

Preguntas frecuentes

respecto al SI revisado que entró en vigor el 20 de mayo de 2019

P1: En el SI revisado, ¿qué es lo que ha cambiado?

R1: El kilogramo (kg), el amperio (A), el kelvin (K) y el mol (mol) tienen nuevas definiciones, pero éstas fueron elegidas para que, en el momento del cambio, la magnitud de las nuevas unidades fuera idéntica a la de las antiguas unidades.

P2: ¿Por qué el cambio a las nuevas definiciones?

R2: Definir el kilogramo en función de constantes físicas fundamentales asegura su estabilidad a largo plazo y, por lo tanto, su confianza, previamente en duda. Se espera que las nuevas definiciones del amperio y del kelvin mejoren significativamente la exactitud con la que puedan realizarse las mediciones de electricidad y las mediciones radiométricas de temperatura. El impacto sobre las mediciones eléctricas ha sido inmediato: las mediciones eléctricas más precisas ya se realizaban antes de la redefinición utilizando los efectos Josephson y Hall cuántico, y el haber fijado los valores numéricos de la constante de Planck h y de la carga eléctrica elemental e en las nuevas definiciones de las unidades ha conducido a valores numéricos exactos para las constantes de Josephson y de von Klitzing. Esto elimina la necesidad previa de usar unidades eléctricas

convencionales en lugar de unidades SI para expresar los resultados de las mediciones eléctricas (véase R14). El factor de conversión entre la radiancia medida y la temperatura termodinámica (la constante de Stefan-Boltzmann) es ahora exacto, con las actuales definiciones del kelvin y del kilogramo, lo que conduce a una metrología mejorada en el campo de la temperatura, a medida que progrese la tecnología. La definición revisada del mol es más simple que la definición previa, y debe ayudar a los usuarios del SI a comprender mejor la naturaleza de la magnitud "cantidad de sustancia" y su unidad, el mol. En conjunto, el SI se ajusta ahora mejor a la tecnología de este siglo.

P3: ¿Qué pasa con las definiciones del segundo (s), el metro (m) y la candela (cd)?

R3: Las definiciones del segundo (s), el metro (m) y la candela (cd) no han cambiado, aunque la forma en la que se escriben ha sido revisada para mantener la coherencia, en forma, con las nuevas definiciones del kilogramo (kg), el amperio (A), el kelvin (K) y el mol (mol).

P4: Tras la entrada en vigor de la revisión del SI, ¿qué pasará ahora con el prototipo internacional del kilogramo (IPK)? ¿Irá a un museo para que el público en general pueda al menos verlo?

R4: No hay planes para cambiar las condiciones de conservación del IPK. Permanecerá en el BIPM y no se exhibirá al público en general. El IPK conservará su interés metrológico y, por lo tanto, en el futuro será monitoreado, aunque muy esporádicamente para evitar tanto como sea posible cualquier daño en su superficie. Las mediciones de la estabilidad de la masa del IPK pueden ayudar, en el futuro, a extrapolar la estabilidad de su masa en el pasado reciente.

P5: ¿Puedo mantener calibrado mi patrón de masa de la misma manera que lo hacía antes del 20 de mayo de 2019?

R5: Sí, puede seguir enviando a calibrar su patrón de masa a su Instituto Nacional de Metrología (INM), o a un laboratorio de calibración secundario, tal como lo hacía antes. Sin embargo, la ruta de trazabilidad que su INM utiliza para ligarlo al kilogramo SI ha cambiado.

El BIPM está organizando una comparación continua entre las distintas realizaciones primarias del kilogramo, a partir de la cual, se determinará un *valor de consenso* del kilogramo. Los Institutos Nacionales de Metrología que dispongan de una realización del kilogramo serán requeridos para utilizar dicho *valor de consenso* cuando diseminen la unidad de masa según la nueva definición, hasta que la dispersión de los valores resulte compatible con las incertidumbres de realización individuales, preservando así la equivalencia internacional de los certificados de calibración, de acuerdo con los principios y protocolos acordados en el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo del CIPM.

