), creado en 1993;
10. Comité Consultivo sobre Acústica, Ultrasonidos y Vibraciones (CCAUV), creado en 1999.

Los trabajos de la Conferencia General y del CIPM se publican por el BIPM en las colecciones siguientes:

- *Report of the meeting of the General Conference on Weights and Measures;*
- *Report of the meeting of the International Committee for Weights and Measures.*

El CIPM decidió en 2003 no imprimir más los informes de las reuniones de los Comités Consultivos, sino incluirlos en la página web del BIPM, en su idioma original.

El BIPM también publica monografías sobre cuestiones metroológicas particulares, y la titulada *El Sistema Internacional de Unidades (SI)*, que se actualiza periódicamente, y que recoge todas las decisiones y recomendaciones referentes a las unidades.

La colección de *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 tomos publicados entre 1881 y 1966) y el *Recueil des Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (11 volúmenes publicados entre 1966 y 1988) han dejado de publicarse por decisión del CIPM.

Los trabajos científicos del BIPM se publican con acceso libre en las revistas científicas.

Desde 1965, *Metrologia*, la revista internacional publicada bajo los auspicios del CIPM, publica artículos sobre metrología científica, avances en métodos de medida, trabajos sobre patrones y unidades, así como los informes referentes a las actividades, decisiones y recomendaciones de los distintos órganos de la Convención del Metro.



# El Sistema Internacional de Unidades

# Contenido

<b>El BIPM y la Convención del Metro</b>	<b>3</b>
<b>Prólogo a la 9ª edición</b>	<b>8</b>
Prólogo a la versión en español	10
<b>1 Introducción</b>	<b>11</b>
1.1 El SI y las constantes que lo definen	11
1.2 Motivación para el uso de constantes en la definición del SI	11
1.3 Implementación del SI	12
<b>2 El Sistema Internacional de Unidades</b>	<b>13</b>
2.1 Definición de la unidad de una magnitud	13
2.2 Definición del SI	13
2.2.1 Naturaleza de las siete constantes definitorias del SI	14
2.3 Definiciones de las unidades SI	16
2.3.1 Unidades básicas	16
2.3.2 Realización práctica de las unidades SI	22
2.3.3 Dimensiones de las magnitudes	22
2.3.4 Unidades derivadas	23
2.3.5 Unidades para magnitudes que describen efectos biológicos y fisiológicos	28
2.3.6 Las unidades SI en el marco de la teoría general de la relatividad	29
<b>3 Múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI</b>	<b>30</b>
<b>4 Unidades no pertenecientes al SI pero aceptadas para su uso con él</b>	<b>32</b>
<b>5 Reglas de escritura de los nombres y símbolos de las unidades, y expresión de los valores de las magnitudes</b>	<b>34</b>
5.1 Uso de los nombres y símbolos de las unidades	34
5.2 Símbolos de las unidades	34
5.3 Nombres de las unidades	35
5.4 Reglas y convenciones de estilo para expresar los valores de las magnitudes	35
5.4.1 Valor y valor numérico de una magnitud; cálculo de magnitudes	35
5.4.2 Símbolos de magnitudes y símbolos de unidades	36
5.4.3 Escritura del valor de una magnitud	36
5.4.4 Escritura de los números y del separador decimal	37



---

5.4.5	Expresión de la incertidumbre de medida asociada al valor de una magnitud	37
5.4.6	Multiplicación y división de símbolos de magnitudes, valores de magnitudes y números	38
5.4.7	Expresión de los valores de magnitudes que son números puros	38
5.4.8	Ángulos planos, ángulos sólidos y ángulos de fase	38
<b>Anexo 1. —</b>	<b>Decisiones de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM)</b>	<b>40</b>
<b>Anexo 2. —</b>	<b>Realización práctica de las definiciones de algunas unidades importantes</b>	<b>91</b>
<b>Anexo 3. —</b>	<b>Unidades para magnitudes fotoquímicas y fotobiológicas</b>	<b>92</b>
<b>Anexo 4. —</b>	<b>Notas históricas sobre la evolución del Sistema Internacional de Unidades y sus unidades básicas</b>	<b>93</b>
	Parte 1. — Evolución histórica de la realización de las unidades SI	93
	Parte 2. — Evolución histórica del Sistema Internacional	95
	Parte 3. — Perspectiva histórica de las unidades básicas	98
	<b>Lista de siglas y acrónimos</b>	<b>103</b>
	<b>Índice</b>	<b>105</b>

## Prólogo a la 9ª edición

El Sistema Internacional de Unidades, el SI, se ha utilizado en todo el mundo como el sistema preferido de unidades, el lenguaje básico para la ciencia, la tecnología, la industria y el comercio desde que se estableció en 1960 por una resolución de la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM).

Este folleto lo publica el *Bureau International des Poids et Mesures*, BIPM, conocido en español como Oficina Internacional de Pesas y Medidas, para promover y divulgar el SI. Enumera las Resoluciones más significativas de la CGPM y las decisiones del *Comité International de Poids et Mesures*, CIPM, conocido en español como Comité Internacional de Pesas y Medidas, que conciernen al sistema métrico, desde la primera reunión de la CGPM en 1889.

El SI siempre ha sido un sistema práctico y dinámico que ha evolucionado para aprovechar los últimos avances científicos y tecnológicos. En particular, los tremendos avances en física atómica y metrología cuántica realizados en los últimos 50 años han permitido que las definiciones del segundo, el metro y la representación práctica de las unidades eléctricas se beneficien de los fenómenos atómicos y cuánticos para lograr realizar las unidades respectivas con niveles de exactitud únicamente limitados por nuestra capacidad técnica y no por las definiciones mismas. Estos avances en la ciencia junto con los desarrollos en la tecnología de medición han permitido cambios en el SI recogidos y explicados en las ediciones anteriores de este folleto.

Esta novena edición del folleto sobre el SI ha sido preparada después de la adopción por la 26ª reunión de la CGPM de un conjunto de cambios de gran alcance. La reunión introdujo un nuevo enfoque para articular las definiciones de las unidades en general, y de las siete unidades básicas en particular, al fijar los valores numéricos de siete constantes "definitorias". Entre ellas se encuentran las constantes fundamentales de la naturaleza, como la constante de Planck y la velocidad de la luz, de modo que las definiciones se basan y representan nuestra comprensión actual de las leyes de la física.

Por primera vez, hay disponible un conjunto completo de definiciones que no hacen referencia a patrones materiales, propiedades de materiales o descripciones de medidas. Estos cambios permiten la realización de todas las unidades con una exactitud que en última instancia está limitada solo por la estructura cuántica de la naturaleza y nuestras habilidades técnicas, pero no por las definiciones mismas. Cualquier ecuación válida de la física que relacione las constantes definitorias con una unidad puede utilizarse para realizar la unidad, creando así oportunidades para la innovación y la realización en cualquier parte con mayor exactitud, a medida que avanza la tecnología. Por lo tanto, esta redefinición marca un importante e histórico paso adelante.

La CGPM aprobó los cambios en noviembre de 2018, entrando en vigor a partir del 20 de mayo de 2019, una fecha elegida por ser el Día Mundial de la Metrología, el día en que se firmó la Convención del Metro en 1875. Si bien el impacto futuro de los cambios será de gran alcance, se ha puesto gran cuidado en garantizar que estas definiciones sean consistentes con las vigentes en el momento en que se implementó el cambio.

Llamamos la atención sobre el hecho de que desde su establecimiento en 1960, el Sistema Internacional de Unidades siempre se ha denominado "el SI" en su forma abreviada. Este principio se ha mantenido en las ocho ediciones anteriores de este folleto, reafirmandose en la Resolución 1 adoptada en la 26ª reunión de la CGPM, que también confirmó que el título de este folleto sea simplemente "El Sistema

Internacional de Unidades". Esta coherencia en la referencia al SI refleja los esfuerzos de la CGPM y del CIPM para garantizar la continuidad de los valores de las mediciones expresadas en unidades SI a través de cada cambio realizado.

El texto de este folleto se ha preparado de forma que proporcione una descripción completa del SI, junto a algunos antecedentes históricos. Consta de cuatro anexos:

El Anexo 1 reproduce, en orden cronológico, todas las decisiones (Resoluciones, Recomendaciones, Declaraciones) promulgadas desde 1889 por la CGPM y el CIPM sobre unidades de medida y el Sistema Internacional de Unidades.

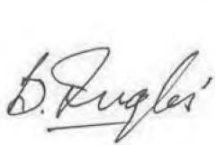
El Anexo 2 solo está disponible en versión electrónica ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). Describe la realización práctica de las siete unidades básicas y otras unidades importantes en cada campo. Este anexo se actualizará periódicamente para reflejar mejoras en las técnicas experimentales disponibles para realizar las unidades.

El Anexo 3 solo está disponible en versión electrónica ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). Se refiere a las unidades para magnitudes fotoquímicas y fotobiológicas.

El Anexo 4 proporciona algunas notas sobre la evolución del SI.

Concluimos expresando nuestro agradecimiento a los miembros del Comité Consultivo sobre las Unidades (CCU) del CIPM, responsable de redactar este folleto. Tanto el CCU como el CIPM han aprobado el texto final.

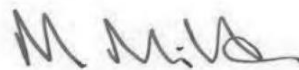
Marzo de 2019



B. Inglis  
Presidente del CIPM



J. Ullrich  
Presidente del CCU



M.J.T. Milton  
Director del BIPM

## **Prólogo a la versión en español**

La presente versión en español ha sido preparada por el Centro Español de Metrología y puede encontrarse, en formato electrónico, en la dirección [www.cem.es](http://www.cem.es).

Para algunas unidades de medida se han empleado sus denominaciones castellanizadas admitidas por la Real Academia Española de la Lengua (RAE); es el caso de voltio, ohmio, faradio, hercio, etc., que en la versión original en francés e inglés aparecen como volt, ohm, farad, hertz, etc.

Diciembre 2019

# 1 Introducción

## 1.1 El SI y las constantes que lo definen

Esta publicación presenta información sobre la definición y el uso del Sistema Internacional de Unidades, universalmente conocido como el SI (del francés *Système international d'unités*), del cual es responsable la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM). En 1960, la 11ª CGPM definió y estableció formalmente el SI y, posteriormente, lo ha revisado cada cierto tiempo, en respuesta a los requisitos de los usuarios y a los avances en ciencia y tecnología. La revisión más reciente y quizás la más significativa del SI desde su establecimiento ha sido la realizada por la 26ª CGPM (2018), la cual se documenta en esta 9ª edición del folleto sobre el SI. La Convención del Metro y sus órganos, la CGPM, el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) y los Comités Consultivos se describen en el apartado “El BIPM y la Convención del Metro”, en la página 3.

El SI es un sistema consistente de unidades para su utilización en todas las facetas de la vida, incluyendo el comercio internacional, la fabricación, la seguridad, la salud y la seguridad, la protección del medio ambiente y la ciencia básica que sustenta todo ello. El sistema de magnitudes subyacentes bajo el SI y las ecuaciones que las relacionan se basan en la descripción actual de la naturaleza y resultan familiares para todos los científicos, tecnólogos e ingenieros.

La definición de las unidades SI se establece mediante un conjunto de siete constantes definitorias. El sistema completo de unidades puede derivarse a partir de los valores numéricos fijos de estas constantes definitorias, expresados en unidades del SI. Estas siete constantes definitorias constituyen la característica fundamental de la definición de todo el sistema de unidades. Estas constantes particulares se eligieron después de ser identificadas como la mejor opción, teniendo en cuenta la definición anterior del SI, basada en siete unidades básicas, y el progreso en la ciencia.

Para la realización de las definiciones puede emplearse una variedad de métodos experimentales descritos por los Comités Consultivos del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). Las descripciones de estas realizaciones se conocen también como "*mises en pratique (puestas en práctica)*". Las realizaciones podrán actualizarse tras el desarrollo de nuevos experimentos; por este motivo, no se incluye en este folleto consejo alguno sobre la realización de las definiciones, aunque puede accederse a ellos a través de la página web del BIPM.

## 1.2 Motivación para el uso de constantes en la definición del SI

Históricamente, las unidades SI se han presentado como un conjunto de *unidades básicas*, últimamente siete. Todas las demás unidades, denominadas *unidades derivadas*, se construyen como productos de potencias de las unidades básicas.

Para las unidades básicas se han utilizado diferentes tipos de definiciones: propiedades de patrones materializados, como la masa del prototipo internacional (KPI) para la unidad kilogramo; un estado físico específico como el punto triple del agua para la unidad kelvin; prescripciones experimentales ideales como en el caso del amperio y la

candela; o constantes de la naturaleza, como la velocidad de la luz para la definición de la unidad metro.

Para ser de utilidad práctica, estas unidades no solo tienen que definirse, sino que también tienen que realizarse físicamente para su diseminación. En el caso de un patrón material, la definición y la realización son equivalentes – un camino que siguieron las civilizaciones antiguas avanzadas. Aunque esto es simple y claro, los patrones materiales implican el riesgo de pérdida, daño o alteración. El resto de definiciones de unidades son incrementalmente abstractas o ideales. Ahora, las realizaciones se separan conceptualmente de las definiciones para que las unidades puedan, en principio, realizarse de manera independiente en cualquier lugar y tiempo. Además, pueden introducirse nuevas y mejores realizaciones a medida que progresen la ciencia y la tecnología, sin necesidad de redefinir la unidad. Estas ventajas – la más evidente vista en la historia de la definición del metro, desde el primer patrón material, pasando por una transición atómica de referencia, hasta el valor numérico fijo de la velocidad de la luz – llevaron a la decisión de definir todas las unidades utilizando constantes.

La elección de las unidades básicas nunca fue única, pero se consolidó a lo largo de la historia y se hizo familiar para los usuarios del SI. La distinción entre unidades básicas y derivadas sigue manteniéndose en la actual definición del SI, pero se ha reformulado como consecuencia de la adopción de las constantes definitorias.

### 1.3 Implementación del SI

Las definiciones de las unidades del SI, según lo decidido por la CGPM, representan el nivel de referencia más alto para la trazabilidad de las mediciones al SI.

Los institutos de metrología de todo el mundo establecen las realizaciones prácticas de las definiciones con el fin de permitir la trazabilidad de las mediciones al SI. Los Comités Consultivos proporcionan el marco para establecer la equivalencia de las realizaciones, con el fin de armonizar la trazabilidad en todo el mundo.

Los organismos de normalización pueden especificar detalles adicionales para magnitudes y unidades, y reglas para su aplicación, cuando así lo requieran partes interesadas. Siempre que estén involucradas unidades SI, las normas deben referirse a las definiciones de la CGPM. Muchas de estas especificaciones figuran, por ejemplo, en las normas desarrolladas por la Organización Internacional de Normalización y la Comisión Electrotécnica Internacional (Serie ISO/IEC 80000 de normas internacionales).

Los distintos países han establecido reglas sobre el uso de las unidades mediante legislación nacional, ya sea para uso general o para áreas específicas como el comercio, la salud, la seguridad pública o la educación. En casi todos los países, esta legislación se basa en el SI. La Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) es la encargada de la armonización internacional de las especificaciones técnicas de dicha legislación.

## 2 El Sistema Internacional de Unidades

### 2.1 Definición de la unidad de una magnitud

El valor de una magnitud se expresa generalmente mediante el producto de un número y una unidad. La unidad es simplemente un ejemplo particular del valor de la magnitud en cuestión, utilizado como referencia, y el número es la relación entre el valor de la magnitud y la unidad.

Para una magnitud en concreto pueden utilizarse diferentes unidades. Por ejemplo, el valor de la velocidad  $v$  de una partícula puede expresarse como  $v = 25 \text{ m/s}$  o como  $v = 90 \text{ km/h}$ , donde metro por segundo y kilómetro por hora son unidades alternativas para el mismo valor de la magnitud velocidad.

Antes de indicar el resultado de una medición, es esencial que la magnitud medida sea adecuadamente descrita. Esto puede resultar simple, como en el caso de la longitud de una barra concreta de acero, pero puede volverse más complejo cuando se requiere una mayor exactitud, donde deben especificarse parámetros adicionales, como la temperatura.

Cuando se informa del resultado de la medición de una magnitud, son necesarios el *valor estimado* del mensurando (la magnitud bajo medición) y la *incertidumbre* asociada a dicho valor. Ambos se expresan en la misma unidad.

Por ejemplo, la velocidad de la luz en el vacío es una constante de la naturaleza, con notación  $c$ , cuyo valor en unidades SI viene dado por la relación  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ , donde el valor numérico es 299 792 458 y la unidad es m/s

### 2.2 Definición del SI

Como para cualquier magnitud, el valor de una constante fundamental puede expresarse como el producto de un número y una unidad.

Las siguientes definiciones especifican el valor numérico exacto de cada constante cuando su valor se expresa en la unidad SI correspondiente. Al fijar el valor numérico exacto, resulta definida la unidad, ya que el producto del *valor numérico* y la *unidad* tiene que ser igual al *valor* de la constante, que se postula como invariante.

Las siete constantes se eligen de tal manera que cualquier unidad del SI puede escribirse mediante una única constante definitoria o mediante productos o relaciones entre constantes definitorias.

El cociente de unidades SI puede expresarse utilizando bien la barra inclinada (/), bien un exponente negativo (⁻)

Por ejemplo,  
 $\text{m/s} = \text{m s}^{-1}$   
 $\text{mol/mol} = \text{mol mol}^{-1}$

**El Sistema Internacional de Unidades, el SI, es el sistema de unidades en el que**

- la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio  $^{133}\text{Cs}$  es  $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$ ,
- la velocidad de la luz en el vacío  $c$  es  $299\,792\,458 \text{ m/s}$ ,
- la constante de Planck  $h$  es  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ,
- la carga elemental  $e$  es  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,
- la constante de Boltzmann  $k$  es  $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,
- la constante de Avogadro  $N_A$  es  $6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ,
- la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12} \text{ hercios } K_{\text{cd}}$  es de  $683 \text{ lm/W}$ .

donde hercio, julio, culombio, lumen y vatio, con símbolos Hz, J, C, lm y W, respectivamente, se relacionan con las unidades segundo, metro, kilogramo, amperio, kelvin, mol y candela, con símbolos s, m, kg, A, K, mol y cd, respectivamente, según  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$  y  $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$ .

Los valores numéricos de las siete constantes que definen el SI carecen de incertidumbre.

**Tabla 1. Las siete constantes definitorias del SI y las correspondientes siete unidades definidas por ellas**

Constante definitoria	Símbolo	Valor numérico	Unidad
Frecuencia de la transición hiperfina del Cs	$\Delta \nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
Velocidad de la luz en el vacío	$c$	299 792 458	$\text{m s}^{-1}$
Constante de Planck	$h$	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s
Carga elemental	$e$	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
Constante de Boltzmann	$k$	$1,380\,649 \times 10^{-23}$	J K <sup>-1</sup>
Constante de Avogadro	$N_{\text{A}}$	$6,022\,140\,76 \times 10^{23}$	mol <sup>-1</sup>
Eficacia luminosa	$K_{\text{cd}}$	683	lm W <sup>-1</sup>

Preservar la continuidad cuanto sea posible ha sido siempre una característica esencial de cualquier cambio en el Sistema Internacional de Unidades. Los valores numéricos de las constantes definitorias han sido elegidos para mantener la consistencia con las definiciones anteriores en la medida en que lo permitan los avances de la ciencia y el conocimiento.

### 2.2.1 Naturaleza de las siete constantes definitorias del SI

La naturaleza de las constantes definitorias varía desde constantes fundamentales de la naturaleza hasta constantes técnicas.

El uso de una constante para definir una unidad desconecta la definición de la realización. Esto ofrece la posibilidad de desarrollar realizaciones prácticas completamente diferentes, o nuevas y mejores, a medida que las tecnologías evolucionan, sin necesidad de cambiar la definición.

Una constante técnica, como  $K_{\text{cd}}$ , la eficacia luminosa de una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz, se refiere a una aplicación especial. En principio, se puede elegir libremente, para incluir factores fisiológicos convencionales u otros factores de ponderación. En contraste, el uso de una constante fundamental de la naturaleza no permite, en general, esta elección porque está relacionada con otras constantes a través de las ecuaciones de la física.

El conjunto de siete constantes definitorias se ha elegido para proporcionar una referencia fundamental, estable y universal que, al mismo tiempo, permite las realizaciones prácticas con las menores incertidumbres. Las convenciones y especificaciones técnicas también tienen en cuenta los desarrollos históricos.

Tanto la constante de Planck  $h$  como la velocidad de la luz en el vacío  $c$  se denominan correctamente fundamentales. Determinan los efectos cuánticos y las propiedades del



espacio-tiempo, respectivamente, y afectan a todas las partículas y campos por igual en todas las escalas y en todos los entornos.

La carga elemental  $e$  corresponde a una fuerza de acoplamiento de la fuerza electromagnética a través de la constante de estructura fina  $\alpha = e^2/(2c\epsilon_0 h)$  donde  $\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica del vacío o constante eléctrica. Algunas teorías predicen una variación de  $\alpha$  con el tiempo. Los límites experimentales de la máxima variación posible de  $\alpha$  son tan bajos, sin embargo, que puede excluirse cualquier efecto en las mediciones prácticas previsible.

La constante de Boltzmann  $k$  es una constante de proporcionalidad entre las magnitudes temperatura (con unidad kelvin) y energía (con unidad julio), por lo que el valor numérico se obtiene a partir de especificaciones históricas de la escala de temperatura. La temperatura de un sistema aumenta con la energía térmica, pero no necesariamente con la energía interna de un sistema. En física estadística, la constante de Boltzmann conecta la entropía  $S$  con el número  $\Omega$  de estados mecánico-cuánticos accesibles,  $S = k \ln \Omega$ .

La frecuencia del cesio  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio-133, tiene el carácter de parámetro atómico, que puede verse afectado por el entorno, por ejemplo por campos electromagnéticos. Sin embargo, la transición subyacente es perfectamente entendida, estable y una buena elección como transición de referencia a efectos prácticos. La elección de un parámetro atómico como  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  no desconecta la definición de la realización tal como sí hacen  $h$ ,  $c$ ,  $e$ , o  $k$ , pero especifica la referencia.

La constante de Avogadro  $N_A$  es una constante de proporcionalidad entre la magnitud cantidad de sustancia (con unidad mol) y la magnitud conteo de entidades (con unidad uno, símbolo 1). Por tanto, tiene el carácter de constante de proporcionalidad similar a la constante de Boltzmann  $k$ .

La eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , es una constante técnica que proporciona una relación numérica exacta entre las características puramente físicas de la potencia radiante que estimula el ojo humano (W) y su respuesta fotobiológica definida por el flujo luminoso debido a la responsividad espectral de un observador medio (lm) a una frecuencia de  $540 \times 10^{12}$  hercios.

## 2.3 Definiciones de las unidades SI

Anteriormente a las definiciones adoptadas en 2018, el SI se definía mediante siete *unidades básicas* a partir de las cuales se construían las *unidades derivadas*, como productos de potencias de las unidades básicas. Definir el SI fijando los valores numéricos de siete constantes definitorias tiene el efecto de que esta distinción, en principio, ya no es necesaria, pues todas las unidades, tanto las *básicas* como las *derivadas*, pueden construirse directamente a partir de las constantes definitorias. Sin embargo, el concepto de unidades básicas y derivadas se mantiene, dado que es útil e históricamente se halla bien establecido, resaltando también que la serie de normas ISO/IEC 80000 especifica las magnitudes básicas y derivadas que necesariamente se corresponden con las unidades básicas y derivadas del SI aquí definidas.

### 2.3.1 Unidades básicas

La Tabla 2 muestra las unidades básicas del SI.

**Tabla 2. Unidades básicas del SI**

Magnitud básica		Unidad básica	
Nombre	Símbolo habitual	Nombre	Símbolo
tiempo	<i>t</i>	segundo	s
longitud	<i>l, x, r, etc.</i>	metro	m
masa	<i>m</i>	kilogramo	kg
corriente eléctrica	<i>I, i</i>	amperio	A
temperatura termodinámica	<i>T</i>	kelvin	K
cantidad de sustancia	<i>n</i>	mol	mol
intensidad luminosa	<i>I<sub>v</sub></i>	candela	cd

Los símbolos para las magnitudes son generalmente letras individuales del alfabeto latino o griego, escritas en letra cursiva, tratándose de *recomendaciones*. Los símbolos de las unidades se escriben con fuente recta (romana) y son *obligatorios*. Consulte el capítulo 5.

A partir de la definición del SI en función de los valores numéricos fijos de las constantes definitorias, se deducen las definiciones de cada una de las siete unidades básicas, utilizando, según corresponda, una o más de dichas constantes definitorias, lo que conduce al siguiente conjunto de definiciones:

#### El segundo

**El segundo, símbolo s, es la unidad SI de tiempo. Se define al fijar el valor numérico de la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , en 9 192 631 770, cuando se expresa en la unidad Hz, igual a  $\text{s}^{-1}$ .**

Esta definición implica la relación exacta  $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ . Invertiendo esta relación se obtiene la expresión para la unidad segundo, en función del valor de la constante  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

$$1 \text{ Hz} = \frac{\Delta \nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{o} \quad 1 \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta \nu_{\text{Cs}}}$$

Resultado de esta definición es que el segundo es la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de  $^{133}\text{Cs}$

La referencia a un átomo no perturbado pretende aclarar que la definición del segundo SI se basa en un átomo de cesio aislado, no perturbado por ningún campo externo, como p. ej., la radiación ambiental de un cuerpo negro.

El segundo, así definido, es la unidad de tiempo acorde con la teoría general de la relatividad. Para poder contar con una escala de tiempo coordinado, se combinan las señales de diferentes relojes primarios en diferentes ubicaciones, que deben corregirse por los desplazamientos relativistas de la frecuencia del cesio (véase la sección 2.3.6).

El CIPM ha adoptado varias representaciones secundarias del segundo, basadas en un número seleccionado de líneas espectrales de átomos, iones o moléculas. Las frecuencias no perturbadas de estas líneas pueden determinarse con una incertidumbre relativa no inferior a la de la realización del segundo, basada en la frecuencia de la transición hiperfina del  $^{133}\text{Cs}$ , pero algunas pueden reproducirse con una estabilidad superior.

### El metro

**El metro, símbolo m, es la unidad SI de longitud. Se define al fijar el valor numérico de la velocidad de la luz en el vacío,  $c$ , en 299 792 458, cuando se expresa en la unidad  $\text{m s}^{-1}$ , donde el segundo se define en función de la frecuencia del Cesio  $\Delta \nu_{\text{Cs}}$ .**

Esta definición implica la relación exacta  $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ . Invirtiendo esta relación se obtiene la expresión exacta para el metro, en función de las constantes  $c$  y  $\Delta \nu_{\text{Cs}}$ :

$$1 \text{ m} = \left( \frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta \nu_{\text{Cs}}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta \nu_{\text{Cs}}}$$

Resultado de esta definición es que un metro es la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de  $1/299\,792\,458$  de segundo.

### El kilogramo

**El kilogramo, símbolo kg, es la unidad SI de masa. Se define al fijar el valor numérico de la constante de Planck,  $h$ , en  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ , cuando se expresa en la unidad  $\text{J}\cdot\text{s}$ , igual a  $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , donde el metro y el segundo se definen en función de  $c$  y  $\Delta \nu_{\text{Cs}}$**

Esta definición implica la relación exacta  $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Invirtiendo esta relación se obtiene la expresión exacta para el kilogramo en función de las tres constantes definitorias  $h$ ,  $\Delta \nu_{\text{Cs}}$  y  $c$ :

$$1 \text{ kg} = \left( \frac{h}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^{-2} \text{ s}$$

o lo que es lo mismo

$$1 \text{ kg} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h \Delta \nu_{\text{Cs}} \approx 1,475\,5214 \times 10^{40} h \Delta \nu_{\text{Cs}}}{c^2 c^2}$$

A resultas de esta definición queda definida la unidad  $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$  (la unidad de las magnitudes físicas acción y momento angular). Junto con las definiciones del segundo y del metro, esto conduce a la definición de la unidad de masa en función del valor de la constante de Planck  $h$ .

La definición anterior del kilogramo fijaba el valor de la masa del prototipo internacional del kilogramo,  $m(K)$  como exactamente igual a un kilogramo, y el valor de la constante de Planck  $h$  debía determinarse experimentalmente. La definición actual fija el valor numérico exacto de  $h$  y la masa del prototipo es la que debe determinarse ahora experimentalmente.

El número elegido para el valor numérico de la constante de Planck en esta definición es tal que, en el momento de su adopción, el kilogramo era igual a la masa del prototipo internacional,  $m(K) = 1 \text{ kg}$ , con una incertidumbre típica relativa de  $1 \times 10^{-8}$ , que era la incertidumbre típica de las mejores estimaciones combinadas del valor de la constante de Planck en ese momento.

Obsérvese que con la definición actual, pueden establecerse realizaciones primarias, en principio, en cualquier punto de la escala de masas.

### El amperio

**El amperio, símbolo A, es la unidad SI de corriente eléctrica. Se define al fijar el valor numérico de la carga elemental,  $e$ , en  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ , cuando se expresa en la unidad C, igual a  $A \cdot s$ , donde el segundo se define en función de  $\Delta \nu_{\text{Cs}}$**

Esta definición implica la relación exacta  $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ A s}$ . Invertiendo esta relación se obtiene una expresión exacta para la unidad amperio en función de las constantes  $e$  y  $\Delta \nu_{\text{Cs}}$ :

$$1 \text{ A} = \left( \frac{e}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) \text{ s}^{-1}$$

o lo que es lo mismo

$$1 \text{ A} = \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})} \frac{\Delta \nu_{\text{Cs}} e \approx 6,789\,687 \times 10^8 \Delta \nu_{\text{Cs}}}{\text{Cs}} \text{ Cs}$$

Resultado de esta definición es que un amperio es la corriente eléctrica correspondiente



La definición anterior del amperio estaba basada en la fuerza entre dos conductores portadores de corriente y tenía el efecto de fijar el valor de la permeabilidad magnética del vacío  $\mu_0$  (también conocida como constante magnética) como exactamente igual a  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$ , donde H y N representan las unidades derivadas coherentes henrio y newton, respectivamente. La nueva definición del amperio fija el valor de  $e$  en lugar de  $\mu_0$ . Como resultado,  $\mu_0$  debe determinarse experimentalmente.

También se deduce que, dado que la permitividad eléctrica del vacío  $\epsilon_0$  (también conocida como constante eléctrica), la impedancia característica del vacío  $Z_0$  y la admitancia del vacío  $Y_0$  son iguales a  $1/\mu_0 c^2$ ,  $\mu_0 c$  y  $1/\mu_0 c$ , respectivamente, los valores de  $\epsilon_0$ ,  $Z_0$  e  $Y_0$  también deben determinarse ahora experimentalmente, y se ven afectados por la misma incertidumbre típica relativa que  $\mu_0$  ya que  $c$  es un valor exacto. El producto  $\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$  y el cociente  $Z_0/\mu_0 = c$  se mantienen exactos. En el momento de adoptar la definición actual del amperio,  $\mu_0$  era igual a  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ , con una incertidumbre típica relativa de  $2,3 \times 10^{-10}$ .

### El kelvin

**El kelvin, símbolo K, es la unidad SI de temperatura termodinámica. Se define al fijar el valor numérico de la constante de Boltzmann,  $k$ , en  $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ , cuando se expresa en la unidad  $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ , igual a  $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de  $h$ ,  $c$  y  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$**

Esta definición implica la relación exacta  $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Invertiendo esta relación se obtiene la expresión exacta para el kelvin en función de las constantes  $k$ ,  $h$  y  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

$$1 \text{ K} = \left( \frac{1,380\ 649}{k} \right) \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

lo que es igual a

$$1 \text{ K} = \frac{1,380\ 649 \times 10^{-23}}{(6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}) (9\ 192\ 631\ 770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{\text{Cs}} \frac{\Delta\nu h}{k}$$

Resultado de esta definición es que un kelvin es igual a la variación de temperatura termodinámica que da lugar a una variación de energía térmica  $kT$  de  $1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J}$ .

La definición anterior del kelvin estableció la temperatura del punto triple del agua,  $T_{\text{TPW}}$ , como exactamente igual a 273,16 K. Dado que la definición actual del kelvin fija el valor numérico de  $k$  en lugar de  $T_{\text{TPW}}$ , esta última debe determinarse ahora experimentalmente. En el momento de adoptar la presente definición,  $T_{\text{TPW}}$  era igual a 273,16 K con una incertidumbre típica relativa de  $3,7 \times 10^{-7}$  basada en las mediciones de  $k$  realizadas antes de la redefinición.

Como resultado de la forma en que se definían las escalas de temperatura, sigue siendo una práctica común expresar una temperatura termodinámica, símbolo  $T$ , en función de su diferencia con la temperatura de referencia  $T_0 = 273,15 \text{ K}$ , cerca del punto del hielo.

Esta diferencia se denomina temperatura Celsius, símbolo  $t$ , definida mediante la ecuación

$$t = T - T_0.$$

La unidad de temperatura Celsius es el grado Celsius, símbolo  $^{\circ}\text{C}$ , que es por definición igual en magnitud a la unidad kelvin. Una diferencia o intervalo de temperatura puede expresarse en kelvin o en grados Celsius, siendo el valor numérico de la diferencia de temperatura el mismo en ambos casos. Sin embargo, el valor numérico de una temperatura Celsius expresada en grados Celsius está relacionado con el valor numérico de la temperatura termodinámica expresada en kelvin por la relación

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$$

(Véase 5.4.1 para una explicación de la notación utilizada aquí).

El kelvin y el grado Celsius también son unidades de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90) adoptada por el CIPM en 1989 en la Recomendación 5 (CI-1989, PV, 57, 115). Obsérvese que la ITS-90 define dos magnitudes  $T_{90}$  y  $t_{90}$  que son aproximaciones cercanas a las temperaturas termodinámicas correspondientes  $T$  y  $t$ .

Obsérvese también que con la definición actual, las realizaciones primarias del kelvin pueden, en principio, establecerse en cualquier punto de la escala de temperatura.

## El mol

**El mol, símbolo mol, es la unidad SI de cantidad de sustancia. Un mol contiene exactamente  $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$  entidades elementales. Esta cifra es el valor numérico fijo de la constante de Avogadro,  $N_A$ , cuando se expresa en la unidad  $\text{mol}^{-1}$ , y se denomina número de Avogadro.**

**La cantidad de sustancia, símbolo  $n$ , de un sistema, es una medida del número de entidades elementales especificadas. Una entidad elemental puede ser un átomo, una molécula, un ión, un electrón, o cualquier otra partícula o grupo especificado de partículas.**

Esta definición implica la relación exacta  $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . Invertiendo esta relación se obtiene la expresión exacta para el mol en función de la constante  $N_A$ :

$$1 \text{ mol} = \left( \frac{6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}}{N_A} \right)$$

Resultado de esta definición es que el mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene  $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$  entidades elementales especificadas.

La definición anterior del mol fijaba el valor de la masa molar del carbono 12,  $M(^{12}\text{C})$ , como exactamente igual a  $0,012 \text{ kg/mol}$ . De acuerdo con la presente definición,  $M(^{12}\text{C})$  ya no es un valor exacto y debe determinarse experimentalmente. El valor elegido para  $N_A$  es tal que en el momento de adoptar la definición actual del mol,  $M(^{12}\text{C})$  era igual a  $0,012 \text{ kg/mol}$  con una incertidumbre típica relativa de  $4,5 \times 10^{-10}$ .

