

Revisión del SI



un SI para el siglo XXI

CEM
CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

El **Centro Español de Metrología (CEM)**, máximo órgano técnico en el campo de la metrología en España, representa al Estado en las Organizaciones Internacionales de metrología científica y legal. Es un Organismo Autónomo de la Administración General del Estado adscrito en la actualidad al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, a través de la Secretaria General de Industria y de la Pequeña y Mediana Empresa.

El **CEM** proporciona, en última instancia, trazabilidad metrológica a las mediciones de todo el sistema industrial español y ayuda a soportar la calidad y aceptación de nuestros productos y servicios. El CEM es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MRA) del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), lo que permite que sus certificados sean reconocidos en todos los países firmantes, facilitando de esta manera el libre comercio internacional y la eliminación de las barreras técnicas de los exportadores españoles.

“Innovando en metrología por un mundo más exacto”

Edita: Centro Español de Metrología
NIPO: 067180021

1ª Edición. 28 de febrero 2018

Prefacio

Con independencia del tipo de unidades, todas las civilizaciones prósperas conocidas han dispuesto de un sistema de unidades (pesas y medidas) como herramienta de apoyo a su desarrollo. Nuestra sociedad del siglo XXI dispone del Sistema Internacional de Unidades, SI, establecido con este nombre en 1960, en base a los planteamientos y necesidades de la época.

Las actuales unidades de medida, objetivas, independientes del hombre y sus actividades, y acordadas por convenio, facilitan el entendimiento y la colaboración entre los hombres, pero en un entorno altamente innovador y disruptivo como el actual, donde están ocurriendo varias revoluciones tecnológicas, es necesaria una revisión conceptual de gran calado del SI. Por ello, las unidades básicas van a definirse en base a una serie de constantes naturales, por definición invariables. Es un cambio sustancial, conceptual y paradigmático del Sistema Internacional de Unidades.

La idea de definir las unidades de forma universal no es nueva, ya que en el siglo XIX, James Clerk Maxwell ya sugirió utilizar las propiedades invariables de los átomos para definir las unidades de medida de longitud, tiempo y masa. Posteriormente Max Planck también sugirió el uso de las “constantes” al formular su ley de radiación. Las realizaciones prácticas y las tecnologías disponibles han ido retrasando algo que estaba en los planteamientos originales de la Revolución Francesa y su Sistema Métrico Decimal: “para todos los tiempos y todos los pueblos”. Ha llegado el momento de dar el salto al futuro.

Esta revisión del SI, una vez establecida, se considerará con seguridad un hito sobresaliente en la historia de la ciencia y de la tecnología.

Esta publicación persigue informar de forma breve sobre los aspectos más destacados de la revisión del SI, aunque sin llegar a profundizar en la materia o pretender abarcar todos los enfoques que tan paradigmática revisión contiene.

Índice

1. Prefacio
2. Introducción
3. Evolución. Decisiones relevantes de la CGPM
4. ¿Es necesaria una redefinición de las unidades básicas?
5. Constantes naturales
6. ¿En qué consiste la revisión del SI?
7. Unidades básicas redefinidas
8. Consecuencias de la revisión del SI

Los cambios en el SI proporcionarán un trampolín para futuras innovaciones

Introducción

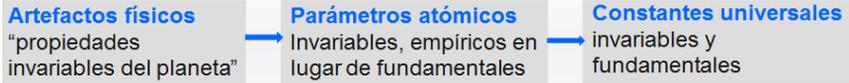
El Sistema Internacional de Unidades, SI, es el sistema adoptado internacionalmente, utilizado en la práctica científica y el único legal en España, en la Unión Europea y en numerosos otros países. El SI parte de un pequeño número de unidades denominadas *básicas* (metro, kilogramo, segundo, amperio, kelvin, mol y candela), correspondientes a otras tantas magnitudes. A partir de ellas, se obtienen las denominadas *derivadas*, como producto de potencias de las básicas. Cuando este producto de potencias no incluye ningún factor numérico distinto de la unidad, las unidades derivadas se denominan *coherentes*. Así pues, el SI es un sistema coherente de unidades, que permite cuantificar cualquier magnitud mensurable de interés en la investigación, la industria, el comercio o la sociedad, en campos tan variados como pueden ser la salud, la seguridad, o la protección del medio ambiente.

El SI sirve hoy como lenguaje común de las comunicaciones, la tecnología, la investigación, la ciencia y el comercio internacional, y se considera uno de los grandes logros del siglo XX y una herramienta fundamental en la globalización.

El SI no es un sistema de unidades estático, sino que evoluciona a lo largo del tiempo para adaptarse a las necesidades y requisitos de medición de la sociedad. Actualmente, tras años de trabajo, está concluyendo el proceso que conducirá a la revisión más importante del SI, desde su establecimiento con tal nombre en 1960. La redefinición de las unidades básicas del SI quedará ligada a *constantes universales*, haciéndolas válidas en forma atemporal, y dejando abiertas sus realizaciones prácticas a mejoras futuras. El SI revisado será aprobado por la 26ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) en noviembre de 2018, entrando en vigor el *Día Mundial de la Metrología*, el 20 de mayo, de 2019.

Evolución

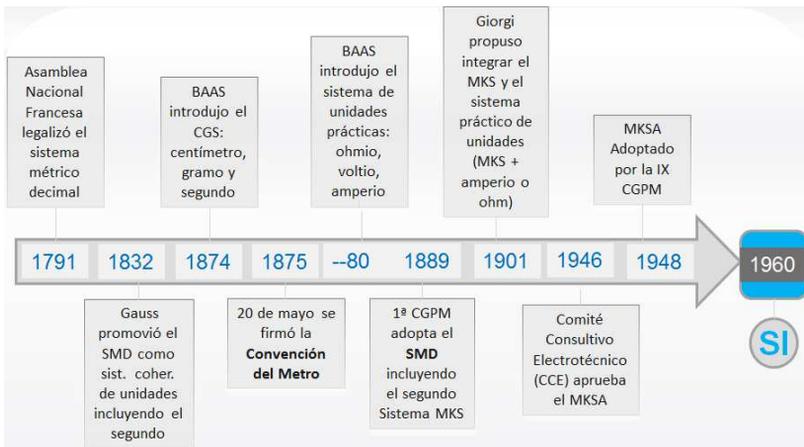
La evolución de los sistemas de unidades ha seguido el proceso:



De esta forma, desde su creación, el SI ha evolucionado, definiéndose cada una de las unidades básicas en términos de invariantes, permaneciendo en la actualidad solamente el kilogramo como único patrón materializado.