Los Estados miembros que no posean realizaciones de la nueva definición del kilogramo obtienen la trazabilidad a dicho *valor de consenso*, a través de los servicios de calibración del BIPM, durante el periodo en el que se utilice tal *valor de consenso*.

P6: Una vez que los laboratorios puedan realizar el kilogramo ellos mismos, ¿cómo podemos estar seguros de que los resultados interlaboratorios son compatibles?

R6: En el caso del kilogramo, cuando ya no se necesite el *valor de consenso*, todos los laboratorios deberán demostrar la trazabilidad a la definición del kilogramo, basada en constantes físicas. Dado que siempre es posible subestimar una incertidumbre experimental o simplemente, cometer un error, los laboratorios que afirmen poseer las incertidumbres más pequeñas deberán comparar periódicamente sus resultados con sus pares, para evaluar su compatibilidad. Ya existe para esto un mecanismo básico, ampliamente utilizado en metrología, basado en el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo del CIPM establecido en 1999.

P7: ¿Se solicitará también a los INM un *valor de consenso* para la diseminación de las otras tres unidades redefinidas?

R7: No. El kilogramo es un caso especial. Sobre las unidades eléctricas y el kelvin, véanse las respuestas R14 y R8. En cuanto al mol, no hay cambios respecto a la práctica seguida anteriormente.

P8: ¿Calibraré mi termómetro de la misma manera que lo hacía antes del 20 de mayo de 2019?

R8: Sí. La nueva definición de kelvin no tiene impacto en el estado de las escalas de temperaturas ITS-90 y PLTS-2000, ampliamente utilizadas. El Comité Consultivo de Termometría (CCT) ha publicado información sobre las ventajas inmediatas y futuras de la nueva definición.

P9: En el SI, la constante de referencia para el kilogramo es la constante de Planck h , con la unidad $J s = kg m^2 s^{-1}$. Sería mucho más fácil de comprender si la constante de referencia tuviera la unidad de masa, el kg. Entonces podríamos decir: "El kilogramo es la masa de *<algo>*", quizás la masa de un número específico de átomos de carbono o de silicio. ¿No hubiera sido esa una mejor definición?

R9: Esto es, hasta cierto punto, una cuestión subjetiva. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la constante de referencia utilizada para definir una unidad *no tiene* por qué ser dimensionalmente igual a la unidad (aunque conceptualmente puede ser más simple cuando es este el caso). Durante largo tiempo el SI ha utilizado varias constantes de referencia, cada una de ellas con unidad diferente a la que se estaba definiendo. Por ejemplo, el metro se define utilizando como constante de referencia la velocidad de la luz c con la unidad m/s, no una longitud específica en m. Y esta definición no se ha considerado nunca insatisfactoria. Esta práctica comenzó por primera vez en 1960, con la anterior definición del amperio basada en el valor fijo de una constante cuya unidad era $\text{kg m s}^{-2} \text{A}^{-2}$. (La actual definición del amperio es más simple).

Aunque pueda parecer intuitivamente preferible definir el kilogramo utilizando una masa como constante de referencia, el uso de la constante de Planck aporta otras ventajas. Por ejemplo, ahora que tanto h como e se conocen con exactitud, las constantes de Josephson y de Von Klitzing, K_J y R_K , también se conocen exactamente, con grandes ventajas para la metrología eléctrica. (La física nos dice que no podemos fijar h y la masa de *<algo>*, por ejemplo, la masa de un átomo de carbono 12, $m(^{12}\text{C})$, sin redefinir consecuentemente el segundo de una manera muy poco práctica).

P10: A pesar de la respuesta a la P9 anterior, todavía hay personas que cuestionan la conveniencia de definir el kilogramo usando h como referencia en lugar de usar $m(^{12}\text{C})$. Uno de los argumentos que usan es que el experimento de la balanza de Kibble¹ (KB) para determinar h utiliza un aparato complejo, difícil de utilizar y costoso de construir, en comparación con el experimento XRCD (densidad de cristales por rayos X) para medir la masa de un átomo de silicio 28, y por lo tanto la masa de un átomo de carbono 12.