La masa molar de cualquier átomo o molécula  $X$  aún puede obtenerse a partir de su masa atómica utilizando la ecuación

$$M(X) = A_r(X) [M(^{12}\text{C})/12] = A_r(X) M_u$$

y la masa molar de cualquier átomo o molécula  $X$  también está relacionada con la masa de la entidad elemental  $m(X)$  por la relación

$$M(X) = N_A m(X) = N_A A_r(X) m_u$$

En estas ecuaciones,  $M_u$  es la constante de masa molar, igual a  $M(^{12}\text{C})/12$  y  $m_u$  es la constante de masa atómica unificada, igual a  $m(^{12}\text{C})/12$ . Ambas están relacionadas con la constante de Avogadro a través de la relación.

$$M_u = N_A m_u$$

En el nombre "cantidad de sustancia", la palabra "sustancia" normalmente se reemplazará por el nombre de la sustancia en cuestión, en la aplicación particular de que se trate; por ejemplo, "cantidad de cloruro de hidrógeno, HCl" o "cantidad de benceno, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>". Es importante definir con exactitud la entidad involucrada (como se enfatiza en la definición del mol), preferiblemente especificando la fórmula química molecular del material involucrado. Aunque la palabra "cantidad" tiene una definición más general en el diccionario, en aras de la brevedad, suele emplearse la denominación "cantidad" en lugar del nombre completo "cantidad de sustancia". Esto es aplicable también a las magnitudes derivadas, como la "concentración de cantidad de sustancia", que puede denominarse simplemente "concentración". En el campo de la química clínica, el nombre "concentración de cantidad de sustancia" generalmente se abrevia como "concentración de sustancia".

### La candela

**La candela, símbolo cd, es la unidad SI de intensidad luminosa en una dirección dada. Se define al fijar el valor numérico de la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , en 683, cuando se expresa en la unidad  $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ , igual a  $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ , o a  $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$ , donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de  $h$ ,  $c$  y  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$**

Esta definición implica la relación exacta  $K_{\text{cd}} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$  para la radiación monocromática de frecuencia  $\nu = 540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ . Invertiendo esta relación se obtiene la expresión exacta para la candela en función de las constantes  $K_{\text{cd}}$ ,  $h$  y  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

$$1 \text{ cd} = \frac{K_{\text{cd}}}{683} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$$

lo que es igual a

1

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34}) (9\,192\,631\,770)^2 683} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}}$$

$$\approx 2,614\,830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}}$$

Resultado de esta definición es que una candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$  y tiene una intensidad radiante en esa dirección de  $(1/683) \text{ W/sr}$ . La definición del estereorradián se encuentra más adelante, en la Tabla 4.



### 2.3.2 Realización práctica de las unidades SI

Los métodos experimentales de más alto nivel empleados para la realización de las unidades utilizando las ecuaciones de la física se conocen como métodos primarios. La característica esencial de un método primario es que permite medir una magnitud, en una unidad particular, utilizando solo mediciones de magnitudes en las que no interviene esa unidad. En la presente formulación del SI, la base de las definiciones es diferente de la utilizada anteriormente, por lo que pueden utilizarse nuevos métodos para la realización práctica de las unidades SI.

En lugar de que cada definición especifique una condición o estado físico particular, que establece un límite fundamental a la exactitud de la realización, ahora el usuario es libre de elegir cualquier ecuación conveniente de la física, que vincule las constantes definitorias con la magnitud que pretende medir. Esta es una forma mucho más general de definir las unidades básicas de medida, no limitada por la ciencia o la tecnología actuales, de forma que futuros desarrollos pueden conducir a diferentes formas de realizar las unidades con una mayor exactitud. Definidas de esta manera, no hay, en principio, ningún límite a la exactitud con la que se puede realizar una unidad. La excepción sigue siendo la definición del segundo, en la cual se mantiene, de momento, la transición de microondas original del cesio, como base de la definición. Para una explicación más completa sobre la realización de las unidades SI, consúltese el Anexo 2.

### 2.3.3 Dimensiones de las magnitudes

Las magnitudes físicas pueden organizarse según un sistema de dimensiones, decidido por convención. Se considera que cada una de las siete magnitudes básicas utilizadas en el SI tiene su propia dimensión. Los símbolos utilizados para las magnitudes básicas y los utilizados para denotar sus dimensiones se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3. Magnitudes y dimensiones básicas utilizadas en el SI**

Magnitud básica	Símbolo para la magnitud	Símbolo para la dimensión
tiempo	$t$	T
longitud	$l, x, r, \text{etc.}$	L
masa	$m$	M
corriente eléctrica	$I, i$	I
temperatura termodinámica	$T$	$\Theta$
cantidad de sustancia	$n$	N
intensidad luminosa	$I_v$	J

Todas las demás magnitudes, con la excepción de las de conteo, son magnitudes derivadas, que pueden escribirse en función de las magnitudes básicas de acuerdo con las ecuaciones de la física. Las dimensiones de las magnitudes derivadas se escriben como productos de potencias de las dimensiones de las magnitudes básicas utilizando las ecuaciones que relacionan las magnitudes derivadas con las magnitudes básicas. En

general, la dimensión de cualquier magnitud  $Q$  se escribe en forma de producto dimensional,

$$\dim Q = T^\alpha L^\beta M^\gamma I^\delta \Theta^\varepsilon N^\zeta J^\eta$$

donde los exponentes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\zeta$  y  $\eta$ , generalmente enteros pequeños, positivos, negativos o nulos, se denominan exponentes dimensionales.

Hay magnitudes  $Q$  para las cuales la ecuación que las define es tal que todos los exponentes dimensionales en la ecuación de la dimensión de  $Q$  son cero. Esto es cierto en particular para cualquier magnitud definida como relación entre dos magnitudes del mismo tipo. Por ejemplo, el índice de refracción es la relación entre dos velocidades y la permitividad relativa es la relación entre la permitividad de un medio dieléctrico y la del espacio libre. Tales magnitudes son simplemente números. La unidad asociada es la unidad uno, símbolo 1, aunque rara vez se escribe explícitamente (véase 5.4.7).

También hay algunas magnitudes que no pueden describirse en función de las siete magnitudes básicas del SI, ya que tienen naturaleza de cuenta. Algunos ejemplos son el número de moléculas, el número de entidades celulares o biomoleculares (por ejemplo, copias de una secuencia particular de ácido nucleico), o la degeneración en mecánica cuántica. Las magnitudes de conteo también son magnitudes con la unidad asociada uno.

La unidad uno es el elemento neutro de cualquier sistema de unidades – necesario y presente de forma automática. No existe ninguna exigencia para introducirlo mediante decisión formal. Por lo tanto, puede establecerse la trazabilidad formal al SI mediante procedimientos de medición apropiados y validados.

Los ángulos planos y sólidos, cuando se expresan en radianes y estereorradianes respectivamente, también son tratados dentro del SI como magnitudes con la unidad uno (véase sección 5.4.8). Los símbolos rad y sr se escriben explícitamente cuando resulta apropiado, para enfatizar que, en radianes o en estereorradianes, la magnitud considerada es, o implica, un ángulo plano o un ángulo sólido, respectivamente. En el caso de los estereorradianes se enfatiza, por ejemplo, la distinción entre las unidades de flujo y de intensidad en radiometría y fotometría. Sin embargo, es una práctica establecida desde hace mucho tiempo en matemáticas y en todas las áreas de la ciencia utilizar rad = 1 y sr = 1. Por razones históricas, el radián y el estereorradián se tratan como unidades derivadas, tal como se describe en la sección 2.3.4.

Es especialmente importante describir claramente cualquier magnitud con unidad uno (véase la sección 5.4.7) que se exprese como relación entre magnitudes del mismo tipo (por ejemplo, relaciones entre longitudes o fracciones de cantidades) o como conteos (por ejemplo, número de fotones o de desintegraciones).

### 2.3.4 Unidades derivadas

Las unidades derivadas se definen como productos de potencias de las unidades básicas. Cuando el factor numérico de este producto es uno, las unidades derivadas se llaman *unidades derivadas coherentes*. Las unidades básicas y las unidades derivadas coherentes del SI forman un conjunto coherente denominado *conjunto de unidades SI coherentes*. La palabra “coherente” significa aquí que las ecuaciones entre los valores

numéricos de las magnitudes toman exactamente la misma forma que las ecuaciones entre las magnitudes propiamente dichas.

Algunas de las unidades derivadas coherentes en el SI reciben nombres especiales. La tabla 4 enumera 22 unidades SI con nombres especiales. Junto con las siete unidades básicas (Tabla 2) forman el núcleo del conjunto de unidades SI. Todas las demás unidades SI son combinaciones de algunas de estas 29 unidades.

Es importante tener en cuenta que cualquiera de las siete unidades básicas y las 22 unidades SI con nombres especiales puede construirse directamente a partir de las siete constantes definitorias del SI. De hecho, las unidades de las siete constantes definitorias incluyen tanto unidades básicas como derivadas.

La CGPM ha adoptado una serie de prefijos para usarlos en la formación de los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI coherentes (véase capítulo 3). Su utilización es conveniente para expresar los valores de magnitudes que son mucho más grandes o mucho más pequeñas que la unidad coherente. Sin embargo, cuando se usan prefijos con las unidades SI, las unidades resultantes ya no son coherentes, porque el prefijo introduce un factor numérico distinto de uno. Los prefijos pueden utilizarse con cualquiera de las 29 unidades (7 básicas y 22 derivadas con nombres especiales) que constituyen el núcleo del conjunto de unidades SI, con la excepción de la unidad básica kilogramo, tal como se explica con más detalle en el capítulo 3.

**Tabla 4. Las 22 unidades SI con nombres y símbolos especiales**

Magnitud derivada	Nombre especial de la unidad	Unidad expresada en unidades básicas <sup>(a)</sup>	Unidad expresada en otras unidades SI
ángulo plano	radián <sup>(b)</sup>	rad = m/m	
ángulo sólido	estereorradián <sup>(c)</sup>	sr = m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup>	
frecuencia	hercio <sup>(d)</sup>	Hz = s <sup>-1</sup>	
fuerza	newton	N = kg m s <sup>-2</sup>	
presión, tensión	pascal	Pa = kg m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>	
energía, trabajo, cantidad de calor	julio	J = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	N m
potencia, flujo radiante	vatio	W = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	J/s
carga eléctrica	culombio	C = A s	
diferencia de potencial eléctrico <sup>(e)</sup>	voltio	V = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>	W/A
capacidad eléctrica	faradio	F = kg <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>	C/V
resistencia eléctrica	ohmio	Ω = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>	V/A
conductancia eléctrica	siemens	S = kg <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>	A/V
flujo magnético	weber	Wb = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>	V s
densidad de flujo magnético	tesla	T = kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>	Wb/m <sup>2</sup>
inductancia	henrio	H = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>	Wb/A
temperatura Celsius	grado Celsius <sup>(f)</sup>	°C = K	
flujo luminoso	lumen	lm = cd sr <sup>(g)</sup>	cd sr
iluminancia	lux	lx = cd sr m <sup>-2</sup>	lm/m <sup>2</sup>
actividad referida a un radionucleido <sup>(d, h)</sup>	becquerel	Bq = s <sup>-1</sup>	
dosis absorbida, kerma	gray	Gy = m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	J/kg
dosis equivalente	sievert <sup>(i)</sup>	Sv = m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	J/kg

- (a) El orden de los símbolos de las unidades básicas en esta Tabla es diferente al de la 8ª edición, tras la decisión del CCU en su 21ª reunión (2013) de volver al orden original de la Resolución 12 de la 11ª CGPM (1960) en la que el newton se escribía  $\text{kg m s}^{-2}$ , el julio como  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$  y J s como  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . La intención era reflejar la física subyacente bajo las ecuaciones de las magnitudes correspondientes, aunque para algunas unidades derivadas más complejas esto puede no ser posible.
  - (b) El radián es la unidad coherente para el ángulo plano. Un radián es el ángulo subtendido en el centro de un círculo por un arco que tiene la misma longitud que el radio. También es la unidad para el ángulo de fase. Para fenómenos periódicos, el ángulo de fase aumenta en  $2\pi$  rad en un período. El radián era anteriormente una unidad suplementaria del SI, pero esta categoría fue suprimida en 1995.
  - (c) El estereorradián es la unidad coherente para el ángulo sólido. Un estereorradián es el ángulo sólido subtendido en el centro de una esfera por un área de la superficie igual al cuadrado del radio. Al igual que el radián, el estereorradián era anteriormente una unidad suplementaria del SI.
  - (d) El hercio solo se utilizará para fenómenos periódicos y el becquerel solo para procesos estocásticos de actividad referida a un radionucleido.
  - (e) La diferencia de potencial eléctrico también se denomina "voltaje" en muchos países, así como "tensión eléctrica" o simplemente "tensión" en otros.
  - (f) El grado Celsius se utiliza para expresar las temperaturas Celsius. El valor numérico de una diferencia de temperatura o intervalo de temperatura es el mismo expresado en grados Celsius o en kelvin.
  - (g) En fotometría, se mantienen habitualmente el nombre estereorradián y el símbolo sr en las expresiones de las unidades.
  - (h) Actividad referida a un radionucleido, a veces incorrectamente denominada radiactividad.
  - (i) Véase la Recomendación 2 del CIPM sobre el uso del sievert (PV, 2002, **70**, 205).
- 

Las siete unidades básicas y las 22 unidades con nombres y símbolos especiales se pueden usar combinadamente para expresar las unidades de otras magnitudes derivadas. Dado que el número de magnitudes no tiene límite, no es posible proporcionar una lista completa de magnitudes y unidades derivadas. La Tabla 5 muestra algunos ejemplos de magnitudes derivadas y las correspondientes unidades derivadas coherentes expresadas en función de las unidades básicas. También la Tabla 6 muestra ejemplos de unidades derivadas coherentes cuyos nombres y símbolos también incluyen unidades derivadas. El conjunto completo de unidades SI incluye tanto el conjunto coherente como los múltiplos y submúltiplos formados utilizando los prefijos SI.

**Tabla 5. Ejemplos de unidades derivadas coherentes del SI, expresadas en función de las unidades básicas**

Magnitud derivada	Símbolo típico de la magnitud	Unidad derivada expresada en unidades básicas
área	$A$	$m^2$
volumen	$V$	$m^3$
velocidad	$v$	$m s^{-1}$
aceleración	$a$	$m s^{-2}$
número de ondas	$\sigma$	$m^{-1}$
densidad, densidad másica	$\rho$	$kg m^{-3}$
densidad superficial	$\rho_A$	$kg m^{-2}$
volumen específico	$v$	$m^3 kg^{-1}$
densidad de corriente	$j$	$A m^{-2}$
intensidad de campo magnético	$H$	$A m^{-1}$
concentración de cantidad de sustancia	$c$	$mol m^{-3}$
concentración másica	$\rho, \gamma$	$kg m^{-3}$
luminancia	$L_v$	$cd m^{-2}$

**Tabla 6. Ejemplos de unidades derivadas coherentes SI cuyos nombres y símbolos incluyen unidades derivadas coherentes SI con nombres y símbolos especiales**

Magnitud derivada	Nombre de la unidad derivada coherente	Símbolo	Unidad derivada expresada en función de unidades básicas
viscosidad dinámica	pascal segundo	Pa s	$kg m^{-1} s^{-1}$
momento de una fuerza	newton metro	N m	$kg m^2 s^{-2}$
tensión superficial	newton por metro	N m <sup>-1</sup>	$kg s^{-2}$
velocidad angular, frecuencia angular	radian por segundo	rad s <sup>-1</sup>	$s^{-1}$
aceleración angular	radian por segundo al cuadrado	rad/s <sup>2</sup>	$s^{-2}$
densidad de flujo de calor, irradiancia	vatio por metro cuadrado	W/m <sup>2</sup>	$kg s^{-3}$
capacidad calorífica, entropía	julio por kelvin	J K <sup>-1</sup>	$kg m^2 s^{-2} K^{-1}$
capacidad calorífica específica, entropía específica	julio por kilogramo y kelvin	J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
energía específica	julio por kilogramo	J kg <sup>-1</sup>	$m^2 s^{-2}$
conductividad térmica	vatio por metro y kelvin	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	$kg m s^{-3} K^{-1}$
densidad de energía	julio por metro cúbico	J m <sup>-3</sup>	$kg m^{-1} s^{-2}$
intensidad de campo eléctrico	voltio por metro	V m <sup>-1</sup>	$kg m s^{-3} A^{-1}$
densidad de carga eléctrica	culombio por metro cúbico	C m <sup>-3</sup>	$A s m^{-3}$
densidad de carga	culombio por metro cuadrado	C m <sup>-2</sup>	$A s m^{-2}$



densidad de flujo eléctrico, desplazamiento eléctrico	culombio por metro cuadrado	$C m^{-2}$	$A s m^{-2}$
permitividad	faradio por metro	$F m^{-1}$	$kg^{-1} m^{-3} s^4 A^2$
permeabilidad	henrio por metro	$H m^{-1}$	$kg m s^{-2} A^{-2}$
energía molar	julio por mol	$J mol^{-1}$	$kg m^2 s^{-2} mol^{-1}$
entropía molar, capacidad calorífica molar	julio por mol y kelvin	$J K^{-1} mol^{-1}$	$kg m^2 s^{-2} mol^{-1} K^{-1}$
exposición (rayos x- y $\gamma$ )	culombio por kilogramo	$C kg^{-1}$	$A s kg^{-1}$
tasa de dosis absorbida	gray por segundo	$Gy s^{-1}$	$m^2 s^{-3}$
intensidad radiante	vatio por estereorradián	$W sr^{-1}$	$kg m^2 s^{-3}$
radiancia	vatio por metro cuadrado y estereorradián	$W sr^{-1} m^{-2}$	$kg s^{-3}$
concentración de actividad catalítica	katal por metro cúbico	$kat m^{-3}$	$mol s^{-1} m^{-3}$

Es importante enfatizar que cada magnitud física tiene solo una unidad SI coherente, aunque esta unidad se puede expresar en diferentes formas usando algunos de los nombres y símbolos especiales.

Sin embargo, lo contrario no es cierto, porque en general varias magnitudes diferentes pueden compartir la misma unidad SI. Por ejemplo, para la magnitud capacidad calorífica así como para la magnitud entropía, la unidad SI es el julio por kelvin. De manera similar, para la magnitud básica corriente eléctrica y para la magnitud derivada fuerza magnetomotriz, la unidad SI es el amperio. Por ello, es importante no usar solo la unidad para especificar la magnitud. Esto es aplicable no solo a los textos técnicos, sino también, por ejemplo, a los instrumentos de medida (es decir, la lectura del instrumento debe indicar tanto la unidad como la magnitud medida).

En la práctica, en ciertas magnitudes, se prefiere el uso de ciertos nombres de unidades especiales para facilitar la distinción entre diferentes magnitudes que tienen la misma dimensión. Usando esta libertad, uno puede recordar el proceso mediante el cual se define la magnitud. Por ejemplo, la magnitud par de torsión es el producto de un vector distancia por un vector fuerza, siendo su unidad el newton metro. Aunque el par de torsión tiene la misma dimensión que la energía (unidad SI julio), el julio no se utiliza nunca para expresar un par de torsión.

La unidad SI de frecuencia es el hercio, la unidad SI de velocidad angular y de frecuencia angular es el radián por segundo, y la unidad SI de actividad es el becquerel, lo que implica cuentas por segundo. Aunque es formalmente correcto escribir las tres unidades como la inversa del segundo, el uso de los diferentes nombres realza la diferente naturaleza de estas distintas magnitudes. Es especialmente importante distinguir cuidadosamente las frecuencias de las frecuencias angulares porque, por definición, sus valores numéricos difieren en un factor<sup>1</sup>  $2\pi$ . Ignorar este hecho puede causar un error de  $2\pi$ . Obsérvese que en algunos países, los valores de frecuencia se expresan de manera convencional mediante "ciclo/s" o "cps" en lugar de con la unidad SI Hz, aunque "ciclo" y "cps" no son unidades del SI. Obsérvese también que es común, aunque no se recomienda, usar el término frecuencia para magnitudes expresadas en rad/s. Debido a esto, se recomienda que las magnitudes denominadas "frecuencia",

La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) ha introducido el var (símbolo: var) como un nombre especial para la unidad de potencia reactiva. En términos de unidades coherentes SI, el var es idéntico al voltio amperio.

<sup>1</sup> Véase la norma ISO 80000 para mayor detalle

“frecuencia angular” y “velocidad angular”, se expresen siempre en unidades explícitas, Hz o rad/s, y no en  $s^{-1}$ .

En el campo de las radiaciones ionizantes, se utiliza la unidad SI becquerel en lugar de la inversa del segundo. Las unidades SI gray y sievert se utilizan para dosis absorbida y dosis equivalente, respectivamente, en lugar del julio por kilogramo. Los nombres especiales becquerel, gray y sievert se introdujeron específicamente debido a los peligros que podrían surgir para la salud humana por errores que involucraran a las unidades inversa del segundo y julio por kilogramo, en caso de que estas últimas se tomaran incorrectamente para identificar las diferentes magnitudes involucradas.

Debe tenerse especial cuidado al expresar temperaturas o diferencias de temperatura, respectivamente. Una diferencia de temperatura de 1 K es igual a una diferencia de temperatura de 1 °C, pero para el caso de una temperatura absoluta debe tenerse en cuenta la diferencia de 273,15 K. La unidad grado Celsius solo es coherente cuando se expresan diferencias de temperatura.

### 2.3.5 Unidades para magnitudes que describen efectos biológicos y fisiológicos

Cuatro de las unidades del SI enumeradas en las tablas 2 y 4 incluyen factores de ponderación fisiológicos: candela, lumen, lux y sievert.

El lumen y el lux derivan de la unidad básica candela. Como la candela, contienen información sobre la visión humana. La candela se estableció como unidad básica en 1954, reconociendo la importancia de la luz en la vida diaria. En el Anexo 3 se ofrece más información sobre las unidades y convenciones utilizadas para definir las magnitudes fotoquímicas y fotobiológicas.

La radiación ionizante aporta energía sobre la materia irradiada. La relación entre la energía depositada y la masa se denomina dosis absorbida  $D$ . Según lo decidido por el CIPM en 2002, la magnitud dosis equivalente  $H = Q D$  es el producto de la dosis absorbida  $D$  por un factor de calidad numérico  $Q$  que tiene en cuenta la eficacia biológica de la radiación y que depende de la energía y el tipo de radiación.

Hay unidades para magnitudes que describen los efectos biológicos e incluyen factores de ponderación, que no son unidades SI. Aquí se dan dos ejemplos:

El sonido causa fluctuaciones de presión en el aire, superpuestas a la presión atmosférica normal, que son detectadas por el oído humano. La sensibilidad del oído depende de la frecuencia del sonido, pero no es una simple función de los cambios de presión o de la frecuencia. Por ello, en acústica se utilizan magnitudes ponderadas en frecuencia, para aproximarnos a la forma en que se percibe el sonido. Se utilizan, por ejemplo, para mediciones relacionadas con la protección contra el daño auditivo. El efecto de las ondas acústicas ultrasónicas plantea preocupaciones similares en diagnósticos y terapias médicas.

Existe una clase de unidades para cuantificar la actividad biológica de ciertas sustancias utilizadas en diagnósticos y terapias médicas, que aún no puede definirse mediante unidades SI. Esta falta de definición se debe a que el mecanismo del efecto biológico específico de estas sustancias aún no se comprende lo suficientemente bien como para que sea cuantificable mediante parámetros físico-químicos. En vista de su importancia



para la salud y la seguridad humanas, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha asumido la responsabilidad de definir Unidades Internacionales OMS (UI) para la actividad biológica de dichas sustancias.

### **2.3.6 Las unidades SI en el marco de la teoría general de la relatividad**

La realización práctica de una unidad y el proceso de comparación requieren un conjunto de ecuaciones dentro de un marco de descripción teórica. En algunos casos, estas ecuaciones incluyen efectos relativistas.

Para patrones de frecuencia es posible establecer comparaciones a distancia mediante señales electromagnéticas. Para interpretar los resultados, se requiere la teoría general de la relatividad, ya que predice, entre otras cosas, un cambio de frecuencia relativa entre patrones de aproximadamente 1 parte en  $10^{16}$  por metro de diferencia de altitud sobre la superficie terrestre. Estos efectos deben corregirse cuando se comparan entre sí los mejores patrones de frecuencia.

Cuando las realizaciones prácticas se comparan localmente, es decir, en un pequeño dominio espacio-temporal, los efectos debidos a la curvatura espacio-tiempo descrita por la teoría general de la relatividad pueden ignorarse. Cuando las realizaciones comparten las mismas coordenadas espacio-temporales (por ejemplo, el mismo movimiento y aceleración o campo gravitatorio), los efectos relativistas pueden ignorarse por completo.

### 3 Múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI

Para su uso con las unidades SI se proporcionan múltiplos y submúltiplos decimales que van desde  $10^{24}$  a  $10^{-24}$ . Los nombres y símbolos de los prefijos de estos múltiplos y submúltiplos se presentan en la Tabla 7.

Los símbolos de los prefijos se escriben con tipo de letra recta, igual que los símbolos de las unidades, independientemente del tipo de letra utilizado en el texto circundante y se unen a los símbolos de las unidades, sin espacio alguno entre el símbolo del prefijo y el símbolo de la unidad. Con la excepción de da (deca), h (hecto) y k (kilo), todos los símbolos de los prefijos de los múltiplos son letras mayúsculas y todos los símbolos de los prefijos de los submúltiplos son letras minúsculas. Todos los nombres de los prefijos se escriben en letras minúsculas, excepto al principio de una frase.

Los prefijos SI se refieren estrictamente a potencias de 10. No deben usarse para indicar potencias de 2 (por ejemplo, un kilobit representa 1000 bits y no 1024 bits). Como nombres y símbolos de prefijos a utilizar con potencias de 2 se recomiendan los siguientes:

kibi	Ki	$2^{10}$
mebi	Mi	$2^{20}$
gibi	Gi	$2^{30}$
tebi	Ti	$2^{40}$
pebi	Pi	$2^{50}$
exbi	Ei	$2^{60}$
zebi	Zi	$2^{70}$
yobi	Yi	$2^{80}$

**Tabla 7. Prefijos SI**

Factor	Nombre	Símbolo	Factor	Nombre	Símbolo
$10^1$	deca	da	$10^{-1}$	deci	d
$10^2$	hecto	h	$10^{-2}$	centi	c
$10^3$	kilo	k	$10^{-3}$	milli	m
$10^6$	mega	M	$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^9$	giga	G	$10^{-9}$	nano	n
$10^{12}$	tera	T	$10^{-12}$	pico	p
$10^{15}$	peta	P	$10^{-15}$	femto	f
$10^{18}$	exa	E	$10^{-18}$	atto	a
$10^{21}$	zetta	Z	$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y	$10^{-24}$	yocto	y

El conjunto formado por un símbolo de prefijo y un símbolo de unidad constituye un nuevo símbolo de unidad inseparable (formando un múltiplo o un submúltiplo de la unidad en cuestión) que puede elevarse a una potencia positiva o negativa y que puede combinarse con otros símbolos de unidades para formar símbolos de unidades compuestas.

*Ejemplos:* pm (picómetro), mmol (milimol),  $G\Omega$  (gigaohmio), THz (terahercio)  
 $2,3 \text{ cm}^3 = 2,3 (\text{cm})^3 = 2,3 (10^{-2} \text{ m})^3 = 2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$   
 $1 \text{ cm}^{-1} = 1 (\text{cm})^{-1} = 1 (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1} = 100 \text{ m}^{-1}$

Del mismo modo, los nombres de los prefijos son inseparables de los nombres de las unidades a las que se unen. Así, por ejemplo, milímetro, micropascal y meganewton son palabras únicas.

Los símbolos de prefijos compuestos; es decir, los símbolos de prefijos formados por yuxtaposición de dos o más símbolos de prefijos, no están permitidos. Esta regla se aplica también a dos o más nombres de prefijos compuestos.

Los símbolos de los prefijos no pueden utilizarse solos o unidos al número 1, símbolo de la unidad uno. Igualmente, los nombres de los prefijos no pueden unirse al nombre de la unidad uno, es decir a la palabra “uno”.

El kilogramo es la única unidad SI coherente cuyo nombre y símbolo, por razones históricas, contiene un prefijo. Los nombres y los símbolos de los múltiplos y submúltiplos decimales de la unidad de masa se forman añadiendo los nombres y símbolos de los prefijos al nombre de unidad “gramo” y al símbolo de unidad “g”, respectivamente. Por ejemplo,  $10^{-6}$  kg se escribe miligramo, mg, no microkilogramo,  $\mu\text{kg}$ .

## 4 Unidades no pertenecientes al SI pero aceptadas para su uso con él

El SI es la referencia internacionalmente acordada a partir de la cual se definen todas las demás unidades. Las unidades SI coherentes tienen la importante ventaja de que no se requiere la conversión de unidades al introducir valores particulares de magnitudes en las ecuaciones de magnitudes.

No obstante, se reconoce que algunas unidades no SI son ampliamente utilizadas y es de esperar que continúen usándose durante muchos años. Por ello, el CIPM ha aceptado algunas unidades no SI para su utilización con el SI; estas se presentan en la Tabla 8. Si se utilizan estas unidades, debe comprenderse que se pierden algunas ventajas del SI. Los prefijos SI pueden usarse con varias de estas unidades, pero no, por ejemplo, con las unidades no SI de tiempo.

**Tabla 8. Unidades no SI aceptadas para su uso con las unidades SI**

Magnitud	Nombre de la unidad	Símbolo de la unidad	Valor en unidades SI	El gal (símbolo Gal) es una
tiempo	minuto	min	1 min = 60 s	unidad no SI para la aceleración, empleada en geodesia y geofísica, para expresar la aceleración debida a la gravedad 1 Gal = 1 cm s <sup>-2</sup> = 10 <sup>-2</sup> m s <sup>-2</sup>
	hora	h	1 h = 60 min = 3600 s	
	día	d	1 d = 24 h = 86 400 s	
longitud	unidad astronómica <sup>(a)</sup>	au	1 au = 149 597 870 700 m	
ángulo plano y	grado	°	1° = (π/180) rad	
ángulo de fase	minuto	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad	
	segundo <sup>(b)</sup>	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) rad	
área	hectárea <sup>(c)</sup>	ha	1 ha = 1 hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	
volumen	litro <sup>(d)</sup>	l, L	1 l = 1 L = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>	
masa	tonelada <sup>(e)</sup>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg	
	dalton <sup>(f)</sup>	Da	1 Da = 1,660 539 066 60 (50) × 10 <sup>-27</sup> kg	
energía	electronvoltio <sup>(g)</sup>	eV	1 eV = 1,602 176 634 × 10 <sup>-19</sup> J	
relaciones	neper <sup>(h)</sup>	Np	véase texto	
logarítmicas	belio <sup>(h)</sup>	B		
	decibelio <sup>(h)</sup>	dB		

(a) Tal como se decidió en la XXVIII Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional (Resolución B2, 2012).

(b) Para algunas aplicaciones, p. ej. en astronomía, los ángulos pequeños se miden en segundos de arco (as, del inglés arcsecond, segundos de ángulo plano), o ", milisegundos de arco (mas), microsegundos de arco (μas) y picosegundos de arco (pas), donde el segundo de arco es un nombre alternativo para el segundo de ángulo plano.

(c) La unidad hectárea y su símbolo ha, fueron adoptados por el CIPM en 1879 (PV, 1879, 41). La hectárea se utiliza para expresar el área de terrenos.

(d) El litro y el símbolo en minúscula l, fueron adoptados por el CIPM en 1879 (PV, 1879, 41). El símbolo

alternativo, L mayúscula, fue adoptado por la 16ª CGPM (1979, Resolución 6; CR, 101 y *Metrologia*, 1980, 16, 56-57) para evitar el riesgo de confusión entre la letra l (ele) y el numeral 1 (uno).

- (e) La tonelada y su símbolo t, fueron adoptados por el CIPM en 1879 (PV, 1879, 41). Esta unidad a veces se denomina "tonelada métrica" en algunos países.
- (f) El dalton (Da) y la unidad de masa atómica unificada (u) son nombres (y símbolos) alternativos para la misma unidad, igual a 1/12 de la masa de un átomo de carbono 12 libre, en reposo y en su estado fundamental. Este valor del dalton es el recomendado en el ajuste CODATA 2018.
- (g) El electronvoltio es la energía cinética adquirida por un electrón al pasar a través de una diferencia de potencial de un voltio en el vacío. El electronvoltio se combina a menudo con los prefijos SI.
- (h) Al usar estas unidades es importante especificar la naturaleza de la magnitud y el valor de referencia utilizado.

---

La Tabla 8 incluye también las unidades de magnitudes que son relaciones logarítmicas, el neper, el belio y el decibelio. Se utilizan para transmitir información sobre la naturaleza de la magnitud relación logarítmica correspondiente. El neper, Np, se utiliza para expresar los valores de magnitudes cuyos valores numéricos se basan en el uso del logaritmo neperiano (o natural),  $\ln = \log_e$ . El belio y el decibelio, B y dB, donde  $1 \text{ dB} = (1/10) \text{ B}$ , se utilizan para expresar los valores de las magnitudes de relación logarítmica cuyos valores numéricos se basan en el logaritmo decimal,  $\lg = \log_{10}$ . La declaración  $L_X = m \text{ dB} = (m/10) \text{ B}$  (donde  $m$  es un número) significa que  $m = 10 \lg (X/X_0)$ . Las unidades neper, belio y decibelio han sido aceptadas por el CIPM para su uso con el Sistema Internacional, pero no son unidades SI.

Hay muchas más unidades no SI, que bien son de interés histórico, o bien aún se usan en campos específicos (por ejemplo, el barril de petróleo) o en países particulares (pulgada, pie y yarda). El CIPM no ve ninguna razón para continuar usando estas unidades en el trabajo científico y técnico moderno. Sin embargo, es importante conocer la relación entre estas unidades y las unidades SI correspondientes, ya que se mantendrá durante muchos años.

## 5 Reglas de escritura de los nombres y símbolos de las unidades, y expresión de los valores de las magnitudes

### 5.1 Uso de los nombres y símbolos de las unidades

Los principios generales referentes a la escritura de los símbolos de las unidades y de los números fueron propuestos durante la 9ª CGPM (1948, Resolución 7). Posteriormente fueron adoptados por la ISO, la CEI y por otras organizaciones internacionales. Como resultado, existe en la actualidad un consenso general sobre cómo deben expresarse los símbolos y nombres de las unidades, incluyendo los símbolos y nombres de los prefijos, y cómo deben expresarse también los valores de las magnitudes. El respeto de estas reglas y convenciones de estilo, las más importantes de las cuales se presentan en este capítulo, facilita la lectura de los artículos científicos y técnicos.

### 5.2 Símbolos de las unidades

Los símbolos de las unidades se imprimen en caracteres romanos (rectos), independientemente del tipo de letra empleada en el texto adyacente. Se escriben en minúsculas excepto si derivan de un nombre propio, en cuyo caso la primera letra es mayúscula.

Una excepción, adoptada por la 16ª CGPM (1979, Resolución 6), es que se permite el uso de las letras L mayúscula o l minúscula como símbolos del litro, a fin de evitar la confusión entre la cifra 1 (uno) y la letra l (ele).

Un prefijo de múltiplo o submúltiplo, si se usa, forma parte de la unidad y precede al símbolo de la unidad, sin espacio alguno. Un prefijo nunca se usa aislado y tampoco se usan prefijos compuestos.

Los símbolos de las unidades son entidades matemáticas y no abreviaturas. Por ello, no van seguidos de un punto, salvo al final de una frase, ni se usa el plural, ni se pueden mezclar símbolos de unidades con nombres de unidades en una misma expresión, pues los nombres no son entidades matemáticas.

Para formar los productos y cocientes de los símbolos de las unidades, se aplican las reglas habituales de multiplicación o división algebraica. La multiplicación debe indicarse mediante un espacio o un punto centrado a media altura ( $\cdot$ ), para evitar que ciertos prefijos se interpreten erróneamente como un símbolo de unidad. La división se indica mediante una línea horizontal, una barra oblicua ( $/$ ), o mediante exponentes negativos. Cuando se combinan varios símbolos de unidades, hay que tener cuidado para evitar toda ambigüedad, por ejemplo utilizando corchetes o paréntesis, o exponentes negativos. En una expresión sin paréntesis, no debe utilizarse más de una barra oblicua, para evitar ambigüedades.