Los antecedentes del SI se remontan a la adopción del Sistema Métrico Decimal (SMD) en tiempos de la Revolución Francesa, y más concretamente al 22 de junio de 1799, cuando los dos patrones de platino que representaban al metro y al kilogramo, fueron depositados en los Archivos de la República, en París. La 1ª CGPM sancionó dicho Sistema en 1889, junto a los nuevos prototipos del metro y el kilogramo, con posterioridad a la firma del Tratado de la Convención del Metro, el 20 de mayo de 1875, y tras introducir el segundo astronómico como unidad de tiempo.

Debido al auge científico y técnico a lo largo de los siglos XIX y XX, el Sistema Métrico Decimal fue evolucionando e incluyendo nuevas unidades, como el amperio, el kelvin y la candela, en 1948, que dieron origen a sistemas de unidades como el CGS (cm, g, s), el MKS (m, kg, s) y el MKSA (m, kg, s, A).



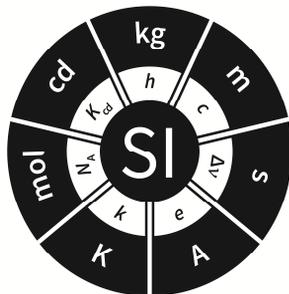
Finalmente, en 1960 la 11ª CGPM estableció definitivamente el nombre de S.I., basado en 6 unidades fundamentales: **metro, kilogramo, segundo, amperio, kelvin y candela**. En 1971 se agregó la séptima unidad fundamental: **el mol**.

Decisiones relevantes de la CGPM

9ª CGPM, 1948	Encomienda al CIPM un estudio para reglamentar las unidades de medida. Define el amperio.
10ª CGPM, 1954	Adopta el sistema de 6 unidades básicas. Elige el punto triple del agua. introducción del amperio, del kelvin y de la candela como unidades básicas.
11ª CGPM, 1960	Adopta el nombre de Sistema Internacional de Unidades y las siglas SI. Redefine el metro y el segundo. Fija reglas para los prefijos.
12ª CGPM, 1964	Decide sobre el litro y el decímetro cúbico. Se introducen los prefijos femto y atto.
13ª CGPM, 1967	Define el segundo en función del átomo de cesio 133. Redefine la candela. Adiciona unidades derivadas. El $^{\circ}\text{K}$ se reemplaza por K. Define la unidad de temperatura termodinámica.
14ª CGPM, 1971	Define e incorpora el mol como séptima unidad de base. Introduce el pascal y el siemen.
15ª CGPM, 1975 (UTC).	Establece el Tiempo Universal Coordinado como escala de tiempo. Introduce el becquerel y el gray .Se adicionan los prefijos exa y peta.
16ª CGPM, 1979	Redefine la candela. Introduce el sievert. Se establecen los símbolos l y L para el litro.
17ª CGPM, 1983	Redefine el metro en función de la velocidad de la luz .
19ª CGPM, 1991	Introduce los prefijos Z, Y, z, y.
20ª CGPM, 1995	Elimina la clase de unidades suplementarias dentro del contexto del SI. El radian y estereorradián se consideran unidades derivadas adimensionales .
21ª CGPM, 1999	Establece el katal como unidad SI derivada.
22ª CGPM, 2003	Permite como separador decimal la coma o el punto en función de la práctica francesa o anglosajona respectivamente.

26ª CGPM, 2018: Revisión histórica del SI. Nuevas definiciones del kilogramo, amperio, kelvin y mol, y adaptación de las del metro, segundo y candela. Las definiciones revisadas se basarán en siete constantes.

El SI aplicará las reglas de la naturaleza para crear las reglas de las mediciones



¿Es necesaria una redefinición de las unidades básicas?

1. Las realizaciones prácticas de las unidades básicas basadas en patrones materializados generan falta de estabilidad en el tiempo y el espacio y potencian grandemente el riesgo de daño o pérdida. Ejemplo: el kilogramo.

$$\Delta m/m_{\text{IPK}} = -50 \mu\text{g/siglo} (-5 \times 10^{-8})$$

2. Las realizaciones prácticas de las unidades básicas a través de experimentos físicos mejoran la reproducibilidad en cualquier tiempo y lugar.
3. Algunas unidades básicas son dependientes de otras y esto limita sus potenciales desarrollos y la disminución de sus incertidumbres. Es el caso del amperio, dependiente del kilogramo.
4. La ciencia y la tecnología actuales y futuras requieren:
 - tolerancias de fabricación más estrechas.
 - menores incertidumbres de medición en todos los campos.
5. Las nuevas revoluciones tecnológicas (industria 4.0, 2ª revolución cuántica, internet de las cosas) y campos grandemente expansivos como la nanotecnología o la biotecnología requieren medidas mucho más exactas y fiables.

Se busca un SI donde las realizaciones prácticas de las unidades estén separadas conceptualmente de sus definiciones, de modo que las unidades pueden, por principio, realizarse independientemente en cualquier lugar y en cualquier momento. Además, se pueden añadir nuevas realizaciones a medida que se desarrollen las tecnologías, sin la necesidad de redefinir la unidad.

Constantes naturales

Como ya expresó Max Planck en su artículo sobre los procesos de radiación irreversible, un sistema de unidades debe basarse preferentemente en las propiedades invariables de la naturaleza.

En el SI, para las aplicaciones prácticas, se ha acordado fijar la dimensión de siete unidades básicas. Por este motivo, se deben seleccionar otras tantas constantes, habiéndose elegido las siguientes:

Unidad Básica		Constantes utilizadas para definir las unidades	
		SI actual	SI revisado
segundo	s	$\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$ frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133
metro	m	c	c velocidad de la luz en el vacío
kilogramo	kg	$m(I\text{PK})$	h constante de Planck
amperio	A	μ_0 (permeabilidad magnética del vacío)	e carga elemental
kelvin	K	T_{TPW}	k constante de Boltzmann
mol	mol	$M(^{12}\text{C})$	N_{A} constante de Avogadro
candela	cd	K_{cd}	K_{cd} eficacia luminosa de una fuente emitiendo a 540 THz

El conjunto de las siete constantes se ha elegido de modo que proporcionen una referencia fundamental, estable y universal, y al mismo tiempo permitan realizaciones prácticas con menores incertidumbres.

No todas estas constantes son constantes naturales fundamentales. Realmente, constantes naturales fundamentales, son la velocidad de la luz c , la constante de Planck h y la carga elemental e .

Las tres constantes siguientes son en realidad factores de conversión:

- La constante de Boltzmann k permite la conversión entre la unidad de temperatura kelvin y la unidad de energía julio, donde el valor numérico de k está condicionado por la elección histórica de la escala de temperatura.
- La constante de Avogadro N_A establece la cantidad de entidades elementales que contiene 1 mol de cantidad de sustancia.
- La eficacia luminosa K_{cd} permite convertir la potencia en vatios, de una fuente de radiación monocromática de longitud de onda 555 nm, en un flujo luminoso medido en lúmenes (lm), que es una medida de la luz irradiada en todas las direcciones del espacio. La conexión con la unidad básica candela (cd) se debe a que una fuente de radiación que genera un flujo luminoso de 4π lm, tiene por unidad de ángulo espacial (estereorradián) una intensidad luminosa de $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/sr}$. Es decir, es una constante técnica relacionada con la respuesta espectral convencional del ojo humano.