¹ Para reconocer la invención de la balanza de potencia por Bryan Kibble

¿Cuáles son las principales razones para elegir h en lugar de $m(^{12}\text{C})$ como constante de referencia para el kilogramo?

R10: Estas son en realidad dos preguntas diferentes:

P1. ¿Por qué elegir h en lugar de $m(^{12}\text{C})$ como la constante de referencia para el kilogramo?

P2. ¿La elección de h o $m(^{12}\text{C})$ determina que el kilogramo se realice en la práctica mediante un experimento KB o mediante el experimento XRCD?

R1. Una vez que el valor numérico de una constante recibe un valor fijo, la constante no necesita, ni puede, medirse posteriormente. Por ejemplo, en 1983, cuando se modificó el SI haciendo que la velocidad de la luz en el vacío, c , fuera la constante de referencia para el metro, concluyó de golpe la larga historia de la medición de c . Esto supuso un enorme beneficio para la ciencia y la tecnología, en parte porque c entra en tantos campos de la ciencia y la tecnología que cada vez que se producía un cambio en el valor SI recomendado de c , era preciso actualizar los valores de numerosas constantes y factores de conversión relacionados con c . La decisión de definir el valor numérico de c como exacto fue obviamente correcta.

De manera similar, h es la constante fundamental de la física cuántica y, en consecuencia, su valor SI se utiliza en muchos y diversos campos de la ciencia y la tecnología modernas. En el pasado, los cambios en el valor recomendado de h conforme mejoraban los experimentos fueron, en el mejor de los casos, molestos y, en el peor, confusos. La razón para definir el valor numérico de h fue similar a la de definir c , pero con las ventajas específicas para la metrología eléctrica dadas en R2.

Por supuesto, $m(^{12}\text{C})$ es innegablemente una constante importante, especialmente para la química y la física

atómicas. Esto se debe a que los pesos atómicos (si se es químico), también conocidos como masas atómicas relativas (si se es físico), están todos ellos basados en $m(^{12}\text{C})$. Sin embargo, los pesos atómicos no dependen de la definición del kilogramo y, por supuesto, no se han visto afectados por la nueva definición.

R2. No. La elección de qué constante de referencia se utiliza para definir el kilogramo no implica ningún método en particular para realizar el kilogramo, y ninguno se menciona en la Resolución 1 (CGPM 2018). Sabemos que cualquier realización debe ser trazable a h , ya que h es la constante de referencia en la presente definición del kilogramo. Sin embargo, también se sabe que $h/m(^{12}\text{C}) = Q$, donde Q representa un producto de factores numéricos exactos y constantes determinadas experimentalmente. La incertidumbre típica relativa de Q es inferior a $4,5 \times 10^{-10}$, a partir de los valores actualmente recomendados para las constantes involucradas. Para realizar el kilogramo puede utilizarse un aparato como la KB, que mida un patrón de masa de 1 kg directamente en función de h (mediante mediciones eléctricas realizadas con dispositivos cuánticos) y de mediciones auxiliares de longitud y tiempo. Sin embargo, un experimento que mida un patrón de masa de 1 kg en función de $m(^{12}\text{C})$, como en el proyecto XRCD, también tiene el potencial de realizar el kilogramo. Esto se debe a que $m(^{12}\text{C}) \cdot Q = h$ y por tanto, el precio a pagar por llegar a h desde $m(^{12}\text{C})$ es la incertidumbre añadida de Q , insignificante en el contexto de la realización de la actual definición.

P11: ¿Han cambiado las siete magnitudes y unidades básicas del SI?

R11: No. Las siete magnitudes básicas (tiempo, longitud, masa, corriente eléctrica, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa) y sus unidades básicas correspondientes (segundo, metro, kilogramo, amperio, kelvin, mol y candela) permanecen sin cambios.

P12: ¿Han cambiado las 22 unidades derivadas coherentes con nombres y símbolos especiales?

R12: No, las 22 unidades derivadas coherentes con nombres y símbolos especiales permanecen inalteradas en el SI.