No se permite emplear abreviaturas para los símbolos y nombres de las unidades, como seg (por s o segundo), mm cuad. (por mm<sup>2</sup> o milímetro cuadrado), cc (por cm<sup>3</sup> o centímetro cúbico) o mps (por m/s o metro por segundo). El uso correcto de los símbolos de las unidades

SI y de las unidades en general, como se ha dicho en los capítulos anteriores de este texto, es obligatorio. De esta forma se evitan ambigüedades y malentendidos respecto a los valores de las magnitudes.

## 5.3 Nombres de las unidades

Los nombres de las unidades se imprimen en caracteres romanos (rectos) y se consideran como nombres (sustantivos) comunes. Los nombres de las unidades empiezan por minúscula (incluso cuando el símbolo de la unidad comience por mayúscula), salvo que estén situados al comienzo de una frase o en un texto en mayúsculas, como un título. Para cumplir esta regla, la escritura correcta del nombre de la unidad cuyo símbolo es °C es “grado Celsius” (la unidad grado comienza con la letra g minúscula y el atributo Celsius comienza con la letra C mayúscula, porque es un nombre propio).

Aunque los valores de las magnitudes se expresan generalmente mediante números y símbolos de unidades, si por cualquier razón resulta más apropiado el nombre de la unidad que su símbolo, debe escribirse el nombre de la unidad completo.

Cuando el nombre de la unidad está combinado con el prefijo de un múltiplo o submúltiplo, no se deja espacio ni se coloca guión entre el nombre del prefijo y el de la unidad. El conjunto formado por el nombre del prefijo y el de la unidad constituye una sola palabra (véase el capítulo 3).

Cuando el nombre de una unidad derivada se forma mediante yuxtaposición de nombres de unidades individuales, conviene dejar un espacio, o utilizar un punto centrado a media altura (·), o un guión, para separar los nombres de las unidades individuales.

## 5.4 Reglas y convenios de estilo para expresar los valores de las magnitudes

### 5.4.1 Valor y valor numérico de una magnitud; cálculo de magnitudes

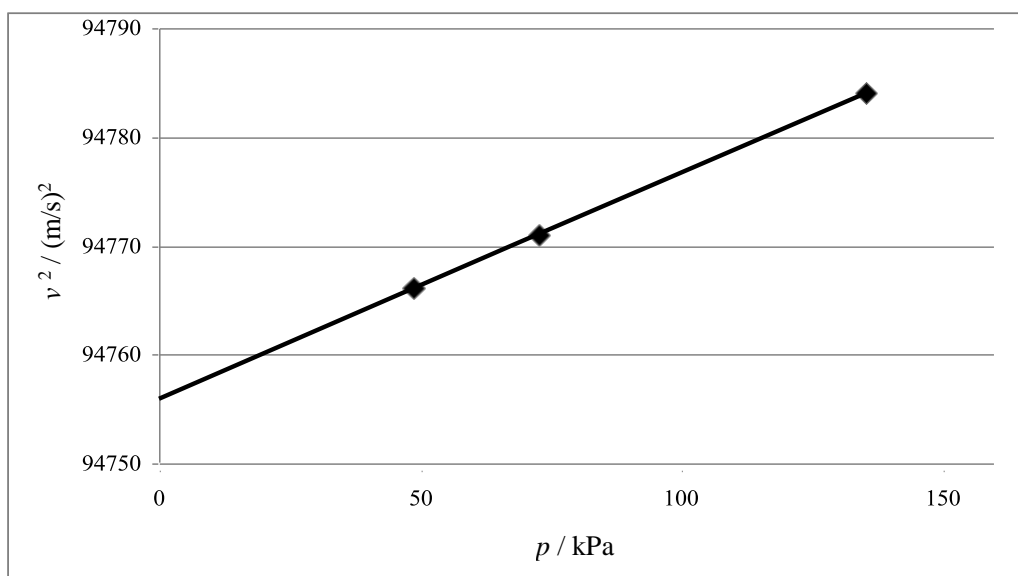
Los símbolos de las magnitudes están formados generalmente por letras individuales en cursiva, pero puede especificarse información adicional mediante subíndices, superíndices o entre paréntesis. Por ejemplo,  $C$  es el símbolo recomendado para la capacidad calorífica,  $C_m$  para la capacidad calorífica molar,  $C_{m,p}$  para la capacidad calorífica molar a presión constante y  $C_{m,v}$  para la capacidad calorífica molar a volumen constante.

Los nombres y símbolos recomendados para las magnitudes se encuentran en numerosas referencias normativas, tales como la serie ISO/IEC 80000 *Magnitudes y Unidades*, el “libro rojo” de IUPAP SUNAMCO, *Símbolos, Unidades y Nomenclatura en Física*, y el “libro verde” de IUPAC, *Magnitudes, Unidades y Símbolos en Química Física*. Sin embargo, los símbolos para las magnitudes son recomendaciones (en contraste con los símbolos para las unidades, donde es obligatorio emplear los símbolos correctos). En circunstancias particulares, los autores pueden preferir usar un símbolo de su elección para una magnitud dada, por ejemplo para evitar un conflicto resultante de utilizar el mismo símbolo para dos magnitudes distintas. En esos casos, hay que precisar claramente el significado del símbolo. Sin embargo, ni el nombre de una magnitud ni el símbolo empleado para expresarla, implican la elección de una unidad en particular.

Los símbolos de las unidades se tratan como entidades matemáticas. Cuando se expresa el valor de una magnitud como producto de un valor numérico por una unidad, tanto el valor numérico como la unidad pueden tratarse conforme a las reglas ordinarias del álgebra. Este procedimiento constituye el cálculo de magnitudes, o álgebra de magnitudes. Por ejemplo, la ecuación  $p = 48 \text{ kPa}$  puede escribirse también como  $p/\text{kPa} = 48$ . Es una práctica común escribir de esta forma el cociente entre una magnitud y una unidad en el encabezamiento de la columna de una tabla, de forma que las entradas de la tabla sean simplemente números. Por ejemplo, una tabla que presente el cuadrado de la velocidad en función de la presión, podría adoptar la siguiente forma:

$p / \text{kPa}$	$v^2 / (\text{m/s})^2$
48,73	94 766
72,87	94 771
135,42	94 784

Los ejes de un gráfico pueden también etiquetarse de este modo, de forma que en las graduaciones aparezcan solo números, como en el siguiente gráfico.



### 5.4.2 Símbolos de magnitudes y símbolos de unidades

Los símbolos de las unidades no deben utilizarse para proporcionar información específica sobre la magnitud y nunca deben ser la única fuente de información sobre la magnitud. Las unidades no deben modificarse nunca con información adicional sobre la naturaleza de la magnitud; cualquier información extra sobre la naturaleza de la magnitud debe acompañar al símbolo de la magnitud, no al símbolo de la unidad.

Por ejemplo:  
 La máxima diferencia de potencial eléctrico es:  
 $U_{\text{máx}} = 1000 \text{ V}$ ,  
 pero no  $U = 1000 \text{ V}_{\text{máx}}$ .  
 La fracción másica de cobre en una muestra de silicio es:  
 $w(\text{Cu}) = 1,3 \times 10^{-6}$   
 pero no  $1,3 \times 10^{-6} \text{ w/w}$ .

### 5.4.3 Escritura del valor de una magnitud

El valor numérico precede siempre a la unidad y siempre se deja un espacio entre el número y la unidad. Así, el valor de la magnitud es el producto del número por la unidad. El espacio

$m = 12,3 \text{ g}$ , donde  $m$  se emplea como símbolo de la magnitud masa, pero  $\varphi = 30^\circ 22' 8''$ , donde  $\varphi$  se emplea como símbolo de la magnitud ángulo plano.



entre el número y la unidad se considera como signo de multiplicación (igual que el espacio entre unidades). Las únicas excepciones a esta regla son los símbolos de las unidades grado, minuto y segundo de ángulo plano, °, ' y ", respectivamente, para los cuales no se deja espacio entre el valor numérico y el símbolo de unidad.

Esta regla implica que el símbolo °C para el grado Celsius debe ir precedido de un espacio al expresar el valor de la temperatura Celsius  $t$ .

$t = 30,2\text{ °C}$   
pero no  $t = 30,2^{\circ}\text{C}$   
ni  $t = 30,2^{\circ}\text{ C}$

En cualquier expresión, sólo se emplea una unidad. Una excepción a esta regla es la expresión de los valores de tiempo y ángulo plano en unidades no SI. Sin embargo, para los ángulos planos, es generalmente preferible dividir el grado de forma decimal. Así, es preferible escribir  $22,20^{\circ}$  mejor que  $22^{\circ} 12'$ , salvo en campos como la navegación, la cartografía o la astronomía, o en la medición de ángulos muy pequeños.

$l = 10,234\text{ m}$ , pero no  
 $l = 10\text{ m } 23,4\text{ cm}$

#### 5.4.4 Escritura de los números y del separador decimal

El símbolo utilizado para separar la parte entera de un número de su parte decimal se denomina “separador decimal”. Desde la 22ª Conferencia General (2003, Resolución 10), “el símbolo del separador decimal puede ser el punto o la coma, en la propia línea de escritura”. El separador decimal elegido será el de uso corriente en el idioma y contexto en cuestión.

Si el número está comprendido entre +1 y -1, el separador decimal va siempre precedido de un cero.

-0,234, pero no -,234

Desde la 9ª Conferencia General (1948, Resolución 7) y la 22ª Conferencia General (2003, Resolución 10), los números con muchas cifras pueden repartirse en grupos de tres cifras separadas por un pequeño espacio, a fin de facilitar la lectura. Estos grupos no se separan nunca ni por puntos ni por comas. Sin embargo, cuando no hay más que cuatro cifras delante o detrás del separador decimal, es usual no insertar un espacio y dejar una única cifra suelta. La práctica de agrupar de esta manera las cifras queda a elección personal; no siempre se sigue en ciertos campos especializados como el dibujo industrial, los documentos financieros y los códigos que ha de leer un ordenador.

43 279,168 29  
pero no 43.279,168.29

3279,1683, o bien  
3 279,168 3

En los números de una tabla, el formato utilizado no debe variar en una misma columna.

#### 5.4.5 Expresión de la incertidumbre de medida asociada al valor de una magnitud

La incertidumbre asociada al valor estimado de una magnitud debe evaluarse y expresarse de acuerdo con el documento JCGM 100:2008 (GUM 1995 con ligeras correcciones), *Evaluación de los datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*. La incertidumbre típica asociada a una magnitud  $x$  se designa como  $u(x)$ . Una forma conveniente de representar la incertidumbre típica se muestra en el siguiente ejemplo:

$$m_n = 1,674\ 927\ 471\ (21) \times 10^{-27}\text{ kg}$$

donde  $m_n$  es el símbolo de la magnitud (en este caso la masa de un neutrón) y el número entre paréntesis el valor numérico de la incertidumbre típica del valor estimado de  $m_n$ , referida a las dos últimas cifras del valor indicado; en este caso  $u(m_n) = 0,000\ 000\ 021 \times 10^{-27}\text{ kg}$ . Si se usa una incertidumbre expandida  $U(x)$  en lugar de la incertidumbre típica  $u(x)$ , entonces deben indicarse la probabilidad de cobertura  $p$  y el factor de cobertura  $k$ .

### 5.4.6 Multiplicación y división de símbolos de magnitudes, valores de magnitudes y números

Cuando se multiplican o dividen símbolos de magnitudes, puede emplearse cualquiera

de las formas escritas siguientes:  $ab$ ,  $a b$ ,  $a \cdot b$ ,  $a \times b$ ,  $a/b$ ,  $\frac{a}{b}$ ,  $a b^{-1}$ .

Cuando se multiplican valores de magnitudes, debe utilizarse, bien un signo de multiplicación,  $\times$ , bien paréntesis (o corchetes), pero no el punto a media altura (centrado). Cuando se multipliquen solo números, debe utilizarse únicamente el signo de multiplicación,  $\times$ .

Cuando se dividen valores de magnitudes mediante una barra oblicua, deben emplearse paréntesis para evitar toda ambigüedad.

Ejemplos:

$F = ma$  para fuerza

igual a masa por aceleración

$(53 \text{ m/s}) \times 10,2 \text{ s}$   
o  $(53 \text{ m/s})(10,2 \text{ s})$

$25 \times 60,5$   
pero no  $25 \times 60,5$

$(20 \text{ m})/(5 \text{ s}) = 4 \text{ m/s}$

$(a/b)/c$ , pero no  $a/b/c$

### 5.4.7 Expresión de los valores de magnitudes que son números puros

Como se discutió en la Sección 2.3.3, los valores de magnitudes con la unidad uno, se expresan simplemente como números. El símbolo de la unidad 1 o el nombre de la unidad "uno" no se muestran explícitamente. Los símbolos de los prefijos SI no pueden unirse al símbolo 1 ni al nombre "uno", por lo tanto, para expresar valores particularmente grandes o pequeños se utilizan potencias de 10.

Las magnitudes que son relaciones entre magnitudes del mismo tipo (por ejemplo, relaciones entre longitudes y fracciones de cantidades) tienen la opción de expresarse con unidades (m/m, mol/mol) para ayudar a comprender la magnitud que se expresa, permitiendo también el uso de prefijos SI, si esto se ve preferible ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ,  $\text{nmol}/\text{mol}$ ). Las magnitudes relacionadas con el conteo no tienen esta opción, son solo números.

El símbolo internacionalmente reconocido % (por ciento) puede usarse con el SI. Cuando se usa, un espacio separa el número del símbolo %. Debe usarse el símbolo % en lugar del nombre "por ciento". En textos escritos, sin embargo, el símbolo % toma generalmente el significado de "partes por cien". No deben utilizarse frases como "porcentaje de masa", "porcentaje de volumen" o "porcentaje de cantidad de sustancia"; la información adicional sobre la magnitud debe incluirse en la descripción y en el símbolo de la magnitud.

También se usa el término "ppm", que significa  $10^{-6}$  en valor relativo, o 1 parte en  $10^6$ , o partes por millón. Esto es análogo al significado de porcentaje como partes por cien. También se utilizan los términos "partes por billón" y "partes por trillón" y sus respectivas abreviaturas "ppb" y "ppt", pero sus significados dependen del idioma. Por esta razón, deben evitarse las abreviaturas ppb y ppt.

$n = 1,51$   
pero no  $n = 1,51 \times 1$ ,  
donde  $n$  es el símbolo  
de la magnitud índice  
de refracción.

En los países de habla inglesa, un billón se considera generalmente como  $10^9$  y un trillón como  $10^{12}$ ; sin embargo, en otros lugares, un billón es  $10^{12}$  y un trillón  $10^{18}$ .

### 5.4.8 Ángulos planos, ángulos sólidos y ángulos de fase

La unidad SI coherente para el ángulo plano y el ángulo de fase es el radián, con símbolo rad, y la del ángulo sólido es el estereorradián, con símbolo sr.

El ángulo plano, en radianes, entre dos líneas con origen en un punto común es la longitud del arco de círculo  $s$ , barrido entre las líneas por un radio de longitud  $r$  desde el punto común, dividida por la longitud del radio,  $\theta = s/r$  rad. El ángulo de fase (a menudo llamado simplemente "fase") es el argumento de cualquier número complejo. Es el ángulo entre el eje real positivo y el radio de la representación polar del número complejo en el plano complejo.

Un radián corresponde al ángulo para el que  $s = r$ , por lo tanto,  $1 \text{ rad} = 1$ . La medida del ángulo recto es exactamente igual al número  $\pi/2$ .

El grado es, por su parte, una convención histórica. La conversión entre radianes y grados se deriva de la relación  $360^\circ = 2\pi \text{ rad}$ . Obsérvese que el grado, con el símbolo  $^\circ$ , no es una unidad del SI.

El ángulo sólido, expresado en estereorradianes, corresponde a la relación entre el área  $A$  de la superficie de una esfera de radio  $r$  y el cuadrado del radio,  $\Omega = A/r^2 \text{ sr}$ . Un estereorradián corresponde al ángulo sólido para el cual  $A = r^2$ , por lo tanto,  $1 \text{ sr} = 1$ .

Las unidades rad y sr corresponden a relaciones entre dos longitudes y dos longitudes al cuadrado, respectivamente. Sin embargo, debe enfatizarse que el rad y el sr solo deben usarse para expresar ángulos planos y ángulos sólidos, no para expresar, en general, relaciones entre longitudes o entre longitudes al cuadrado.

Cuando el SI fue adoptado por la 11ª CGPM en 1960, se creó una categoría de “unidades suplementarias” para acomodar al radián y al estereorradián. Décadas más tarde, la CGPM decidió (1) “interpretar las unidades suplementarias en el SI, es decir, el radián y el estereorradián, como unidades derivadas sin dimensión, cuyos nombres y símbolos pueden usarse, aunque no necesariamente, en las expresiones de otras unidades derivadas SI, según sea conveniente”, y (2) eliminar la clase de las unidades suplementarias (Resolución 8 de la 20ª CGPM (1995)).

## **Anexo 1. Decisiones de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM)**

Este anexo recoge las decisiones de la CGPM y del CIPM que afectan directamente a las definiciones de las unidades SI, los prefijos a emplear con el SI y las convenciones relativas a la escritura de los números y símbolos de las unidades. No es un listado completo de decisiones de la CGPM y del CIPM. Para un listado completo, hay que referirse a los sucesivos volúmenes de las *Comptes Rendus des Séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures* (CR) y de los *Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures* (PV) o, para decisiones recientes, a la revista *Metrologia*.

Como el SI no permanece estático, sino que evoluciona siguiendo el desarrollo de la ciencia de la medida, algunas decisiones han sido derogadas o modificadas; otras han sido aclaradas mediante adiciones. Las decisiones que han sido objeto de tales cambios se identifican por un asterisco (\*) y remiten a una nota que proporciona la referencia de la decisión de modificación.

El texto original de cada decisión (o su traducción) se muestra con fuente diferente, para distinguirlo del texto principal. Los asteriscos y notas han sido añadidos por el BIPM para hacer el texto más comprensible, no formando parte del texto original.

En este anexo, las decisiones de la CGPM y del CIPM figuran por orden cronológico estricto, desde 1889 a 2018, a fin de mantener la continuidad con la que se tomaron. Sin embargo, para facilitar la localización de las decisiones referentes a un tema concreto, se incluye un índice de contenidos, ordenado por materias, con referencias a las páginas donde figuran las reuniones particulares en las que se tomaron las decisiones relativas a dicha materia.

## Contenido del Anexo 1

<b>Decisiones relativas al establecimiento del SI</b>		<b>página</b>
9ª CGPM, 1948:	decisión de establecer el SI	49
10ª CGPM, 1954:	decisión de adoptar las seis primeras unidades básicas	51
CIPM 1956:	decisión de adoptar el nombre “Sistema Internacional de Unidades”	52
11ª CGPM, 1960:	confirma el nombre y la abreviatura “SI”,	53
	nombra los prefijos de tera a pico,	53
	establece las unidades suplementarias rad y sr,	53
	lista algunas unidades derivadas	54
CIPM, 1969:	declaraciones relativas a las unidades básicas, suplementarias, derivadas y coherentes, y utilización de los prefijos	59
CIPM, 2001:	“unidades SI” y “unidades del SI”	70
23ª CGPM, 2007	posible redefinición de algunas unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades, SI	76
24ª CGPM, 2011	posible revisión futura del Sistema Internacional de Unidades, SI	79
25ª CGPM, 2014	futura revisión del Sistema Internacional de Unidades, SI	85
26ª CGPM, 2018	revisión del Sistema Internacional de Unidades, SI (para su entrada en vigor el 20 de mayo de 2019)	87
<b>Decisiones relativas a las unidades básicas del SI</b>		
<b>Longitud</b>		
1ª CGPM, 1889:	sanción del Prototipo del metro	46
7ª CGPM, 1927:	definición y uso del Prototipo del metro	47
10ª CGPM, 1954	adopción del metro como unidad básica	51
11ª CGPM, 1960:	redefinición del metro mediante la radiación del kriptón 86	52
15ª CGPM, 1975:	valor recomendado de la velocidad de la luz	61
17ª CGPM, 1983:	redefinición del metro en función de la velocidad de la luz, realización de la definición del metro	64
CIPM, 2002:	especifica las reglas para la realización práctica de la definición del metro	70
CIPM, 2003:	revisión de la lista de radiaciones recomendadas	72
CIPM, 2005:	revisión de la lista de radiaciones recomendadas	74
CIPM, 2007:	revisión de la lista de radiaciones recomendadas	75
23ª CGPM, 2007:	revisión de la realización práctica ( <i>mise en pratique</i> ) de la definición del metro y desarrollo de nuevos patrones de frecuencia óptica	76
CIPM, 2009:	actualización de la lista de frecuencias patrón	78
24ª CGPM, 2011:	posible revisión futura del Sistema Internacional de Unidades, SI.	79

	<b>página</b>	
24ª CGPM, 2011:	revisión de la realización práctica ( <i>mise en pratique</i> ) de la definición del metro y desarrollo de nuevos patrones de frecuencia óptica	83
CIPM, 2013:	actualización de la lista de frecuencias patrón	83
26ª CGPM, 2018:	revisión del Sistema Internacional de Unidades, SI (para su entrada en vigor el 20 de mayo de 2019)	87
<b>Masa</b>		
1ª CGPM, 1889:	sanción del Prototipo del kilogramo	46
3ª CGPM, 1901:	declaración distinguiendo entre masa y peso, y valor convencional de $g_n$	47
10ª CGPM, 1954	adopción del kilogramo como unidad básica	51
CIPM, 1967:	declaración sobre la aplicación de prefijos al gramo	56
21ª CGPM, 1999:	futura redefinición del kilogramo	69
23ª CGPM, 2007	posible redefinición de algunas unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades, SI	77
24ª CGPM, 2011	posible revision futura del Sistema Internacional de Unidades, SI	79
25ª CGPM, 2014	futura revisión del Sistema Internacional de Unidades, SI	85
26ª CGPM, 2018	revisión del Sistema Internacional de Unidades, SI (para su entrada en vigor el 20 de mayo de 2019)	87
<b>Tiempo</b>		
10ª CGPM, 1954	adopción del segundo como unidad básica	51
CIPM, 1956:	definición del segundo como fracción del año trópico 1900	51
11ª CGPM, 1960:	ratifica la definición del segundo dada por el CIPM en 1956	52
CIPM, 1964:	declara patrón recomendado a la transición hiperfina del cesio 133	55
12ª CGPM, 1964:	autoriza al CIPM para investigar sobre patrones de frecuencia atómicos y moleculares	55
13ª CGPM, 1967/68:	define el segundo en función de la transición del cesio	56
CCDS, 1970:	define el Tiempo Atómico Internacional, TAI	59
14ª CGPM, 1971:	requiere al CIPM para que defina y establezca el Tiempo Atómico Internacional, TAI	59
15ª CGPM, 1975:	sanciona el uso del Tiempo Universal Coordinado, UTC	61
CIPM, 2006:	representaciones secundarias del segundo	75
23ª CGPM, 2007:	sobre la revisión de la realización práctica ( <i>mise en pratique</i> ) de la definición del metro y desarrollo de nuevos patrones de frecuencia óptica	76
CIPM, 2009:	actualización de la lista de frecuencias patrón	78
24ª CGPM, 2011:	posible revisión futura del Sistema Internacional de Unidades, SI	79
24ª CGPM, 2011:	revisión de la realización práctica ( <i>mise en pratique</i> ) de la definición del metro y desarrollo de nuevos patrones de frecuencia óptica	83

	<b>página</b>	
CIPM, 2013:	actualización de la lista de frecuencias patrón	83
CIPM, 2015:	actualización de la lista de frecuencias patrón	86
26ª CGPM, 2018:	revisión del Sistema Internacional de Unidades, SI (para su entrada en vigor el 20 de mayo de 2019)	87
 <b>Unidades eléctricas</b>		
CIPM, 1946:	definición de unidades eléctricas coherentes en el sistema metro-kilogramo-segundo (MKS) de unidades (para su entrada en vigor el 1 de enero de 1948)	48
10ª CGPM, 1954	adopción del amperio como unidad básica	51
14ª CGPM, 1971:	adopta el nombre siemens, símbolo S, para la conductancia eléctrica	59
18ª CGPM, 1987:	ajuste previsto de las representaciones del voltio y del ohmio	65
CIPM, 1988:	definido el valor convencional de la constante de Josephson (para su entrada en vigor el 1 de enero de 1990)	66
CIPM, 1988:	definido el valor convencional de la constante de von Klitzing (para su entrada en vigor el 1 de enero de 1990)	67
23ª CGPM, 2007	posible redefinición de algunas unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades, SI	77
24ª CGPM, 2011	posible revision futura del Sistema Internacional de Unidades, SI	79
25ª CGPM, 2014	futura revisión del Sistema Internacional de Unidades, SI	85
26ª CGPM, 2018	revisión del Sistema Internacional de Unidades, SI (para su entrada en vigor el 20 de mayo de 2019)	87
 <b>Temperatura termodinámica</b>		
9ª CGPM, 1948:	adopta el punto triple del agua como punto de referencia para la temperatura termodinámica,	48
	fija el cero de la temperatura Celsius en 0,01 grados por debajo de la temperatura del punto triple del agua	48
CIPM, 1948:	adopta el nombre grado Celsius para la escala de temperatura Celsius	49
10ª CGPM, 1954:	define la temperatura termodinámica de tal modo que el punto triple del agua es 273,16 grados Kelvin exactamente,	50
	define la atmósfera normal	51
10ª CGPM, 1954	adopción del grado Kelvin como unidad básica	51
13ª CGPM, 1967/68:	decide la definición formal del kelvin, símbolo K	57
CIPM, 1989:	Escala Internacional de Temperatura de 1990, EIT-90	67
CIPM, 2005:	nota añadida a la definición del kelvin relativa a la composición isotópica del agua	74
23ª CGPM, 2007:	aclaración sobre la definition del kelvin, unidad de temperatura termodinámica	76
23ª CGPM, 2007	posible redefinición de algunas unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades, SI	77

	<b>página</b>
24ª CGPM, 2011	79
25ª CGPM, 2014	85
26ª CGPM, 2018	87
<b>Cantidad de sustancia</b>	
14ª CGPM, 1971:	60
21ª CGPM, 1999:	69
23ª CGPM, 2007	77
24ª CGPM, 2011	79
25ª CGPM, 2014	85
26ª CGPM, 2018	87
<b>Intensidad luminosa</b>	
CIPM, 1946:	47
10ª CGPM, 1954	51
13ª CGPM, 1967/68:	58
16ª CGPM, 1979:	62
24ª CGPM, 2011:	79
26ª CGPM, 2018:	87
<b>Decisiones relativas a las unidades derivadas y suplementarias del SI</b>	
<b>Unidades SI derivadas</b>	
12ª CGPM, 1964:	56
13ª CGPM, 1967/68:	58
15ª CGPM, 1975:	61
16ª CGPM, 1979:	63
CIPM, 1984:	65
CIPM, 2002:	72
<b>Unidades suplementarias</b>	
CIPM, 1980:	72



	<b>página</b>
	63
20ª CGPM, 1995:	68
	68
<b>Decisiones relativas a terminología y aceptación de unidades para uso con el SI</b>	
<b>Prefijos SI</b>	
12ª CGPM, 1964:	56
15ª CGPM, 1975:	62
19ª CGPM, 1991:	68
<b>Números y símbolos de unidades</b>	
9ª CGPM, 1948:	50
<b>Nombres de unidades</b>	
13ª CGPM, 1967/68:	58
<b>Separador decimal</b>	
22ª CGPM, 2003:	73
<b>Unidades aceptadas para su uso con el SI: un ejemplo, el litro</b>	
3ª CGPM, 1901:	46
11ª CGPM, 1960:	54
CIPM, 1961:	54
12ª CGPM, 1964:	55
16ª CGPM, 1979:	63

**1ª CGPM, 1889**

■ **Sanción de los prototipos internacionales del metro y del kilogramo**  
(CR, 34-38)\*

La Conferencia General de Pesas y Medidas,

**considerando**

la "*Compte Rendu* del Presidente del Comité Internacional de Pesas y Medidas" y el "Informe del CIPM", que muestran que, por colaboración de la sección francesa de la Comisión Internacional del Metro y del CIPM, las medidas fundamentales de los prototipos internacionales del metro y del kilogramo se han efectuado en las mejores condiciones de exactitud y de fiabilidad que permite el estado actual de la ciencia;

que los prototipos internacionales y nacionales del metro y del kilogramo están contruidos con una aleación de platino con un 10 por 100 de iridio, con precisión de 0,0001;

la igualdad en longitud del Metro internacional y la igualdad en masa del Kilogramo internacional con la longitud del Metro y la masa del Kilogramo, ambos depositados en los Archivos de Francia;

que las diferencias entre los Metros nacionales y el Metro internacional están dentro de un límite de 0,01 milímetros y que estas diferencias se basan en la escala termométrica de hidrógeno que es posible reproducir siempre, gracias a la estabilidad del hidrógeno, si se aseguran condiciones idénticas;

que las diferencias entre los Kilogramos nacionales y el Kilogramo internacional, están dentro de un límite de 1 miligramo;

que el Metro y el Kilogramo internacionales y que los Metros y los Kilogramos nacionales cumplen las condiciones exigidas por la Convención del Metro,

**sanciona**

A. En lo que concierne a los prototipos internacionales:

1. El Prototipo del metro elegido por el CIPM. Este prototipo representará en lo sucesivo, a la temperatura del hielo fundente, la unidad métrica de longitud.
2. El Prototipo del kilogramo adoptado por el CIPM. Este prototipo será considerado en lo sucesivo como unidad de masa.
3. La escala termométrica centígrada de hidrógeno, con referencia a la cual se han establecido las ecuaciones de los Metros prototipos.

B. En lo que concierne a los prototipos nacionales: .....

...

**3ª CGPM, 1901**

■ **Declaración relativa a la definición del litro** (CR, 38-39)\*

...

**La Conferencia declara**

1. La unidad de volumen, para las determinaciones de gran exactitud, es el volumen ocupado por la masa de 1 kilogramo de agua pura, a su máximo de densidad y bajo la presión atmosférica normal; este volumen se denomina "litro".

2. ...

\* La definición del metro fue derogada en 1960 por la 11ª CGPM (Resolución 6, véase p. 52).

\* Definición derogada en 1964 por la 12ª CGPM (Resolución 6, véase p. 55).

■ **Declaración sobre la unidad de masa y la definición del peso; valor convencional de  $g_n$**  (CR, 70)

**Teniendo en cuenta** la decisión del Comité Internacional de Pesas y Medidas de 15 de octubre de 1887, por la cual se ha definido el kilogramo como unidad de masa;

**Teniendo en cuenta** la decisión contenida en la fórmula de sanción de los prototipos del Sistema Métrico, aceptada unánimemente por la Conferencia General de Pesas y Medidas el 26 de septiembre de 1889;

**Considerando** la necesidad de terminar con la ambigüedad que existe aún en el uso corriente respecto del significado del término *peso*, empleado unas veces como *masa*, y otras veces como *fuerza mecánica*;

**La Conferencia declara**

1. El kilogramo es la unidad de masa; es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo;
2. El término “peso” designa a una magnitud de la misma naturaleza que una “fuerza”; el peso de un cuerpo es el producto de la masa del cuerpo por la aceleración de la gravedad; en particular, el peso normal de un cuerpo es el producto de la masa del cuerpo por la aceleración normal de la gravedad;
3. El número adoptado en el Servicio Internacional de Pesas y Medidas para el valor de la aceleración normal de la gravedad es  $980,665 \text{ cm/s}^2$ , valor ya declarado por las leyes de algunos países.

\* Esta definición fue derogada en 2018 por la 26ª CGPM (Resolution 1, véase p. 87)

\*\* Este valor de  $g_n$  era el valor convencional de referencia para el cálculo de la unidad kilogramo-fuerza, hoy en día obsoleta.

**7ª CGPM, 1927**

■ **Definición del metro por el Prototipo internacional** (CR, 49)\*

La unidad de longitud es el metro, definido por la distancia, a  $0^\circ$ , entre los ejes de dos trazos centrados, grabados sobre la barra de platino iridiado depositada en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas y declarada Prototipo del metro por la 1ª Conferencia General de Pesas y Medidas, cuando esta barra se encuentre a presión atmosférica normal y soportada por dos cilindros de al menos un centímetro de diámetro, situados simétricamente en un mismo plano horizontal y a la distancia de 571 mm el uno del otro.

\* Esta definición fue derogada en 1960 por la 11ª CGPM (Resolución 6, véase p. 52).

**CIPM, 1946**

■ **Definición de las unidades fotométricas** (PV, 20, 119-122)\*

**Resolución**

...

4. Las unidades fotométricas pueden definirse como sigue:

**Nueva candela** (unidad de intensidad luminosa). — La magnitud de la nueva candela es tal que el brillo del radiador perfecto a la temperatura de solidificación del platino sea de 60 nuevas candelas por centímetro cuadrado.

**Nuevo lumen** (unidad de flujo luminoso). — El nuevo lumen es el flujo luminoso emitido dentro del ángulo sólido unidad (estereorradián) por una fuente puntual uniforme que tiene una intensidad luminosa de 1 nueva candela.

5. ...

\* Las dos definiciones contenidas en esta Resolución fueron ratificadas por la 9ª CGPM en 1948, que además aprobó el nombre de candela dado a la “nueva candela” (CR, 54). Para el lumen se abandonó posteriormente el calificativo “nuevo”. Esta definición fue modificada por la 13ª CGPM en 1967 (Resolución 5, véase p. 58).

## ■ Definición de las unidades eléctricas (PV, 20, 132-133)

### Resolución 2

...

4. (A) Definiciones de las unidades mecánicas utilizadas en las definiciones de las unidades eléctricas:

**Unidad de fuerza.** — La unidad de fuerza [en el sistema MKS (metro, kilogramo, segundo)] es la fuerza que comunica a una masa de 1 kilogramo la aceleración de 1 metro por segundo, en cada segundo.

**Julio** (unidad de energía o de trabajo). — El julio es el trabajo efectuado cuando el punto de aplicación de 1 unidad MKS de fuerza [newton] se desplaza una distancia de 1 metro en la dirección de la fuerza.

**Vatio** (unidad de potencia). — El vatio es la potencia que produce una energía igual a 1 julio por segundo.

(B) Definiciones de unidades eléctricas. El Comité Internacional de Pesas y Medidas acepta las proposiciones siguientes que definen el valor teórico de las unidades eléctricas:

**Amperio** (unidad de corriente eléctrica). — El amperio es la intensidad de una corriente constante que, si se mantuviera en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de 1 metro uno del otro en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a  $2 \times 10^{-7}$  unidades MKS de fuerza [newton] por metro de longitud.

**Voltio** (unidad de diferencia de potencial y de fuerza electromotriz). — El voltio es la diferencia de potencial eléctrico que existe entre dos puntos de un hilo conductor que transporta una corriente constante de 1 amperio, cuando la potencia disipada entre estos puntos es igual a 1 vatio.

**Ohmio** (unidad de resistencia eléctrica). — El ohmio es la resistencia eléctrica que existe entre dos puntos de un conductor cuando una diferencia de potencial constante de 1 voltio, aplicada entre estos puntos, produce, en el conductor, una corriente de 1 amperio, no habiendo en el conductor ninguna fuerza electromotriz.

**Culombio** (unidad de cantidad de electricidad). — El culombio es la cantidad de electricidad transportada en 1 segundo por una corriente de 1 amperio.

**Faradio** (unidad de capacidad eléctrica). — El faradio es la capacidad eléctrica de un condensador entre cuyas placas aparece una diferencia de potencial eléctrico de 1 voltio, cuando está cargado con una cantidad de electricidad de 1 culombio.

**Henrio** (unidad de inductancia eléctrica). — El henrio es la inductancia de un circuito cerrado en el que se produce una fuerza electromotriz de 1 voltio cuando la corriente eléctrica que recorre el circuito varía uniformemente a una velocidad de 1 amperio por segundo.