Está claro que estas tres últimas unidades básicas definidas por factores de conversión son una concesión del nuevo sistema SI a las necesidades prácticas de la industria, la técnica y la investigación.

Por último, la séptima contante, la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, $\Delta\nu_{Cs}$, tiene el carácter de parámetro atómico, resultando un buen compromiso práctico.

Con los valores numéricos de las constantes fijos y con la ayuda de las leyes de la física, todas las unidades del SI pueden realizarse de manera experimental.



Final agreed values of the four fundamental constants to be fixed



The CODATA 2017 Values of h , e , k , and N_A

Quantity	Value
h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
k	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
N_A	$6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

¿En qué consiste la revisión del SI?

El SI ha utilizado diferentes tipos de definiciones de las unidades básicas, así tenemos artefactos, como el prototipo internacional del kilogramo (*IPK*), estados físicos específicos, como el punto triple del agua en la definición del kelvin, prescripciones experimentales idealizadas como los casos de las definiciones del amperio y la candela, o constantes de la naturaleza, como la velocidad de la luz en el vacío, para la definición del metro.

El valor Q de una magnitud se expresa mediante el producto de un número $\{Q\}$ y una unidad $[Q]$: $Q = \{Q\}[Q]$.

La unidad es simplemente un ejemplo particular del valor de la magnitud, establecido por convenio y utilizado como referencia, mientras que el número es la relación entre el valor de la magnitud y la unidad elegida. Para una magnitud particular, pueden utilizarse diferentes unidades; por ejemplo, el valor de la velocidad v de una partícula puede expresarse como $v = 25 \text{ m/s}$ o $v = 90 \text{ km/h}$, donde metro por segundo y kilómetro por hora son unidades alternativas para el mismo valor de la magnitud velocidad.

Igualmente, el valor de una constante fundamental también puede expresarse como el producto de un número y una unidad: $Q = \{Q\}[Q]$.

Las nuevas definiciones de las unidades especifican el valor numérico exacto de cada constante, cuando su valor se expresa en la correspondiente unidad SI. Fijando este valor numérico, la unidad resulta definida, dado que el producto del **valor numérico** $\{Q\}$ por la **unidad** $[Q]$ debe ser igual al **valor** Q de la constante, por principio invariable.

Con la revisión del SI, todas las unidades básicas se definen a partir de constantes. El kilogramo, el amperio, el kelvin y el mol se basarán en los valores numéricos establecidos, respectivamente, para:

- **La constante de Planck (h),**
- **La carga elemental (e),**
- **La constante de Boltzmann (k), y**
- **La constante de Avogadro (N_A).**

Las tres unidades básicas restantes, el metro, el segundo y la candela, ya están definidas en términos de constantes, pero se adaptarán sus definiciones.

Las definiciones de todas las unidades básicas de SI se expresarán de manera uniforme utilizando una formulación de constante explícita, de forma que el Sistema Internacional de Unidades, SI, quedará definido como aquel 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⁻¹,
- la eficacia luminosa de la radiación monocromática de 540×10^{12} Hz, K_{cd} , es 683 lm/W.

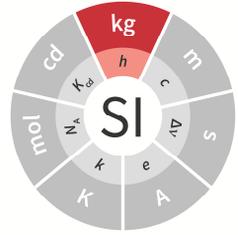
La revisión del SI:

- ✓ *Separa las definiciones de las realizaciones.*
- ✓ *Definiciones basadas en constantes.*
- ✓ *Crea una base segura para futuros desarrollos.*



Nueva definición del 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 J·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 equivale a la relación exacta $h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, de donde:

$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^2 \text{ s} = 1,475\ 521 \dots \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}$$

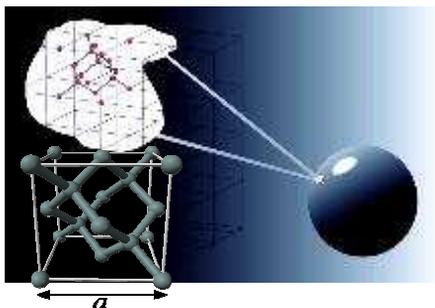
La definición anterior del kilogramo fijaba el valor de la masa del Prototipo Internacional del Kilogramo $m(\text{IPK})$ en 1 kg exactamente, y el valor de la constante de Planck h tenía que determinarse experimentalmente. De acuerdo a la nueva definición, se fija exactamente el valor de h y la masa $m(\text{IPK})$ tiene que determinarse experimentalmente. El valor numérico elegido para la constante de Planck es tal que un kilogramo es igual a la masa del Prototipo Internacional $m(\text{IPK})$, con una incertidumbre típica relativa de 2×10^{-8} .

Para determinar con la incertidumbre adecuada el valor de la constante de Planck h y, consecuentemente, proporcionar trazabilidad a la unidad de masa después de la redefinición, existen dos métodos primarios independientes, el método de Avogadro, también denominado determinación de la densidad de un cristal mediante rayos X, y la balanza de Kibble.

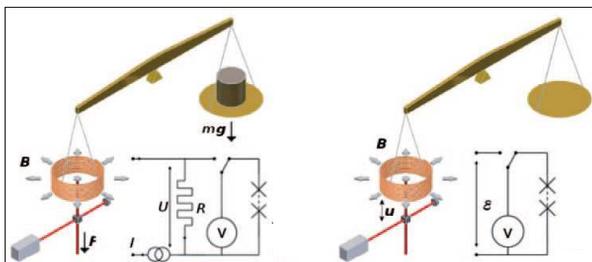
El método de Avogadro se basa en la idea clásica de que la masa de una sustancia pura se puede expresar en función del número de entidades elementales de dicha sustancia. En esta línea y gracias a los grandes avances de la industria de semiconductores, se puede disponer de monocristales de silicio, de gran tamaño, con una alta pureza y sin dislocaciones. Además, se puede conseguir que dicho cristal contenga prácticamente un solo isótopo, el ^{28}Si , resultando idóneo para realizar este método. Dado que el número de Avogadro, N_{A} , nos da el número de átomos de un mol, conocida la masa molar del ^{28}Si , $M(^{28}\text{Si})$, y sabiendo que hay 8 átomos de silicio por celda unidad (con distancia de red a , determinada por rayos X), puede obtenerse la masa de una esfera de silicio de volumen V_{S} a partir de la siguiente expresión:

$$m = \frac{8V_s}{a^3} \cdot \frac{M(^{28}\text{Si})}{N_A}$$

Diagrama de la esfera de silicio con detalle de su estructura cristalina, que consta de una celda cúbica de lado a con 8 átomos.



