

La nueva referencia internacional para el kilogramo

Introducción

El 20 de mayo de 2019 entró en vigor el nuevo Sistema Internacional de Unidades (SI), ahora con base en constantes fundamentales de la naturaleza. Sin lugar a dudas, la definición de la unidad de masa, el kilogramo, es la más emblemática en el nuevo SI, por ser la única de las siete unidades de base que se mantenía referida a un artefacto, el Prototipo Internacional del Kilogramo. Sin embargo, el cambio en la trazabilidad de masa, en México y en el mundo, se tiene que realizar de manera paulatina, para lo cual el Comité Consultivo para la Masa y Unidades Relacionadas ha definido un proceso de transición que consiste en cuatro fases, para pasar de la trazabilidad en masa que se originaba en el valor de masa de exactamente 1 kg del Prototipo Internacional del Kilogramo (Fase 0), a realizaciones independientes de la unidad de masa (Fase 3).

Motivación para el cambio en la definición del kilogramo

La masa fue la última de las unidades de base del Sistema Internacional que se encontraba referida al valor de un artefacto, el Prototipo Internacional de Kilogramo (IPK por sus siglas en inglés), el cual fue sancionado en 1889 en la 1ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM). La definición del kilogramo que se estableció en aquella 1ª CGPM fue la siguiente:

“El kilogramo es la unidad de masa; es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo.”



Fig. 1 El Prototipo Internacional del Kilogramo, resguardado en una triple campana de vidrio.

[\(https://www.bipm.org/en/bipm/mass/ipk/\)](https://www.bipm.org/en/bipm/mass/ipk/)

Desde esa fecha, el IPK se encuentra depositado en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM por sus siglas en francés), y hasta antes de la redefinición del kilogramo sólo fue utilizado en cuatro ocasiones, tres de ellas en las verificaciones de los prototipos nacionales del kilogramo y la última vez en la campaña extraordinaria de calibración de los prototipos, en anticipación a la redefinición de la unidad de masa. La primera verificación periódica de los prototipos nacionales utilizando el IPK se realizó de 1899 a 1911. La segunda verificación periódica de los prototipos nacionales inicio en 1939, pero fue interrumpida por la segunda guerra mundial, reanudándose los trabajos en 1946, y fue hasta 1953 que se terminaron las mediciones. La tercera verificación periódica de los prototipos nacionales se realizó de 1988 a 1992.

De las verificaciones de los prototipos nacionales, se diseminaba el valor de masa del IPK a los usuarios de los diferentes países a través de los diferentes prototipos nacionales (por su comparación contra el IPK), y mediante este proceso, se mantuvo la trazabilidad de los valores de masa en el mundo por aproximadamente 130 años.

De las primeras tres verificaciones de los prototipos nacionales, se pudo observar que los prototipos nacionales derivaban su valor de masa (cambiaban su valor), con respecto al IPK en hasta 60 microgramos en 100 años (ver Fig. 2). Recordando que la definición del kilogramo estaba ligada al valor exacto y sin incertidumbre de la masa del IPK (exactamente 1 kg), dicho cambio en masa o deriva de la masa se atribuyó a los prototipos nacionales y a las copias oficiales del IPK, sin embargo, es altamente probable que incluso el IPK también hubiese derivado en su valor de masa.