**Weber** (unidad de flujo magnético). — El weber es el flujo magnético que, atravesando un circuito de una sola espira produciría una fuerza electromotriz de 1 voltio, si se redujese a cero, a velocidad uniforme, en 1 segundo.

Las definiciones contenidas en esta Resolución fueron ratificadas por la 9ª CGPM en 1948 (CR, 49), que además adoptó el nombre de newton (Resolución 7, véase p. 50) para la unidad MKS de fuerza.

En 1954, la 10ª CGPM (Resolución 6, véase p. 51) estableció un sistema práctico de unidades de medida para uso internacional. El amperio fue designado como unidad básica de este sistema.

\* Esta definición del amperio fue derogada en 2018 por la 26ª CGPM (Resolución 1, véase p. 87).

## 9ª CGPM, 1948

### ■ Punto triple del agua; escala termodinámica con un único punto fijo; unidad de cantidad de calor (julio) (CR, 55 y 63)

#### Resolución 3

1. En el estado actual de la técnica, el punto triple del agua es capaz de proporcionar un punto de referencia termométrica con una exactitud superior al punto de fusión del hielo. En consecuencia, el Comité Consultivo de Termometría y Calorimetría (CCTC) estima que el cero de la escala termodinámica centesimal debe definirse como situado a una temperatura inferior en 0,0100 grados a la del punto triple del agua.

El kelvin fue redefinido por la 26ª CGPM en 2018 (Resolución 1, véase p. 87)

2. El CCTC admite el principio de una escala termodinámica absoluta con un solo punto fijo fundamental, actualmente proporcionado por el punto triple del agua pura, cuya temperatura absoluta será fijada posteriormente.

La introducción de esta nueva escala no afecta en absoluto al empleo de la Escala Internacional, que continúa siendo la escala práctica recomendada.

3. La unidad de cantidad de calor es el julio.

Nota: Se pide que los resultados de los experimentos calorimétricos se expresen siempre que sea posible en julios. Si los experimentos se realizan por comparación con el aumento de la temperatura del agua (y, por cualquier razón, no se puede evitar el uso de la caloría), debe proporcionarse toda la información necesaria para la conversión en julios. El CIPM, asesorado por el CCTC, debe preparar una tabla que dé, en julios por grado, los valores más exactos que se puedan obtener de los experimentos sobre el calor específico del agua.

Una tabla, preparada conforme a este encargo, fue aprobada y publicada por el CIPM en 1950 (PV, 22, 92).

■ **Adopción del “grado Celsius”** [CIPM, 1948 (PV, 21, 88) y 9ª CGPM, 1948 (CR, 64)]

Entre los tres términos (“grado centígrado”, “grado centesimal”, “grado Celsius”) propuestos para designar el grado de temperatura, el CIPM eligió “grado Celsius” (PV, 21, 88).

Este término fue también adoptado por la 9ª CGPM (CR, 64).

■ **Propuesta de establecimiento de un sistema práctico de unidades de medida** (CR, 64)

**Resolución 6**

La Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

que la Unión Internacional de Física ha requerido al Comité Internacional de Pesas y Medidas que adopte para uso internacional un Sistema Internacional de Unidades práctico, que la Unión Internacional de Física recomienda el sistema MKS y una unidad eléctrica del sistema práctico absoluto, pero no recomienda que el sistema CGS sea abandonado por los físicos;

que la propia CGPM ha recibido del Gobierno Francés un requerimiento análogo, acompañado de un borrador para emplearlo como base de discusión para el establecimiento de una especificación completa de las unidades de medida;

**insta** al CIPM a:

averiguar, mediante una encuesta oficial enérgica y activa, la opinión de los círculos científicos, técnicos y pedagógicos de todos los países (ofreciéndoles como base el documento francés);

reunir y estudiar las respuestas;

hacer recomendaciones para un único sistema práctico de unidades de medida, susceptible de ser adoptado por todos los países adheridos a la Convención del Metro.

## ■ Escritura de los símbolos de las unidades y de los números (CR, 70)\*

### Resolución 7

#### Principios

Los símbolos de las unidades se expresan en caracteres romanos rectos, en minúscula; pero si los símbolos derivan de nombres propios, se emplean caracteres romanos en mayúscula. Los símbolos no van seguidos de punto.

En los números, la coma (uso francés y español) o el punto (uso británico) se emplean únicamente para separar la parte entera de los números de su parte decimal. Para facilitar la lectura los números se separan en grupos de tres cifras: estos grupos nunca se separan por puntos, ni por comas.

Unidades	Símbolos	Unidades	Símbolos
• metro	m	amperio	A
• metro cuadrado	m <sup>2</sup>	voltio	V
• metro cúbico	m <sup>3</sup>	vatio	W
• micrón	μ	ohmio	Ω
• litro	l	culombio	C
• gramo	g	faradio	F
• tonelada	t	henrio	H
segundo	s	hercio	Hz
ergio	erg	poise	P
dina	dyn	newton	N
grado Celsius	°C	• candela (nueva candela)	cd
• grado absoluto	°K	lux	lx
caloría	cal	lumen	lm
bar	bar	stilb	sb
hora	h		

#### Observaciones

1. Los símbolos cuyas unidades van precedidas de un punto (•) son los que ya habían sido adoptados anteriormente por una decisión del CIPM.
2. El símbolo de la unidad estéreo, empleada en la medida de volumen de madera, debe ser "st" y no "s", que le había sido previamente asignado por el CIPM.
3. Para indicar, no una temperatura, sino un intervalo o una diferencia de temperaturas, la palabra "grado" debe escribirse completa o mediante la abreviatura "grad".

## 10ª CGPM, 1954

### ■ Definición de la escala termodinámica de temperatura (CR, 79)\*

#### Resolución 3

La 10ª Conferencia General de Pesas y Medidas decide definir la escala de temperatura termodinámica eligiendo el punto triple del agua como punto fijo fundamental, y asignándole la temperatura de 273,16 grados Kelvin, exactamente.

\* La CGPM derogó ciertas decisiones sobre unidades y terminología, en particular las relativas al micrón, al grado absoluto y a los nombres "grado" y "grad", 13ª CGPM, 1967/68 (Resoluciones 7 y 3, véanse p. 58 y 57, respectivamente), y "litro", 16ª CGPM, 1979 (Resolución 6, véase p. 63).

\* La 13ª CGPM en 1967 definió explícitamente el kelvin (Resolución 4, véase p. 57)

\* El kelvin fue redefinido por la 26ª CGPM en 2018 (Resolución 1, véase p. 87)

### ■ Definición de la atmósfera normal (CR, 79)

#### Resolución 4

La 10ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), habiendo constatado que la definición de la atmósfera normal dada por la 9ª Conferencia General de Pesas y Medidas en la definición de la Escala Internacional de Temperatura ha llevado a pensar a algunos físicos que la validez de esta definición de la atmósfera normal se encontraba limitada a las necesidades de la termometría de precisión,

**declara** que adopta, para todas las aplicaciones, la definición:

1 atmósfera normal = 1 013 250 dinas por centímetro cuadrado,  
es decir: 101 325 newtons por metro cuadrado.

### ■ Sistema práctico de unidades (CR, 80)\*

#### Resolución 6

De acuerdo con el deseo expresado en su Resolución 6 por la 9ª Conferencia General de Pesas y Medidas referente al establecimiento de un sistema práctico de unidades de medida para uso internacional, la 10ª Conferencia General de Pesas y Medidas

**decide** adoptar como unidades básicas del sistema, las siguientes unidades:

longitud	metro
masa	kilogramo
tiempo	segundo
corriente eléctrica	amperio
temperatura termodinámica	grado Kelvin
intensidad luminosa	candela

\* El nombre de unidad “grado kelvin” fue cambiado a “kelvin” en 1967 por la 13ª CGPM (Resolución 3, véase p. 57).

## CIPM, 1956

### ■ Definición de la unidad de tiempo (segundo) (PV, 25, 77)\*

#### Resolución 1

En virtud del poder conferido por la 10ª Conferencia General de Pesas y Medidas por su Resolución 5, el Comité Internacional de Pesas y Medidas,

**considerando**

1. que la 9ª Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional (Dublín, 1955) se ha declarado a favor de vincular el segundo al año trópico,
2. que, según las decisiones de la 8ª Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional (Roma, 1952), el segundo de tiempo de efemérides (T.E.) es la fracción

$$\frac{12\,960\,276\,813}{408\,986\,496} \times 10^{-9} \text{ del año trópico para enero de 1900 de 0 a 12 h T.E.,}$$

**decide**

“El segundo es la fracción 1/31 556 925,9747 del año trópico para enero de 1900, de 0 a 12 h del Tiempo de Efemérides.”

\* Esta definición fue derogada en 1967 por la 13ª CGPM (Resolución 1, véase p. 56).

## ■ Sistema Internacional de Unidades (PV, 25, 83)

### Resolución 3

El Comité Internacional de Pesas y Medidas,

#### considerando

la misión que le confió la Resolución 6 de la 9ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) con respecto al establecimiento de un sistema práctico de unidades de medida susceptible de ser adoptado por todos los países adheridos a la Convención del Metro, los documentos recibidos de veintiún países en respuesta a la encuesta requerida por la 9ª CGPM,

la Resolución 6 de la 10ª CGPM que fija las unidades básicas del sistema a establecer,

#### recomienda

1. que se denomine “Sistema Internacional de Unidades” al sistema fundamentado sobre las unidades básicas adoptadas por la 10ª CGPM, que son:

[Sigue la lista de las seis unidades básicas con su símbolo, reproducida en la Resolución 12 de la 11ª CGPM (1960)].

2. que se empleen las unidades de este sistema enumeradas en la tabla siguiente, sin excluir otras unidades que se podrán añadir en el futuro:

[Sigue la tabla de unidades incluida en el párrafo 4 de la Resolución 12 de la 11ª CGPM (1960)].

## 11ª CGPM, 1960

### ■ Definición del metro (CR, 85)\*

#### Resolución 6

La 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

#### considerando

que el Prototipo internacional no define el metro con una exactitud suficiente para las necesidades actuales de la metrología,

que además es deseable adoptar un patrón natural e indestructible,

#### decide

1. El metro es la longitud igual a 1 650 763,73 longitudes de onda en el vacío de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles  $2p_{10}$  y  $5d_5$  del átomo de kriptón 86.
2. Se deroga la definición del metro en vigor desde 1889, basada en el Prototipo internacional de platino iridiado.
3. El Prototipo internacional del metro sancionado por la 1ª CGPM en 1889 deberá ser mantenido en el BIPM bajo las condiciones especificadas en 1889.

\* Esta definición fue derogada en 1983 por la 17ª CGPM (Resolución 1, véase p. 64)

### ■ Definición de la unidad de tiempo (segundo) (CR, 86)\*

#### Resolución 9

La 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

#### considerando

los poderes concedidos por la 10ª CGPM al Comité Internacional de Pesas y Medidas para definir la unidad fundamental de tiempo,

la decisión tomada por el CIPM en 1956,

**ratifica** la definición siguiente:

\* Esta definición fue derogada en 1967 por la 13ª CGPM (Resolución 1, véase p. 56)



“El segundo es la fracción 1/31 556 925,9747 del año trópico para enero de 1900, de 0 a 12 h del Tiempo de Efemérides.”

■ **Sistema Internacional de Unidades (CR, 87)\***

**Resolución 12**

La 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

la Resolución 6 de la 10ª CGPM por la que se adoptaron seis unidades básicas sobre las que establecer un sistema práctico de medida para uso internacional:

longitud	metro	m
masa	kilogramo	kg
tiempo	segundo	s
corriente eléctrica	amperio	A
temperatura termodinámica	grado Kelvin	°K
intensidad luminosa	candela	cd

\* La Conferencia General derogó posteriormente algunas de estas decisiones y completó la lista de prefijos: véanse las notas siguientes.

El nombre y símbolo de la unidad de temperatura termodinámica fueron modificados por la 13ª CGPM en 1967 (Resolución 3, véase p. 57).

la Resolución 3 adoptada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas en 1956, las recomendaciones adoptadas por el CIPM en 1958 relativas a la abreviatura del nombre del sistema y los prefijos para la formación de múltiplos y submúltiplos de las unidades,

**decide**

1. el sistema basado en las seis unidades básicas anteriores se denomina con el nombre de “Sistema Internacional de Unidades”;
2. la abreviatura internacional del nombre del sistema es: SI;
3. los nombres de los múltiplos y submúltiplos de las unidades se forman mediante los prefijos siguientes:

Una séptima unidad básica, el mol, fue adoptada por la 14ª CGPM en 1971 (Resolución 3, véase p. 60).

Factor por el que se multiplica la unidad	Prefijo	Símbolo	Factor por el que se multiplica la unidad	Prefijo	Símbolo
1 000 000 000 000 = 10 <sup>12</sup>	tera	T	0,1 = 10 <sup>-1</sup>	deci	d
1 000 000 000 = 10 <sup>9</sup>	giga	G	0,01 = 10 <sup>-2</sup>	centi	c
1 000 000 = 10 <sup>6</sup>	mega	M	0,001 = 10 <sup>-3</sup>	mili	m
1 000 = 10 <sup>3</sup>	kilo	k	0,000 001 = 10 <sup>-6</sup>	micro	μ
100 = 10 <sup>2</sup>	hecto	h	0,000 000 001 = 10 <sup>-9</sup>	nano	n
10 = 10 <sup>1</sup>	deca	da	0,000 000 000 001 = 10 <sup>-12</sup>	pico	p

La 12ª CGPM adoptó prefijos adicionales en 1964 (Resolución 8, véase p. 56), la 15ª CGPM en 1975 (Resolución 10, véase p. 62) y la 19ª CGPM en 1991 (Resolución 4, véase p. 68).

4. en este sistema se emplean las unidades que a continuación se relacionan, sin perjuicio de que en el futuro puedan añadirse otras.

**Unidades suplementarias**

ángulo plano	radián	rad
ángulo sólido	estereorradián	sr

La 20ª CGPM en 1995 derogó la clase de las unidades suplementarias del SI (Resolución 8, véase p. 68). Actualmente se consideran unidades derivadas.

**Unidades derivadas**

superficie	metro cuadrado	$m^2$	
volumen	metro cúbico	$m^3$	
frecuencia	hercio	Hz	1/s
densidad o masa volúmica	kilogramo por metro cúbico	$kg/m^3$	
velocidad	metro por segundo	m/s	
velocidad angular	radián por segundo	rad/s	
aceleración	metro por segundo cuadrado	$m/s^2$	
aceleración angular	radián por segundo cuadrado	$rad/s^2$	
fuerza	newton	N	$kg \cdot m/s^2$
presión (tensión mecánica)	newton por metro cuadrado	$N/m^2$	
viscosidad cinemática	metro cuadrado por segundo	$m^2/s$	
viscosidad dinámica	newton-segundo por metro cuadrado	$N \cdot s/m^2$	
trabajo, energía, cantidad de calor	julio	J	$N \cdot m$
potencia	vatio	W	J/s
cantidad de electricidad	culombio	C	$A \cdot s$
tensión eléctrica (voltaje), diferencia de potencial, fuerza electromotriz	voltio	V	W/A
campo eléctrico	voltio por metro	V/m	
resistencia eléctrica	ohmio	$\Omega$	V/A
capacidad eléctrica	faradio	F	$A \cdot s/V$
flujo de inducción magnética	weber	Wb	$V \times s$
inductancia	henrio	H	$V \cdot s/A$
densidad de flujo magnético	tesla	T	$Wb/m^2$
Intensidad del campo magnético	amperio por metro	A/m	
fuerza magnetomotriz	amperio	A	
flujo luminoso	lumen	lm	$cd \cdot sr$
luminancia	candela por metro cuadrado	$cd/m^2$	
iluminancia	lux	lx	$lm/m^2$

La 13ª CGPM en 1967 (Resolución 6, véase p. 58) especificó otras unidades que debían añadirse a la lista. En principio, la lista de unidades derivadas es ilimitada.

### ■ Decímetro cúbico y litro (CR, 88)

#### Resolución 13

La 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

#### considerando

que el decímetro cúbico y el litro no son iguales y difieren del orden de 28 partes en  $10^6$ , que las determinaciones de magnitudes físicas que implican medidas de volumen se realizan con una exactitud cada vez mayor, aumentando así el riesgo de confusión entre el decímetro cúbico y el litro,

**requiere** al Comité Internacional de Pesas y Medidas que estudie este problema y presente sus conclusiones a la 12ª CGPM.

### CIPM, 1961

### ■ Decímetro cúbico y litro (PV, 29, 34)

#### Recomendación

El Comité Internacional de Pesas y Medidas recomienda que los resultados de las medidas exactas de volumen se expresen en unidades del Sistema Internacional y no en litros.

**CIPM, 1964**■ **Patrones de frecuencia atómicos y moleculares** (PV, 32, 26 y CR. 93)**Declaración**

El Comité Internacional de Pesas y Medidas,

**habilitado** por la Resolución 5 de la 12ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) para designar patrones de frecuencia atómicos o moleculares para uso temporal en medidas de tiempo en física,

**declara** que el patrón a emplear es la transición entre los niveles hiperfinos  $F = 4, M = 0$  y  $F = 3, M = 0$  del estado fundamental  $^2S_{1/2}$  del átomo de cesio 133 no perturbado por campos externos y que a la frecuencia de esta transición se le asigna un valor igual a  $9\ 192\ 631\ 770$  hercios.

**12ª CGPM, 1964**■ **Patrón atómico de frecuencia** (CR, 93)**Resolución 5**

La 12ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

que la 11ª CGPM constató en su Resolución 10 la urgencia para los objetivos de la metrología de precisión de definir un patrón atómico o molecular de intervalo de tiempo, que, a pesar de los resultados obtenidos con la utilización de patrones atómicos de frecuencia de cesio, no ha llegado aún el momento de adoptar por parte de la CGPM una nueva definición del segundo, unidad básica del Sistema Internacional de Unidades, debido a los nuevos e importantes progresos que probablemente se obtendrán del trabajo en curso,

**considerando también** que no es deseable esperar más para basar las medidas físicas de tiempo en patrones atómicos o moleculares de frecuencia,

**habilita** al Comité Internacional de Pesas y Medidas para designar los patrones de frecuencia atómicos o moleculares a emplear provisionalmente, y

**pide** a las organizaciones y laboratorios expertos en este campo que continúen con los estudios relacionados con una nueva definición del segundo.

■ **Litro** (CR, 93)**Resolución 6**

La 12ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando** la Resolución 13 adoptada por la 11ª CGPM en 1960 y la Recomendación adoptada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas en 1961,

1. **deroga** la definición del litro dada en 1901 por la 3ª CGPM,
2. **declara** que la palabra "litro" puede utilizarse como un nombre especial para el decímetro cúbico,
3. **recomienda** que el nombre de litro no se utilice para expresar resultados de medida de volumen de gran exactitud.

### ■ Curie (CR, 94)\*

#### Resolución 7

La 12ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando** que desde hace mucho tiempo el curie se utiliza en muchos países como unidad de actividad de radionucleidos,

**reconociendo** que en el Sistema Internacional de Unidades (SI), la unidad de esta actividad es el segundo elevado a la potencia menos uno ( $s^{-1}$ ),

**admite** que el curie se siga manteniendo, fuera del SI, como unidad de actividad, con el valor  $3,7 \times 10^{10} s^{-1}$ . El símbolo de esta unidad es Ci.

\* La 15ª CGPM adoptó en 1975 (Resolución 8, véase p. 61) el nombre “becquerel” (Bq) para la unidad SI de actividad:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq.}$$

### ■ Prefijos SI femto y atto (CR, 94)\*

#### Resolución 8

La 12ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**decide** añadir a la lista de prefijos para la formación de los nombres de los múltiplos y de los submúltiplos de las unidades, adoptada por la 11ª CGPM, Resolución 12, párrafo 3, los dos nuevos prefijos siguientes:

Factor multiplicador	Prefijo	Símbolo
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a

\* La 15ª CGPM añadió nuevos prefijos en 1975 (Resolución 10, véase p. 62).

## CIPM, 1967

### ■ Múltiplos y submúltiplos decimales de la unidad de masa (PV, 35, 29 y *Metrología*, 1968, 4, 45)

#### Recomendación 2

El Comité Internacional de Pesas y Medidas,

**considerando** que la regla de formación de los nombres de los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades del párrafo 3 de la Resolución 12 de la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) (1960) puede prestarse a interpretaciones divergentes en su aplicación a la unidad de masa,

**declara** que las disposiciones de la Resolución 12 de la 11ª CGPM se apliquen, en el caso del kilogramo, del siguiente modo: los nombres de los múltiplos y submúltiplos decimales de la unidad de masa se forman por adición de los prefijos a la palabra “gramo”.

## 13ª CGPM, 1967/68

### ■ Unidad SI de tiempo (segundo) (CR, 103 y *Metrología*, 1968, 4, 43)

#### Resolución 1

La 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

que la definición del segundo adoptada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) en su reunión de 1956 (Resolución 1) y ratificada por la Resolución 9 de la 11ª CGPM (1960), mantenida posteriormente por la Resolución 5 de la 12ª Conferencia General (1964) no es adecuada para las necesidades actuales de la metrología,

que en su reunión de 1964 el CIPM, habilitado por la Resolución 5 de la 12ª Conferencia (1964), ha recomendado, para responder a estas necesidades, un patrón atómico de frecuencia de cesio de uso temporal,

que este patrón de frecuencia se encuentra en la actualidad suficientemente probado y se le ha encontrado de exactitud suficiente para proporcionar una definición del segundo que cumpla los requisitos actuales,

que ha llegado el momento de reemplazar la definición actualmente en vigor de la unidad de tiempo del Sistema Internacional de Unidades por una definición basada en este patrón,

**decide**

1. La unidad de tiempo del Sistema Internacional de Unidades es el segundo definido de la forma siguiente:

“El segundo es la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133”;

2. La Resolución 1 adoptada por el CIPM en su reunión de 1956 y la Resolución 9 de la 11ª CGPM quedan derogadas.

En su reunión de 1997, el CIPM afirmó que esta definición se refiere a un átomo de cesio en reposo a una temperatura termodinámica de 0 K.

La redacción de la definición del segundo fue modificada por la 26ª CGPM en 2018 (Resolución 1, véase p. 87)

■ **Unidad SI de temperatura termodinámica (kelvin)** (CR, 104 y *Metrología*, 1968, 4, 43)\*

**Resolución 3**

La 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

los nombres “grado Kelvin” y “grado”, los símbolos “°K” y “grad” y sus reglas de empleo contenidas en la Resolución 7 de la 9ª CGPM (1948), en la Resolución 12 de la 11ª CGPM (1960) y la decisión tomada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas en 1962 (PV, 30, 27),

que la unidad de temperatura termodinámica y la unidad de intervalo de temperatura son una única unidad, que debería indicarse por un solo nombre y un solo símbolo,

**decide**

1. la unidad de temperatura termodinámica se denota con el nombre “kelvin” y su símbolo es “K”;
2. este mismo nombre y este mismo símbolo se utilizan para expresar un intervalo de temperatura;
3. un intervalo de temperatura puede expresarse también en grados Celsius;
4. se derogan las decisiones mencionadas en el primer párrafo, referentes al nombre de la unidad de temperatura termodinámica, su símbolo y la designación de la unidad para expresar un intervalo o una diferencia de temperatura, aunque las aplicaciones que se derivan de dichas decisiones se admiten por un tiempo.

\* En su sesión de 1980, el CIPM aprobó el informe de la 7ª reunión del CCU que pedía que no se permitiera más el empleo de los símbolos “°K” y “grad”

\*\* Véase la Recomendación 2 (CI-2005) del CIPM relativa a la composición isotópica del agua que forma parte de la definición del kelvin (p. 74).

■ **Definición de la unidad SI de temperatura termodinámica (kelvin)** (CR, 104 y *Metrología*, 1968, 4, 43)\*

**Resolución 4**

La 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando** que es útil formular de un modo más explícito la definición de la unidad de temperatura termodinámica contenida en la Resolución 3 de la 10ª CGPM (1954),

**decide** expresar esta definición de la forma siguiente:

“El kelvin, unidad de temperatura termodinámica, es la fracción 1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.”

\*Véase la Recomendación 5 (CI-1989) del CIPM relativa a la Escala Internacional de Temperatura de 1990, p. 67.

El kelvin fue redefinido en la 26ª CGPM en 2018 (Resolución 1, véase p87)

■ **Unidad SI de intensidad luminosa (candela)** (CR, 104 y *Metrología*, 1968, 4, 43-44)\*

\* Esta definición fue derogada en 1979 por la 16ª CGPM (Resolución 3, véase p. 62)

**Resolución 5**

La 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

la definición de la unidad de intensidad luminosa ratificada por la 9ª CGPM (1948) y contenida en la “Resolución referente al cambio de las unidades fotométricas” adoptada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas en 1946 (PV, 20, 119) en virtud de los poderes conferidos por la 8ª CGPM (1933),

que esta definición determina satisfactoriamente la magnitud de la unidad de intensidad luminosa pero se presta a críticas en cuanto a su redacción,

**decide** expresar la definición de la candela de la forma siguiente:

“La candela es la intensidad luminosa, en dirección perpendicular, de una superficie de 1/600 000 metros cuadrados de un cuerpo negro a la temperatura de congelación del platino bajo una presión de 101 325 newtons por metro cuadrado.”

■ **Unidades SI derivadas** (CR, 105 y *Metrología*, 1968, 4, 44)\*

\* La 15ª CGPM aprobó en 1975 un nombre especial y un símbolo para la unidad de actividad (Resolución 8, véase p. 61)

**Resolución 6**

La 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando** que es útil añadir algunas unidades derivadas a la lista del párrafo 4 de la Resolución 12 de la 11ª CGPM (1960),

**decide** añadir:

número de ondas	1 por metro	$m^{-1}$
entropía	julio por kelvin	J/K
capacidad calorífica específica	julio por kilogramo y kelvin	J/(kg · K)
conductividad térmica	vatio por metro y kelvin	W/(m · K)
intensidad radiante	vatio por estereorradián	W/sr
actividad (de una fuente radioactiva)	1 por segundo	$s^{-1}$

■ **Derogación de decisiones anteriores (el micrón y la nueva candela)** (CR, 105 y *Metrología*, 1968, 4, 44)

**Resolución 7**

La 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando** que las decisiones subsiguientes de la Conferencia General relativas al Sistema Internacional de Unidades son incompatibles con partes de la Resolución 7 de la 9ª CGPM (1948),

**decide** en consecuencia eliminar de la Resolución 7 de la 9ª Conferencia:

1. el nombre de la unidad “micrón” y el símbolo “ $\mu$ ” que se atribuyó a esta unidad y que ha pasado a ser un prefijo;
2. el nombre de la unidad “nueva candela”.

**CIPM, 1969**

■ **Sistema Internacional de Unidades, Reglas de aplicación de la Resolución 12 de la 11ª CGPM (1960)** (PV, 37, 30 y *Metrologia*, 1970, 6, 66)\*

**Recomendación 1**

El Comité Internacional de Pesas y Medidas,

**considerando** que la Resolución 12 de la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas (1960), referente al Sistema Internacional de Unidades, ha suscitado controversias sobre ciertos aspectos,

**declara**

1. las unidades básicas, las unidades suplementarias y las unidades derivadas del Sistema Internacional de Unidades, que forman un conjunto coherente, se denominan “unidades SI”,\*\*
2. los prefijos adoptados por la CGPM para la formación de los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI se denominan “prefijos SI”, y

**recomienda**

3. emplear las unidades SI y sus múltiplos y submúltiplos decimales cuyos nombres se formen mediante los prefijos SI.

Nota: La denominación “unidades suplementarias” que figura en la Resolución 12 de la 11ª CGPM (y en la presente Recomendación), se aplica a unidades SI respecto de las cuales la Conferencia General renuncia a declarar si son unidades básicas o unidades derivadas.

\* La 20ª CGPM decidió en 1995 derogar la clase de las unidades suplementarias del SI (Resolución 8, véase p. 68).

\*\* El CIPM aprobó en 2001 una propuesta del CCU para aclarar la definición de «unidades SI» y «unidades del SI», véase p. 70.

**CCDS, 1970 (En CIPM, 1970)**

■ **Definición del TAI** (PV, 38, 110-111 y *Metrologia*, 1971, 7, 43)

**Recomendación S2**

El Tiempo Atómico Internacional (TAI) es la coordenada de referencia temporal establecida por el Bureau International de l'Heure (BIH) en base a las indicaciones de relojes atómicos que funcionan en varias instalaciones conforme a la definición del segundo, unidad de tiempo del Sistema Internacional de Unidades.

En 1980, la definición del TAI se completó como sigue (declaración del CCDS, *BIPM Com. Cons. Déf. Seconde*, 1980, 9, S 15 y *Metrologia*, 1981, 17, 70):

El TAI es la escala de tiempo coordinado definida en un sistema de referencia geocéntrico, con el segundo SI realizado sobre el geode en rotación como unidad de la escala.

La Unión Astronómica Internacional amplió esta definición en su Resolución A4 de 1991:

“El TAI es una escala de tiempo realizada cuya forma ideal, despreciando un retardo constante de 32,184 s, es el Tiempo Terrestre (TT), ligado a su vez a la coordenada de tiempo del sistema de referencia geocéntrico, Tiempo Coordinado Geocéntrico (TCG), por una relación constante.”

(véase Proc. 21º Asamblea General de la UAI, *IAU Trans.*, 1991, vol. XXIB, Kluwer.)

**14ª CGPM, 1971**

■ **Pascal y siemens** (CR, 78)

La 14ª Conferencia General de Pesas y Medidas ha adoptado los nombres especiales “pascal” (símbolo Pa) para la unidad SI newton por metro cuadrado y “siemens” (símbolo S) para la unidad SI de conductancia eléctrica [ohmio a la potencia menos uno].

■ **Tiempo Atómico Internacional; misión del CIPM** (CR, 77-78 y *Metrologia*, 1972, 8, 35)

**Resolución 1**

La 14ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

que el segundo, unidad de tiempo del Sistema Internacional de Unidades, se ha definido desde 1967 en función de una frecuencia atómica natural y ya no a partir de escalas de tiempo proporcionadas por movimientos astronómicos,

que la necesidad de una escala de Tiempo Atómico Internacional (TAI) es una consecuencia de la definición atómica del segundo,

que varias organizaciones internacionales han asegurado y siguen asegurando con éxito el establecimiento de escalas de tiempo basadas en movimientos astronómicos, particularmente gracias a los servicios permanentes del Bureau International de l'Heure (BIH),

que el BIH ha comenzado a establecer una escala de tiempo atómico de calidad reconocida y de probada utilidad,

que los patrones atómicos de frecuencia empleados para la realización del segundo han sido considerados y deben seguir siéndolo por el Comité Internacional de Pesas y Medidas, auxiliado por un Comité Consultivo y que el intervalo unidad de la escala de Tiempo Atómico Internacional ha de ser el segundo, realizado de acuerdo con su definición atómica,

que todas las organizaciones científicas internacionales competentes y los laboratorios nacionales que trabajan en este campo han expresado el deseo de que el CIPM y la CGPM den una definición del Tiempo Atómico Internacional y contribuyan al establecimiento de la escala de Tiempo Atómico Internacional,

que la utilidad del Tiempo Atómico Internacional requiere una estrecha coordinación con las escalas de tiempo basadas en movimientos astronómicos,

**solicita** al CIPM

1. que dé una definición del Tiempo Atómico Internacional,
2. que tome las medidas necesarias, de acuerdo con las organizaciones internacionales interesadas, para asegurar que se utilicen de la mejor forma posible todas las competencias científicas y las instalaciones existentes en la realización de la escala de Tiempo Atómico Internacional y para que se puedan satisfacer los requerimientos de los usuarios del Tiempo Atómico Internacional.

La definición del TAI fue dada por el CCDS (actualmente CCTF) en 1970, véase informe del CCDS, p. 61.

**■ Unidad SI de cantidad de sustancia (mol) (CR, 78 y *Metrología*, 1972, 8, 36)\*****Resolución 3**

La 14ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando** los consejos de la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada, de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada y de la Organización Internacional de Normalización respecto a la necesidad de definir una unidad de cantidad de sustancia,

**decide**

1. El mol es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0,012 kilogramos de carbono 12; su símbolo es "mol"<sup>\*\*</sup>.
2. Cuando se emplee el mol, deben especificarse las entidades elementales, que pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones, otras partículas o grupos específicos de tales partículas.
3. El mol es una unidad básica del Sistema Internacional de Unidades.

\* En su sesión de 1980, el CIPM aprobó el informe de la 7ª reunión del CCU (1980) precisando que, en esta definición, ha de entenderse que se refiere a átomos de carbono 12 no ligados, en reposo y en el estado fundamental.

\*\* El mol fue redefinido por la 26ª CGPM en 2018 (Resolución 1, véase p. 87)



**15ª CGPM, 1975**

- **Valor recomendado para la velocidad de la luz** (CR, 103 y *Metrologia*, 1975, 11, 179-180)

**Resolución 2**

La 15ª Conferencia General de Pesas y Medidas,

**considerando** la excelente concordancia entre los resultados de medida de longitudes de onda de las radiaciones láser enclavadas sobre una línea de absorción molecular en la región visible e infrarroja, con una incertidumbre estimada de  $\pm 4 \times 10^{-9}$ , lo que corresponde a la incertidumbre de la realización del metro,

**considerando** también las medidas concordantes de las frecuencias de varias de estas radiaciones,

**recomienda** el uso del valor que resulta para la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío  $c = 299\,792\,458$  metros por segundo.

La incertidumbre relativa dada aquí corresponde a tres veces la desviación típica de los datos considerados.

- **Tiempo Universal Coordinado (UTC)** (CR, 104 y *Metrologia*, 1975, 11, 180)

**Resolución 5**

La 15ª Conferencia General de Pesas y Medidas,

**considerando** que el sistema denominado "Tiempo Universal Coordinado" (UTC) se utiliza muy ampliamente, que se emplea en la mayor parte de las transmisiones de señales horarias vía radio, que esta amplia difusión proporciona a los usuarios no sólo patrones de frecuencia sino también el Tiempo Atómico Internacional y una aproximación al Tiempo Universal (o, si se prefiere, al tiempo solar medio),

**constata** que el Tiempo Universal Coordinado es la base de la hora civil cuyo uso está legalizado en la mayoría de los países,

**estima** que este uso es perfectamente recomendable.

- **Unidades SI para las radiaciones ionizantes (becquerel y gray)** (CR, 105 y *Metrologia*, 1975, 11, 180)\*

**Resoluciones 8 y 9**

La 15ª Conferencia General de Pesas y Medidas,

con motivo de la necesidad urgente, expresada por la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiaciones (ICRU), de extender el uso del Sistema Internacional de Unidades a las investigaciones y a las aplicaciones radiológicas,

en razón a la necesidad de facilitar todo lo posible el uso de las unidades a los no especialistas,

teniendo en cuenta además la gravedad de los riesgos de error en el trabajo terapéutico,

**adopta** el siguiente nombre especial de unidad SI para la actividad:

**becquerel**, símbolo Bq, igual a la inversa del segundo (Resolución 8),

**adopta** el siguiente nombre especial de unidad SI para las radiaciones ionizantes:

**gray**, símbolo Gy, igual al julio por kilogramo (Resolución 9).

Nota: El gray es la unidad SI de dosis absorbida. En el campo de las radiaciones ionizantes, el gray puede emplearse también con otras magnitudes físicas que se expresan también en julios por kilogramo; el Comité Consultivo de Unidades tiene la responsabilidad de estudiar este tema en colaboración con las organizaciones internacionales competentes.

\* En su reunión de 1976, el CIPM aprobó el informe de la 5ª reunión del CCU (1976) precisando que, según indicación del ICRU, el gray puede emplearse también para expresar la energía másica transferida, el kerma y el índice de dosis absorbida.