Por su parte, en la balanza de Kibble se equilibra la fuerza gravitatoria de un cuerpo de masa m con la fuerza electromagnética que genera una bobina circular de longitud l por la que pasa una corriente eléctrica de intensidad I en el seno de un campo magnético radial de densidad de flujo B . Para determinar el producto de $B \cdot l$ se induce en dicha bobina una fuerza electromotriz ε y se desplaza dicha bobina con velocidad u . Como resultado se tiene una ecuación con dimensiones de potencia, por lo que a veces a este método se le ha llamado también de la balanza de potencia, donde g es la aceleración de la gravedad:



Esquema de funcionamiento de la balanza de Kibble: Izq. La fuerza gravitatoria se equilibra con la fuerza electromagnética generada sobre la bobina en un campo con densidad de flujo magnético B . Dcha. La bobina se mueve con velocidad u en el seno del mismo campo, generando una fuerza electromotriz ε .

$$m g u = I \varepsilon \quad (1)$$

La intensidad de corriente I se puede determinar como el cociente entre una tensión U y una resistencia R . Esta resistencia R se puede medir en función de la constante de von Klitzing, $R_K = h/e^2$, mientras que las tensiones U y ε se pueden medir en función de la constante de Josephson, $K_J = 2e/h$. La expresión (1) permite entonces determinar la masa en función de la constante de Planck h como

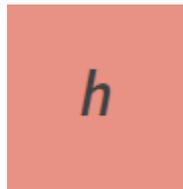
$$m = h \frac{bf^2}{4gu}$$

donde f es una frecuencia de microondas y b es una constante adimensional, ambas asociadas a las mediciones de las magnitudes eléctricas implicadas.

No hay que olvidar que existe una relación entre estas constantes fundamentales, tal que el número de Avogadro puede obtenerse a partir de la constante de Planck y viceversa, lo que hace que ambos caminos sean equivalentes y los resultados mutuamente verificables.

Las consecuencias de la nueva definición son importantes y curiosas: Dada la trazabilidad metrológica actual al Prototipo Internacional del Kilogramo (*IPK*), los Institutos Nacionales de Metrología, que pueden calibrar pesas de 1 kg con una incertidumbre típica de unos 15 microgramos, con la nueva definición serán difícil calibrarlas con incertidumbres inferiores a 25 microgramos. A pesar de ello, esto sólo afectará al primer nivel de trazabilidad; para niveles metrológicos inferiores, así como para el resto de magnitudes con trazabilidad a la masa (fuerza, presión, densidad, volumen,...) este efecto será despreciable y a cambio:

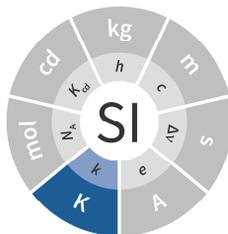
- La nueva definición del kilogramo asegurará la estabilidad a largo plazo de la unidad SI de masa, permitiendo su realización en cualquier instante y lugar.
- El kilogramo tendrá una incertidumbre relativa igual a la de h .
- Se reducirá la incertidumbre de las magnitudes eléctricas.



La redefinición del kilogramo es un gran desafío.

Nueva definición del 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 $\text{kg m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de h , c y $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.



Esta definición implica que un kelvin equivale al cambio de temperatura termodinámica que da lugar a un cambio en la energía térmica, kT , de $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J.

Debido a cómo se han venido definiendo hasta el momento las escalas de temperatura, seguirá siendo posible expresar el valor de una temperatura termodinámica T por su diferencia con respecto a $T_0 = 237,15$ K, valor cercano al punto del hielo. Esta diferencia es la llamada temperatura Celsius, símbolo t , definida, por tanto, mediante la ecuación:

$$T = T_0 + t$$

La unidad de esta temperatura Celsius es el grado Celsius, símbolo $^{\circ}\text{C}$, que por definición es, en magnitud, igual al kelvin. Es decir, una diferencia o un intervalo de temperaturas en kelvin o en grados Celsius tienen el mismo valor numérico. Sin embargo, el valor numérico de una temperatura Celsius se relaciona con el valor numérico de la temperatura termodinámica como:

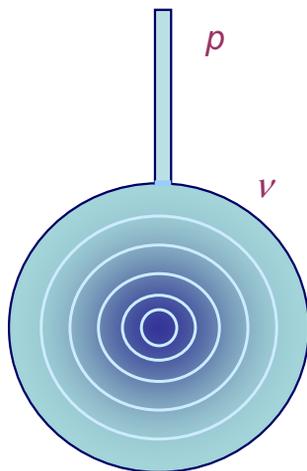
$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$$

Ambas unidades son también unidades de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) que define dos magnitudes T_{90} y t_{90} como aproximaciones, muy cercanas, a las correspondientes temperaturas termodinámicas T y t . Es importante destacar que esta nueva definición del kelvin permite realizar definiciones primarias de la unidad en cualquier punto de la escala de temperatura.

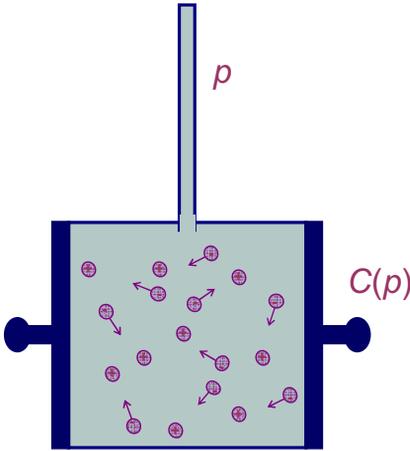
La temperatura aparece en todas las leyes físicas acompañada siempre de la constante de Boltzmann en la forma kT como “energía térmica”. Dicha constante aparece, por tanto, “naturalmente” ligada a la temperatura. La constante de

Boltzmann es, en otras palabras, el factor de conversión entre dos unidades derivadas: el julio y el newton·metro, unidades correspondientes a las magnitudes energía térmica y energía mecánica. En esencia ambas unidades (J y N·m) representan la misma magnitud en el SI (energía) por lo que deberían ser idénticas pero, antes de la nueva definición del kelvin y debido a que se definía de forma independiente al del resto de las unidades básicas, había ciertas diferencias causadas por las distintas fuentes de error a las que se ven sometidos los termómetros. Los únicos termómetros capaces de establecer directamente esta relación son los llamados termómetros primarios o termodinámicos, en los que la relación entre el mensurando y la temperatura termodinámica se conoce explícitamente, a través de una ley de la física, de forma que no depende de otras constantes que sean función de la temperatura, y además puede calcularse con la suficientemente baja incertidumbre de medida. Estos termómetros, funcionando a la temperatura del punto triple del agua, son los que se han usado para fijar el valor de k .