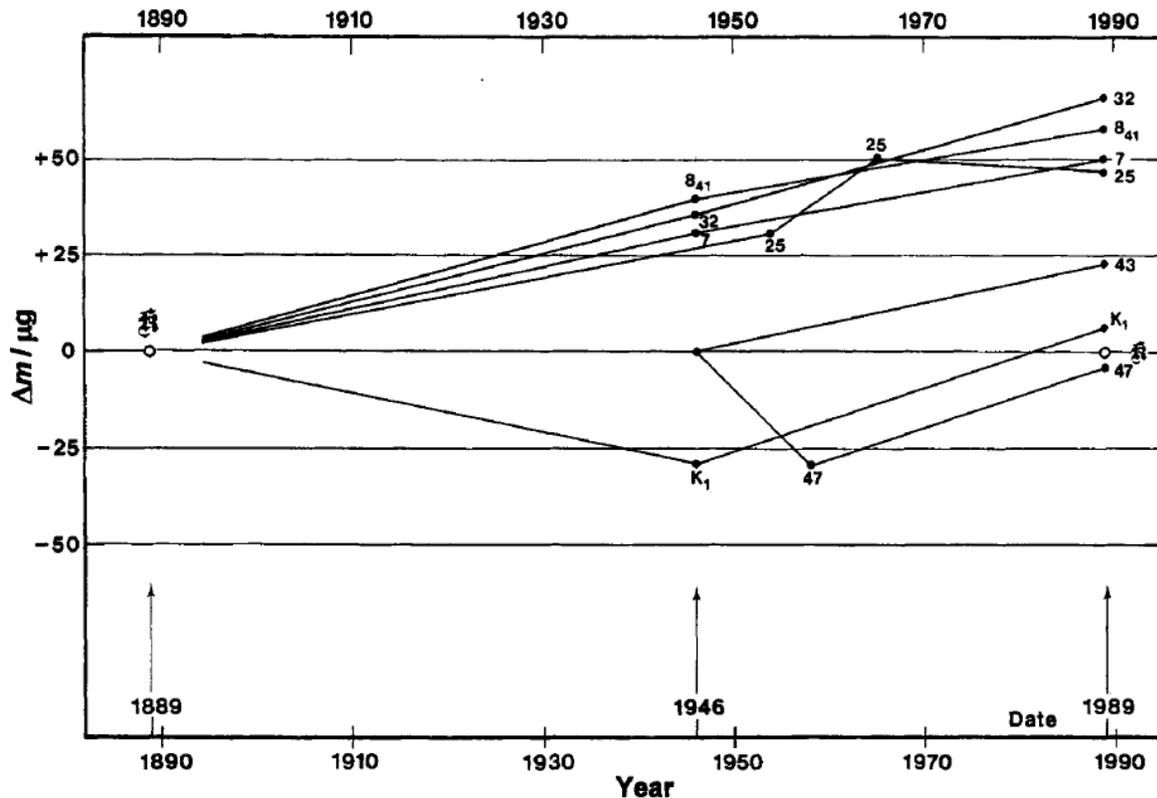


Fig. 2 Cambio de masa de las seis copias oficiales del kilogramo y el prototipo No. 25 con respecto al IPK, (G. Girard).

Adicional a la deriva del IPK, la definición anterior del kilogramo presentaba otros problemas como no poder realizar o medir valores de masa de manera independiente al IPK. Por otro lado, la mejor incertidumbre relativa

en masa que se podía conseguir era en 1 kg (valor nominal), valor de la definición y, para valores diferentes a 1 kg, la incertidumbre relativa se incrementaba debido al escalamiento de los valores de masa, situación particularmente crítica para los valores más pequeños de masa (ver Fig. 3). En la actualidad, sólo es posible medir la masa de objetos con trazabilidad al SI en un intervalo limitado de unos diez nanogramos (0.01 μg), hasta valores de aproximadamente un gigagramo (1×10^6 kg o 1 000 toneladas), motivo por el cual, en muchos campos de la ciencia, sólo pueden hacerse aproximaciones de valores de masa de objetos muy pequeños como los átomos o partículas subatómicas, o de objetos muy grandes como planetas o estrellas, sin que realmente se puedan medir con valores de masa trazables al SI.