■ **Prefijos SI peta y exa** (CR, 106 y *Metrología*, 1975, 11, 180-181)\*

**Resolución 10**

La 15ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**decide** añadir a la lista de los prefijos SI a usar para los múltiplos, adoptada por la 11ª CGPM, Resolución 12, párrafo 3, los dos prefijos siguientes:

Factor por el que se multiplica la unidad	Prefijo	Símbolo
$10^{15}$	peta	P
$10^{18}$	exa	E

\* La 19ª CGPM añadió nuevos prefijos en 1991 (Resolución 4, véase p. 68)

**16ª CGPM, 1979**

■ **Unidad SI de intensidad luminosa (candela)** (CR, 100 y *Metrología*, 1980, 16, 56)

**Resolución 3**

La 16ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

que, a pesar de los notables esfuerzos de algunos laboratorios, sigue habiendo divergencias excesivas entre los resultados de la realización de la candela mediante el patrón primario actual basado en un cuerpo negro,

que las técnicas radiométricas se están desarrollando rápidamente, permitiendo precisiones ya equivalentes a las de la fotometría y que estas técnicas se encuentran ya en uso en laboratorios nacionales para realizar la candela sin tener que construir un cuerpo negro,

que la relación entre las magnitudes luminosas de la fotometría y las magnitudes radiométricas, es decir, el valor de 683 lúmenes por vatio para la eficacia luminosa espectral de la radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  hercios, ha sido adoptada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) en 1977,

que este valor ha sido reconocido suficientemente exacto para el sistema de las magnitudes luminosas fotópicas, que implica un cambio sólo del orden del 3% para el sistema de magnitudes luminosas escotópicas y que por tanto asegura una continuidad satisfactoria,

que ha llegado el momento de dar a la candela una definición que permitirá una mejora tanto en la facilidad de realización como en la precisión de patrones fotométricos, y que se aplique tanto a las magnitudes fotópicas y escotópicas de la fotometría como a las magnitudes a definir en el dominio mesópico,

**decide**

1. La candela es la intensidad luminosa, en una dirección determinada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  hercios y cuya intensidad radiante en dicha dirección es 1/683 vatios por estereorradián.
2. Se deroga la definición de la candela (denominada en su momento nueva candela) decidida por el CIPM en 1946 en virtud de las atribuciones conferidas por la 8ª CGPM en 1933, ratificada por la 9ª CGPM en 1948 y después modificada por la 13ª CGPM en 1967.

La redacción de la definición de la candela fue modificada por la 26ª CGPM en 2018 (Resolución 1, véase p. 87)

La visión fotópica se detecta en la retina del ojo por los conos, que son sensibles a altos niveles de luminancia ( $L > \text{aprox. } 10 \text{ cd/m}^2$ ), y se usan para la visión diurna.

La visión escotópica se detecta en la retina del ojo por los bastones, que son sensibles a bajos niveles de luminancia ( $L < \text{aprox. } 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ ), y se usan para la visión nocturna.

En el campo comprendido entre estos niveles de luminancia se usan tanto los conos como los bastones y esto se describe como visión mesópica.

■ **Nombre especial para la unidad SI de dosis equivalente (sievert)** (CR, 100 y *Metrologia*, 1980, **16**, 56)\*

#### Resolución 5

La 16ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

##### considerando

el esfuerzo realizado para introducir las unidades SI en el campo de las radiaciones ionizantes,

los riesgos para los seres humanos de una dosis de radiación subestimada, riesgos que podrían surgir de la confusión entre dosis absorbida y dosis equivalente,

que la proliferación de nombres especiales representa un peligro para el Sistema Internacional de Unidades, que debe evitarse en la medida de lo posible, pero que esta regla puede romperse cuando se trata de salvaguardar la salud humana,

**adopta** el nombre especial **sievert**, símbolo Sv, para la unidad SI de dosis equivalente en el campo de la radioprotección. El sievert es igual al julio por kilogramo.

\* El CIPM decidió en 1984 acompañar esta Resolución de una explicación (Recomendación 1, véase p. 65).

■ **Símbolos del litro** (CR, 101 y *Metrologia*, 1980, **16**, 56-57)

#### Resolución 6

La 16ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**reconociendo** los principios generales adoptados para la escritura de los símbolos de las unidades en la Resolución 7 de la 9ª CGPM (1948),

**considerando** que el símbolo l para la unidad litro fue adoptado por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) en 1879 y confirmado en la misma Resolución de 1948,

**considerando** también que, para evitar el riesgo de confusión entre la letra l y el número 1, varios países han adoptado el símbolo L en lugar de l para la unidad litro,

**considerando** que el nombre litro, aunque no se encuentra incluido en el Sistema Internacional de Unidades, debe admitirse como de uso general con el Sistema,

**decide**, como excepción, adoptar los dos símbolos l y L como símbolos utilizables para la unidad litro,

**considerando** de otra parte que en el futuro sólo debe mantenerse uno de los dos símbolos,

**invita** al CIPM a observar la evolución del empleo de los dos símbolos y a dar a la 18ª CGPM su opinión sobre la posibilidad de suprimir uno de ellos.

El CIPM en 1990 consideró que era todavía demasiado pronto para elegir un símbolo único del litro.

## CIPM, 1980

■ **Unidades SI suplementarias (radián y estereorradián)** (PV, 48, 24 y *Metrologia*, 1981, **17**, 72)\*

#### Recomendación 1

El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM),

**tomando en consideración** la Resolución 3 adoptada por ISO/TC 12 en 1978 y la Recomendación U 1 (1980) adoptada por el Comité Consultivo de Unidades (CCU) en su 7ª reunión,

##### considerando

que las unidades radián y estereorradián se emplean habitualmente en expresiones para unidades donde hay necesidad de clarificación, especialmente en fotometría, donde el estereorradián juega un papel importante para distinguir las unidades correspondientes a magnitudes diversas,

que en las ecuaciones utilizadas se expresa generalmente el ángulo plano como el cociente de dos longitudes y el ángulo sólido como el cociente entre un área y el cuadrado de

\* La clase de las unidades suplementarias del SI fue derogada en 1995 por decisión de la 20ª CGPM (Resolución 8, véase p. 68)

una longitud y que, por lo tanto, estas magnitudes se tratan como magnitudes sin dimensión,

que el estudio de los formalismos empleados en el dominio científico muestra que no existe ninguno que sea a la vez coherente y conveniente y en el que las magnitudes ángulo plano y ángulo sólido pudieran ser consideradas como magnitudes básicas,

**considerando también**

que la interpretación dada por el CIPM en 1969 para la clase de las unidades suplementarias contenida en la Resolución 12 de la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas en 1960 permite la libertad de tratar al radián y al estereorradián como unidades básicas del SI,

que tal posibilidad compromete la coherencia interna del Sistema Internacional basado en siete unidades básicas solamente,

**decide** interpretar la clase de las unidades suplementarias del Sistema Internacional como una clase de unidades derivadas sin dimensión para las cuales la CGPM deja la libertad de utilizarlas o no en las expresiones de unidades derivadas del Sistema Internacional.

### 17ª CGPM, 1983

■ **Definición del metro** (CR, 97 y *Metrología*, 1984, 20, 25)

**Resolución 1**

La 17ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

que la definición actual no permite una realización del metro suficientemente precisa para todas las necesidades,

que los progresos realizados en la estabilización de láseres permiten obtener radiaciones más reproducibles y más fáciles de utilizar que la radiación patrón emitida por una lámpara de kriptón 86,

que los progresos realizados en la medida de frecuencias y de longitudes de onda de estas radiaciones han conducido a determinaciones concordantes de la velocidad de la luz cuya exactitud se encuentra limitada principalmente por la realización de la actual definición del metro,

que los valores de las longitudes de onda determinadas a partir de medidas de frecuencia y de un valor dado de la velocidad de la luz tienen una reproducibilidad superior a la que se puede obtener por comparación con la longitud de onda de la radiación patrón del kriptón 86,

que resulta ventajoso, en especial para la astronomía y la geodesia, mantener sin cambio el valor de la velocidad de la luz recomendado en 1975 por la 15ª CGPM, en su Resolución 2 ( $c = 299\,792\,458$  m/s),

que se ha estado considerando una nueva definición del metro de diversas formas todas las cuales se basan en dar a la velocidad de la luz un valor exacto, igual al valor recomendado, con lo cual no se introduce ninguna discontinuidad apreciable de la unidad de longitud, teniendo en cuenta la incertidumbre relativa de  $\pm 4 \times 10^{-9}$  de las mejores realizaciones de la definición actual del metro,

que estas diversas formas, que hacen referencia bien al trayecto recorrido por la luz en un intervalo de tiempo especificado, bien a la longitud de onda de una radiación de frecuencia medida o especificada, han sido objeto de consultas y de discusiones profundas, han sido reconocidas como equivalentes y que una mayoría se ha inclinado a favor de la primera forma,

que el Comité Consultivo para la Definición del Metro (CCDM) se encuentra actualmente en disposición de dar las instrucciones para la realización práctica de tal definición, instrucciones que podrían incluir el empleo de la radiación naranja del kriptón 86 utilizada hasta ahora como patrón y que podrían ser extendidas o revisadas en el futuro,

La redacción de la definición del metro fue modificada por la 26ª CGPM en 2018 (Resolución 1, véase p. 87)

El valor de la incertidumbre relativa aquí indicada, corresponde a tres veces la desviación típica en los datos considerados.

**decide**

1. El metro es la longitud del trayecto recorrido en el vacío por la luz durante un intervalo de tiempo de  $1/299\,792\,458$  de segundo,
2. Se deroga la definición del metro en vigor desde 1960, basada en la transición entre los niveles  $2p_{10}$  y  $5d_5$  del átomo de kriptón 86.

■ **Sobre la realización de la definición del metro** (CR, 98 y *Metrología*, 1984, 20, 25-26)

**Resolución 2**

La 17ª Conferencia General de Pesas y Medidas,

**invita** al Comité Internacional de Pesas y Medidas

- a preparar las instrucciones para la puesta en práctica de la nueva definición del metro,
- a seleccionar las radiaciones que puedan recomendarse como patrones de longitud de onda para la medición de longitud por interferometría y a preparar instrucciones para su empleo,
- a continuar los estudios iniciados para mejorar estos patrones.

Véase la Recomendación 1 (CI-2002) del CIPM sobre la revisión de la realización práctica de la definición del metro, p. 70.

**CIPM, 1984**

■ **Referente al sievert** (PV, 52, 31 y *Metrología*, 1985, 21, 90)\*

**Recomendación 1**

El Comité Internacional de Pesas y Medidas,

**considerando** la confusión que sigue existiendo en relación con la Resolución 5, aprobada por la 16ª Conferencia General de Pesas y Medidas (1979),

**decide** introducir la siguiente explicación en la publicación "El Sistema Internacional de Unidades (SI)":

La magnitud dosis equivalente  $H$  es el producto de la dosis absorbida  $D$  de radiaciones ionizantes y de dos factores sin dimensión:  $Q$  (factor de calidad) y  $N$  (producto de todos los demás factores de multiplicación), prescritos por la Comisión Internacional de Protección Radiológica:

$$H = Q \cdot N \cdot D.$$

Así, para una radiación determinada, el valor numérico de  $H$  en julios por kilogramo puede resultar diferente del valor numérico de  $D$  en julios por kilogramo, puesto que depende de  $Q$  y  $N$ . Para evitar todo riesgo de confusión entre la dosis absorbida  $D$  y la dosis equivalente  $H$ , deben emplearse los nombres especiales para las unidades correspondientes; es decir, ha de utilizarse el nombre gray en lugar de julios por kilogramo para la unidad de dosis absorbida  $D$  y el nombre sievert en lugar de julios por kilogramo para la unidad de dosis equivalente  $H$ .

\* El CIPM decidió en 2002 modificar la explicación sobre la magnitud dosis equivalente en la Publicación sobre el SI (Recomendación 2, véase p. 72).

**18ª CGPM, 1987**

■ **Ajuste previsto de las realizaciones del voltio y del ohmio** (CR, 100 y *Metrología*, 1988, 25, 115)

**Resolución 6**

La 18ª Conferencia General de Pesas y Medidas,

**considerando**

- que la uniformidad mundial y la estabilidad a largo plazo de las realizaciones nacionales de las unidades eléctricas son de una importancia fundamental para la ciencia, el

comercio y la industria, tanto desde un punto de vista técnico como desde un punto de vista económico,

- que muchos laboratorios nacionales utilizan el efecto Josephson y empiezan a utilizar el efecto Hall cuántico para conservar las realizaciones del voltio y del ohmio respectivamente, ya que proporcionan las mejores garantías de estabilidad a largo plazo,
- que, por la importancia de la coherencia entre las unidades de medida de diversas magnitudes físicas, los valores atribuidos a estas realizaciones deben estar de acuerdo, tanto como sea posible, con el SI,
- que los resultados de los experimentos recientes y actuales permitirán establecer un valor aceptable, suficientemente compatible con el SI, para el coeficiente que relaciona cada uno de estos efectos a la unidad eléctrica correspondiente,

**invita** a los laboratorios cuyos trabajos puedan contribuir a establecer el valor del cociente tensión/frecuencia en el efecto Josephson y del cociente tensión/corriente en el efecto Hall cuántico a continuar activamente estos trabajos y a comunicar sin dilación sus resultados al Comité Internacional de Pesas y Medidas, y

**encarga** al Comité Internacional de Pesas y Medidas recomendar, cuando lo juzgue posible, un valor para cada uno de estos cocientes, junto con una fecha en la que podrían ponerse en práctica simultáneamente en todos los países; estos valores deberían anunciarse al menos con un año de antelación y se adoptarían el 1 de enero de 1990.

## CIPM, 1988

- **Realización del voltio mediante el efecto Josephson** (PV, 56, 44 y *Metrologia*, 1989, 26, 69)\*

### Recomendación 1

El Comité Internacional de Pesas y Medidas,

**actuando** de acuerdo con las instrucciones dadas en la Resolución 6 de la 18ª Conferencia General de Pesas y Medidas referente a la próxima modificación de las realizaciones del voltio y del ohmio,

#### considerando

- que un estudio minucioso de los resultados de las determinaciones más recientes conduce a un valor de 483 597,9 GHz/V para la constante de Josephson,  $K_J$ , es decir, para el cociente entre la frecuencia y la diferencia de potencial correspondiente al escalón  $n = 1$  en el efecto Josephson,
- que el efecto Josephson, con este valor de  $K_J$ , puede utilizarse para establecer un patrón de referencia de fuerza electromotriz cuya incertidumbre (desviación típica), con respecto al voltio, se estima en 4 partes en  $10^7$  en valor relativo y cuya reproducibilidad es significativamente mejor,

#### recomienda

- que se adopte para la constante de Josephson,  $K_J$ , el valor convencional exacto de 483 597,9 GHz/V que se denota como  $K_{J-90}$ .
- que este nuevo valor se utilice a partir del 1 de enero de 1990, y no antes, para reemplazar los valores actualmente en uso,
- que este nuevo valor se utilice a partir de la misma fecha por todos los laboratorios que basen sus medidas de fuerza electromotriz en el efecto Josephson,
- que a partir de la citada fecha todos los demás laboratorios ajusten el valor de sus patrones de referencia para ponerlos de acuerdo con este nuevo valor,

**es de la opinión** de que en un futuro previsible no será necesario ningún cambio de este valor recomendado para la constante de Josephson, y

\* En 2018, la 26ª CGPM derogó la adopción de un valor convencional para  $K_J$  (Resolución 1, véase p. 87)

**llama la atención** de los laboratorios sobre el hecho de que el nuevo valor es superior en 3,9 GHz/V, aproximadamente 8 partes en  $10^6$  en valor relativo, al valor dado en 1972 por el Comité Consultivo de Electricidad en su Declaración E-72.

■ **Realización del ohmio mediante el efecto Hall cuántico** (PV, 56, 20 y *Metrologia*, 1989, 26, 70)\*

**Recomendación 2**

El Comité Internacional de Pesas y Medidas,

**actuando** de acuerdo con las instrucciones dadas en la Resolución 6 de la 18ª Conferencia General de Pesas y Medidas referente al próximo ajuste de las realizaciones del voltio y del ohmio,

**considerando**

- que la mayor parte de los patrones actuales de referencia de resistencia eléctrica cambian significativamente con el tiempo,
- que un patrón de referencia de laboratorio de resistencia eléctrica basado en el efecto Hall cuántico sería estable y reproducible,
- que un estudio minucioso de los resultados de las determinaciones más recientes conduce a un valor de  $25\,812,807\ \Omega$  para la constante de von Klitzing,  $R_K$ , es decir, para el cociente de la tensión Hall dividida por la corriente correspondiente a la meseta  $i = 1$  en el efecto Hall cuántico,
- que el efecto Hall cuántico, con este valor de  $R_K$ , puede utilizarse para establecer un patrón de referencia de resistencia cuya incertidumbre, a nivel de una desviación típica respecto al ohmio, se estima en 2 partes en  $10^7$  en valor relativo y cuya reproducibilidad es significativamente mejor,

**recomienda**

- que se adopte para la constante de von Klitzing,  $R_K$ , un valor convencional exacto de  $25\,812,807\ \Omega$ , denotado por  $R_{K-90}$ .
- que este valor se utilice a partir del 1 de enero de 1990, y no antes, por todos los laboratorios que basen sus medidas de resistencia eléctrica en el efecto Hall cuántico,
- que desde la misma fecha todos los demás laboratorios ajusten el valor de sus patrones de referencia para ponerlos de acuerdo con  $R_{K-90}$ ,
- que, cuando se use el efecto Hall cuántico para establecer un patrón de referencia de resistencia eléctrica, los laboratorios sigan la edición más reciente de las guías técnicas para medidas fiables de la resistencia Hall cuantizada elaboradas por el Comité Consultivo de Electricidad y publicadas por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, y

**es de la opinión** de que en un futuro previsible no será necesario ningún cambio de este valor recomendado para la constante de von Klitzing.

En su 89ª reunión en 2000, el CIPM aprobó la declaración de la 22ª reunión del CCEM referente al valor de la constante de von Klitzing.

\* En 2018, la 26ª CGPM derogó la adopción de un valor convencional para  $R_K$ . (Resolución 1, véase p. 87)

**CIPM, 1989**

■ **La Escala Internacional de Temperatura de 1990** (PV, 57, 26 y *Metrologia*, 1990, 27, 13)

**Recomendación 5**

El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), de acuerdo con la Resolución 7 de la 18ª Conferencia General de Pesas y Medidas en 1987, ha adoptado la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) en sustitución de la Escala Internacional Práctica de Temperatura de 1968 (EIPT-68).

El CIPM **destaca** que, respecto a la EIPT-68, la EIT-90

- se extiende hacia las temperaturas más bajas, hasta 0,65 K y así, también sustituye a la Escala Provisional de Temperatura de 1976 (EPT-76),

El kelvin fue redefinido por la 26ª CGPM en 2018 (Resolución 1, véase p. 87)

- está sustancialmente en mejor acuerdo con las temperaturas termodinámicas correspondientes,
- ha mejorado mucho su continuidad, precisión y reproducibilidad en todo su rango, y
- tiene subrangos y definiciones alternativas en ciertos rangos que facilitan grandemente su uso.

El CIPM **hace notar** además, que para acompañar el texto de la EIT-90 habrá otros dos documentos, el *Supplementary Information for the ITS-90* y *Techniques for Approximating the ITS-90*, que serán publicadas por el BIPM y puestas al día periódicamente.

El CIPM **recomienda**

- que la EIT-90 entre en vigor el 1 de enero de 1990, y
- que, desde esa misma fecha, la EIPT-68 y la EPT-76 sean derogadas.

## 19ª CGPM, 1991

### ■ Prefijos SI zetta, zepto, yotta y yocto (CR, 97 y *Metrologia*, 1992, 29, 3)

#### Resolución 4

La 19ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM)

**decide** añadir a la lista de prefijos SI que se usan para los múltiplos y submúltiplos de las unidades, adoptada por la 11ª CGPM, Resolución 12, párrafo 3, la 12ª CGPM, Resolución 8 y la 15ª CGPM, Resolución 10, los prefijos siguientes:

Factor por el que se multiplica la unidad	Prefijo	Símbolo
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y
$10^{-24}$	yocto	y

Los nombres zepto y zetta derivan de septo, evocando el número siete (la séptima potencia de  $10^3$ ) y la letra “z” reemplaza a la letra “s” para evitar el doble empleo de la letra “s” como símbolo.

Los nombres yocto y yotta derivan de octo, evocando el número ocho (octava potencia de  $10^3$ ); la letra “y” se añade para evitar el empleo de la letra “o” como símbolo a causa de la posible confusión con el número cero.

## 20ª CGPM, 1995

### ■ Supresión de la clase de las unidades suplementarias en el SI (CR, 121 y *Metrologia*, 1996, 33, 83)

#### Resolución 8

La 20ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

- que la 11ª Conferencia General, en 1960, en su Resolución 12 que establecía el Sistema Internacional de Unidades, SI, distinguía tres clases de unidades, las unidades básicas, las unidades derivadas y las unidades suplementarias, comprendiendo esta última el radián y el estereorradián,
- que la situación de las unidades suplementarias, en relación con las unidades básicas y las unidades derivadas, ha dado lugar a discusión,
- que el Comité Internacional de Pesas y Medidas, en 1980, constatando que la situación ambigua de las unidades suplementarias compromete la coherencia interna del SI, ha interpretado en su Recomendación 1 (CI-1980) las unidades suplementarias en el SI, como unidades derivadas sin dimensiones,

**aprobando** la interpretación dada por el Comité Internacional en 1980,



**decide**

- interpretar las unidades suplementarias en el SI, es decir, el radián y el estereorradián, como unidades derivadas adimensionales, cuyos nombres y símbolos pueden utilizarse, aunque no necesariamente, en las expresiones de otras unidades SI derivadas, cuando se considere oportuno, y
- en consecuencia, suprimir la clase de las unidades suplementarias como clase separada en el SI.

**21ª CGPM, 1999**

■ **La definición del kilogramo** (CR, 141-142 y *Metrología*, 2000, 37, 94)

**Resolución 7**

La 21ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

- la necesidad de asegurar la estabilidad a largo plazo del Sistema Internacional de Unidades (SI),
- la incertidumbre intrínseca relacionada con la estabilidad a largo plazo del prototipo que define la unidad de masa, una de las unidades básicas del SI,
- que esta incertidumbre repercute sobre la estabilidad a largo plazo de otras tres unidades básicas del SI cuya definición depende de la del kilogramo; a saber, el amperio, el mol y la candela,
- los progresos ya alcanzados en diferentes experimentos diseñados para enlazar la unidad de masa a constantes fundamentales o atómicas,
- lo deseable que es tener más de un método para efectuar este enlace,

**recomienda** que los laboratorios nacionales prosigan sus esfuerzos para mejorar los experimentos que relacionan la unidad de masa con las constantes fundamentales o atómicas y que podrían, en el futuro, servir de base para una redefinición del kilogramo.

■ **Nombre especial dado a la unidad SI mol por segundo, el katal, para expresar la actividad catalítica** (CR, 145 y *Metrología*, 2000, 37, 95)

**Resolución 12**

La 21ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM),

**considerando**

- la importancia para la salud y la seguridad humanas de facilitar el empleo de unidades SI en los campos de la medicina y de la bioquímica,
- que una unidad no SI llamada "unidad", símbolo U, igual a  $1 \mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}$ , no coherente con el Sistema Internacional de Unidades (SI), se ha estado usando ampliamente en medicina y en bioquímica desde 1964 para expresar la actividad catalítica,
- que la ausencia de un nombre especial para designar la unidad derivada coherente del SI mol por segundo ha conducido a que los resultados de las medidas clínicas se proporcionen en diferentes unidades locales,
- que el empleo de unidades SI en medicina y en química clínica se encuentra especialmente recomendado por las uniones internacionales en estos campos,
- que la Federación Internacional de Química Clínica y Laboratorios Clínicos ha solicitado al Comité Consultivo de Unidades que recomiende el nombre especial katal, símbolo kat, para la unidad SI mol por segundo,
- que aunque la proliferación de nombres especiales representa un peligro para el SI, existen excepciones para ciertos casos relacionados con la salud y la seguridad humanas (15ª Conferencia General, 1975, Resoluciones 8 y 9, 16ª Conferencia General, 1979, Resolución 5),

**observando** que el nombre katal, símbolo kat, se ha utilizado como la unidad SI mol por segundo desde hace más de treinta años, para expresar la actividad catalítica,

**decide** adoptar el nombre especial katal, símbolo kat, para la unidad SI mol por segundo, para expresar la actividad catalítica, particularmente en los campos de la medicina y de la bioquímica, y

**recomienda** que, cuando se utilice el katal, se especifique el mensurando, haciendo referencia al procedimiento de medida, el cual debe identificar la reacción indicadora.

## CIPM, 2001

### ■ “unidades SI” y “unidades del SI” (PV, 69, 38-39)

El CIPM aprobó en 2001 la siguiente propuesta del CCU referente a las “unidades SI” y a las “unidades del SI”:

“Sugerimos que los términos “unidades SI” y “unidades del SI” hagan ambos referencia a las unidades básicas y a las unidades derivadas coherentes, así como a todas las unidades obtenidas al combinarlas con los prefijos recomendados de múltiplos y submúltiplos.

Sugerimos que el término “unidades SI coherentes” se utilice cuando se desee restringir su sentido exclusivamente a las unidades básicas y a las unidades derivadas coherentes.”

## CIPM, 2002

### ■ Revisión de la realización práctica de la definición del metro (PV, 70, 90-101 y *Metrología*, 40, 103-133)

#### Recomendación 1

El Comité Internacional de Pesas y Medidas,

#### recordando

- que en 1983 la 17ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) adoptó una nueva definición del metro;
- que en el mismo año la CGPM invitó al Comité Internacional (CIPM)
  - a preparar las instrucciones para la realización práctica del metro,
  - a elegir radiaciones que pudieran recomendarse como patrones de longitud de onda para la medición de longitudes por interferometría y a preparar sus instrucciones de uso,
  - a continuar los estudios iniciados para mejorar dichos patrones y a completar o revisar en consecuencia sus instrucciones;
- que en respuesta a esta invitación el CIPM adoptó la Recomendación 1 (CI-1983) (puesta en práctica de la definición del metro) que dice
- que el metro debe realizarse por uno de los métodos siguientes:
  - (a) mediante la longitud  $l$  del trayecto recorrido en el vacío por una onda electromagnética plana durante el intervalo  $t$ , esta longitud se obtiene a partir de la medida del intervalo  $t$ , empleando la relación  $l = c_0 \cdot t$  y el valor de la velocidad de la luz en el vacío  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s,
  - (b) mediante la longitud de onda en el vacío  $\lambda$  de una onda electromagnética plana de frecuencia  $f$ , esta longitud de onda se obtiene a partir de la medida de la frecuencia  $f$ , empleando la relación  $\lambda = c_0 / f$  y el valor de la velocidad de la luz en el vacío  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s,
  - (c) mediante una de las radiaciones de la lista que sigue, cuya longitud de onda en el vacío establecida o cuya frecuencia establecida pueden emplearse con la incertidumbre indicada, siempre que se observen las condiciones especificadas y las buenas prácticas aceptadas;

- que en todos los casos se apliquen las correcciones necesarias para tener en cuenta las condiciones reales como difracción, gravedad o imperfección del vacío;
- que en el contexto de la relatividad general, el metro se considere como unidad de longitud propia. Su definición es válida por tanto sólo en una zona especial suficientemente pequeña, para la cual los efectos de la no uniformidad del campo gravitatorio puedan despreciarse (obsérvese que, en la superficie de la Tierra, este efecto es del orden de 1 parte en  $10^{16}$  por metro de altitud en valor relativo). En ese caso, los únicos efectos a considerar son los de la relatividad especial. Los métodos locales recomendados en (b) y (c) para realizar el metro, proporcionan el metro propio, pero no necesariamente el método indicado en (a). El método (a) debería pues quedar restringido a longitudes / suficientemente cortas para que los efectos predichos por la relatividad general sean despreciables en relación con las incertidumbres de realización. Para consejos sobre la interpretación de las medidas cuando no sea el caso, véase el informe del Grupo de Trabajo del Comité Consultivo de Tiempo y Frecuencia (CCTF) sobre la Aplicación de la Relatividad General a la Metrología (Aplicación de la Relatividad General a la Metrología, *Metrología*, 1997, **34**, 261-290);
- que el CIPM ya había recomendado una lista de radiaciones a este efecto;

**recordando** también que en 1992 y en 1997 el CIPM revisó la realización práctica de la definición del metro;

**considerando**

- que la ciencia y la tecnología continúan exigiendo una mayor exactitud en la realización del metro;
- que, desde 1997, los trabajos desarrollados en los laboratorios nacionales, en el BIPM y en otros laboratorios han permitido identificar nuevas radiaciones y métodos para su realización que conducen a menores incertidumbres;
- que cada vez se emplean más las frecuencias ópticas en las actividades relacionadas con el tiempo y que se continúa ampliando el campo de aplicación de las radiaciones recomendadas de la puesta en práctica para cubrir no sólo la metrología dimensional y la realización del metro, sino también la espectroscopía de alta resolución, la física atómica y molecular, las constantes fundamentales y las telecomunicaciones;
- que se dispone ahora de un cierto número de nuevos valores de frecuencias, con incertidumbres reducidas, para patrones de radiación de átomos y de iones enriados muy estables, ya mencionados en la lista de radiaciones recomendadas; que se han medido recientemente las frecuencias de las radiaciones de varios átomos y especies iónicas enriadas, y que se han determinado nuevos valores mejorados, con incertidumbres significativamente reducidas, de un cierto número de patrones de frecuencias ópticas basados en células de gas, incluyendo el rango de longitudes de onda de interés para las telecomunicaciones ópticas;
- que las nuevas técnicas de peines de frecuencias de femtosegundos presentan un manifiesto interés para relacionar la frecuencia de los patrones de frecuencia óptica de gran estabilidad con la de los patrones de frecuencia que realizan el segundo SI, que estas técnicas suponen un método de medida conveniente para proporcionar trazabilidad al SI y que la tecnología de peines de frecuencia puede proporcionar tanto fuentes de frecuencia como técnicas de medida;

**reconoce** las técnicas de peines de frecuencias como oportunas y apropiadas y recomienda continuar investigando para estudiar sus posibilidades;

**acoge favorablemente** las validaciones de las técnicas de peines de frecuencias que se están efectuando por comparación con otras técnicas de cadenas de frecuencias;

**anima** a los laboratorios nacionales de metrología y a otros laboratorios a continuar los estudios de las técnicas de peines de frecuencias al más alto nivel posible de exactitud y a intentar simplificarlas para difundir su aplicación,

**recomienda**

- que la lista de radiaciones recomendadas establecida por el CIPM en 1997 (Recomendación 1 (CI-1997)) se sustituya por la lista de radiaciones que sigue\*, la cual incluye
  - valores actualizados de la frecuencia del átomo de Ca enfriado, del átomo de H y del ión confinado Sr<sup>+</sup>,
  - valores de frecuencia de nuevas especies iónicas enfriadas, incluyendo al ión Hg<sup>+</sup> confinado, al ión confinado In<sup>+</sup> y al ión confinado Yb<sup>+</sup>,
  - valores actualizados de la frecuencia de láseres estabilizados de Rb, láseres de Nd:YAG y de He-Ne, ambos estabilizados con I<sub>2</sub>, láseres de He-Ne estabilizados con metano y láseres de CO<sub>2</sub> estabilizados con OsO<sub>4</sub> en 10 μm,
  - valores de la frecuencia de patrones importantes para comunicaciones ópticas, que incluyen los láseres estabilizados de Rb y C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>.

\* La lista de radiaciones recomendadas, Recomendación 1 (CI-2002), se encuentra en PV, **70**, 197-204 y en *Metrologia*, 2003, **40**, 104-115.

■ **Dosis Equivalente (PV, 70, 102)**

**Recomendación 2**

Véase también *J. Radiol. Prot.*, 2005, **25**, 97-100.

El Comité Internacional de Pesas y Medidas,

**considerando** que

- la definición actual de la unidad SI de dosis equivalente (sievert) comprende un factor “*N*” (producto de todos los demás factores multiplicativos) prescrito por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, en sus siglas en inglés),
- la ICRP y la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU, en sus siglas en inglés) han decidido suprimir este factor *N* que no se considera ya necesario,
- la definición actual de la dosis equivalente *H* en el SI, que incluye el factor *N*, induce a confusión,

**decide** modificar la explicación proporcionada en la Publicación sobre “El Sistema Internacional de Unidades (SI)” de la forma siguiente:

La magnitud dosis equivalente *H* es el producto de la dosis absorbida *D* de radiaciones ionizantes y del factor adimensional *Q* (factor de calidad) definido en función de la transferencia lineal de energía por la ICRU:

$$H = Q D.$$

Así, para una radiación dada, el valor numérico de *H* en julios por kilogramo puede ser diferente del valor *D* en julios por kilogramo, dado que es función del valor de *Q*.

El Comité **decide** pues mantener la última frase de la explicación en la forma siguiente:

A fin de evitar todo riesgo de confusión entre la dosis absorbida *D* y la dosis equivalente *H*, deben emplearse los nombres especiales para las unidades correspondientes; es decir, ha de utilizarse el nombre gray en lugar de julio por kilogramo para la unidad de dosis absorbida *D* y el nombre sievert en lugar de julio por kilogramo para la unidad de dosis equivalente *H*.

**CIPM, 2003**

■ **Revisión de la lista de radiaciones recomendadas para la realización práctica de la definición del metro (PV, 71, 70 y *Metrologia*, 2004, 41, 99-100)**

**Recomendación 1**

El Comité Internacional de Pesas y Medidas,

**considerando** que

- se dispone recientemente de mejores valores de las frecuencias de las radiaciones de ciertos patrones de iones enfriados de gran estabilidad, ya documentados en la lista de radiaciones recomendadas;

- se han determinado mejores valores de frecuencias de patrones de frecuencia óptica en el infrarrojo, basados en células de gas, en la región de las telecomunicaciones ópticas, valores ya publicados en la lista de radiaciones recomendadas;
- se han efectuado recientemente y por primera vez medidas de frecuencia mediante peines de frecuencias de femtosegundos de ciertos patrones basados en células de yodo, que figuran en la lista complementaria de radiaciones recomendadas, medidas que conducen a una reducción considerable de la incertidumbre;

**propone** que la lista de *radiaciones recomendadas* se revise para incluir:

- los valores actualizados de la frecuencia de la transición cuadripolar del ión confinado  $^{88}\text{Sr}^+$  y la transición octopolar del ión confinado  $^{171}\text{Yb}^+$ ;
- el valor actualizado de la frecuencia del patrón estabilizado con  $\text{C}_2\text{H}_2$  en  $1,54 \mu\text{m}$ ;
- los valores actualizados de los patrones estabilizados con  $\text{I}_2$  en  $543 \text{ nm}$  y  $515 \text{ nm}$ .

## 22ª CGPM, 2003

### ■ Símbolo del separador decimal (CR, 169 y *Metrologia*, 2004, 41, 104)

#### Resolución 10

La 22ª Conferencia General,

**considerando** que

- uno de los objetivos principales del Sistema Internacional de Unidades (SI) es permitir expresar el valor de las magnitudes de una forma fácilmente comprensible en todo el mundo,
- el valor de una magnitud se expresa normalmente por un número seguido de una unidad,
- a menudo el número utilizado para expresar el valor de una magnitud contiene múltiples cifras, con una parte entera y una parte decimal,
- la 9ª Conferencia General en su Resolución 7 (1948) había establecido que “En los números, la coma (uso francés) o el punto (uso inglés) se utilicen únicamente para separar la parte entera de los números de su parte decimal”,
- siguiendo la decisión del Comité Internacional en su 86ª reunión (1997), la Oficina Internacional de Pesas y Medidas utiliza actualmente el punto (en la línea) como separador decimal en todas las versiones en inglés de sus publicaciones, incluido el texto inglés de la Publicación sobre el SI (la referencia internacional definitiva sobre el SI), mientras que continúa empleando la coma (en la línea) como separador decimal en todas sus publicaciones en francés,
- sin embargo, ciertas organizaciones internacionales emplean la coma en la línea como separador decimal en sus documentos en inglés,
- además, algunas organizaciones internacionales, incluyendo algunas organizaciones internacionales de normalización, especifican que el separador decimal debe ser la coma en la línea en todos los idiomas,
- la recomendación de usar la coma en la línea como separador decimal está, en muchos idiomas, en conflicto con la costumbre de utilizar el punto en la línea como separador decimal,
- para algunos idiomas que son maternos para más de un país, se usa el punto en la línea o la coma en la línea como separador decimal dependiendo del país, mientras que otros países con más de un idioma materno usan el punto en la línea o la coma en la línea según el idioma,

**declara** que el símbolo del separador decimal podrá ser el punto en la línea o la coma en la línea,

**reafirma** que “Para facilitar la lectura, los números pueden separarse en grupos de tres cifras, no insertando nunca puntos ni comas en los espacios entre grupos”, como estableció la Resolución 7 de la 9ª CGPM de 1948.