En esencia, la termometría primaria se lleva a cabo utilizando un termómetro basado en un sistema físico bien conocido, para el que su ecuación de estado, que describe la relación entre la temperatura termodinámica T y otras magnitudes independientes, como la ecuación de estado del gas ideal o la ley de Planck, pueden escribirse de forma explícita sin constantes desconocidas o que dependan de la temperatura de forma significativa. De esta forma la temperatura termodinámica se puede obtener a partir de la medida de dichas magnitudes independientes. La exactitud de la medidas termodinámicas depende no sólo de la exactitud con que se realicen las propias medidas de las magnitudes independientes sino también de disponer del conocimiento teórico suficiente acerca de cómo dichas ecuaciones de estado se apartan de la idealidad al llevarlas a la práctica en un sistema físico (experimento) concreto, de forma que se puedan aplicar las correcciones adecuadas.



Termómetro acústico

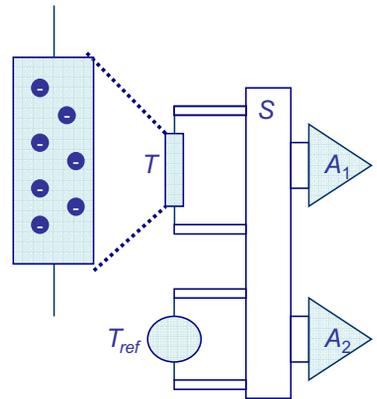


Termómetro de constante dieléctrica

variando la frecuencia o bien las dimensiones de la cavidad hasta obtener una resonancia. En ambos casos se mide la longitud de onda de las ondas acústicas que se propagan en la cavidad. Al igual que con la termometría acústica, en el caso de los termómetros de constante dieléctrica, la magnitud termométrica es una propiedad intensiva del gas e independiente de su cantidad, pero difieren en que aquí se requiere el conocimiento de la polarizabilidad molar, que no se puede deducir teóricamente. Gracias a que la polarizabilidad del helio atómico se pudo calcular con un alto grado de precisión mediante la mecánica cuántica, se han conseguido con este tipo de termómetros incertidumbres de medida lo suficientemente buenas como para usarlo en la determinación de k .

Para fijar el valor de la constante de Boltzmann se han utilizado tres tipos de termómetros primarios: acústico, de constante dieléctrica y de ruido Johnson.

El termómetro acústico y el de constante dieléctrica son dos tipos de termómetros de gas que se basan en la medición de la velocidad de propagación del sonido, en un gas el primero y en la medida de la constante dieléctrica en un condensador cuyo material dieléctrico es un gas. La medida de la velocidad del sonido se realiza por métodos de interferometría acústica en una cavidad cerrada, bien

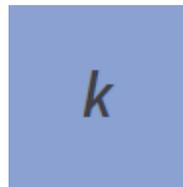


Termómetro de ruido Johnson

La temperatura de un objeto también puede determinarse observando fenómenos estadísticos cuánticos. El principio físico de la termometría de ruido, el último tipo de termómetro primario usado para la determinación de la constante de Boltzmann, es la agitación térmica de los electrones en una resistencia eléctrica: el ruido de Johnson. La temperatura se determina mediante la medida del voltaje cuadrático medio (ruido) en una resistencia eléctrica a bajas frecuencias.

A pesar de la profundidad filosófica y el gran cambio de mentalidad del nuevo SI, el nuevo kelvin tendrá una influencia inapreciable a nivel industrial. De hecho, esta falta de impacto es deliberada, por un lado por coherencia del SI y por otro para afectar lo menos posible a la “vida diaria” evitando costes económicos. Será en la zona criogénica (por debajo de 20 K) y en altas temperaturas (por encima de 1000 °C) donde sí podrán verse ciertos cambios y probablemente convivan calibraciones basadas en la EIT-90 y otras medidas directas de la temperatura termodinámica. El objeto de esta nueva definición es sentar las bases para futuras mejoras haciendo al kelvin independiente de cualquier elemento, técnica de medida o rango de temperatura.

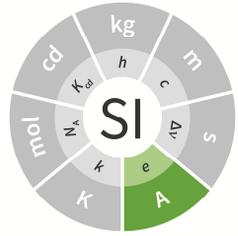
Es importante destacar que los valores de temperatura asignados en las escalas de temperatura (EIT-90 y Escala Provisional de bajas Temperaturas del 2000) son exactos con respecto a sus correspondientes escalas y que la nueva definición del kelvin no tendrá efecto en dichos valores de temperatura o en las incertidumbres de la realización de ambas escalas. En particular, el estatus del punto triple del agua como punto fijo, con un valor definido en la EIT-90, permanece invariable. Es decir, la realización del punto triple del agua de acuerdo con la EIT-90 no tendrá una incertidumbre adicional a causa de esta nueva definición. Debe tenerse en cuenta que en la actualidad, la incertidumbre de realización de la EIT-90 (entre -200 °C y 1000 °C) es alrededor de un orden de magnitud inferior a la incertidumbre de la temperatura termodinámica. Sin embargo, el punto triple del agua, que de momento tiene un valor exacto de temperatura, perderá su posición dominante y se convertirá en un punto fijo, como cualquier otro, con la incertidumbre de la constante de Boltzmann en el momento en que se fijó su valor; es decir, $3,7 \times 10^{-7}$ en forma relativa, lo que equivale a una incertidumbre de 0,10 mK en la temperatura termodinámica del punto triple del agua



La redefinición favorecerá el uso tanto de la temperatura termodinámica como de la EIT-90.

Nueva definición del amperio

El amperio, símbolo A, es la unidad SI de intensidad 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 $\Delta\nu_{Cs}$.



En el sistema SI actualmente en vigor se define la unidad de intensidad de corriente eléctrica, el amperio, como la intensidad de una corriente constante que, manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de un metro uno del otro, en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud.

Esta definición equivale a asignar el valor de $4\pi \times 10^{-7}$ henrios por metro a la permeabilidad en el vacío μ_0 .

Su realización práctica, usualmente a través de balanzas de tensión, es compleja, solo accesible a unos pocos Institutos Nacionales de Metrología (INM), lo que ha llevado a la mayoría a obtener el amperio de forma indirecta basándose en los efectos cuánticos Hall y Josephson.

El efecto Hall cuántico relaciona la tensión y la corriente con una constante de proporcionalidad denominada constante de von Klitzing:

$$R_K = h/e^2,$$

donde e es la carga elemental y h la constante de Planck.