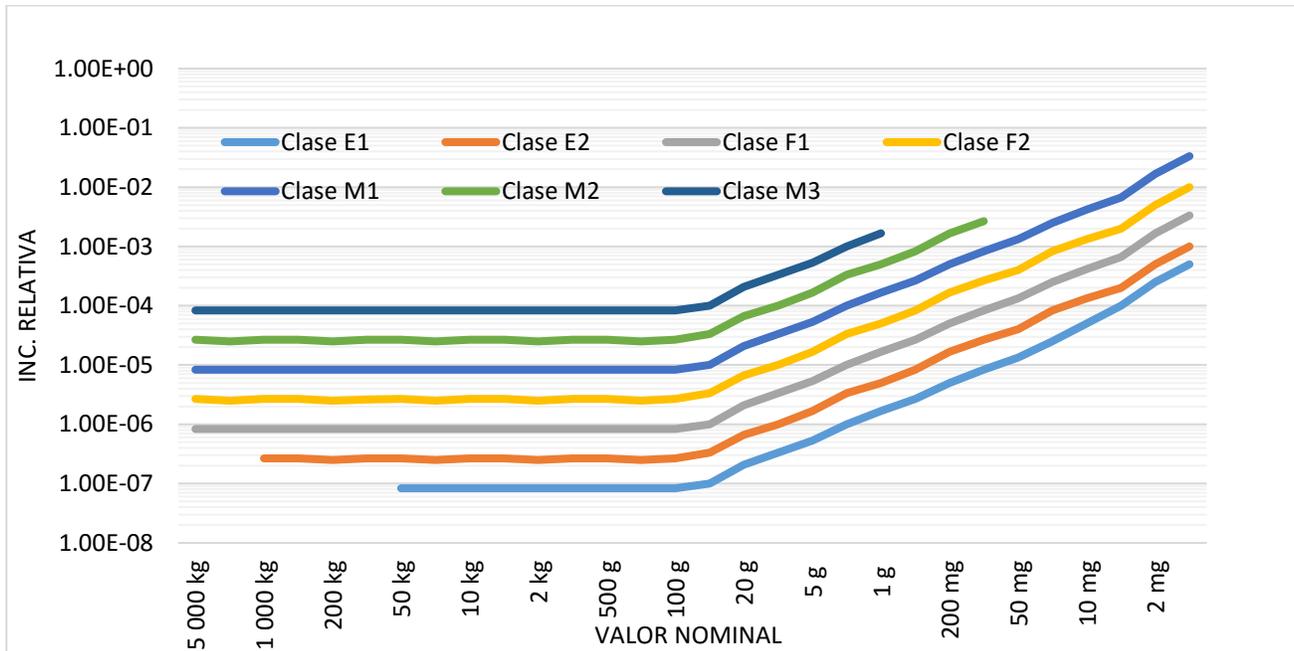


Fig. 3 Incertidumbre estándar relativa de las pesas de acuerdo a la OIML R111:2004 en función de su valor nominal.

Las constantes definitorias del nuevo Sistema Internacional de Unidades

En la 21ª CGPM (1999), se recomendó a los Institutos Nacionales de Metrología la realización de experimentos que ligaran la unidad de masa a constantes fundamentales o atómicas, en vista a una nueva definición del kilogramo.

Al igual que para el kilogramo, se buscaron ligar los valores del amperio, el kelvin y el mol a constantes de la naturaleza, (las definiciones del metro, el segundo y la candela, ya estaban ligadas a constantes de la naturaleza). Para ello, se eligieron la constante de Planck h , la carga elemental e , la constante de Boltzmann k y la constante de Avogadro N_A , para que, en conjunto con las constantes definidas previamente, es decir, la frecuencia de transición hiperfina del estado fundamental del átomo de cesio 133, $\Delta\nu_{Cs}$, la velocidad de la luz c , y la eficacia luminosa K_{cd} , fuesen las siete constantes definitorias del nuevo Sistema Internacional de Unidades.

Para fijar los valores de las constantes definitorias, el Comité en Datos para la Ciencia y la Tecnología (CODATA) del Consejo Internacional para la Ciencia, realizó el análisis de los resultados de los diferentes experimentos (disponibles), en los que se podían medir directamente las constantes h , e , k y N_A o derivar sus valores mediante las relaciones entre éstas con otras constantes, utilizando para ello un método de ajuste por mínimos cuadrados. Los resultados del ajuste realizado por CODATA fueron publicados en 2017.

En la 26ª CGPM (2018), se definieron los valores exactos (sin incertidumbre) de las constantes definitorias de las unidades de base para la revisión del Sistema Internacional.

- la frecuencia de transición hiperfina del estado fundamental del átomo de cesio 133, $\Delta \nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$ Hz,
- la velocidad de la luz, $c = 299\,792\,458$ m s⁻¹,
- la constante de Planck, $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- la carga elemental, $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- la constante de Boltzmann, $k = 1.380\,649 \times 10^{-23}$ J K⁻¹,
- la constante de Avogadro, $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹, y
- la eficacia luminosa de radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz, $K_{\text{cd}} = 683$ lm W⁻¹

Cada una de las constantes definitorias fija el valor de cada una de las siete unidades de base del Sistema Internacional.

La definición del kilogramo aprobada en esta 26ª CGPM fue la siguiente:

“El kilogramo, símbolo kg, es la unidad de masa del SI. Se define al tomar como valor numérico fijo la constante de Planck h como $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ expresada en la unidad J s, la cual es igual a kg m² s⁻¹, donde el metro y el segundo están definidas en términos de c y $\Delta \nu_{\text{Cs}}$.”

La fecha de entrada en vigor de las nuevas definiciones de las unidades de base del SI se definió para el 20 de mayo del 2019, coincidiendo con la celebración del Día Mundial de la Metrología 2019.