## CIPM, 2005

### ■ Aclaración sobre la definición del kelvin, unidad de temperatura termodinámica (PV, 73, 119 y *Metrología*, 2006, 43, 177-178)\*

\*El kelvin fue redefinido por la 26ª CGPM en 2018 (Resolución 1, véase p. 87)

#### Recomendación 2

El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM),

#### considerando

- que el kelvin, unidad de temperatura termodinámica, se define como la fracción  $1/273,16$  de la temperatura termodinámica del punto triple del agua,
- que la temperatura del punto triple del agua depende de las proporciones relativas de los isótopos de hidrógeno y de oxígeno presentes en la muestra de agua utilizada,
- que este efecto es ahora una de las mayores fuentes de la variabilidad observada entre las diferentes realizaciones del punto triple del agua,

#### decide

- que la definición del kelvin se refiera a un agua de composición isotópica específica,
- que dicha composición isotópica del agua sea la siguiente:

0,000 155 76 mol de  $^2\text{H}$  por mol de  $^1\text{H}$ ,  
 0,000 379 9 mol de  $^{17}\text{O}$  por mol de  $^{16}\text{O}$ , y  
 0,002 005 2 mol de  $^{18}\text{O}$  por mol de  $^{16}\text{O}$ ,

que es la composición del material de referencia de la Agencia Internacional de la Energía Atómica "Patrón de Viena de Agua Oceánica Media (VSMOW, en sus siglas en inglés)", recomendada por la UIPAC en "Atomic Weights of the Elements: Review 2000".

- que esta composición debe declararse en una nota unida a la definición del kelvin en la Publicación del SI de la manera siguiente:  
 "Esta definición se refiere al agua de composición isotópica definida exactamente por las siguientes relaciones de cantidad de sustancia: 0,000 155 76 mol de  $^2\text{H}$  por mol de  $^1\text{H}$ , 0,000 379 9 mol de  $^{17}\text{O}$  por mol de  $^{16}\text{O}$  y 0,002 005 2 mol de  $^{18}\text{O}$  por mol de  $^{16}\text{O}$ ".

### ■ Revisión de la lista de radiaciones recomendadas para la *realización práctica de la definición del metro* (PV, 73,120 y *Metrología*, 2006, 43, 178)

#### Recomendación 3

El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM),

#### considerando que

- se dispone desde hace poco tiempo de mejores valores de frecuencias de radiación de ciertos patrones de gran estabilidad de iones y de átomos enfriados, ya publicados en la lista de radiaciones recomendadas;
- se han determinado mejores valores de frecuencia de patrones de frecuencia óptica en el infrarrojo, basados en celdas de gas, en la región de las telecomunicaciones ópticas, ya publicados en la lista de radiaciones recomendadas;
- se han determinado mejores valores de las frecuencias de ciertos patrones basados en células de yodo, valores ya publicados en la lista complementaria de fuentes recomendadas;
- por primera vez se han efectuado mediciones de la frecuencia de nuevos átomos enfriados en la región del infrarrojo cercano y de moléculas en la región de las telecomunicaciones ópticas, mediante peines de frecuencias basados en láseres de femtosegundos;

**decide** que la lista de *radiaciones recomendadas* sea revisada para incluir:

- los valores actualizados de las frecuencias de las transiciones cuadrupolares del ión confinado  $^{88}\text{Sr}^+$ , del ión confinado  $^{199}\text{Hg}^+$  y del ión confinado  $^{171}\text{Yb}^+$ ;
- el valor actualizado de la frecuencia de la transición del átomo de Ca;

- el valor actualizado de la frecuencia del patrón estabilizado con C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, a 1,54 μm;
- el valor actualizado de la frecuencia del patrón estabilizado con iodo, a 515 nm;
- la adición de la transición del átomo de <sup>87</sup>Sr a 698 nm;
- la adición de la transición bifotónica del átomo de <sup>87</sup>Rb a 760 nm;
- la adición de la banda (ν<sub>1</sub>+ν<sub>3</sub>) del <sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> y de las bandas (ν<sub>1</sub>+ν<sub>3</sub>) y (ν<sub>1</sub>+ν<sub>3</sub>+ν<sub>4</sub>+ν<sub>5</sub>) del <sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, a 1,54 μm.

## CIPM, 2006

- **Respecto a las realizaciones secundarias del segundo** (PV, 74, 123 y *Metrologia*, 2007, 44, 97)

### Recomendación 1

El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM),

considerando que

- Se establecerá una lista común de “Valores de frecuencias patrón recomendados para aplicaciones que incluyen la realización práctica del metro y las realizaciones secundarias del segundo”,
- El Grupo de Trabajo Conjunto CCL/CCTF sobre la realización práctica de la Definición del Metro y Realizaciones Secundarias del Segundo, en su reunión en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) en septiembre de 2005, discutió posibles candidatos para su inclusión en la lista de realizaciones secundarias del segundo,
- el Grupo de Trabajo Conjunto CCL/CCTF revisó y actualizó los valores para las frecuencias de transición de los iones Hg, Sr, Yb y del átomo neutro Sr en su sesión de septiembre de 2006,
- El CCTF en su Recomendación CCTF 1 (2004) ya recomendaba la frecuencia de la transición cuántica hiperfina del estado fundamental no perturbado del <sup>87</sup>Rb como realización secundaria del segundo;

**recomienda** utilizar las siguientes frecuencias de transición como realizaciones secundarias del segundo, incluyéndolas en la nueva lista de “Valores de frecuencias patrón recomendados para aplicaciones que incluyen la realización práctica del metro y las realizaciones secundarias del segundo”

- la transición cuántica hiperfina no perturbada del estado fundamental del <sup>87</sup>Rb, con una frecuencia  $\nu^{87} = 6\,934\,682\,610,904\,324$  Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $3 \times 10^{-15}$ ,
- la transición óptica no perturbada  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$  del ion <sup>88</sup>Sr<sup>+</sup>, con una frecuencia  $\nu^{88}\text{Sr}^+ = 444\,779\,044\,095\,484$  Hz y una incertidumbre relativa de  $7 \times 10^{-15}$ ,
- la transición óptica no perturbada  $5d^{10}\ 6s\ ^2S_{1/2} (F=0) - 5d^9\ 6s^2\ ^2D_{5/2} (F=2)$  del ion <sup>199</sup>Hg<sup>+</sup>, con una frecuencia  $\nu^{199}\text{Hg}^+ = 1\,064\,721\,609\,899\,145$  Hz y una incertidumbre típica relativa de  $3 \times 10^{-15}$ ,
- la transición óptica no perturbada  $6s\ ^2S_{1/2} (F=0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F=2)$  del ion <sup>171</sup>Yb<sup>+</sup>, con una frecuencia  $\nu^{171}\text{Yb}^+ = 688\,358\,979\,309\,308$  Hz y una incertidumbre típica relativa de  $9 \times 10^{-15}$ ,
- la transición óptica no perturbada  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$  del átomo neutro <sup>87</sup>Sr, con una frecuencia  $\nu^{87}\text{Sr} = 429\,228\,004\,229\,877$  Hz y una incertidumbre típica relativa de  $1,5 \times 10^{-14}$ .

## CIPM, 2007

- **Revisión de la lista de radiaciones recomendadas para la realización práctica de la definición del metro** (PV, 75, 85)

### Recomendación 1

El Comité Internacional de Pesas y Medidas,

**considerando que:**

- se han determinado valores mejorados de frecuencia de moléculas en la región de telecomunicaciones ópticas, ya publicados en la lista de frecuencias patrón, mediante mediciones de frecuencia basadas en peines de femtosegundos;
- por primera vez se han determinado frecuencias de moléculas en la región de telecomunicaciones ópticas mediante mediciones de frecuencia basadas en peines de femtosegundos;
- por primera vez se han determinado las frecuencias cercanas a 532 nm de ciertos patrones de frecuencia óptica con absorción mediante célula de yodo, mediante mediciones de frecuencia basadas en peines de femtosegundos;

**propone que la lista de patrones de frecuencia sea revisada para incluir:**

- una lista actualizada de valores de frecuencia para la banda ( $\nu_1 + \nu_3$ ) del  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ , a 1,54  $\mu\text{m}$ ;
- la adición de valores de frecuencia para la banda ( $2\nu_1$ ) del  $^{12}\text{C}_2\text{HD}$ , a 1,54  $\mu\text{m}$ ;
- la adición de valores de frecuencia para las componentes hiperfinas de las transiciones P(142) 37-0, R(121) 35-0 y R(85) 33-0 a 532 nm del yodo.

**23ª CGPM, 2007****■ Sobre la revisión de la realización práctica de la definición del metro y el desarrollo de nuevos patrones de frecuencia óptica (CR, 171)****Resolución 9**

La 23ª Conferencia General,

**considerando que:**

- ha habido rápidas e importantes mejoras en las prestaciones de los patrones de frecuencia óptica,
- ahora se usan de manera rutinaria los peines de femtosegundos para relacionar las radiaciones ópticas y las de microondas en una única ubicación,
- los Institutos Nacionales de Metrología (INM) están trabajando en técnicas de comparación de frecuencias ópticas en distancias cortas,
- para poder comparar los patrones de frecuencia óptica deben desarrollarse a nivel internacional técnicas de comparación remota,

**da la bienvenida a**

- las actividades del Grupo de Trabajo Conjunto entre el Comité Consultivo de Longitud y el Comité Consultivo de Tiempo y Frecuencia, de revisión de las frecuencias de las realizaciones ópticas del segundo,
- las adiciones a la realización práctica de la definición del metro y a la lista de radiaciones recomendadas realizada por el Comité Internacional en 2002, 2003, 2005, 2006 y 2007,
- la iniciativa de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) para plantear la cuestión de cómo comparar patrones de frecuencia óptica,

**recomienda que:**

- los INM comprometan recursos para el desarrollo de patrones de frecuencia óptica y su comparación,
- el BIPM trabaje en la coordinación de un proyecto internacional con la participación de los INM, orientado al estudio de las técnicas que podrían utilizarse para comparar patrones de frecuencia óptica.

**■ Aclaración sobre la definición del kelvin, unidad de temperatura termodinámica (CR, 172)****Resolución 10**

La 23ª Conferencia General,

El kelvin fue redefinido por la 26ª CGPM en 2018 (Resolución 1, véase p. 87)



**considerando**

- que el kelvin, unidad de temperatura termodinámica, se define como la fracción  $1/273,16$  de la temperatura termodinámica del punto triple del agua,
- que la temperatura del punto triple depende de la cantidad relativa de isótopos de hidrógeno y oxígeno presentes en la muestra de agua utilizada,
- que este efecto es ahora una de las principales fuentes de la variabilidad observada entre diferentes realizaciones del punto triple del agua,

**toma nota y da la bienvenida** a la decisión del Comité Internacional de Pesas y Medidas de octubre de 2005, sobre la propuesta del Comité Consultivo de Termometría, de que

- la definición del kelvin se refiera a agua de una composición isotópica específica,
- esta composición sea:

0,000 155 76 mol de  $^2\text{H}$  por mol de  $^1\text{H}$ ,

0,000 379 9 mol de  $^{17}\text{O}$  por mol de  $^{16}\text{O}$ , y

0,002 005 2 mol de  $^{18}\text{O}$  por mol de  $^{16}\text{O}$ ,

que es la composición del material de referencia de la Agencia Internacional de la Energía Atómica "Patrón de Viena de Agua Oceánica Media (VSMOW, en sus siglas en inglés)", recomendada por la UIPAC en "Atomic Weights of the Elements: Review 2000".

- esta composición debe declararse en una nota unida a la definición del kelvin en la Publicación del SI de la manera siguiente:

"Esta definición se refiere al agua de composición isotópica definida exactamente por las siguientes relaciones de cantidad de sustancia: 0,000 155 76 mol de  $^2\text{H}$  por mol de  $^1\text{H}$ , 0,000 379 9 mol de  $^{17}\text{O}$  por mol de  $^{16}\text{O}$  y 0,002 005 2 mol de  $^{18}\text{O}$  por mol de  $^{16}\text{O}$ "

■ **Sobre la posible redefinición de ciertas unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades (SI) (CR, 174)**

**Resolución 12**

La 23ª Conferencia General,

**considerando**

- que durante muchos años los Institutos Nacionales de Metrología (INM) y la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) han realizado esfuerzos considerables para avanzar y mejorar el Sistema Internacional de Unidades (SI) mediante ampliación de las fronteras de la metrología, a fin de que las unidades básicas del SI puedan definirse mediante invariantes de la naturaleza – las constantes físicas fundamentales,
- que de las siete unidades básicas del SI, solo el kilogramo se define aún mediante un artefacto material: el prototipo internacional del kilogramo (2ª CGPM, 1889, 3ª CGPM, 1901) y que las definiciones del amperio, mol y candela dependen del kilogramo,
- la Resolución 7 de la 21ª Conferencia General (1999) que recomendó que "los laboratorios nacionales continúen con sus esfuerzos para refinar los experimentos que vinculan la unidad de masa a las constantes fundamentales o atómicas, con vistas a una futura redefinición del kilogramo",
- los muchos avances realizados en los últimos años, en experimentos que relacionan la masa del prototipo internacional con la constante de Planck  $h$  o la constante de Avogadro  $N_A$ ,
- las iniciativas para determinar el valor de una serie de constantes fundamentales relevantes, incluido el trabajo para volver a determinar la constante de Boltzmann  $k_B$ ,
- que como resultado de los avances recientes, hay implicaciones significativas y beneficios potenciales para las redefiniciones del kilogramo, el amperio, el kelvin y el mol,

La 26ª CGPM en 2018 aprobó finalmente la revisión del SI (Resolución 1, véase p. 87)

- la Recomendación 1 del Comité Internacional (C1-2005) en su reunión de octubre de 2005, y varias Recomendaciones de los Comités Consultivos sobre el tema de una redefinición de una o más de las unidades básicas del SI,

**reconociendo**

- que cualquier cambio en las definiciones de unidades del SI debe estar limitado por la autoconsistencia,
- que es deseable que las definiciones de las unidades básicas se entiendan fácilmente,
- el trabajo del Comité Internacional y los Comités Consultivos,
- la necesidad de vigilar los resultados de experimentos relevantes,
- la importancia de solicitar comentarios y contribuciones a las comunidades científicas y a los usuarios en general, y
- la decisión del Comité Internacional en 2005 de aprobar, en principio, la preparación de nuevas definiciones del kilogramo, amperio, kelvin y la posibilidad de redefinir el mol,

**recomienda** que los Institutos Nacionales de Metrología y el BIPM

- prosigan con los experimentos pertinentes para que el Comité Internacional pueda llegar a un punto de vista sobre si es posible redefinir el kilogramo, el amperio, el kelvin y el mol utilizando valores fijos de las constantes fundamentales en ocasión de la 24ª Conferencia General (2011),
- trabajen, junto con el Comité Internacional, sus Comités Consultivos y los grupos de trabajo apropiados, en formas prácticas de realizar cualquier nueva definición basada en valores fijos de las constantes fundamentales, preparen una realización práctica para cada una de ellas y consideren la forma más apropiada para explicar las nuevas definiciones a los usuarios,
- inicien campañas de sensibilización para alertar a las comunidades de usuarios sobre la posibilidad de las redefiniciones y que las implicaciones técnicas y legislativas de dichas redefiniciones y sus realizaciones prácticas se discutan y consideren cuidadosamente,

**y solicita** al Comité Internacional que informe sobre estos temas en la 24ª Conferencia General en 2011 y que realice los preparativos que se consideren necesarios para que, si los resultados de los experimentos son satisfactorios y se satisfacen las necesidades de los usuarios, puedan incluirse propuestas formales para cambios en las definiciones del kilogramo, amperio, kelvin y mol en la 24ª Conferencia General.

## CIPM, 2009

### ■ Actualización de la lista de frecuencias patrón (PV, 77, 105)

#### Recommendation 2

El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM),

**considerando** que

- se ha establecido una lista común de “Valores recomendados de frecuencias patrón para aplicaciones que incluyen la **realización práctica** del metro y realizaciones secundarias del segundo”;
- el Grupo de Trabajo de Patrones de Frecuencia CCL-CCTF (FSWG) ha revisado varios candidatos prometedores para su inclusión en la lista,

**recomienda**

que se incluyan o actualicen en la lista de frecuencias patrón recomendadas las siguientes frecuencias de transición:

- la transición óptica no perturbada  $5s^2 \ ^1S_0 - 5s \ 5p \ ^3P_0$  del átomo neutro  $^{87}\text{Sr}$ , con una frecuencia  $f = 429\ 228\ 004\ 229\ 873,7$  Hz y una incertidumbre típica relativa de  $1 \times 10^{-15}$  (esta radiación ya fue recomendada por el CIPM como realización secundaria del segundo);

- la transición óptica no perturbada  $5s^2 \ ^1S_0 - 5s \ 5p \ ^3P_0$  del átomo neutro  $^{88}\text{Sr}$  con una frecuencia  $f = 429\ 228\ 066\ 418\ 012$  Hz y una incertidumbre típica relativa de  $1 \times 10^{-14}$ ;
- la transición óptica no perturbada  $4s \ ^2S_{1/2} - 3d \ ^2D_{5/2}$  del ion  $^{40}\text{Ca}^+$  con una frecuencia  $f = 411\ 042\ 129\ 776\ 393$  Hz y una incertidumbre típica relativa de  $4 \times 10^{-14}$ ;
- la transición óptica no perturbada  $^2S_{1/2} (F = 0) - ^2F_{7/2} (F = 3, m_F = 0)$  del ion  $^{171}\text{Yb}^+$  con una frecuencia  $f = 642\ 121\ 496\ 772\ 657$  Hz y una incertidumbre típica relativa de  $6 \times 10^{-14}$ ;
- la transición óptica no perturbada  $6s^2 \ ^1S_0 (F = 1/2) - 6s \ 6p \ ^3P_0 (F = 1/2)$  del átomo neutro  $^{171}\text{Yb}$  con una frecuencia  $f = 518\ 295\ 836\ 590\ 864$  Hz y una incertidumbre típica relativa de  $1,6 \times 10^{-13}$ .

## 24ª CGPM, 2011

### ■ Sobre la posible futura revisión del Sistema Internacional de Unidades, el SI (CR, 212)

La 26ª CGPM en 2018 aprobó finalmente la revisión del SI (Resolución 1, véase p. 87)

#### Resolución 1

La Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), en su 24ª reunión, **considerando**

- el consenso internacional sobre la importancia, el valor y los beneficios potenciales de una redefinición de varias unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI),
- que los institutos nacionales de metrología (INM), así como la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), han realizado legítimamente un esfuerzo significativo durante las últimas décadas para hacer avanzar el Sistema Internacional de Unidades (SI), extendiendo las fronteras de la metrología para que las unidades básicas del SI puedan definirse en términos de invariantes de la naturaleza – constantes físicas o propiedades fundamentales de los átomos.
- que un ejemplo destacado del éxito de tales esfuerzos es la definición actual de la unidad de longitud del SI, el metro (17ª reunión de la CGPM, 1983, Resolución 1), que lo vincula a un valor exacto de la velocidad de la luz en vacío  $c$ , a saber, 299 792 458 metros por segundo,
- que de las siete unidades básicas del SI, solo el kilogramo se define aún mediante un artefacto material, a saber, el prototipo internacional del kilogramo (1ª reunión de la CGPM, 1889, 3ª reunión de la CGPM, 1901), y que las definiciones de amperio, mol y candela dependen del kilogramo,
- que aunque el prototipo internacional ha servido bien a la ciencia y la tecnología desde que fue aprobado por la CGPM en su 1ª reunión en 1889, tiene varias limitaciones importantes, una de las más significativas que su masa no está explícitamente vinculada a un invariante de la naturaleza y en consecuencia su estabilidad a largo plazo no está asegurada,
- que la CGPM en su 21ª reunión en 1999 adoptó la Resolución 7 en la que recomendó que "los laboratorios nacionales continúen sus esfuerzos para refinar los experimentos que vinculan la unidad de masa a las constantes fundamentales o atómicas, con vistas a una futura redefinición del kilogramo",
- que en los últimos años se han producido muchos avances para relacionar la masa del prototipo internacional con la constante de Planck  $h$ , mediante métodos que incluyen balanzas de potencia y mediciones de la masa de un átomo de silicio,
- que las incertidumbres de todas las unidades eléctricas SI realizadas directa o indirectamente por medio de los efectos Josephson y Hall cuántico, junto con los valores SI de las constantes  $K_J$  y  $R_K$  de Josephson y von Klitzing, podrían reducirse significativamente si el kilogramo se redefiniera vinculándolo a un valor numérico exacto de  $h$ , y si el amperio se redefiniera vinculándolo a un valor numérico exacto de la carga elemental  $e$ ,

- que el kelvin se define actualmente mediante una propiedad intrínseca del agua que, si bien es un invariante de la naturaleza, en la práctica depende de la pureza y la composición isotópica del agua utilizada,
- que es posible redefinir el kelvin vinculándolo a un valor numérico exacto de la constante de Boltzmann  $k$ ,
- que también es posible redefinir el mol vinculándolo a un valor numérico exacto de la constante de Avogadro  $N_A$  y, por lo tanto, que ya no dependa de la definición del kilogramo, incluso cuando el kilogramo se defina vinculado a un valor numérico exacto de  $h$ , enfatizando así la distinción entre cantidad de sustancia y masa,
- que las incertidumbres de los valores de muchas otras constantes fundamentales importantes y los factores de conversión de energía se eliminarían o reducirían considerablemente si  $h$ ,  $e$ ,  $k$  y  $N_A$  tuvieran valores numéricos exactos cuando se expresaran en unidades SI,
- que la Conferencia General, en su 23ª reunión en 2007, adoptó la Resolución 12 en la que describía el trabajo que deberían realizar los INM, el BIPM y el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) junto con sus Comités Consultivos (CC) para que se pudieran adoptar nuevas definiciones del kilogramo, amperio, kelvin y mol basadas en constantes fundamentales,
- que, aunque este trabajo ha progresado bien, no se han cumplido todos los requisitos establecidos en la Resolución 12 adoptada por la Conferencia General en su 23ª reunión en 2007, por lo que el Comité Internacional de Pesas y Medidas aún no está listo para hacer una propuesta final,
- que, sin embargo, ya puede darse ahora una explicación clara y detallada de lo que probablemente se propondrá,

**toma nota** de la intención del Comité Internacional de Pesas y Medidas de proponer una revisión del SI como sigue:

- el Sistema Internacional de Unidades, el SI, será el sistema de unidades en el que:
  - la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental del átomo de cesio  $133 \Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$  es exactamente 9 192 631 770 hercios,
  - la velocidad de la luz en el vacío  $c$  es exactamente 299 792 458 metros por segundo,
  - la constante de Planck  $h$  es exactamente  $6,626\ 06X \times 10^{-34}$  juliosegundo\*,
  - la carga elemental  $e$  es exactamente  $1,602\ 17X \times 10^{-19}$  culombios,
  - la constante de Boltzmann  $k$  es exactamente  $1,380\ 6X \times 10^{-23}$  julios por kelvin
  - la constante de Avogadro  $N_A$  es exactamente  $6,022\ 14X \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
  - la eficacia luminosa  $K_{\text{cd}}$  de la radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz es exactamente 683 lumen por vatio

\* La X que aparece en la expresión de las constantes indica que el dígito o dígitos que representa era/eran desconocido(s) en el momento de la resolución

donde

(i) las unidades hercio, julio, culombio, lumen y vatio, con los símbolos Hz, J, C, lm y W, respectivamente, están relacionadas con las unidades segundo, metro, kilogramo, amperio, kelvin, mol y candela, con símbolos s, m, kg, A, K, mol y cd, respectivamente, de acuerdo con  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{s A}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$  y  $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$ ,

(ii) el símbolo X en este borrador de resolución representa uno o más dígitos adicionales que se agregarán a los valores numéricos de  $h$ ,  $e$ ,  $k$  y  $N_A$ , usando valores basados en el ajuste más reciente de CODATA,

de lo cual se deduce que el SI continuará teniendo el conjunto actual de siete unidades básicas, en particular

- el kilogramo continuará siendo la unidad de masa, pero su magnitud se establecerá fijando el valor numérico de la constante de Planck como

exactamente igual a  $6,626\ 06 \times 10^{-34}$  cuando se expresa en la unidad SI  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$ , que es igual a J s,

- el amperio continuará siendo la unidad de corriente eléctrica, pero su magnitud se establecerá fijando el valor numérico de la carga elemental como exactamente igual a  $1,602\ 17 \times 10^{-19}$  cuando se expresa en la unidad SI A s, que es igual a C,
- el kelvin continuará siendo la unidad de temperatura termodinámica, pero su magnitud se establecerá fijando el valor numérico de la constante de Boltzmann como exactamente igual a  $1,380\ 6 \times 10^{-23}$  cuando se expresa en la unidad SI  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$ , que es igual a  $\text{J K}^{-1}$ ,
- el mol continuará siendo la unidad de cantidad de sustancia de una entidad elemental específica, que puede ser un átomo, molécula, ion, electrón, o cualquier otra partícula o grupo específico de tales partículas, pero su magnitud se establecerá fijando el valor numérico de la constante de Avogadro como exactamente igual a  $6,022\ 14 \times 10^{23}$  cuando se expresa en la unidad SI  $\text{mol}^{-1}$ .

La Conferencia General de Pesas y Medidas

**observa además** que dado que

- las nuevas definiciones de kilogramo, amperio, kelvin y mol están destinadas a ser del tipo de constante explícita; es decir, definiciones en las que la unidad se define indirectamente al especificar explícitamente un valor exacto para una constante fundamental bien reconocida,
- la definición existente del metro está vinculada a un valor exacto de la velocidad de la luz en el vacío, que también es una constante fundamental bien reconocida,
- la definición existente del segundo está vinculada a un valor exacto de una propiedad bien definida del átomo de cesio, que también es un invariante de la naturaleza,
- aunque la definición existente de la candela no está vinculada a una constante fundamental, puede considerarse que está vinculada a un valor exacto de un invariante de la naturaleza,
- mejoraría la comprensión del Sistema Internacional si todas sus unidades básicas tuvieran una redacción similar,

El Comité Internacional de Pesas y Medidas propondrá también

la reformulación de las definiciones existentes del segundo, metro y candela en formas completamente equivalentes, que podrían ser las siguientes:

- el segundo, símbolo s, es la unidad de tiempo; su magnitud queda establecida al fijar el valor numérico de la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental del átomo de cesio 133, en reposo y a una temperatura de 0 K, como exactamente igual a 9 192 631 770 cuando se expresa en la unidad SI  $\text{s}^{-1}$ , que es igual a Hz,
- el metro, símbolo m, es la unidad de longitud; su magnitud queda establecida al fijar el valor numérico de la velocidad de la luz en el vacío como exactamente igual a 299 792 458 cuando se expresa en la unidad SI  $\text{m s}^{-1}$ ,
- la candela, símbolo cd, es la unidad de intensidad luminosa en una dirección dada; su magnitud queda establecida al fijar el valor numérico de la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz como exactamente igual a 683 cuando se expresa en la unidad SI  $\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{cd sr}$ , o  $\text{cd sr W}^{-1}$ , que es igual a  $\text{lm W}^{-1}$ .

De esta manera, se verá que las definiciones de las siete unidades básicas derivan de forma natural del conjunto de siete constantes dadas anteriormente.

En consecuencia, en la fecha elegida para la implementación de la revisión del SI:

- se derogará la definición del kilogramo vigente desde 1889, basada en la masa del prototipo internacional del kilogramo (1ª reunión de la CGPM, 1889, 3ª reunión de la CGPM, 1901),

- se derogará la definición del amperio, en vigor desde 1948 (9ª reunión de la CGPM, 1948), basada en la definición propuesta por el Comité Internacional (CIPM, 1946, Resolución 2),
- se derogarán los valores convencionales de la constante de Josephson  $K_{J-90}$  y de la constante de von Klitzing  $R_{K-90}$ , adoptados por el Comité Internacional (CIPM, 1988, Recomendaciones 1 y 2) a solicitud de la Conferencia General (18ª reunión de la CGPM, 1987, Resolución 6) para el establecimiento de realizaciones del voltio y del ohmio utilizando los efectos Josephson y Hall cuántico, respectivamente,
- se derogará la definición del kelvin vigente desde 1967/68 (13ª reunión de la CGPM, 1967/68, Resolución 4) basada en una definición anterior menos explícita (10ª reunión de la CGPM, 1954, Resolución 3),
- se derogará la definición del mol en vigor desde 1971 (14ª reunión de la CGPM, 1971, Resolución 3) basada en una definición por la cual la masa molar del carbono 12 tenía el valor exacto  $0,012 \text{ kg mol}^{-1}$ ,
- se derogarán las definiciones existentes del metro, segundo y candela en vigor desde que fueron adoptadas por la CGPM en sus reuniones 17ª (1983, Resolución 1), 13ª (1967/68, Resolución 1) y 16ª (1979, Resolución 3), respectivamente.

La Conferencia General de Pesas y Medidas

**observa además** que en la misma fecha

- la masa del prototipo internacional del kilogramo  $m(K)$  será 1 kg, pero con una incertidumbre relativa igual a la del valor recomendado de  $h$  justo antes de la redefinición y que posteriormente su valor se determinará experimentalmente,
- la constante magnética (permeabilidad del vacío)  $\mu_0$  será  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$  pero con una incertidumbre relativa igual a la del valor recomendado de la constante de estructura fina  $\alpha$  y que posteriormente su valor se determinará experimentalmente ,
- la temperatura termodinámica del punto triple del agua  $T_{TPW}$  será 273,16 K pero con una incertidumbre relativa igual a la del valor recomendado de  $k$  justo antes de la redefinición y que posteriormente su valor se determinará experimentalmente,
- la masa molar del carbono 12,  $M(^{12}\text{C})$ , será  $0,012 \text{ kg mol}^{-1}$  pero con una incertidumbre relativa igual a la del valor recomendado de  $N_A h$  justo antes de la redefinición y que posteriormente su valor se determinará experimentalmente.

La Conferencia General de Pesas y Medidas

**anima**

- a los investigadores de los institutos nacionales de metrología, al BIPM y a las instituciones académicas, a continuar con sus esfuerzos y dar a conocer a la comunidad científica en general y a CODATA en particular, el resultado de sus trabajos relevantes para la determinación de las constantes  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , y  $N_A$ , y
- al BIPM a que continúe con su trabajo para relacionar la trazabilidad de los prototipos que mantiene con el prototipo internacional del kilogramo y para desarrollar un conjunto de patrones de referencia que faciliten la diseminación de la unidad de masa cuando ésta se redefina,

**invita**

- a CODATA, a continuar proporcionando valores ajustados de las constantes físicas fundamentales basados en toda la información relevante disponible y a dar a conocer los resultados al Comité Internacional a través de su Comité Consultivo de Unidades, ya que estos valores e incertidumbres de CODATA serán los utilizados para el SI revisado,
- al CIPM, a presentar una propuesta para la revisión del SI tan pronto como se cumplan las recomendaciones de la Resolución 12 de la 23ª reunión de la Conferencia General, en particular la preparación de *mises en pratique* para las nuevas definiciones del kilogramo, amperio, kelvin y mol,

- al CIPM, a continuar su trabajo hacia formulaciones mejoradas de las definiciones de las unidades básicas del SI en función de constantes fundamentales, obteniendo en la medida de lo posible una descripción más comprensible para los usuarios en general, consistente con el rigor y la claridad científica,
- al CIPM, los Comités Consultivos, el BIPM, la OIML y los Institutos Nacionales de Metrología, que aumenten significativamente sus esfuerzos para iniciar campañas de sensibilización destinadas a alertar a las comunidades de usuarios y al público en general sobre la intención de redefinir varias unidades del SI y alentar la consideración de las implicaciones prácticas, técnicas y legislativas de tales redefiniciones, de modo que puedan solicitarse comentarios y contribuciones a las comunidades científicas y de usuarios.

■ **Sobre la revisión de la realización práctica del metro y el desarrollo de nuevos patrones de frecuencia óptica (CR, 227)**

**Resolución 8**

La Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), en su 24ª reunión,

**considerando** que

- ha habido rápidos e importantes progresos en las prestaciones de los patrones de frecuencia óptica,
- los institutos nacionales de metrología están trabajando en técnicas de comparación de patrones de frecuencia óptica en distancias cortas,
- deben desarrollarse técnicas de comparación remota a nivel internacional para poder comparar los patrones de frecuencia óptica,

**da la bienvenida**

- a las actividades del grupo de trabajo conjunto del CCTF y del CCL para revisar las frecuencias de las representaciones ópticas del segundo,
- a las adiciones hechas por el CIPM en 2009 a la lista común de "Valores recomendados de frecuencias patrón para aplicaciones que incluyen la realización práctica del metro y las realizaciones secundarias del segundo",
- al establecimiento de un grupo de trabajo del CCTF sobre Coordinación del Desarrollo de Técnicas Avanzadas de Transferencia de Tiempo y Frecuencia,

**recomienda** que

- los INM comprometan recursos para el desarrollo de patrones de frecuencia óptica y su comparación,
- el BIPM apoye la coordinación de un proyecto internacional con la participación de INM, orientado al estudio de las técnicas que podrían servir para comparar patrones de frecuencia óptica.

**CIPM, 2013**

■ **Actualización de la lista de frecuencias patrón (PV, 81, 53)**

**Recomendación 1**

El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM),

**considerando** que

- se ha establecido una lista común de "Valores recomendados de frecuencias patrón para aplicaciones que incluyen la *realización práctica* del metro y realizaciones secundarias del segundo";
- el Grupo de Trabajo de Patrones de Frecuencia CCL-CCTF (FSWG) ha revisado varios candidatos prometedores para su inclusión en la lista,

**recomienda** los siguientes cambios en la lista de “Valores recomendados de frecuencias patrón para aplicaciones que incluyen la *realización práctica* del metro y las realizaciones secundarias del segundo”:

- que se añada a la lista la siguiente frecuencia de transición:
  - la transición óptica no perturbada  $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$  del átomo neutro  $^{199}\text{Hg}$  con una frecuencia de 1 128 575 290 808 162 Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $1,7 \times 10^{-14}$ ;
- que se actualicen en la lista las siguientes frecuencias de transición:
  - la transición óptica no perturbada  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$  del ion  $^{40}\text{Ca}^+$  con una frecuencia de 411 042 129 776 395 Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $1,5 \times 10^{-14}$ ;
  - la transición óptica no perturbada  $1S - 2S$  del átomo neutro  $^1\text{H}$  con una frecuencia de 1 233 030 706 593 518 Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $1,2 \times 10^{-14}$ ;

Nota: Esta frecuencia corresponde a la mitad de la diferencia de energía entre los estados  $1S$  y  $2S$ ;

- que se actualicen en la lista las siguientes frecuencias de transición y se avalen como realizaciones secundarias del segundo:
  - la transición óptica no perturbada  $6s\ ^2S_{1/2} - 4f\ ^{13}6s^2\ ^2F_{7/2}$  del ion  $^{171}\text{Yb}^+$  (octupolo) con una frecuencia de 642 121 496 772 645,6 Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $1,3 \times 10^{-15}$ ;
  - la transición óptica no perturbada  $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$  del átomo neutro  $^{171}\text{Yb}$  con una frecuencia de 518 295 836 590 865,0 Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $2,7 \times 10^{-15}$ ;
- que se añadan a la lista las siguientes frecuencias de transición, como realizaciones secundarias del segundo:
  - la transición óptica no perturbada  $3s^2\ ^1S_0 - 3s\ 3p\ ^3P_0$  del ion  $^{27}\text{Al}^+$  con una frecuencia de 1 121 015 393 207 857,3 Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $1,9 \times 10^{-15}$ ;
- que se actualicen en la lista las siguientes frecuencias de transición, como realizaciones secundarias del segundo:
  - la transición óptica no perturbada  $5d\ ^{10}6s\ ^2S_{1/2} - 5d\ ^96s^2\ ^2D_{5/2}$  del ion  $^{199}\text{Hg}^+$  con una frecuencia de 1 064 721 609 899 145,3 Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $1,9 \times 10^{-15}$ ;
  - la transición óptica no perturbada  $6s\ ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$  del ion  $^{171}\text{Yb}^+$  (cuadrupolo) con una frecuencia de 688 358 979 309 307,1 Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $3 \times 10^{-15}$ ;
  - la transición óptica no perturbada  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$  del ion  $^{88}\text{Sr}^+$  con una frecuencia de 444 779 044 095 485,3 Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $4,0 \times 10^{-15}$ ;
  - la transición óptica no perturbada  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$  del átomo neutro  $^{87}\text{Sr}$  con una frecuencia de 429 228 004 229 873,4 Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $1 \times 10^{-15}$ ;
- que se actualice la siguiente frecuencia de transición como realización secundaria del segundo:
  - la transición hiperfina no perturbada del estado fundamental del  $^{87}\text{Rb}$  con una frecuencia de 6 834 682 610 391 024 Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $1,3 \times 10^{-15}$ .