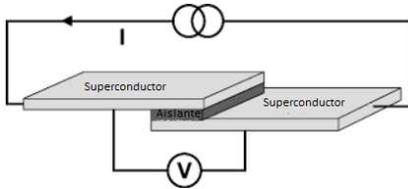
Por su parte, el efecto Josephson relaciona la tensión y la frecuencia, $U = n \cdot f / K_J$, a través de la constante de Josephson:

$$K_J = 2e/h,$$

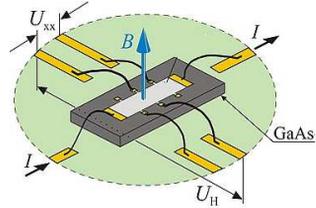
Las constantes R_K y K_J se conocen en términos de las actuales unidades del SI y tienen una incertidumbre relativa de 1×10^{-7} y 4×10^{-7} , respectivamente. Debido a que esta incertidumbre es mayor que la reproducibilidad de las medidas experimentales, por acuerdo internacional a ambas constantes se les asignó en 1990 el mejor valor medido hasta entonces, $R_{K-90} = 25\ 812,807\ \Omega$ y $K_{J-90} = 483\ 597,9\ \text{GHz V}^{-1}$, sin incertidumbre. La combinación de estos dos efectos permite obtener la intensidad de corriente eléctrica mediante la ley de Ohm.

La nueva definición del amperio se puede realizar de las siguientes formas:

- a) Basándose en la ley de Ohm $U = R I$, que establece una relación entre la tensión U aplicada sobre la resistencia R y la corriente que circula por ella I , y las realizaciones prácticas de las unidades derivadas de tensión y resistencia basadas en el efecto Josephson y en el efecto Hall, respectivamente. Este procedimiento es utilizado desde 1990, pero en el nuevo SI las constantes K_J y R_K tendrán valores exactos.



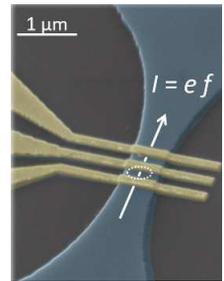
a) Efecto Josephson.



b) Efecto Hall cuántico.

- b) Contando las cargas individuales que fluyen a través de un conductor, por unidad de tiempo. Se requiere para ello un circuito eléctrico que permita el transporte individual y controlado de electrones, *Single Electron Tunneling* (SET). Los instrumentos que controlan este transporte de electrones se denominan bombas de electrones. Si este transporte tiene lugar cíclicamente, a una frecuencia determinada f , se transportarán n electrones por ciclo, y la intensidad de corriente será:

$$I = n \cdot e \cdot f = Q_s \cdot f$$

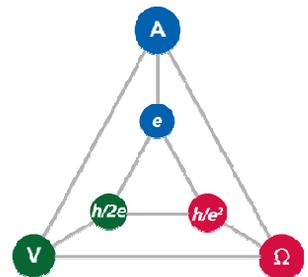


Bomba de electrones

Donde Q_s es la carga transportada en el circuito SET e idealmente $n = 1$ para este tipo de circuitos.

Estos procedimientos permiten a su vez verificar la consistencia de las definiciones del voltio, el ohmio y el amperio. Mientras que con el primer procedimiento, el voltio y el ohmio se realizan mediante la constante de Josephson y la constante de von Klitzing, el segundo procedimiento permite realizar el amperio a través del recuento de cargas individuales $Q_s = e$. De aquí se deriva la ley de Ohm sobre una base cuántica:

$$K_J \cdot R_K \cdot Q_s = (2e/h)(h/e^2)e = 2.$$

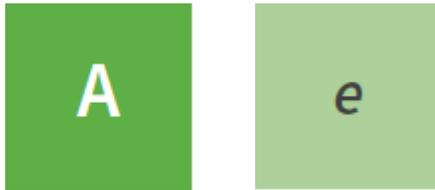


Triángulo metrológico cuántico

Este “triángulo metrológico cuántico” fue confirmado experimentalmente con una incertidumbre de 9×10^{-7} .

- c) Usando la relación que se produce en el proceso de carga de un condensador, al aplicar una rampa de tensión a un condensador de capacidad C se genera una intensidad de corriente, $I = C \cdot dU/dt$. Esta expresión relaciona las unidades $A = F \cdot V/s$, y en ella la intensidad de corriente eléctrica depende de las realizaciones de las unidades voltio, faradio y segundo.

En el caso de las unidades eléctricas, la redefinición del SI generará modificaciones muy pequeñas, del orden de una parte en 10 millones, en relación a las unidades del antiguo SI. Las incertidumbres de la realización práctica de las magnitudes eléctricas basadas en las constantes K_J y R_K se reducirán al desaparecer la incertidumbre asignada a estas constantes.



El amperio se independiza del kilogramo y se reduce la incertidumbre de las magnitudes eléctricas.

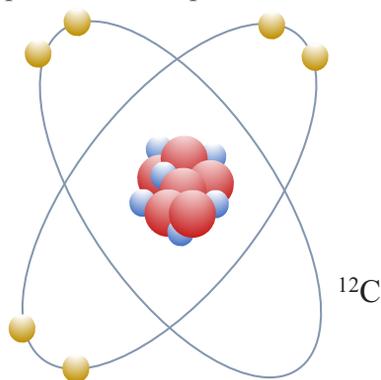
En estas ecuaciones M_u es la constante de masa molar, de valor $M(^{12}\text{C})/12$ y m_u es la constante de masa atómica, de valor $m(^{12}\text{C})/12$. Ambas constantes están relacionadas por la constante de Avogadro, tal que:

$$M_u = N_A m_u$$

En el nombre “cantidad de sustancia” la palabra “sustancia” se reemplaza con el nombre de la sustancia en cada aplicación particular; es decir, se habla de “cantidad de cloruro de hidrógeno, HCl” o “cantidad de benceno C_6H_6 ”. Es esencial precisar siempre de forma específica la entidad a la que se hace referencia, como enfatiza la propia definición del mol, preferiblemente proporcionando la fórmula química del material al que nos referimos.

A pesar de que la palabra “cantidad” tiene una definición más amplia en el diccionario, se puede utilizar como abreviatura de “cantidad de sustancia”. Esto también puede aplicarse a otras magnitudes derivadas como la “cantidad-de-sustancia concentración” que puede denominarse simplemente como “cantidad de concentración”, algo redundante en español, por lo que, en el campo de la química clínica por ejemplo, se abrevia como “concentración de sustancia”.

La determinación de la constante de Avogadro se ha realizado mediante el experimento de Avogadro, utilizado también para determinar el kilogramo, como se ha expuesto anteriormente. En la práctica, las medidas químicas requieren la realización de la unidad de cantidad de sustancia para todos los tipos de entidades químicas e incluso para sus magnitudes derivadas, como la [cantidad de] concentración (mol/m^3), contenido (mol/kg) o fracción (mol/mol). Esto puede llevarse a cabo por diversos métodos de medida y la actual definición del mol permite determinar el número de entidades en una muestra N con la misma exactitud que la cantidad de sustancia n , ya que $N = n N_A$ y N_A tiene un valor exacto. De igual forma, la masa molecular y la masa molar de una sustancia tendrán la misma incertidumbre relativa, 1×10^{-8} , la de la constante de Avogadro en el momento de su determinación.