Experimentos para la realización de la unidad de masa, el kilogramo

Los dos experimentos que a la fecha han podido realizar con éxito la unidad de masa, son las balanzas electromecánicas, representadas principalmente por la balanza de Kibble (ver Fig. 4), y el otro experimento es el Método de Densidad de Cristal por Rayos X, XRCD por sus siglas en inglés (ver Fig. 5). Tanto la balanza de Kibble como el método de XRCD pueden realizar mediciones de masa de patrones de aproximadamente 1 kg, con incertidumbre relativa de hasta 1×10^{-8} , con trazabilidad al valor de la constante de Planck, $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s.

El experimento de la balanza de Kibble, anteriormente llamada balanza del watt, ver Fig. 4, consiste en equilibrar la potencia mecánica con la potencia eléctrica. Esta comparación sucede de manera virtual en dos etapas o modos de medición, con la intención de eliminar unas variables que son difíciles de medir con alta exactitud. Del modelo de medición de este experimento, involucrando efectos cuánticos como el Josephson y el Hall, se relaciona el valor de la constante de Planck con la masa de un patrón además de otras variables como la frecuencia que, en el estado del arte pueden medirse con muy alta exactitud.

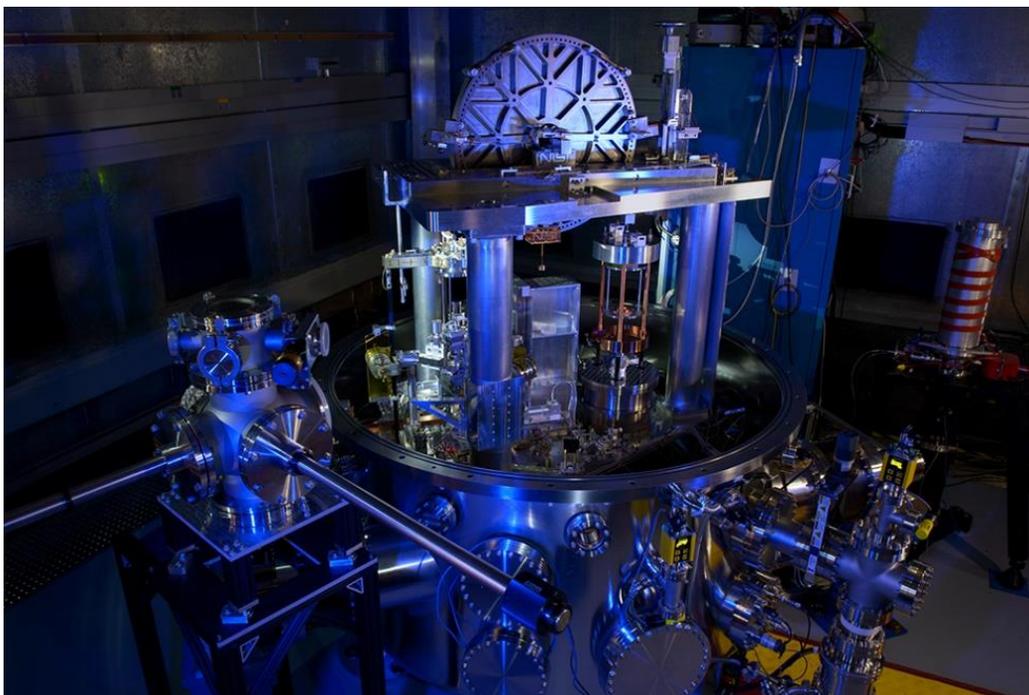


Fig. 4. Balanza de Kibble del NIST – EUA
<https://www.nist.gov/image/wattbalancersicover-1.jpg>

Por otro lado, el método XRCD consiste en contar los átomos de una esfera fabricada en monocristal de silicio ^{28}Si , y posteriormente multiplicar el número de átomos que constituyen dicha esfera por la masa individual de cada átomo de ^{28}Si . Para el experimento se fabricaron esferas prácticamente perfectas de cristal de silicio isotópicamente enriquecido, sin dislocaciones ni vacantes en la estructura cristalina, ver Fig. 5.

Este experimento relaciona la masa con una constante fundamental, la constante de Avogadro N_A , que se define como el número de entidades elementales que existen en un mol de una sustancia. Dado que la masa molar del ^{28}Si , $M(^{28}\text{Si})$, es conocida, se pudo determinar la masa de un macrocristal de silicio (esfera de monocristal de ^{28}Si).



Fig. 5. Monocristal de ^{28}Si para el método XRCD, (<https://phys.org/news/2015-07-precise-avogadro-redefine-kilogram.html>).