P13: ¿Han cambiado en el actual SI los nombres y símbolos de los prefijos de los múltiplos y submúltiplos (kilo para 10^3 , mili para 10^{-3} , etc.)?

R13: No, los nombres y símbolos de los prefijos se mantienen inalterados.

P14: ¿Ha cambiado la magnitud de algunas de las unidades?

R14: No. Las llamadas "condiciones de continuidad" se establecieron antes de la transición al SI revisado para garantizar que no hubiera cambio alguno en la magnitud de ninguna de las unidades básicas del SI y, por lo tanto, ningún cambio en ninguna unidad derivada de las unidades básicas.

(Hay una pequeña excepción relacionada con las unidades eléctricas: desde 1990 hasta mayo de 2019, las unidades eléctricas utilizadas en la práctica estaban basadas en valores convencionales para la constante de Josephson y para la constante de von Klitzing, en lugar de en sus definiciones SI en esa etapa. Esto condujo a unas pequeñas discrepancias entre dichos valores convencionales y los valores SI. El SI revisado ha devuelto las unidades eléctricas prácticas al SI. El 20 de mayo de 2019 se produjo un único ajuste de +0,1 partes por millón (ppm) en los valores de tensión y de +0.02 ppm en los valores de resistencia, al expresarlos en las unidades SI).

P15: ¿Cómo puede fijarse el valor de una constante fundamental como h para definir el kilogramo, e para definir el amperio, y así sucesivamente? ¿Cómo se sabía qué valor era el correcto? ¿Y si resulta que se ha elegido el valor equivocado?

R15: No se ha fijado – o cambiado – el valor de ninguna constante utilizada para definir una unidad. Los valores de las constantes fundamentales son constantes de la naturaleza y solo se ha fijado el valor numérico de cada constante, cuando se expresa en su unidad SI. Al fijar su valor numérico queda definida la magnitud de la unidad en la se mide actualmente esa constante.

Ejemplo: Si c es el *valor* de la velocidad de la luz, $\{c\}$ es su *valor numérico*, y $[c]$ es la *unidad*, de forma que

$$c = \{c\} [c] = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

con lo que el valor c es el producto del número $\{c\}$ por la unidad $[c]$, y el valor nunca cambia. Sin embargo, los factores $\{c\}$ y $[c]$ pueden escogerse de formas distintas, tal que el producto c se mantenga inalterado.

En 1983 se decidió fijar el número $\{c\}$ como exactamente igual a 299 792 458, lo que definió la unidad de velocidad $[c] = \text{m/s}$. Como el segundo, s , ya estaba definido, el efecto fue definir el metro, m . En la nueva definición se ha elegido el número $\{c\}$ de forma que la magnitud de la unidad $[\text{m/s}]$ se ha mantenido inalterada, garantizando así la continuidad entre las definiciones nueva y antigua de la unidad.

P16: De acuerdo, en realidad solo se ha fijado el valor numérico de la constante expresada en su unidad. Para el kilogramo, por ejemplo, se eligió fijar el valor numérico $\{h\}$ de la constante de Planck expresada en su unidad $[h] = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$. Pero la pregunta sigue siendo: supongamos que un nuevo experimento sugiere que se eligió un valor numérico incorrecto para $\{h\}$, ¿qué pasa entonces?

R16: Ahora que se han realizado los cambios, la masa del prototipo internacional del kilogramo (el IPK), que definió el kilogramo desde 1889 hasta el 20 de mayo de 2019, tendrá que determinarse experimentalmente. Si se ha elegido un "valor erróneo" $\{h\}$, simplemente el nuevo experimento nos dirá que la masa del IPK no es exactamente 1 kg.

Esta situación solo afecta a las mediciones macroscópicas de masa; las masas de los átomos y los valores de otras constantes relacionadas con la física cuántica no se ven afectadas. Continuar con la definición del kilogramo acordada en 1889, mantendría la práctica de utilizar una magnitud de referencia (es decir, la masa del IPK) que no puede garantizarse que no cambia con el tiempo, frente a un verdadero invariante como es la masa de un átomo o la constante de Planck.