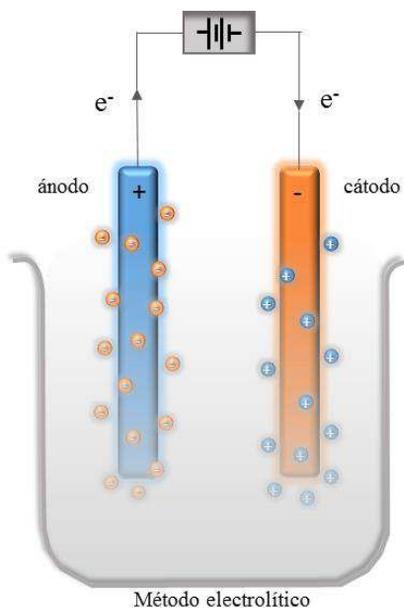


Los métodos más usados para la realización práctica del mol son el método gravimétrico, el uso de la ecuación de los gases ideales y el método electrolítico.

El método gravimétrico se basa en que el número de entidades N de una sustancia X o su cantidad de sustancia n en una muestra puede determinarse mediante el producto de la fracción de masa de X en la muestra, por la propia masa de la muestra. Este método es el más empleado ya que la medida de la masa es relativamente simple y precisa, pero es esencial conocer la fracción de masa. Cuando existen disponibles sustancias de muy alta pureza, la incertidumbre en la determinación de la masa es a menudo el factor limitante, y el mol puede realizarse con incertidumbres relativas mejores que 1×10^{-6} . Pero esto sólo es posible en muy pocos casos, en los que la fracción de masa (tradicionalmente llamada “pureza”) es conocida con suficiente incertidumbre, por ejemplo, en gases o metales puros.

La cantidad de sustancia n de un gas puro también puede determinarse resolviendo su ecuación de estado. La ecuación de estado de un gas real está basada en la de los gases ideales, con una serie de correcciones (coeficientes del virial). Por tanto, el uso de las ecuaciones de estado implica básicamente la

medida de presión, volumen y temperatura, ya que la constante molar de los gases, $R = N_A \cdot k$, es conocida con exactitud. También es necesario conocer el valor del segundo coeficiente del virial, que está tabulado para la mayoría de los gases simples. Este método se fundamenta, ante todo, en el uso de gases puros.



En el método electrolítico, el número de entidades N que reaccionan en un electrodo es igual a la carga Q que pasa a través del sistema, dividida por $z \cdot e$, donde z es el número de carga (valencia) de los iones que han reaccionado y e es la carga elemental del electrón (conocida con exactitud). Este método para la realización del mol depende sobre todo de la eficiencia de la reacción electrolítica para el ion de

interés, que será del 100 % si no hay otros iones presentes que puedan intervenir.

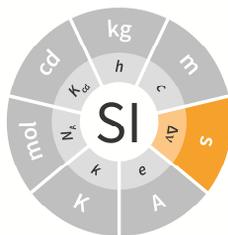
La definición antigua ligaba directamente el mol con la masa de un nucleido particular, lo que permitía establecer la trazabilidad del mol a través de las medidas de masa, estableciendo una relación simple entre las medidas macroscópicas y el número de entidades microscópicas, a través de la constante de masa molar M_u que, con la nueva definición, tiene una incertidumbre asociada. Es decir, las condiciones de continuidad impuestas a las nuevas definiciones de las unidades básicas del SI siguen asignando un valor de $M_u = 1 \text{ g/mol}$, pero con una incertidumbre experimental muy pequeña y más que suficiente para las necesidades de las medidas químicas actuales, siendo aproximadamente treinta veces más pequeña que la incertidumbre relativa que se puede alcanzar en las actuales realizaciones del mol más exactas y varios órdenes de magnitud más pequeña que en las realizaciones descritas más arriba.



La redefinición del mol respecto a un valor numérico exacto de la constante de Avogadro N_A , lo libera de su dependencia del kilogramo.

Definición reformulada del 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 s^{-1}



De esta definición resulta 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 cesio 133.

La referencia a un átomo no perturbado pretende aclarar que la definición del segundo SI se basa en un átomo de cesio aislado, en reposo, a 0 K, y no perturbado por ningún campo externo, como la radiación ambiente del cuerpo negro.

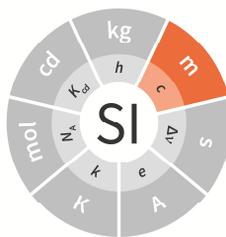
La unidad de tiempo se realiza mediante patrones de frecuencia (relojes) que producen oscilaciones eléctricas a una frecuencia cuya relación con la frecuencia de transición del átomo de cesio 133 se conoce con una incertidumbre muy baja, tras estimar y corregir las diversas variaciones debidas al efecto Doppler relativista vinculado al movimiento atómico, a la radiación térmica del ambiente y a otros efectos relacionados con el diseño y operación del patrón. Los mejores de estos patrones primarios producen el segundo SI con una incertidumbre típica relativa de algunas partes en 10^{16} .

El segundo, así definido, es la unidad del tiempo propio en el sentido de la teoría general de la relatividad. Para contar con una escala de tiempo coordinada, se combinan las señales de diferentes relojes primarios en diferentes ubicaciones, corregidos por las variaciones de frecuencia relativistas del cesio.

El CIPM ha adoptado varias representaciones secundarias del segundo, basadas en un número seleccionado de líneas espectrales de átomos, iones o moléculas. Estos patrones secundarios de frecuencia tienen una exactitud de partes en 10^{18} ; sin embargo, sus incertidumbres están en el rango de partes en 10^{14} - 10^{15} , ya que están limitadas por su ligazón al patrón primario de cesio, lo que abre la puerta a una redefinición y realización práctica del segundo en no muchos años.

Definición reformulada del 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 m s^{-1} , donde el segundo se define en función de la frecuencia del Cesio $\Delta\nu_{\text{Cs}}$



De esta definición resulta que el 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.