Aún y cuando los experimentos mencionados han demostrado su capacidad para realizar de manera exitosa el kilogramo, el cambio en la trazabilidad de la unidad de masa deberá hacerse de manera gradual para asegurar la coherencia de las mediciones de masa a nivel internacional, en especial debido a que el kilogramo es una de las siete unidades de base del Sistema Internacional de Unidades (SI), y por tanto, parte fundamental en la trazabilidad de las magnitudes derivadas de la masa, p.ej. densidad, fuerza, presión, entre otras. Para ello, el Comité Consultivo para la Masa y Unidades Relacionas (CCM), ha aprobado un proceso de transición que incluye 3 fases adicionales para completar el cambio de la trazabilidad en los valores de masa del valor del Prototipo Internacional del Kilogramo, al valor de la constante de Planck, teniendo cada una de estas fases condiciones técnicas que se deben cumplir.

Fases necesarias para la transición en la trazabilidad de las mediciones de masa

El CCM estableció 3 fases adicionales y necesarias para una transición confiable de la trazabilidad en masa del Prototipo Internacional del Kilogramo a realizaciones independientes de la unidad de masa, una vez que entró en vigor la redefinición del kilogramo en el SI, el 20 de mayo de 2019.

En la tabla 1 se resumen dichas fases, en donde la fase 0 fue aquella en la cual la trazabilidad de masa tenía su origen en el valor del Prototipo Internacional del Kilogramo, y la fase 3 será la fase en la cual se podrá tener trazabilidad en valores de masa con referencia a la constante de Planck, a partir de experimentos individuales realizados en cualquier parte del mundo.

En la tabla 1 se presentan también algunas consideraciones importantes para cada fase, con relación a la incertidumbre de las calibraciones de masa que se podrán obtener de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM). Lo anterior es importante debido a que muchos Institutos Nacionales de Metrología, no tendrán la oportunidad de contar con realizaciones primarias de la unidad de masa, y el BIPM es una alternativa (además de los Institutos que si cuentan con realizaciones primarias), para obtener la trazabilidad al valor de

la constante de Planck para sus patrones nacionales. Adicionalmente, en la misma tabla se presentan algunas consideraciones que deben tener en cuenta los Institutos Nacionales de Metrología que cuenten con el experimento activo para la realización del kilogramo.

Fase	Escala de tiempo	Descripción	Fuente de trazabilidad	Incertidumbre de las calibraciones de masa del BIPM	Rol de los experimentos de la realización	Diseminación de masa de los Institutos Nacionales de Metrología con experimento de realización del kilogramo
0	Hasta el 20 de mayo del 2019	Trazabilidad al Prototipo Internacional del Kilogramo, IPK	$m_{\text{IPK}} \equiv 1 \text{ kg}$ $u_{m_{\text{IPK}}} \equiv 0$	$u_{\text{stab}}(t)$	Mediciones de h	Diseminación desde el Prototipo Nacional con trazabilidad al IPK
1	20 de mayo, 2019 - Fecha 1	Trazabilidad a la constante de Planck, con incertidumbre adicional debida a (la nueva) definición	$m_{\text{IPK}} \approx 1 \text{ kg}$ $u_{m_{\text{IPK}}} = 10 \mu\text{g}$	$\approx \sqrt{u_{m_{\text{IPK}}}^2 + u_{\text{stab}}^2(t)}$	Contribuir a las Comparaciones Clave (KC por sus siglas en inglés), mejorar y resolver discrepancias	Diseminación desde el Prototipo Nacional con trazabilidad al IPK, con 10 μg de incertidumbre adicional
2	Fecha 1 - Fecha 2	Trazabilidad a la constante de Planck, diseminación desde valor del consenso (CV por sus siglas en inglés)	Valor de consenso (CV)	$\approx \sqrt{u_{\text{CV}}^2 + u_{\text{stab}}^2(t)}$	Contribuir al CV (vía KC), mejorar los experimentos y resolver discrepancias	Diseminación desde el valor de consenso con incertidumbre $\approx \sqrt{u_{\text{CV}}^2 + u_{\text{stab INM}}^2(t)}$
3	A partir de la Fecha 2	Trazabilidad a la constante de Planck, diseminación desde realizaciones individuales	Valor fijo de h $u(h) \equiv 0$	(Incertidumbre del experimento de la realización del BIPM)	Realización de la unidad de masa, Participación en Comparaciones Clave para demostrar equivalencia	Diseminación desde realizaciones experimentales validadas con incertidumbre del experimento. Se aplican los términos del Arreglo de Reconocimiento Mutuo del Comité Internacional de Pesas y Medidas

Tabla 1. Las fases para una transición confiable del Prototipo Internacional del Kilogramo a realizaciones independientes de la unidad de masa.