Ha habido mucho debate a lo largo de los años sobre cuánto podría estar cambiando la masa del IPK respecto a la masa de una verdadera constante física. La ventaja de la nueva definición es que ahora estamos seguros de que la constante de referencia utilizada para definir el kilogramo es un verdadero invariante.

P17: Cada una de las constantes fundamentales utilizadas para definir una unidad tiene una incertidumbre; su valor no se conoce exactamente. Pero se propone fijar exactamente su valor numérico. ¿Cómo puede ser eso? ¿Qué ha pasado con la incertidumbre?

R17: La anterior definición del kilogramo fijaba la masa del IPK como exactamente igual a un kilogramo, con incertidumbre nula, $u_r(m_{\text{IPK}}) = 0$. La constante de Planck, antes de la revisión del SI, se determinaba experimentalmente y tenía una incertidumbre típica relativa de 1.0 parte en 10^8 , $u_r(h) = 1.0 \times 10^{-8}$.

Ahora, el valor de h se conoce exactamente en función de su unidad SI, con incertidumbre nula, $u_r(h) = 0$. La

masa del IPK deberá determinarse experimentalmente, partiendo de una incertidumbre relativa $u_r(m_{\text{IPK}}) = 1.0 \times 10^{-8}$. Por lo tanto, en la nueva definición la incertidumbre no se ha perdido, sino que pasa a ser la incertidumbre de la referencia anterior que ya no se usará, tal como muestra la siguiente tabla.

<i>Constante utilizada para definir el kilogramo</i>		<i>SI anterior</i>		<i>SI actual</i>	
		<i>estado</i>	<i>incertidumbre</i>	<i>estado</i>	<i>incertidumbre</i>
masa del IPK	$m(K)$	exacto	0	experimental	$1,0 \times 10^{-8}$
constante de Planck	h	experimental	$1,0 \times 10^{-8}$	exacto	0

P18: La unidad de la constante de Planck es la unidad de acción, $J \cdot s = kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$. ¿Cómo es que fijando el valor numérico de la constante de Planck resulta definido el kilogramo?

R18: Al fijar el valor numérico de h resulta definida la unidad de acción, $J \cdot s = kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$. Como ya se ha definido el segundo, s , fijando el valor numérico de la frecuencia de la transición hiperfina del Cesio, $\Delta\nu_{Cs}^{(*)}$, y el metro, m , fijando el valor numérico de la velocidad de la luz en el vacío, c , entonces definir la magnitud de la unidad $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ tiene el efecto de definir la unidad kg .

(*) $\Delta\nu$ es la notación utilizada por CODATA para representar las frecuencias de las transiciones hiperfinas, la cual difiere de la típica notación ν utilizada para indicar las frecuencias de otras transiciones.

P19: ¿No son las definiciones actuales de las unidades básicas en el SI revisado, definiciones circulares y, por lo tanto, insatisfactorias?

R19: No, no son circulares. Una definición circular es aquella que hace uso del resultado de la definición para formular la definición. Las definiciones individuales de las unidades básicas en el actual SI especifican el *valor numérico* de cada constante de referencia elegida para definir la unidad correspondiente, pero no hacen uso del resultado para formular la definición.

P20: Ahora que se han fijado los valores de todas las constantes fundamentales, puede aún verificarse la consistencia de la física?

R20: No se han fijando los valores de todas las constantes fundamentales, solo los valores numéricos de un pequeño subconjunto y combinaciones de constantes de este subconjunto. Esto ha tenido el efecto de cambiar las definiciones de las unidades, pero no las ecuaciones de la física, y no impide que los investigadores puedan verificar la consistencia de las ecuaciones.

P21: Ahora las constantes físicas c , h y e tienen valores numéricos fijos, pero ¿no fija esto el valor de la constante de estructura fina, a la que no se debe dar un valor fijo?

R21: No. El valor de la constante de estructura fina continua determinándose experimentalmente. En el SI, la constante de estructura fina siempre ha dependido de c , h , e y μ_0 . La cuarta constante es la permeabilidad magnética del vacío, que anteriormente definía el amperio, pero que ahora se determina experimentalmente a partir de la medición de la constante de estructura fina.