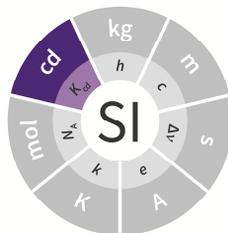
El metro puede realizarse mediante uno de los siguientes métodos:

- por medio de la longitud l del camino recorrido en el vacío por una onda electromagnética plana en un tiempo t ; esta longitud se obtiene a partir del tiempo t medido, utilizando la relación $l = c \cdot t$ y el valor de la velocidad de la luz en el vacío $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$,
- por medio de la longitud de onda en el vacío λ de una onda electromagnética plana de frecuencia f ; esta longitud de onda se obtiene a partir de la frecuencia f medida, utilizando la relación $\lambda = c / f$ y el valor de la velocidad de la luz en el vacío $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$,
- por medio de una de las radiaciones de una lista actualizada periódicamente por el CIPM, cuya longitud de onda declarada en vacío, o cuya frecuencia, se puede utilizar con la incertidumbre indicada en la lista, siempre que se cumplan determinadas especificaciones y buenas prácticas.

En 2005, el Grupo de Trabajo sobre la realización práctica del metro (MePWG) y el Grupo de trabajo conjunto CCL-CCTF sobre representaciones secundarias del segundo, se fusionaron en un único grupo de trabajo sobre patrones de frecuencia CCL-CCTF, encargado de producir y mantener una lista única de valores recomendados de frecuencias patrón para aplicaciones que incluyen tanto la realización práctica del metro como representaciones secundarias del segundo.

Definición reformulada de 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 540×10^{12} Hz, K_{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 $\Delta\nu_{Cs}$.



De esta definición resulta que la candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz y que tiene una intensidad radiante, en esa dirección, de $(1/683)$ W/sr.

Esta definición se expresa en términos estrictamente físicos y se da para una sola frecuencia de la radiación electromagnética. Pero la mayoría de las fuentes de luz emiten un amplio espectro de frecuencias; por ello, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) definió un conjunto de funciones de ponderación espectral, denominadas funciones de eficiencia luminosa espectral, que describen la sensibilidad espectral relativa del ojo humano promedio, para condiciones visuales específicas. La constante K_{cd} , junto con las funciones de eficiencia luminosa espectral, relaciona magnitudes fotométricas y radiométricas para establecer un sistema metrologicamente consistente.

La realización práctica de la candela y las unidades fotométricas derivadas se basa casi siempre en la realización práctica de unidades radiométricas, empleando dos tipos de métodos primarios: los basados en detectores patrón (radiómetro eléctrico de sustitución, fotodiodos de eficiencia cuántica predecible) y los basados en fuentes patrón (radiador de Planck, radiación sincrotrón).

La candela (cd) se realiza con mayor frecuencia utilizando una lámpara patrón con diseño optimizado para emitir en una dirección definida, desde una fuente de luz pequeña en relación con la distancia hasta el área activa del detector, de modo que pueda considerarse como puntual en esa dirección. La intensidad radiante se convierte en intensidad luminosa utilizando la función de eficiencia luminosa espectral apropiada de la CIE y la constante fotométrica K_{cd} .

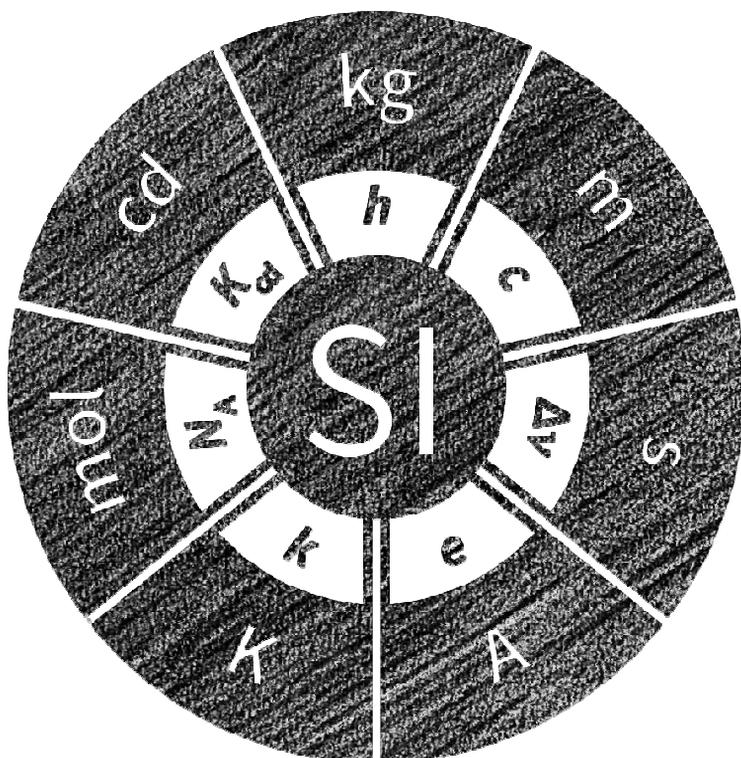
Consecuencias de la revisión del SI

- El kilogramo, el amperio, el kelvin y el mol seguirán siendo las unidades de masa, intensidad de corriente eléctrica, temperatura termodinámica y cantidad de sustancia, pero sus definiciones estarán basadas en constantes.
- Las definiciones revisadas del kilogramo, amperio, kelvin y mol no tendrán ningún impacto sobre el segundo, el metro y la candela.
- El SI revisado tendrá mayor influencia en los niveles de exactitud elevados. Todas las realizaciones prácticas de las unidades se apoyarán en constantes y serán reproducibles en el tiempo y en el espacio.
- Las definiciones estarán separadas de su realización, lo que permitirá la evolución de las realizaciones prácticas, mientras las definiciones perduran en el tiempo.
- Mejora el uso del SI en algunas mediciones científicas, a la vez que se reducen las incertidumbres de muchas constantes fundamentales.
 - ✓ La nueva definición del kilogramo asegura la estabilidad a largo plazo de la unidad SI de masa, permitiendo su realización en cualquier instante y lugar. Tras la revisión del SI, heredará la incertidumbre relativa de h .
 - ✓ Se reduce la incertidumbre de las magnitudes eléctricas, integrándose éstas en el SI.
 - ✓ La nueva definición del kelvin será realizable mediante distintos experimentos y en un amplio rango de temperaturas. La temperatura termodinámica del punto triple del agua T_{TPW} será exactamente 273,16 K, pero con una incertidumbre relativa igual a la del valor recomendado de k justo antes de la redefinición. A partir de entonces, el valor de T_{TPW} se determinará experimentalmente.
 - ✓ La redefinición del mol respecto a un valor numérico exacto de la constante de Avogadro N_A , lo libera de su dependencia del kilogramo y hace más visible la distinción entre "cantidad de sustancia" y "masa".

El nuevo SI no impondrá cambio alguno en nuestra vida diaria.

*“... para todos los tiempos,
para todos los pueblos”*

(Lema de la Convención del Metro)



CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA
C/ Del Alfar, 2 · 28760 - Tres Cantos · Madrid (España)
Teléfono: +34 91 807 47 00 · Fax: +34 91 807 48 07
cem@cem.es · www.cem.es