En donde:

- m_{IPK} , $u_{m_{\text{IPK}}}$ es la masa del Prototipo Internacional del Kilogramo y su incertidumbre respectivamente.
- $u_{\text{stab}}(t)$ es la contribución de incertidumbre debida a la inestabilidad de los patrones de masa del BIPM al tiempo t .
- u_{CV} es la contribución de incertidumbre debida al valor de consenso.
- $u_{\text{stab INM}}(t)$ es la contribución de incertidumbre debida a la inestabilidad de los patrones de masa del Instituto Nacional de Metrología, al tiempo t .

La **Fase 0** se refiere al periodo que inició con la definición de la unidad de masa con base al Prototipo Internacional del Kilogramo en 1889, y que culminó el 20 de mayo de 2019 con la implementación del Sistema Internacional de Unidades revisado. La fase 0 tuvo una duración aproximada de 130 años, y se caracterizó por depender del valor de masa del Prototipo Internacional del Kilogramo, definido exactamente igual a un kilogramo y sin incertidumbre. Durante este periodo, el BIPM mantuvo el valor del kilogramo mediante un conjunto de patrones de trabajo fabricados en platino iridio y calibrados directamente contra el Prototipo Internacional del Kilogramo, en las verificaciones de los prototipos nacionales del kilogramo (y la de campaña extraordinaria de calibración de los prototipos).

Es importante señalar que los resultados del estudio piloto de futuras realizaciones del kilogramo (CCM.R-kg-P1), desarrollado en 2016, permitió cumplir con los siguientes requisitos establecidos por el CCM para realizar el cambio en la definición del kilogramo,

- Al menos tres experimentos independientes de la realización (del kilogramo), incluyendo la balanza de Kibble y el experimento XRCD, deberán arrojar valores de la constante de Planck con incertidumbres relativas no mayores a 5×10^{-8} , y
- Al menos uno de esos resultados, debería tener una incertidumbre estándar relativa no mayor a 2×10^{-8} .

En este periodo, los experimentos se comparaban evaluando su medición (resultado) de la constante de Planck, y su referencia era el valor del kilogramo.

La **Fase 1** inició el 20 de mayo del 2019 y culminó en la fecha 1, oficialmente el 1° de febrero del 2021, con el cálculo y adopción del primer valor de consenso (CV) de la unidad de masa. Este periodo duró un poco más de 20 meses y, se caracterizó por iniciar con la trazabilidad de los valores de masa hacia el valor numérico fijo de la constante de Planck, sin embargo, dicha trazabilidad no se obtenía directamente de los experimentos para la realización del kilogramo, sino que se trazaba a través del valor del Prototipo Internacional del Kilogramo debido a la condición establecida por el CCM, en donde se estableció que la nueva definición del kilogramo tenía que ser congruente con la definición del kilogramo con base en el valor de masa del Prototipo Internacional del Kilogramo; por tanto el valor del Prototipo Internacional siguió siendo la referencia para la masa, pero ya no con incertidumbre cero, ya que se le agregó una componente de incertidumbre debida a la nueva definición.

Para ello, como se ha mencionado anteriormente, la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, el BIPM, mantiene el valor del Prototipo Internacional del Kilogramo con los patrones de trabajo del BIPM calibrados por última vez en 2014 directamente con el Prototipo Internacional.

La **Fase 2** inició el 1 de febrero del 2021 (fecha 1), con la adopción del primer valor de consenso, y concluirá en la fecha 2 que será decidida por el CCM. Esta fase se caracteriza en que la trazabilidad de las mediciones de masa es hacia un valor de consenso (CV), el cual es proporcionado por el grupo de tarea del CCM, el cual asegura la estabilidad y continuidad en las mediciones tomando en cuenta todas las realizaciones de la unidad de masa y comparaciones de éstas disponibles.

El primer valor de consenso se calculó en diciembre del 2020 como la media aritmética de tres conjuntos de datos, (sin tener en cuenta las posibles correlaciones entre los conjuntos de datos):

- Datos directamente trazables al Prototipo Internacional del Kilogramo, utilizado por última vez en 2014.
- Datos existentes del estudio piloto del CCM de experimentos para la realización del kilogramo CCM.R-kg-P1, realizado en 2016.
- El valor de referencia de la comparación clave (KCRV) de la primera Comparación Clave, CCM.M-K8.2019.