Nota: Se supone que el valor de la incertidumbre típica estimada corresponde a un nivel de confianza del 68 %. Sin embargo, dado el número muy limitado de datos disponibles, existe la posibilidad de que, retrospectivamente, esto no sea exacto.



**25ª CGPM, 2014**

■ **Sobre la futura revisión del Sistema Internacional de Unidades, el SI** (CR, 177 y *Metrología*, 2015, **52**, 155)

La 26ª CGPM aprobó finalmente en 2018 la revisión del SI (Resolución 1, véase p. 87)

**Resolución 1**

La Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), en su 25ª reunión,

**recordando**

- la Resolución 1 adoptada por la CGPM en su 24ª reunión (2011), que toma nota de la intención del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) de proponer una revisión del SI que vincule las definiciones de kilogramo, amperio, kelvin y mol a los valores numéricos exactos de la constante de Planck  $h$ , la carga elemental  $e$ , la constante de Boltzmann  $k$  y la constante de Avogadro  $N_A$ , respectivamente, y que revisa la forma en que se define el SI, incluida la redacción de las definiciones de las unidades SI para tiempo, longitud, masa, corriente eléctrica, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa, de forma que las constantes de referencia en las que se basa el SI resulten evidentes,
- los múltiples beneficios referidos en la Resolución 1 que se derivarán de dicha revisión para la ciencia, la tecnología, la industria y el comercio, especialmente al vincular el kilogramo a un invariante de la naturaleza en lugar de a la masa de un artefacto material, asegurando así su estabilidad a largo plazo,
- la Resolución 7 adoptada por la CGPM en su 21ª reunión (1999), que alienta el trabajo de los Institutos Nacionales de Metrología (INM) conducente a una redefinición del kilogramo,
- la Resolución 12 adoptada por la CGPM en su 23ª reunión (2007), que describe el trabajo a realizar por los INM, la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) y el CIPM junto con sus Comités Consultivos (CC), y que podría permitir la adopción por la CGPM de la planificada revisión del SI,

**considerando que** ha habido un progreso significativo en completar el trabajo necesario, incluyendo

- la adquisición de datos relevantes y su análisis por el Comité de Datos para la Ciencia y la Tecnología (CODATA) para obtener los valores requeridos de  $h$ ,  $e$ ,  $k$  y  $N_A$ ,
- el establecimiento por el BIPM de un conjunto de patrones de referencia, de masa, para facilitar la diseminación de la unidad de masa en el SI revisado,
- la preparación de realizaciones prácticas para las nuevas definiciones de kilogramo, amperio, kelvin y mol,

**teniendo en cuenta que** el trabajo adicional del Comité Consultivo de Unidades (CCU), el CIPM, el BIPM, los INM y los CC debería centrarse en

- campañas de sensibilización para alertar a las comunidades de usuarios y al público en general sobre la revisión propuesta del SI,
- la preparación de la 9ª edición del Folleto sobre el SI, de forma que presente el SI revisado de una manera comprensible para lectores diversos, sin comprometer el rigor científico,

**que** a pesar de este progreso, los datos aún no parecen ser lo suficientemente sólidos como para que la CGPM adopte el SI revisado en su 25ª reunión,

**anima**

- a continuar con el esfuerzo en los INM, el BIPM y las instituciones académicas, para obtener datos relevantes para la determinación de  $h$ ,  $e$ ,  $k$  y  $N_A$  con las incertidumbres necesarias,
- a los INM, a continuar actuando a través de los CC en el análisis y revisión de estos datos,

- al CIPM, a continuar desarrollando un plan que proporcione el camino a través de los Comités Consultivos y el CCU para implementar la Resolución 1 adoptada por la CGPM en su 24ª reunión (2011), y
- a que el CIPM mantenga el esfuerzo, junto con sus comités consultivos, los INM, el BIPM y otras organizaciones como la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), para completar todo el trabajo necesario para que la CGPM en su 26ª reunión adopte una resolución que reemplace el SI actual con el SI revisado, siempre que la cantidad de datos, sus incertidumbres y el nivel de consistencia se consideren satisfactorios.

## CIPM, 2015

### ■ Actualización de la lista de frecuencias patrón (PV, 83, 54)

#### Recomendación 2

El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM),

#### Considerando que

- se ha establecido una lista común de “Valores recomendados de frecuencias patrón para aplicaciones que incluyen la *realización práctica* del metro y realizaciones secundarias del segundo”;
- el Grupo de Trabajo de Patrones de Frecuencia CCL-CCTF (FSWG) ha revisado varios candidatos prometedores para su inclusión en la lista,

#### recomienda

que se actualicen en la lista de valores recomendados de frecuencias patrón las siguientes frecuencias de transición:

- la transición óptica no perturbada  $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$  del átomo neutro  $^{199}\text{Hg}$  con una frecuencia  $f_{199\text{Hg}} = 1\ 128\ 575\ 290\ 808\ 154,8$  Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $6 \times 10^{-16}$ ;
- la transición óptica no perturbada  $6s\ ^2S_{1/2} - 4f^{13}\ 6s^2\ ^2F_{7/2}$  del ion  $^{171}\text{Yb}^+$  con una frecuencia  $f_{171\text{Yb}^+}$  (octopolo) =  $642\ 121\ 496\ 772\ 645,0$  Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $6 \times 10^{-16}$  (esta radiación ya ha sido avalada por el CIPM como realización secundaria del segundo);
- la transición óptica no perturbada  $6s\ ^2S_{1/2} (F = 0, m_F = 0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F = 2, m_F = 0)$  del ion  $^{171}\text{Yb}^+$  con una frecuencia  $f_{171\text{Yb}^+}$  (cuadripolo) =  $688\ 358\ 979\ 309\ 308,3$  Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $6 \times 10^{-16}$  (esta radiación ya ha sido avalada por el CIPM como realización secundaria del segundo);
- la transición óptica no perturbada  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$  del ion  $^{88}\text{Sr}^+$  con una frecuencia  $f_{88\text{Sr}^+} = 444\ 779\ 044\ 095\ 486,6$  Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $1,6 \times 10^{-15}$  (esta radiación ya ha sido avalada por el CIPM como realización secundaria del segundo);
- la transición óptica no perturbada  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$  del ion  $^{40}\text{Ca}^+$  con una frecuencia  $f_{40\text{Ca}^+} = 411\ 042\ 129\ 776\ 398,4$  Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $1,2 \times 10^{-14}$ ;
- la transición óptica no perturbada  $1S - 2S$  del átomo neutro  $^1\text{H}$  con una frecuencia  $f_{1\text{H}} = 1\ 233\ 030\ 706\ 593\ 514$  Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $9 \times 10^{-15}$ .

Nota: Esta frecuencia corresponde a la mitad de la diferencia de energía entre los estados  $1S$  y  $2S$ ;

- la transición óptica no perturbada  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$  del átomo neutro  $^{87}\text{Sr}$  con una frecuencia  $f_{87\text{Sr}} = 429\ 228\ 004\ 229\ 873,2$  Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $5 \times 10^{-16}$  (esta radiación ya ha sido avalada por el CIPM como realización secundaria del segundo);
- la transición óptica no perturbada  $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$  del átomo neutro  $^{171}\text{Yb}$  con una frecuencia  $f_{171\text{Yb}} = 518\ 295\ 836\ 590\ 864,0$  Hz y una incertidumbre típica relativa estimada

Hay más actualizaciones disponibles en la página web del BIPM.

de  $2 \times 10^{-15}$  (esta radiación ya ha sido avalada por el CIPM como realización secundaria del segundo);

- la transición hiperfina no perturbada del estado fundamental del  $^{87}\text{Rb}$  con una frecuencia  $f_{87\text{Rb}} = 6\,834\,682\,610,904\,310$  Hz y una incertidumbre típica relativa estimada de  $7 \times 10^{-16}$  (esta radiación ya ha sido avalada por el CIPM como realización secundaria del segundo).

Y también **recomienda**

que las siguientes frecuencias de transición sean incluidas en la lista de valores recomendados de frecuencias patrón:

- Molécula absorbente  $^{127}\text{I}_2$ , componente  $a_1$  de absorción saturada, transición R(36) 32-0.

$$\text{Valores } f_{a1} = 564\,074\,632,42 \text{ MHz}$$

$$\lambda_{a1} = 531\,476\,582,65 \text{ fm}$$

con una incertidumbre típica relativa estimada de  $1 \times 10^{-10}$  se aplica a la radiación de un diodo láser DFB de frecuencia doblada, estabilizado con una célula de Iodo externa al láser.

- Átomo absorbente  $^{87}\text{Rb}$ , cruce  $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$  entre las componentes hiperfinas  $d$  y  $f$  de la absorción saturada a 780 nm (transición D2)

$$\text{Valores } f_{\text{cruce } d/f} = 384\,227\,981,9 \text{ MHz}$$

$$\lambda_{\text{cruce } d/f} = 780\,246\,291,6 \text{ fm}$$

con una incertidumbre típica relativa estimada de  $5 \times 10^{-10}$  se aplica a la radiación de un láser de diodo, de cavidad externa sintonizable, estabilizado en el cruce  $d/f$  en una célula de rubidio externa al láser.

Nota: Se supone que el valor de la incertidumbre típica estimada corresponde a un nivel de confianza del 68 %. Sin embargo, dado el número muy limitado de datos disponibles, existe la posibilidad de que, retrospectivamente, esto no sea exacto.

## CIPM, 2017

- **Avance hacia la posible redefinición del SI (PV, 85, 28)**

### Decisión 10

El Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) recibió con agrado las recomendaciones sobre la redefinición del SI por parte de sus Comités Consultivos.

El CIPM observó que ahora ya se cumplen las condiciones acordadas para la redefinición y decidió presentar el proyecto de Resolución A a la 26ª reunión de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y emprender todos los demás pasos necesarios para proceder a la redefinición planificada del kilogramo, amperio, kelvin y mol.

## 26ª CGPM, 2018

- **Sobre la revisión del Sistema Internacional de Unidades, el SI (CR, en imprenta y *Metrologia*, 2019, 56, 022001)**

### Resolución 1

La Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), en su 26ª reunión,

**considerando**

- el requisito esencial para un Sistema Internacional de Unidades (SI), de ser uniforme y accesible a nivel mundial para el comercio internacional, la fabricación de alta tecnología, la salud y la seguridad humanas, la protección del medio ambiente, los estudios del clima mundial y la ciencia básica que sustenta a todo lo anterior,
- que las unidades SI deben ser estables a largo plazo, internamente coherentes y realizables de manera práctica en base a la descripción teórica actual de la naturaleza al más alto nivel,

- que una revisión del SI que cumpliera con estos requisitos ya fue descrita y adoptada por unanimidad en la Resolución 1 de la 24ª Conferencia General en 2011, la cual presentaba en detalle una nueva forma de definir el SI en base a un conjunto de siete constantes definitorias, tanto constantes fundamentales de la física como otras constantes de la naturaleza, de las cuales se deducían las definiciones de las siete unidades básicas,
- que las condiciones establecidas por la 24ª Conferencia General, y confirmadas por la 25ª Conferencia General para poder adoptar tal SI revisado, ya se cumplen en la actualidad,

#### decide

que a partir del 20 de mayo de 2019, el Sistema Internacional de Unidades, el SI, es el sistema de unidades en el que

- la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio  $133 \Delta \nu_{\text{Cs}}$  es 9 192 631 770 Hz,
- la velocidad de la luz en el vacío  $c$  es 299 792 458 m/s,
- la constante de Planck  $h$  es  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$  J s,
- la carga elemental  $e$  es  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  C,
- la constante de Boltzmann  $k$  es  $1,380\,649 \times 10^{-23}$  J/K
- la constante de Avogadro  $N_A$  es  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- la eficacia luminosa  $K_{\text{cd}}$  de la radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz es 683 lm/W,

donde las unidades hercio, julio, culombio, lumen y vatio, con símbolos Hz, J, C, lm y W, respectivamente, están relacionadas con las unidades segundo, metro, kilogramo, amperio, kelvin, mol y candela, con símbolos s, m, kg, A, K, mol y cd, respectivamente, de acuerdo con  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$  y  $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$ .

Al tomar esta decisión, la Conferencia General toma nota de las consecuencias establecidas en la Resolución 1 de la 24ª Conferencia General con respecto a las unidades básicas del SI y las confirma en los Anexos que siguen a esta Resolución, que tienen la misma validez que la propia Resolución.

La Conferencia General invita al Comité Internacional a producir una nueva edición de su folleto *El Sistema Internacional de Unidades, SI*, el cual proporciona una descripción completa del SI.

#### Anexo 1. Derogación de las definiciones anteriores de las unidades básicas:

Tras la nueva definición del SI adoptada anteriormente:

- queda derogada la definición del segundo, en vigor desde 1967/68 (13ª reunión de la CGPM, Resolución 1),
- queda derogada la definición del metro vigente desde 1983 (17ª reunión de la CGPM, Resolución 1),
- queda derogada la definición del kilogramo vigente desde 1889 (1ª reunión de la CGPM, 1889, 3ª reunión de la CGPM, 1901), basada en la masa del prototipo internacional del kilogramo,
- queda derogada la definición del amperio en vigor desde 1948 (9ª reunión de la CGPM), basada en la definición propuesta por el Comité Internacional (CIPM, 1946, Resolución 2),
- queda derogada la definición del kelvin vigente desde 1967/68 (13ª reunión de la CGPM, Resolución 4),
- queda derogada la definición del mol vigente desde 1971 (14ª reunión de la CGPM, Resolución 3),
- queda derogada la definición de la candela vigente desde 1979 (16ª reunión de la CGPM, Resolución 3),

- queda derogada la decisión de adoptar los valores convencionales de las constantes de Josephson  $K_{J-90}$  y de von Klitzing  $R_{K-90}$ , tomada por el Comité Internacional (CIPM, 1988, Recomendaciones 1 y 2) a solicitud de la Conferencia General (18ª reunión de la CGPM, 1987, Resolución 6), para el establecimiento de realizaciones del voltio y del ohmio utilizando los efectos Josephson y Hall cuántico, respectivamente.

### Anexo 2. Estatus de las constantes utilizadas en las definiciones anteriores:

De la nueva definición del SI adoptada anteriormente y de los valores recomendados tras el ajuste especial CODATA 2017 en que se basan los valores de las constantes definitorias, se desprende que, en el momento de adoptar esta Resolución

- la masa del prototipo internacional del kilogramo  $m(K)$  es igual a 1 kg, con una incertidumbre típica relativa igual a la del valor recomendado de  $h$  en el momento en que se adoptó esta Resolución; es decir,  $1,0 \times 10^{-8}$ . En el futuro su valor se determinará experimentalmente,
- la permeabilidad magnética del vacío  $\mu_0$  es igual a  $4\pi \times 10^{-7}$  H m<sup>-1</sup> con una incertidumbre típica relativa igual a la del valor recomendado de la constante de estructura fina  $\alpha$  en el momento en que se adoptó esta Resolución; es decir,  $2,3 \times 10^{-10}$ . En el futuro su valor se determinará experimentalmente,
- la temperatura termodinámica del punto triple del agua  $T_{TPW}$  es igual a 273,16 K con una incertidumbre típica relativa muy similar a la del valor recomendado de  $k$  en el momento en que se adoptó esta Resolución; es decir,  $3,7 \times 10^{-7}$ . En el futuro su valor se determinará experimentalmente,
- la masa molar del carbono 12,  $M(^{12}\text{C})$ , es igual a 0,012 kg mol<sup>-1</sup> con una incertidumbre típica relativa igual a la del valor recomendado de  $N_A/h$  en el momento de la adopción de esta Resolución; es decir,  $4,5 \times 10^{-10}$ . En el futuro su valor se determinará experimentalmente.

### Anexo 3. Unidades básicas del SI

A partir de la definición del SI adoptada anteriormente en función de valores numéricos fijos de las constantes definitorias, se deducen las definiciones de cada una de las siete unidades básicas tomando, según corresponda, una o más de estas constantes definitorias para generar el siguiente conjunto de definiciones:

- El segundo, símbolo s, es la unidad SI de tiempo. Se define al fijar el valor numérico de la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , en 9 192 631 770, cuando se expresa en la unidad Hz, igual a s<sup>-1</sup>.
- El metro, símbolo m, es la unidad SI de longitud. Se define al fijar el valor numérico de la velocidad de la luz en el vacío,  $c$ , en 299 792 458, cuando se expresa en la unidad m s<sup>-1</sup>, donde el segundo se define en función de la frecuencia del Cesio  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- El kilogramo, símbolo kg, es la unidad SI de masa. Se define al fijar el valor numérico de la constante de Planck,  $h$ , en  $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ , cuando se expresa en la unidad J·s, igual a kg·m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>, donde el metro y el segundo se definen en función de  $c$  y  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- El amperio, símbolo A, es la unidad SI de corriente eléctrica. Se define al fijar el valor numérico de la carga elemental,  $e$ , en  $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ , cuando se expresa en la unidad C, igual a A·s, donde el segundo se define en función de  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- El kelvin, símbolo K, es la unidad SI de temperatura termodinámica. Se define al fijar el valor numérico de la constante de Boltzmann,  $k$ , en  $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ , cuando se expresa en la unidad J·K<sup>-1</sup>, igual a kg·m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de  $h$ ,  $c$  y  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- El mol, símbolo mol, es la unidad SI de cantidad de sustancia. Un mol contiene exactamente  $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$  entidades elementales. Esta cifra es el valor

numérico fijo de la constante de Avogadro,  $N_A$ , cuando se expresa en la unidad  $\text{mol}^{-1}$ , y se denomina número de Avogadro.

La cantidad de sustancia, símbolo  $n$ , de un sistema, es una medida del número de entidades elementales especificadas. Una entidad elemental puede ser un átomo, una molécula, un ion, un electrón, o cualquier otra partícula o grupo especificado de partículas.

- La candela, símbolo  $\text{cd}$ , es la unidad SI de intensidad luminosa en una dirección dada. Se define al fijar el valor numérico de la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , en 683, cuando se expresa en la unidad  $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ , igual a  $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ , o a  $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$ , donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de  $h$ ,  $c$  y  $\Delta \nu_{\text{Cs}}$ .

## **Anexo 2. Realización práctica de las definiciones de algunas unidades importantes**

El anexo 2 sólo se publica en formato electrónico, estando disponible tanto en la página web del BIPM, en el enlace <http://www.bipm.org>, como en la página web del CEM (<http://www.cem.es>).

## **Anexo 3. Unidades para magnitudes fotoquímicas y fotobiológicas**

El anexo 3 sólo se publica en formato electrónico, estando disponible tanto en la página web del BIPM, en el enlace <http://www.bipm.org>, como en la página web del CEM (<http://www.cem.es>).



## Anexo 4. Notas históricas sobre la evolución del Sistema Internacional de Unidades y sus unidades básicas

### Parte 1. Evolución histórica de la realización de las unidades SI

Los métodos experimentales utilizados para la realización de las unidades y que utilizan ecuaciones de la física se conocen como métodos primarios. La característica esencial de un método primario es que permite medir una magnitud en una unidad particular directamente a partir de su definición utilizando solo magnitudes y constantes que no contienen esa unidad.

Tradicionalmente, se consideraba que una unidad para una magnitud dada era un ejemplo particular de esa magnitud, que había sido elegida para proporcionar valores numéricos de dimensión conveniente en mediciones comunes. Antes del surgimiento de la ciencia moderna, las unidades se definían necesariamente mediante artefactos materiales, en particular el metro y el kilogramo, para la longitud y la masa, o mediante la propiedad de un objeto particular, como la rotación de la tierra para el segundo. Incluso en el origen del sistema métrico decimal, a finales del siglo XVIII, se reconoció que una definición más deseable de la unidad de longitud sería, por ejemplo, una basada en una propiedad universal de la naturaleza, como la longitud de un péndulo que batiera segundos. Dicha definición sería independiente del tiempo y el lugar y, en principio, sería accesible en todo el mundo. En ese momento, consideraciones de índole práctica condujeron a definiciones más simples, basadas en artefactos, para el metro y el kilogramo, mientras que el segundo permaneció vinculado a la rotación de la Tierra. No fue hasta 1960 que se adoptó la primera definición no material, a saber, la longitud de onda de una radiación óptica específica para el metro.

Desde entonces, se han adoptado definiciones para el amperio, el kelvin, el mol y la candela, no referidas a artefactos materiales. En el caso del amperio, se refiere a una corriente eléctrica específica requerida para producir una fuerza electromagnética dada y, en el caso del kelvin, a un estado termodinámico particular, a saber, el punto triple del agua. Incluso la definición atómica del segundo lo fue en términos de una transición específica del átomo de cesio. El kilogramo siempre se ha destacado como la única unidad que se ha mantenido ligada a un artefacto. La definición que abrió el camino a la universalidad real fue la del metro en 1983. Esa definición suponía, aunque no lo indicaba, un valor numérico fijo para la velocidad de la luz. Sin embargo, la definición estaba redactada en la forma tradicional y esencialmente establecía que el metro era la distancia recorrida por la luz en un tiempo específico. De esta manera, mostraba el tipo de redacción común que tenían las demás definiciones de las unidades básicas del SI, por ejemplo, "el amperio es la corriente que ..." y "el kelvin es una fracción de una temperatura específica". Tales definiciones pueden denominarse "de unidad explícita".

Aunque estas definiciones cumplen con muchos de los requisitos de universalidad y accesibilidad, y permiten una variedad de realizaciones, limitan sin embargo las realizaciones prácticas a experimentos directa o indirectamente vinculados a condiciones particulares o estados especificados en cada definición. En consecuencia, la exactitud de la realización de tales definiciones nunca puede ser mejor que la exactitud de realización de las condiciones particulares o los estados especificados en las definiciones.

Este es un problema particular en la presente definición del segundo, que se basa en una transición de microondas de un átomo de cesio. Las frecuencias de las transiciones ópticas

de diferentes átomos o iones son ahora, demostrablemente, más reproducibles, en algunos órdenes de magnitud, que la frecuencia del cesio que aparece en la definición.

En la definición actual del SI basada en un conjunto de constantes definitorias, en lugar de que cada definición especifique una condición o estado particular, que fija un límite fundamental a la exactitud de la realización, puede utilizarse cualquier ecuación conveniente de la física, que vincule la constante o constantes particulares a la magnitud que queremos medir. Esta es una forma mucho más general de definir las unidades básicas de medida. Una que no está limitada por la ciencia o la tecnología actuales, y en la que los desarrollos futuros pueden conducir a ecuaciones aún desconocidas que podrían dar como resultado diferentes formas de realizar las unidades, con una exactitud mucho mayor. Definidas de esta manera, no hay, en principio, ningún límite a la exactitud con la que pueden realizarse las unidades. La excepción sigue siendo la definición del segundo, en la cual, por el momento, la transición original de microondas del cesio sigue siendo la base de la definición.

La diferencia entre una definición de “unidad explícita” y una de “constante explícita” se puede ilustrar claramente usando las dos definiciones previas del metro que dependían de un valor numérico fijo de la velocidad de la luz y, en segundo lugar, las dos definiciones del kelvin. La definición original de 1983 del metro establece, en efecto, que "el metro es la distancia recorrida por la luz en 1/299 792 458 segundos". La nueva definición simplemente establece que el metro se define tomando la constante que define el segundo, la frecuencia especificada del cesio y el valor numérico fijo de la velocidad de la luz expresado en la unidad  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Por lo tanto, podemos usar cualquier ecuación de la física incluyendo, por supuesto, la indicada en la anterior definición, el tiempo que se tarda en recorrer la distancia dada, que se usa para las distancias astronómicas, pero también la ecuación simple que relaciona la frecuencia y la longitud de onda con la velocidad de la luz. La anterior definición del kelvin basada en un valor numérico fijo para la temperatura del punto triple del agua requiere, en última instancia, una medición en el punto triple del agua. La nueva definición, basada en el valor numérico fijo para la constante de Boltzmann, es mucho más general, ya que cualquier ecuación termodinámica en la que aparece  $k$  puede utilizarse en principio para determinar una temperatura termodinámica en cualquier punto de la escala de temperatura. Por ejemplo, al determinar la exitancia radiante total de un cuerpo negro a temperatura  $T$ , igual a  $(2\pi^5 k^4 / 15c^2 h^3) T^4$ , en  $\text{W m}^{-2}$ , podemos determinar  $T$  directamente.

Para el kilogramo, la unidad cuya definición ha sufrido el cambio más fundamental, la realización puede ser a través de cualquier ecuación de la física que vincule la masa, la constante de Planck, la velocidad de la luz y la frecuencia del cesio. Una ecuación tal es la que describe el funcionamiento de una balanza electromecánica, antes conocida como balanza de potencia y más recientemente como balanza de Kibble<sup>1</sup>. Con este dispositivo, una potencia mecánica, derivada de una masa,  $m$ , la aceleración local de la gravedad,  $g$ , y una velocidad,  $v$ , puede medirse en función de una potencia eléctrica obtenida a partir de una corriente eléctrica y una tensión, medidas a partir de los efectos cuánticos Hall y Josephson respectivamente. La ecuación resultante es  $mgv = Ch$ , donde  $C$  es una constante de calibración que incluye las frecuencias medidas y  $h$  es la constante de Planck.

Otro método que puede usarse para una realización primaria del kilogramo consiste en determinar el número de átomos en una esfera de silicio y utilizar la ecuación:

$$m = \frac{N_A \cdot M_{\text{Si}}}{N} \quad (1)$$

con la masa  $m$  y el volumen  $V$  de la esfera (en torno a 1 kg), el parámetro de red  $a_0$ , la constante de Rydberg  $R_\infty$ , la constante de estructura fina  $\alpha$ , la masa de un átomo de silicio

<sup>1</sup> Para reconocer la invención de la balanza de potencia por Bryan Kibble.

(promediada sobre los tres isótopos existentes en la esfera)  $m_{\text{Si}}$ , y la masa del electrón  $m_e$ , respectivamente. La primera fracción corresponde al número de átomos en la esfera, la segunda a la masa electrónica y la tercera fracción es la relación de la masa del átomo de silicio (promediado isotópicamente) a la masa del electrón.

Otra posibilidad para medir la masa a través de la nueva definición, pero esta vez a nivel microscópico, es mediante mediciones de retroceso atómico utilizando la relación que incluye  $h/m$ .

Todos estos métodos ilustran perfectamente el carácter general de la nueva forma de definir las unidades. Una información más detallada sobre la actual realización de las unidades básicas y otras unidades se proporciona en la página web del BIPM.

## Parte 2. Evolución histórica del Sistema Internacional

La 9ª CGPM (1948, Resolución 6; CR 64) instaba al CIPM a:

- estudiar el establecimiento de un completo juego de reglas para las unidades de medida;
- obtener, con este fin, mediante consulta oficial, la opinión prevaleciente en los círculos científicos, técnicos y educativos de todos los países;
- hacer recomendaciones para el establecimiento de un *sistema práctico de unidades de medida* adecuado para su adopción por todos los signatarios de la *Convención del Metro*.

La propia CGPM también estableció y enumeró, en la Resolución 7 (CR 70), "principios generales para la escritura de los símbolos de las unidades" algunas unidades derivadas coherentes a las que se asignaron nombres especiales.

La 10ª CGPM (1954, Resolución 6; CR 80) adoptó para este sistema práctico las siguientes seis magnitudes básicas: longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura termodinámica e intensidad luminosa, así como sus seis unidades básicas correspondientes: metro, kilogramo, segundo, amperio, kelvin y candela. Después de una larga discusión entre físicos y químicos, la 14ª CGPM (1971, Resolución 3, CR 78 y *Metrologia* 1972, **8**, 36) agregó, como séptima magnitud básica, la cantidad de sustancia, y como unidad básica correspondiente, el mol.

La 11ª CGPM (1960, Resolución 12; CR 87) adoptó el nombre de *Sistema Internacional de Unidades*, con la abreviatura internacional *SI*, para este sistema práctico de unidades y estableció reglas para prefijos, unidades derivadas y las antiguas unidades suplementarias, así como otros asuntos, entre ellos, una especificación integral para las unidades de medida. Las reuniones subsiguientes de la CGPM y del CIPM han agregado y modificado la estructura original del SI para tener en cuenta los avances científicos y las necesidades cambiantes de los usuarios.

La secuencia histórica que condujo a estas importantes decisiones se puede resumir de la siguiente manera.

- La creación del sistema métrico decimal en los tiempos de la Revolución Francesa y el posterior depósito de dos patrones de platino representando el metro y el kilogramo, el 22 de junio de 1799, en los *Archivos de la República* en París, que puede verse como el primer paso hacia el actual Sistema Internacional de Unidades.
- En 1832, Gauss promovió con empeño la aplicación de este sistema métrico, junto con el segundo definido en astronomía, como un sistema coherente de unidades para las ciencias físicas. Gauss fue el primero en realizar mediciones absolutas del campo magnético terrestre mediante un sistema decimal basado en las *tres unidades mecánicas* milímetro, gramo y segundo para, respectivamente, las magnitudes longitud, masa y tiempo. En años posteriores, Gauss y Weber ampliaron estas mediciones para incluir otros fenómenos eléctricos.
- Estas aplicaciones en el campo de la electricidad y el magnetismo se extendieron aún más en la década de 1860 bajo el liderazgo activo de Maxwell y Thomson a través de la Asociación Británica para el Avance de las Ciencias (BAAS en sus siglas en inglés). Formularon el requisito de un *sistema coherente de unidades con unidades básicas y unidades derivadas*. En 1874, la BAAS introdujo el *sistema CGS*, un sistema coherente tridimensional de unidades basado en las tres unidades mecánicas centímetro, gramo y segundo, utilizando prefijos desde micro a mega para expresar los múltiplos y submúltiplos decimales. El desarrollo posterior de la física como ciencia experimental estuvo basado en gran medida en este sistema.
- El tamaño de las unidades CGS coherentes en los campos de la electricidad y el magnetismo se demostró inconveniente, por lo que en la década de 1880 la BAAS y el Congreso Internacional de Electricidad, predecesor de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), aprobaron un conjunto de *unidades prácticas* mutuamente coherentes. Entre ellas se encontraban el ohmio para la resistencia eléctrica, el voltio para la fuerza electromotriz y el amperio para la corriente eléctrica.
- Después de la firma de la Convención del Metro el 20 de mayo de 1875, que creó el BIPM y estableció la CGPM y el CIPM, comenzó el trabajo de establecer nuevos prototipos internacionales para el metro y el kilogramo. En 1889, la 1ª CGPM sancionó los prototipos internacionales del metro y del kilogramo. Junto con el segundo astronómico como unidad de tiempo, estas unidades constituyeron un sistema mecánico tridimensional de unidades similar al sistema CGS, pero con las unidades básicas metro, kilogramo y segundo, conocido como *sistema MKS*.
- En 1901, Giorgi demostró que es posible combinar las unidades mecánicas de este sistema MKS con las unidades eléctricas prácticas para formar un sistema coherente de cuatro dimensiones, agregando a las tres unidades básicas una cuarta unidad, de naturaleza eléctrica, como el amperio o el ohmio, y reescribiendo las ecuaciones del electromagnetismo en la denominada forma racionalizada. La propuesta de Giorgi abrió el camino a nuevos desarrollos.
- Después de la revisión de la Convención del Metro por la 6ª CGPM (1921), que extendió el alcance y las responsabilidades del BIPM a otros campos de la física y la posterior creación del Comité Consultivo de Electricidad (CCE) por la 7ª CGPM (1927), la propuesta de Giorgi fue ampliamente discutida por la CEI, la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP en sus siglas en inglés) y otras organizaciones internacionales. Esto llevó al CCE a proponer en 1939 la adopción

de un sistema de cuatro dimensiones basado en el metro, el kilogramo, el segundo y el amperio, el sistema MKSA, una propuesta aprobada por el CIPM en 1946.

- Tras una consulta internacional realizada por el BIPM, que comenzó en 1948, la 10ª CGPM (1954) aprobó la introducción adicional del kelvin y la candela, como unidades básicas para la temperatura termodinámica y la intensidad luminosa, respectivamente. El nombre Sistema Internacional de Unidades, con la abreviatura SI, fue establecido por la 11ª CGPM (1960). Además, se establecieron reglas para los prefijos, las unidades derivadas, las antiguas unidades suplementarias y otros asuntos, proporcionando así una especificación integral para todas las unidades de medida.
- En la 14ª CGPM (1971) se adoptó una nueva unidad básica, el mol, símbolo mol, para la magnitud cantidad de sustancia. Esto fue resultado de una propuesta de la Organización Internacional de Normalización, con origen a su vez en otra propuesta de la Comisión sobre Símbolos, Unidades y Nomenclatura (Comisión SUN) de la IUPAP, apoyada por la Unión Internacional para la Química Pura y Aplicada (IUPAC, en sus siglas en inglés). Esto elevó el número de unidades básicas del SI a siete.
- Desde entonces se han realizado avances extraordinarios al relacionar las unidades del SI con magnitudes verdaderamente invariables, como las constantes fundamentales de la física y las propiedades de los átomos. Reconociendo la importancia de vincular las unidades del SI a tales magnitudes invariantes, la 24ª CGPM (2011) adoptó los principios para una nueva definición del SI basada en el uso de un conjunto de siete constantes como referencias para las definiciones. En el tiempo de la 24ª CGPM, los experimentos para determinar sus valores en función de las unidades básicas de entonces no eran completamente consistentes, pero para la 26ª CGPM (2018) esto ya se había logrado y en la Resolución 1 se adoptó la nueva definición de SI. Esta es la base de la definición presentada en esta publicación, que es la forma más simple y fundamental de definir el SI.
- El SI estaba definido previamente mediante siete unidades básicas y unidades derivadas definidas como productos de potencias de las unidades básicas. Las siete unidades básicas fueron elegidas por razones históricas, ya que el sistema métrico decimal, más tarde SI, evolucionó y se desarrolló en los últimos 130 años. Su elección no fue única, pero se estableció y resultó familiar a lo largo de los años, no solo proporcionando un marco para describir el SI, sino también para definir las unidades derivadas. Este papel de las unidades básicas continúa en el SI actual, aunque el SI se define ahora mediante siete constantes definitorias. Por lo tanto, en esta publicación, aún se pueden encontrar definiciones de las siete unidades básicas, pero en adelante se basarán en las siete constantes definitorias: la frecuencia hiperfina del cesio  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ; la velocidad de la luz en el vacío  $c$ ; la constante de Planck  $h$ ; la carga elemental  $e$ ; la constante de Boltzmann  $k$ ; la constante de Avogadro  $N_{\text{A}}$  y la eficacia luminosa de una radiación visible definida  $K_{\text{cd}}$ .