Contribuciones al Valor de Consenso 2020	Desviación con relación a la unidad de masa (como se mantiene) del BIPM (μg)	Incertidumbre estándar (μg)
Valor del Prototipo Internacional del Kilogramo, última comparación en 2014	0.0	11.7

Valor de Referencia estudio piloto CCM.R-kg-P1, 2016 (*)	12.4	11.4
Valor de Referencia de la CCM.M-K8.2019	-18.8	7.5

Tabla 2. Valores e incertidumbres que fueron consideradas para el cálculo del primer valor de consenso.

(*) Datos corregidos por el cambio de 17 partes en 10^9 en h introducido por el ajuste del Comité de Información para Ciencia y Tecnología (CODATA) en 2017, y un ajuste de $4 \mu\text{g}$ en la unidad de masa mantenida en el BIPM).

Como resultado del cálculo de este primer valor de consenso,

- El CCM decidió un valor de incertidumbre estándar de $20 \mu\text{g}$ para el primer valor de consenso.
- La masa del Prototipo Internacional del Kilogramo, con base en el valor de consenso es $1 \text{ kg} - 2 \mu\text{g}$.
- La masa de cada uno de los patrones nacionales, con base en el valor de consenso es $2 \mu\text{g}$ por debajo de su valor con base en el Prototipo Internacional del Kilogramo.
- Las Capacidades de Medición y Calibración (CMCs) de los diferentes Institutos Nacionales de Metrología (publicadas en la página web del BIPM), se ajustaron considerando la incertidumbre del valor de consenso.

La **Fase 3** iniciará con la fecha 2, en la cual el CCM decidirá cuando la diseminación de valores de masa a partir del valor de consenso ya no será necesario, debido a que la dispersión de los resultados de las calibraciones mediante realizaciones primarias experimentales será compatible con sus incertidumbres individuales.

En esta fase se podrán obtener valores de masa con trazabilidad al valor numérico fijo y sin incertidumbre de la constante de Planck directamente de alguno de los experimentos de la realización de la unidad de masa (p.ej. Balanza de Kibble o Método de XRCD), de manera independiente y cuyo valor de incertidumbre dependerá únicamente del experimento en particular. Sin embargo, es importante señalar que, para garantizar la coherencia de las mediciones de masa, dichos experimentos para la realización del kilogramo deberán participar regularmente en comparaciones clave organizadas por el CCM para demostrar equivalencia entre sus resultados, y obtener el reconocimiento internacional de los resultados de sus mediciones.

Comparaciones mediciones realizadas por realizaciones primarias del kilogramo

Las comparaciones (de resultados de mediciones), claves o suplementarias, organizadas por el Comité Consultivo para la Masa y Magnitudes Relacionadas, son una herramienta muy valiosa para evaluar la equivalencia de resultados y/o detectar errores o tendencias de las técnicas de medición, y para el caso particular de los experimentos para la realización de la unidad de masa no es la excepción. El primero de estos ejercicios que se desarrolló fue el estudio piloto de futuras realizaciones del kilogramo, CCM.R-kg-P1, realizado en 2016.

En este estudio participaron los siguientes institutos y experimentos:

Instituto	País	Método de realización
BIPM	Internacional	Patrones de Platino Iridio (patrones de trabajo)
LNE	Francia	Balanza de Kibble
NIST	Estados Unidos de América	Balanza de Kibble

NMIJ	Japón	Esfera de monocristal de silicio (Método XRCD)
NRC	Canadá	Balanza de Kibble
PTB	Alemania	Esfera de monocristal de silicio (Método XRCD)

Tabla 3. Institutos Participantes del estudio piloto CCM.R-kg-P1.

En este estudio piloto, los Institutos Nacionales participantes realizaron mediciones de dos conjuntos de pesas de 1 kg (2 pesas por conjunto), para el primer conjunto se recomendó utilizar patrones de platino iridio y realizar la medición de éstos al vacío directamente con el experimento de la realización del kilogramo, y el segundo par de patrones, se recomendó utilizar patrones de acero inoxidable y calibrarlos en aire con trazabilidad a los resultados de su realización. A excepción del LNE – Francia, los participantes realizaron las mediciones del primer conjunto al vacío.