Las definiciones de las siete unidades básicas pueden relacionarse sin ambigüedad con los valores numéricos de las siete constantes definitorias. Sin embargo, no existe una relación “uno a uno” entre las siete constantes definitorias y las siete unidades básicas, ya que muchas de las unidades básicas dependen de más de una constante definitoria.

### Parte 3. Perspectiva histórica de las unidades básicas

#### Unidad de tiempo, el segundo

Antes de 1960, la unidad de tiempo, el segundo, se definía como la fracción  $1/86\,400$  del día solar medio. La definición exacta de "día solar medio" se dejó a los astrónomos. Sin embargo, las mediciones mostraron que las irregularidades en la rotación de la Tierra hacían de esta una definición insatisfactoria. Con el fin de definir la unidad de tiempo de manera más precisa, la 11ª CGPM (1960, Resolución 9, CR, 86) adoptó una definición dada por la Unión Astronómica Internacional basada en el año trópico 1900. Sin embargo, el trabajo experimental ya había demostrado que un patrón atómico de tiempo, basado en una transición entre dos niveles de energía de un átomo o una molécula, podría realizarse y reproducirse de manera mucho más exacta. Considerando que para la ciencia y la tecnología es indispensable una definición muy precisa de la unidad de tiempo, la 13ª CGPM (1967- 1968, Resolución 1, CR, 103 y *Metrologia*, 1968, 4, 43) eligió una nueva definición del segundo con referencia a la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental del átomo de cesio 133. La Resolución 1 de la 26ª CGPM (2018) adoptó finalmente una redacción más precisa y revisada de esta misma definición, ahora en función de un valor numérico fijo de la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133.

#### Unidad de longitud, el metro

La definición de 1889 del metro, es decir, la longitud del prototipo internacional de platino e iridio, fue reemplazada por la 11ª CGPM (1960) utilizando una definición basada en la longitud de onda de la radiación correspondiente a una transición particular del criptón 86. Este cambio se adoptó con el fin de mejorar la exactitud con la que se podía realizar la definición del metro, lo que se logró utilizando un interferómetro con un microscopio desplazable para medir la diferencia de trayectoria óptica a medida que se contaban las franjas. A su vez, esta fue reemplazada en 1983 por la 17ª CGPM (Resolución 1, CR, 97 y *Metrologia*, 1984, 20, 25) por una definición referida a la distancia que la luz viaja en el vacío en un intervalo de tiempo específico. El prototipo internacional original del metro, que fue sancionado por la 1ª CGPM en 1889 (CR, 34-38), todavía se mantiene en el BIPM bajo las condiciones especificadas en 1889. Con el fin de dejar clara su dependencia del valor numérico fijo de la velocidad de la luz,  $c$ , la redacción de la definición se cambió en la Resolución 1 de la 26ª CGPM (2018).

#### Unidad de masa, el kilogramo

La definición de 1889 del kilogramo era simplemente la masa del prototipo internacional del kilogramo, un artefacto hecho de platino e iridio. Este se mantuvo, y aún se mantiene, en el BIPM bajo las condiciones especificadas por la 1ª CGPM (1889, CR, 34-38) cuando sancionó el prototipo y declaró que "este prototipo será considerado en adelante como la unidad de masa". Se fabricaron cuarenta prototipos similares casi al mismo tiempo, y todos se mecanizaron y pulieron para que tuvieran la misma masa que el prototipo internacional. En la 1ª CGPM (1889), después de la calibración contra el prototipo internacional, la mayoría de estos "prototipos nacionales" se asignaron individualmente a los Estados Miembros de la Convención del Metro, y algunos también al BIPM. La 3ª CGPM (1901, CR, 70), en una declaración destinada a poner fin a la ambigüedad en el uso común con respecto al uso de la

palabra “peso”, confirmó que “el kilogramo es la unidad de masa; es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo”. La versión completa de estas declaraciones aparece en la pág. 70 del acta de la reunión mencionada anteriormente de la CGPM.

Con ocasión de la segunda verificación de los prototipos nacionales en 1946, se encontró que, en promedio, las masas de estos prototipos estaban divergiendo de la del prototipo internacional. Esto fue confirmado por la tercera verificación llevada a cabo de 1989 a 1991, con una diferencia media de alrededor de 25 microgramos para el conjunto de los prototipos originales sancionados por la 1ª CGPM (1889). Con el fin de garantizar la estabilidad a largo plazo de la unidad de masa, obtener el máximo beneficio de los patrones eléctricos cuánticos y ser de mayor utilidad a la ciencia moderna, se decidió adoptar una nueva definición para el kilogramo basada en el valor de una constante fundamental, para lo cual fue elegida la constante de Planck  $h$  según la Resolución 1 de la 26ª CGPM (2018).

### **Unidad de corriente eléctrica, el amperio**

Las unidades eléctricas, llamadas "unidades internacionales", para corriente y resistencia fueron introducidas por el Congreso Internacional de Electricidad celebrado en Chicago en 1893 y las definiciones del "amperio internacional" y del "ohmio internacional" fueron confirmadas por la Conferencia Internacional en Londres en 1908.

En la época de la 8ª CGPM (1933) había un deseo unánime de reemplazar las "unidades internacionales" por las llamadas "unidades absolutas". Sin embargo, debido a que algunos laboratorios aún no habían completado los experimentos necesarios para determinar las relaciones entre las unidades internacionales y las absolutas, la CGPM otorgó autoridad al CIPM para decidir en un momento apropiado tanto estas relaciones como la fecha en que las nuevas unidades absolutas entrarían en vigor. El CIPM lo hizo en 1946 (1946, Resolución 2, PV, 20, 129-137), cuando decidió que las nuevas unidades entrarían en vigor el 1 de enero de 1948. En octubre de 1948, la 9ª CGPM aprobó las decisiones tomadas por el CIPM. La definición del amperio, elegida por el CIPM, estaba referida a la fuerza entre dos cables paralelos que transportan una corriente eléctrica y tuvo el efecto de fijar el valor numérico de la permeabilidad magnética del vacío  $\mu_0$  (también llamada constante magnética). El valor numérico de la permitividad eléctrica del vacío  $\epsilon_0$  (también llamada constante eléctrica) también resultó fijado como consecuencia de la nueva definición del metro adoptada en 1983.

Sin embargo, la definición de 1948 del amperio resultó difícil de realizar y los patrones cuánticos prácticos (basados en los efectos Josephson y Hall cuántico), que vinculan tanto el voltio como el ohmio a combinaciones particulares de la constante de Planck  $h$  y la carga elemental  $e$ , fueron los universalmente utilizados como realización práctica del amperio a través de la ley de Ohm (18ª CGPM (1987), Resolución 6, CR 100). Como consecuencia, se volvió natural no solo fijar el valor numérico de  $h$  para redefinir el kilogramo, sino también fijar el valor numérico de  $e$  para redefinir el amperio de forma que los patrones eléctricos cuánticos prácticos concordaran exactamente con el SI. La actual definición, basada en un valor numérico fijo para la carga elemental,  $e$ , se adoptó en la Resolución 1 de la 26ª CGPM (2018).

### Unidad de temperatura termodinámica, el kelvin

La definición de la unidad de temperatura termodinámica fue dada por la 10ª CGPM (1954, Resolución 3; CR 79) que seleccionó el punto triple de agua,  $T_{TPW}$ , como un punto fijo fundamental, asignándole la temperatura de 273,16 K, y definiendo así el kelvin. La 13ª CGPM (1967-1968, Resolución 3; CR, 104 y *Metrologia*, 1968, 4, 43) adoptó el nombre kelvin, símbolo K, en lugar de "grado kelvin", símbolo °K, para la unidad definida de esta manera. Sin embargo, las dificultades prácticas para realizar esta definición, que requieren una muestra de agua pura de composición isotópica bien definida y el desarrollo de nuevos métodos primarios de termometría, llevaron a la adopción de una nueva definición del kelvin basada en un valor numérico fijo de la constante de Boltzmann  $k$ . La definición actual, que eliminó ambas restricciones, se adoptó en la Resolución 1 de la 26ª CGPM (2018).

### Unidad de cantidad de sustancia, el mol

Tras el descubrimiento de las leyes fundamentales de la química, se utilizaron unidades llamadas, por ejemplo, "átomo gramo" y "molécula gramo" para especificar cantidades de elementos o compuestos químicos. Estas unidades tenían una conexión directa con "pesos atómicos" y "pesos moleculares", que en realidad son masas atómicas y moleculares relativas. Las primeras compilaciones de "Pesos atómicos" se vincularon originalmente al peso atómico del oxígeno que, por acuerdo general, se tomó como 16. Mientras que los físicos separaban los isótopos en un espectrómetro de masas y atribuían el valor 16 a uno de los isótopos del oxígeno, los químicos atribuyeron el mismo valor a la mezcla (ligeramente variable) de los isótopos 16, 17 y 18, que para ellos constituían el elemento natural oxígeno. Un acuerdo entre la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP) y la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) puso fin a esta dualidad en 1959-1960. Los físicos y los químicos acordaron asignar el valor 12, exactamente, al llamado peso atómico, correctamente referido como la masa atómica relativa  $A_r$  del isótopo del carbono con el número másico 12 (carbono 12,  $^{12}\text{C}$ ). La escala unificada así obtenida proporciona las masas atómicas y moleculares relativas, también conocidas como pesos atómicos y moleculares, respectivamente. Este acuerdo no se ve afectado por la redefinición del mol.

La magnitud utilizada por los químicos para especificar la cantidad de elementos o compuestos químicos se llama "cantidad de sustancia". La cantidad de sustancia, símbolo  $n$ , se define como proporcional al número de entidades elementales especificadas  $N$  en una muestra, siendo la constante de proporcionalidad una constante universal que es la misma para todas las entidades. La constante de proporcionalidad es la inversa de la constante de Avogadro  $N_A$ , de modo que  $n = N/N_A$ . La unidad de cantidad de sustancia se denomina *mol*, símbolo mol. Siguiendo las propuestas de IUPAP, IUPAC e ISO, el CIPM desarrolló en 1967 una definición del mol, que confirmó en 1969, al especificar que la masa molar del carbono 12 debería ser exactamente 0,012 kg/mol. Esto permitió que la cantidad de sustancia  $n_S(X)$  de cualquier muestra pura  $S$  de una entidad  $X$  pudiera determinarse directamente a partir de la masa de la muestra  $m_S$  y la masa molar  $M(X)$  de la entidad  $X$ , determinándose la masa molar a partir de su masa atómica relativa  $A_r$  (peso atómico o molecular) sin la necesidad de un conocimiento preciso de la constante de Avogadro, mediante el uso de las relaciones

$$n_S(X) = m_S/M(X), \text{ y } M(X) = A_r(X) \text{ g/mol}$$

Por lo tanto, esta definición del mol dependía de la definición del kilogramo, basada en un artefacto.



El valor numérico de la constante de Avogadro definida de esta manera era igual al número de átomos en 12 gramos de carbono 12. Sin embargo, debido a los avances tecnológicos recientes, este número se conoce ahora con tal precisión que se ha hecho posible una definición más simple y universal del mol, a saber, especificando exactamente el número de entidades en un mol de cualquier sustancia, fijando así el valor numérico de la constante de Avogadro. Esto tiene el efecto de que la nueva definición del mol y el valor de la constante de Avogadro ya no dependen de la definición del kilogramo. Por lo tanto, se enfatiza la distinción entre las magnitudes, fundamentalmente diferentes, "cantidad de sustancia" y "masa". La definición actual del mol basada en un valor numérico fijo de la constante de Avogadro,  $N_A$ , se adoptó en la Resolución 1 de la 26ª CGPM (2018).

### **Unidad de intensidad luminosa, la candela**

Las unidades de intensidad luminosa, que se basaban en patrones de llama o de filamento incandescente, utilizados en varios países antes de 1948, fueron reemplazadas inicialmente por la "nueva candela" basada en la luminancia de un radiador planckiano (un cuerpo negro) a la temperatura de congelación del platino. Esta modificación había sido preparada por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE, en sus siglas en francés) y por el CIPM antes de 1937 y la decisión fue promulgada por el CIPM en 1946. Luego fue ratificada en 1948 por la 9ª CGPM, que adoptó un nuevo nombre internacional para esta unidad, la *candela*, símbolo cd; en 1954, la 10ª CGPM estableció la candela como unidad básica; en 1967, la 13ª CGPM (Resolución 5, CR, 104 y *Metrologia*, 1968, **4**, 43-44) modificó esta definición.

En 1979, debido a las dificultades para realizar un radiador de Planck a altas temperaturas, y las nuevas posibilidades que ofrecía la radiometría, p. ej., la medición de la potencia de radiación óptica, la 16ª CGPM (1979, Resolución 3, CR, 100 y *Metrologia*, 1980, **16**, 56) adoptó una nueva definición de la candela.

La definición actual de la candela utiliza un valor numérico fijo para la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , adoptada en la Resolución 1 de la 26ª CGPM (2018).



## Listado de siglas y acrónimos utilizados en esta publicación

### 1 Siglas y acrónimos de laboratorios, comités y conferencias

BAAS	British Association for the Advancement of Science (Asociación Británica para el Avance de la Ciencia)
BIH	Bureau International de l'Heure (Oficina Internacional de la Hora)
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures (Oficina Internacional de Pesas y Medidas)
CARICOM	Caribbean Community (Comunidad Caribeña)
CCAUV	Comité Consultatif de l'Acoustique, des Ultrasons et des Vibrations (Comité Consultivo sobre Acústica, Ultrasonidos y Vibraciones)
CCDS	Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (Comité Consultivo para la Definición del Segundo) (véase CCTF)
CCE	Comité Consultatif d'Électricité (Comité Consultivo sobre Electricidad) (véase CCEM)
CCEM	Comité Consultatif d'Électricité et Magnétisme (Comité Consultivo sobre Electricidad y Magnetismo) (antes CCE)
CCL	Comité Consultatif des Longueurs (Comité Consultivo sobre Longitud)
CCM	Comité Consultatif pour la Masse et les Grandeurs Apparentées (Comité Consultivo sobre Masa y Magnitudes Relacionadas)
CCPR	Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (Comité Consultivo sobre Fotometría y Radiometría)
CCQM	Comité Consultatif pour la Quantité de Matière: Métrologie en Chimie et Biologie (Comité Consultivo sobre Cantidad de Sustancia: Metrología en Química y Biología)
CCRI	Comité Consultatif des Rayonnements Ionisants (Comité Consultivo sobre Radiaciones Ionizantes)
CCT	Comité Consultatif de Thermométrie (Comité Consultivo sobre Termometría)
CCTF	Comité Consultatif du Temps et des Fréquences (Comité Consultivo sobre Tiempo y Frecuencia) (antes CCDS)
CCU	Comité Consultatif des Unités (Comité Consultivo sobre Unidades)
CGPM	Conférence Générale des Poids et Mesures (Conferencia General de Pesas y Medidas)
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage (Comisión Internacional de Iluminación)
CIPM	Comité International des Poids et Mesures (Comité Internacional de Pesas y Medidas)
CODATA	Committee on Data for Science and Technology (Comité de Datos para la Ciencia y la Tecnología)
CR	<i>Comptes Rendus</i> de la Conferencia General de Pesas y Medidas, CGPM
IAU	International Astronomical Union (Unión Astronómica Internacional)
ICRP	International Commission on Radiological Protection (Comisión Internacional de Protección Radiológica)
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements (Comisión Internacional sobre Unidades y Medidas de Radiación)

IEC	International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional)
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service (Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia)
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada)
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics (Unión Internacional de Física Pura y Aplicada)
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale (Organización Internacional de Metrología Legal)
OMS	Organisation Mondiale de la Santé (Organización Mundial de la Salud)
PV	<i>Procès-Verbaux</i> del Comité Internacional de Pesas y Medidas, CIPM
SUNAMCO	Commission for Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Masses and Fundamental Constants (IUPAP) (Comisión para Símbolos, Unidades, Nomenclatura, Masas Atómicas y Constantes Fundamentales)

## 2 Siglas y acrónimos de términos científicos

CGS	Sistema tridimensional coherente de unidades basado en las tres unidades mecánicas centímetro, gramo y segundo
EPT-76	Échelle Provisoire de Température de 1976 (Escala Provisional de Temperatura de 1976)
GUM	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (Guía para la expresión de la incertidumbre de medida).
IPTS-68	International Practical Temperature Scale of 1968 (Escala Práctica Internacional de Temperatura de 1968)
ISQ	International System of Quantities (Sistema Internacional de Magnitudes)
ITS-90	International Temperature Scale of 1990 (Escala Internacional de Temperatura de 1990)
MKS	Sistema de unidades basado en las tres unidades mecánicas metro, kilogramo y segundo
MKSA	Sistema tetradimensional de unidades basado en el metro, el kilogramo, el segundo y el amperio
SI	Système International d'Unités (Sistema Internacional de Unidades)
TAI	Temps Atomique International (Tiempo Atómico Internacional)
TCG	Temps-Coordonnée Géocentrique (Tiempo Coordinado Geocéntrico)
TT	Terrestrial Time (Tiempo Terrestre)
UTC	Coordinated Universal Time (Tiempo Universal Coordinado)
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water (Patrón de Viena de Agua Oceánica Media)

# Índice

## A

aceleración de la gravedad, valor normal de ( $g_n$ ), 32, 47, 94  
 actividad de un radionucleido, 24, 56  
 absolutas, unidades, 99  
 absorbida, dosis, 24, 27, 28, 44, 61, 63, 65, 72  
 adimensionales, magnitudes, 69  
 agrupación de dígitos, dígitos en grupos de tres, 37, 50, 73  
 agua, composición isotópica, 74, 77, 80, 100  
 agua, punto triple, 11, 19, 43, 48, 49, 50, 57, 74, 77, 82, 89, 93, 94, 100  
 amperio (A), 11, 14, 16, 18, 19, 27, 48, 50, 51, 53, 54, 69, 77, 78, 80, 81, 82, 85, 87, 88, 89, 93, 95, 96, 97, 99  
 ángulo, 23, 24, 25, 32, 36, 37, 38, 39, 53, 63, 64  
 arcosegundo (segundo de arco), 32  
 arco, microsegundo de ( $\mu$ s), 32  
 arco, milisegundo de (mas), 32  
 astronómica, unidad, 32  
 atmósfera estándar, 51  
 atómico, peso, 100  
 átomo de cesio, niveles hiperfinos, 17, 55, 57  
 átomo-gramo, molécula-gramo, 100  
 Avogadro, constante de, 13, 14, 15, 20, 21, 77, 80, 81, 85, 88, 90, 97, 100, 101  
 Avogadro, número, 20, 90

## B

BAAS, Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, 96  
 balanza de Kibble, 94, 95  
 bar, 50  
 básica(s), unidad(es), 8, 11-12, 16-20, 24-26, 41, 93, 98

básica, magnitud, 16, 22, 27, 95  
 becquerel (Bq), 24, 25, 27, 28, 44, 56, 61  
 bel, belio (B), 32, 33  
 Boltzmann, constante de, 13, 14, 15, 19, 77, 80, 81, 85, 88, 89, 94, 97, 100

## C

caloría, 49, 50  
 calorífica, capacidad, 26, 27, 35, 58  
 cálculo de una magnitud, 35, 36  
 candela (cd), 44, 45, 47, 50, 51, 53, 54, 58, 62, 69, 77, 79, 80, 81, 82, 88, 90, 93, 95, 97, 101; nueva candela, 44, 45, 47, 50, 58, 62, 101  
 cantidad de sustancia, 15, 16, 20, 21, 22, 26, 38, 44, 60, 74, 77, 80, 81, 85, 89, 90, 95, 97, 100  
 capacidad calorífica, 26, 27, 35, 58  
 carbono 20, 33, 60, 82, 89, 100, 101  
 carga elemental, 13, 14, 15, 18, 79, 80, 81, 85, 88, 89, 97, 99  
 Celsius, temperatura, 20, 24, 25, 37, 43  
 Celsius, grado ( $^{\circ}$ C), 20, 24, 25, 28, 35, 37, 43, 49, 50  
 Cesio, frecuencia del, 15, 17, 55, 56, 89, 94  
 CGS, 49, 96  
 cifras, grupos de, 37, 50, 73  
 cinemática, viscosidad,(stokes), 54  
 CODATA, 33, 80, 82, 85, 89  
 coherentes, unidades derivadas, 19, 24, 25, 26, 70, 95  
 composición isotópica del agua, 43, 57, 74, 80  
 constante explícita, definición, 81, 94  
 constante de Avogadro, 13, 14, 15, 20, 21, 77, 80, 81, 85, 88, 90, 97, 100, 101

constante de Boltzmann, 13, 14, 15, 19, 77, 80, 81, 85, 88, 89, 94, 97, 100

constante de estructura fina, 15, 82, 89, 94

constantes definitorias, 8, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 22, 24, 88, 89, 94, 97

constante de Josephson ( $K_J$ ,  $K_{J-90}$ ), 43, 66, 79, 82, 89

constante de Planck, 8, 13, 14, 17, 18, 77, 79, 80, 85, 88, 89, 94, 97, 99

constante de Rydberg, 94

constante de von Klitzing ( $R_K$ ,  $R_{K-90}$ ), 43, 67, 79, 82, 89

constantes fundamentales de la física, 8, 14, 69, 71, 77, 78, 79, 80, 83, 88, 97

constante magnética, permeabilidad del vacío, 19, 82, 89, 99

conteo, magnitudes de, 15, 23

continuidad, 9, 14

Convención del Metro, 3, 5, 8, 11, 46, 49, 52, 95, 96, 98

corriente eléctrica, 16, 18, 19, 22, 27, 48, 51, 53, 81, 85, 89, 93, 94, 95, 96, 99

Coulomb, ley, 14

cuántico, patrón, 99

culombio (C), 14, 24, 26, 27, 48, 50, 54, 80, 88

curie (Ci), 56

**D**

dalton (Da), 32, 33

decibelio (dB), 32, 33

decimal, separador, 37, 45, 73

decimal, sistema métrico, 93, 96, 97

definición explícita de una unidad, 93, 94

definiciones de las unidades básicas, 16-21

derivada, magnitud, 24-27

derivada(s), unidad(es), 11, 12, 16, 24-28, 35, 39, 44, 95, 96, 97

desdoblamiento hiperfino del átomo de cesio, 55, 57

día (d), 32

dígitos en grupos de tres, agrupación de dígitos, 37, 50, 73

dimensión (de una magnitud), 22-23

dimensión, magnitudes sin, 64

dina (dyn), 50, 51

dinámica, viscosidad (poise), 26, 54

dosis absorbida, 25, 27, 28, 44, 61, 63, 72

dosis equivalente, véase sievert

**E**

efecto Hall cuántico, 66, 67, 79, 82, 89, 99

efecto Josephson, 66, 79, 82, 89, 94, 99

eficacia luminosa, 13, 14, 15, 21, 62, 80, 81, 88, 90, 97, 101

eléctrica, corriente, 16, 18, 19, 22, 27, 48, 51, 53, 81, 85, 89, 93, 94, 95, 96, 99

eléctricas, unidades, 8, 43, 96

electromagnéticas magnitudes, 29, 61

electrón, masa del, 95

electronvoltio (eV), 32, 33

elemental, carga, 13, 14, 15, 18, 79, 80, 81, 85, 88, 89, 97, 99

ergio, 50

escala de temperatura termodinámica, 50

Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90), 20, 43, 57, 67

escotópico, 62

escritura del valor de una magnitud, 36

esfera de Silicio, 94

establecimiento del SI, 41, 95-96

estereorradián (sr), 22-25, 27, 38, 39, 47, 53, 58, 62-64, 68, 69

estructura fina, constante de, 15, 82, 89, 94

**F**

faradio (F), 14, 24, 27, 48, 50, 54

escritura del valor de una magnitud, 36-37  
 fotobiológicas, magnitudes, 9, 28, 92  
 fotométricas, magnitudes, 58  
 fotométricas, unidades, 44, 47  
 fotópica, visión, 62  
 frecuencia del Cesio, 15, 17, 89, 94  
 fundamentales, constantes (de la física), 8, 14, 69, 71, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 88, 97

**G**

gal (Gal), 32  
 Gauss (G), 96  
 general, relatividad, 17, 29, 71  
 Giorgi, 96  
 grado Celsius (°C), 20, 25, 28, 35, 37, 43, 49, 50  
 gramo, 31, 50, 56, 96  
 gray (Gy), 25, 27, 28, 44, 61, 65, 72  
 grupos de cifras, 37, 50, 73

**H**

Hall, efecto (incl. efecto Hall cuántico), 66, 67, 79, 82, 89, 94, 99  
 hectárea (ha), 32  
 henrio (H), 24, 27, 48, 50, 54  
 hercio (Hz), 13, 14, 24, 25, 27, 50, 54, 80, 88  
 históricas, notas, 93-101  
 hora (h), 32, 50

**I**

incertidumbre, 13, 14, 37  
 intensidad luminosa, 16, 21, 22, 44, 204, 95, 97  
 ionizante, radiación, 4, 28, 61, 63, 65, 72  
 ISO/IEC serie 80000, 12, 16, 35  
 ISO/TC 12, 63  
 ITS-90, Escala Internacional de Temperatura de 1990, 20, 43, 57, 67

IU OMS, Unidades Internacionales de la Organización Mundial de la Salud, 29

IUPAC, 97, 100; Libro Verde, 35

IUPAP SUNAMCO, 35; Libro Rojo, 35

IU WHO, véase IU OMS

**J**

Josephson, constante ( $K_J$ ,  $K_{J-90}$ ), 43, 66, 79, 82, 89

Josephson, efecto, 66, 79, 82, 89, 94, 99

julio (J), 14, 15, 24-25, 48, 49, 54, 80, 88

**K**

katal (kat), 25, 69

kelvin (K), 11, 14, 15, 16, 20, 25, 43, 50, 74, 77, 78, 80, 81, 82, 85, 87, 88, 89, 204, 93, 94, 95, 97, 100

Kibble, balanza de, 94, 95

kibibyte (kilobyte), 30

kilogramo, 11, 14, 16, 18, 24, 31, 42, 46, 47, 48, 51, 53, 56, 69, 77-82, 85, 87, 88, 89, 90, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101

kilogramo, múltiplos (y submúltiplos) del, 30, 56

kilogramo, prototipo internacional del, 18, 47, 77-99

kilogramo, verificación, 99

**L**

legislación sobre unidades, 12

ley de Coulomb, 14

litro (L o l), 32, 34, 45, 50, 54, 55, 63

longitud, 13, 16, 17, 22, 32, 41, 93, 94, 95, 96, 98

lumen (lm), 14, 25, 28, 47, 50, 54, 80, 88; nuevo lumen, 44

luminosa, eficacia, 13, 14, 15, 21, 62, 80, 81, 88, 90, 97, 101

luminosa, intensidad, 16, 21, 22, 44, 95, 97, 101

lux (lx), 25, 28, 50, 54

luz, velocidad en el vacío, 8, 12, 13, 14, 17, 41, 61, 64, 70, 79, 80, 81, 88, 89, 93, 94, 97, 98

## M

magnitud, 13  
 magnitud básica, 16, 22, 27, 95  
 magnitud, cálculo, 35, 36  
 magnitud derivada, 16, 24, 26-27  
 magnitud, escritura del valor de una, 36  
 magnitud, valor 13, 35-37  
 magnitud, valor numérico, 35, 36  
 magnitud, símbolos, 22, 23, 24  
 magnitudes adimensionales, 69  
 magnitudes biológicas, unidades 92  
 magnitudes de conteo, 23, 38  
  
 magnitudes de recuento, 23, 38  
 magnitudes electromagnéticas, 29, 61  
 magnitudes fotométricas, 47  
 magnitudes, símbolos recomendados, 16, 22  
 magnitudes sin dimensión, 64  
 masa, 16, 17, 22, 31, 32, 42, 93, 94, 95, 96, 99-99  
 masa del electrón, 95  
 masa molar, 20, 82, 89, 100  
 masa y peso, 47  
 Maxwell, 96  
 mesópico, 62  
 métrico, sistema, 3, 8, 47, 93, 96, 97  
 metro (m), 8, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 41, 93, 94, 95, 96, 98  
 metro, prototipo internacional del, 52, 98  
 microsegundo de arco ( $\mu\text{s}$ ), 32  
 milisegundo de arco (mas), 32  
 minuto (min), 32  
 MKS, sistema, 48, 49, 96  
 MKSA, sistema, 97  
 mol (mol), 13, 16, 20, 21, 25, 26, 53, 69, 70, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 93, 95, 97, 100, 101  
 molar, masa, 20, 21, 82, 89, 100  
 molécula-gramo, átomo-gramo, 100  
 molécula-gramo, átomo-gramo, 100

molecular, peso, 100  
 múltiplos, prefijos para, 24, 25, 30, 31, 53, 56, 59, 62, 68, 70, 96  
 múltiplos (y submúltiplos) del kilogramo, 31, 56

## N

neper (Np), 32, 33  
 newton (N), 19, 24, 25, 27, 48, 50, 54, 59  
 niveles hiperfinos del átomo de cesio, 80, 81  
 nombre(s) de unidad(es), 27, 34, 35, 45  
 nombres y símbolos especiales de unidades, 24-27, 95  
 notas históricas, 93-101  
 número de Avogadro, 20, 90

## O

obligatorios, símbolos de unidades, 16, 34-35  
 ohmio ( $\Omega$ ), 24, 43, 48, 50, 54, 59, 65, 66, 67, 82, 89, 96, 99  
 OIML, 12, 83, 86  
 OMS, 29

## P

pascal (Pa), 24, 59  
 patrón cuántico, 99  
 permeabilidad del vacío, constante magnética, 19, 82, 89, 99  
  
 peso atómico, 100  
 peso molecular, 100  
 pie, 33  
 Planck, constante de, 8, 13, 14, 17, 18, 77, 79, 80, 85, 88, 89, 94, 97, 99  
 poise (P), 50  
 porcentaje, por ciento, 38  
 potencia, balanza de, véase balanza de Kibble o Kibble, balanza de  
 ppb, 38  
 ppm, 38  
 ppt, 38  
 prácticas, unidades 96



prefijos del SI, 24-25, 30, 31, 32, 34, 38, 40, 53, 95, 96, 97  
 prefijos para múltiplos, 24, 25, 30, 31, 53, 56, 59, 62, 68, 70, 96  
 prefijos para submúltiplos, 30-31, 53, 56, 59, 68  
 prototipo internacional del kilogramo, 18, 47, 77-99  
 prototipo internacional del metro, 52, 98  
 pulgada, 33  
 punto triple del agua, 11, 19, 43, 48, 49, 50, 57, 74, 77, 82, 89, 93, 94, 100

**Q**

química clínica, 21, 69

**R**

radiación ionizante, 4, 28, 61, 63, 65, 72  
 radián (rad), 23, 24, 25, 38, 39, 53, 63, 64, 68  
 Radionucleido, actividad 25, 56  
 realización de una unidad, 11-12, 14-15, 22, 29, 93-95  
 recuento, magnitudes de, 23, 38  
 relaciones logarítmicas, magnitudes, 32-33  
 relatividad general, 71  
 relatividad, 17, 29, 71  
 Rydberg, constante de, 94

**S**

segundo (s), 8, 14, 16, 17, 32, 34, 37, 42, 93, 94, 95, 96, 97-98  
 separador decimal, 37, 45, 73  
 SI, véase Sistema Internacional de Unidades  
 SI, establecimiento 41, 95-96  
 SI, prefijos, 24-25, 30, 31, 32, 34, 38, 40, 53, 95, 96, 97  
 siemens (S), 24, 43  
 sievert (Sv), 25, 28, 44, 63, 65, 72  
 Silicio, esfera de, 94  
 símbolos de una magnitud, 22, 23, 24

símbolos obligatorios para las unidades, 16, 34-35  
 símbolos recomendados para las magnitudes, 16, 22  
 símbolos y nombres especiales de unidades, 24-27, 95  
 Sistema Internacional de Magnitudes, 16  
 Sistema Internacional de Unidades (SI), 8-9, 11-12, 13-16, 41, 93-101  
 sistema métrico, 3, 8, 47, 93, 96, 97  
 sistema métrico decimal, 96  
 sistema MKS, 48, 49, 96  
 sistema MKSA, 97  
 sonido, unidades para, 28  
 stilb (sb), 50  
 submúltiplos, prefijos para, 30-31, 53, 56, 59, 68  
 suplementarias, unidades, 39, 41, 44, 45, 53, 59, 63, 64, 68, 69, 95, 97  
 sustancia, cantidad de, 15, 16, 20, 21, 22, 26, 38, 44, 60, 74, 77, 80, 81, 85, 89, 90, 95, 97, 100

**T**

TAI, Tiempo Atómico Internacional, 59, 60  
 temperatura Celsius, 20, 25, 37, 43  
 temperatura termodinámica, 16, 19, 22, 43, 94, 95, 97, 100  
 temperatura termodinámica, escala de, 50  
 tesla (T), 24, 54  
 Thomson, 96  
 tiempo (duración), 16, 22, 32, 42, 95, 96, 97, 98  
 Tiempo Atómico Internacional (TAI), 59, 60  
 Tiempo Universal Coordinado (UTC), 61  
 tonelada, 32, 50  
 tonelada métrica, 33

**U**

unidad (SI), 16-29

unidad astronómica, 32  
unidad(es) básica(s), 8, 11-12, 16-20, 24-26, 41, 93, 98  
unidad(es) derivada(s), 11, 12 16, 24-28, 35, 39, 44, 95, 96, 97  
unidad explícita, definición, 93, 94  
unidad(es), nombre(s), 35, 58  
unidad, símbolos, 34  
unidad, realización, 11-12, 14-15, 22, 29, 93-95  
unidades absolutas, 99  
unidades básicas definiciones 16-21  
unidades derivadas coherentes, 19, 24, 25, 26, 70, 95  
unidades eléctricas, 8, 43, 96  
unidades fotométricas, 44, 47  
  
unidades fuera del SI, 32-33, 36, 69  
Unidades Internacionales de la Organización Mundial de la Salud (IU), WHO, 29  
unidades, legislación, 12  
unidades, nombres de, 35, 59  
unidades, nombres y símbolos especiales, 24-27, 95  
unidades para magnitudes biológicas, 92  
unidades para relaciones logarítmicas, 32-33  
unidades para sonido, 28  
unidades prácticas, 96  
unidad(es), símbolo(s) de, 34  
unidades, símbolos obligatorios, 16, 34-35

unidades suplementarias, 39, 41, 44, 45, 53, 59, 63, 64, 68, 69, 95, 97  
UTC, Tiempo Universal Coordinado, 61

## V

valor de una magnitud, 13, 35-37  
valor de una magnitud, escritura del, 36  
valor normal de la aceleración de la gravedad ( $g_n$ ), 32, 47, 94  
valor numérico de una magnitud, 35, 36  
vatio (W), 14, 24, 48, 50, 54 80, 88.  
velocidad de la luz en el vacío, 13, 14, 17, 70, 80, 81 88, 89, 97,  
verificación del kilogramo, 99  
viscosidad cinemática,(stokes), 54  
viscosidad dinámica, (poise), 26, 54  
visión fotópica, 62  
voltio (V), 24, 48, 50, 54, 65, 66, 82, 89, 96, 99  
von Klitzing, constante de ( $R_K, R_{K-90}$ ), 43, 67, 79, 82, 89

## W

weber (Wb), 138, 160, 166  
Weber, 205  
WHO, véase OMS

## Y

yarda, 146



# CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA

**c/ Alfar, 2**  
**28760 Tres Cantos**  
**Madrid**  
**España**

NIPO: 113-19-008-1 (papel)  
NIPO: 113-19-009-7 (digital)