Las pesas de los diferentes institutos nacionales de metrología fueron enviadas al BIPM, en donde fueron medidas con los patrones de trabajo del BIPM con trazabilidad al Prototipo Internacional del Kilogramo.

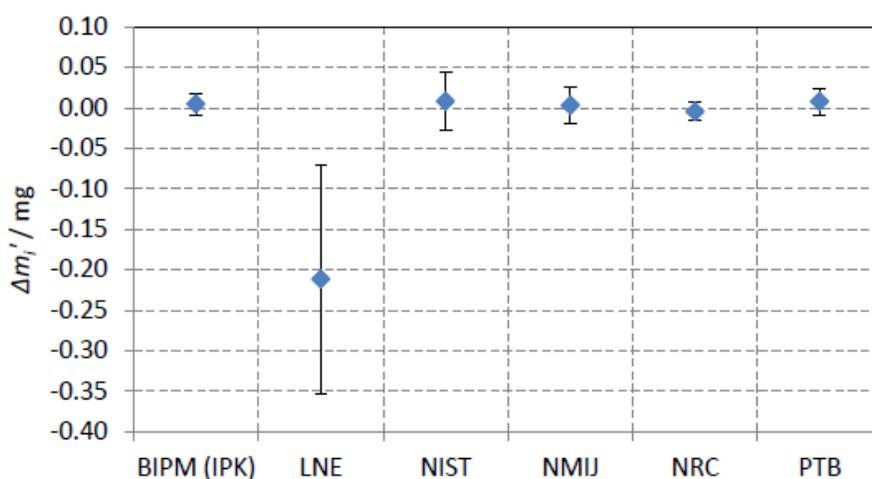


Fig. 6. Desviaciones de masa $\Delta m_i'$, entre los resultados de los Institutos Nacionales de Metrología y el valor de referencia y sus incertidumbres estándar combinadas ($k = 1$). Se muestra también la diferencia de la calibración del BIPM con base en el valor del Prototipo Internacional del Kilogramo.

Como resultado de este primer ejercicio, se observa que los resultados del NIST, NMIJ, NRC y PTB coincidieron entre sí dentro de sus declaraciones de incertidumbre estándar, $k = 1$. El resultado del LNE coincidió con los demás resultados al considerar la incertidumbre expandida, $k = 2$. La incertidumbre estándar del valor de referencia del estudio piloto fue de $10 \mu\text{g}$.

Como se ha mencionado anteriormente, los resultados de este estudio piloto fueron clave para llevar a cabo el cambio en la definición del kilogramo en el nuevo SI.

Una vez que entró en vigor el cambio en la definición del kilogramo, en 2019 se organizó la primera comparación clave de realizaciones del kilogramo, identificada como CCM.M-K8.2019. En esa ocasión participaron seis Institutos Nacionales de Metrología y el BIPM (internacional), en el que todos los institutos participantes cuentan con el experimento para la realización del kilogramo con referencia en el valor la constante de Planck.

Instituto	País	Método de realización
BIPM	Internacional	Balanza de Kibble y

		Patrones de Platino Iridio (patrones de trabajo)
KRISS	República de Corea	Balanza de Kibble
NIM	China	Balanza del joule ¹
NIST	Estados Unidos de América	Balanza de Kibble
NMIJ	Japón	Esfera de monocristal de silicio (Método XRCD)
NRC	Canadá	Balanza de Kibble
PTB	Alemania	Esfera de monocristal de silicio (Método XRCD)

Tabla 4. Institutos Participantes de la comparación clave CCM.M-K8.2019, organizada por el CCM para realizaciones del kilogramo.

La organización y las mediciones de la comparación se realizaron de manera similar al estudio piloto CCM.R-kg-P1, en donde los Institutos Nacionales de Metrología realizaron mediciones de pesas directamente con sus experimentos para la realización del kilogramo en vacío, y calcularon los valores de masa utilizando el valor numérico fijo de la constante de Planck establecido en el nuevo SI, $h = 6.626\ 07015 \times 10^{-34}$ J s. Una vez medida las masas de las pesas, fueron enviadas al BIPM en donde fueron comparadas contra patrones de trabajo del BIPM, las cuales cuentan con trazabilidad al valor del Prototipo Internacional del Kilogramo.

En la fig. 4 se presenta una gráfica de la comparación de resultados de esta primera comparación clave en realizaciones primarias de la unidad de masa, en donde cada uno de los valores representa la diferencia del resultado emitido por el laboratorio menos el valor medido por el BIPM.

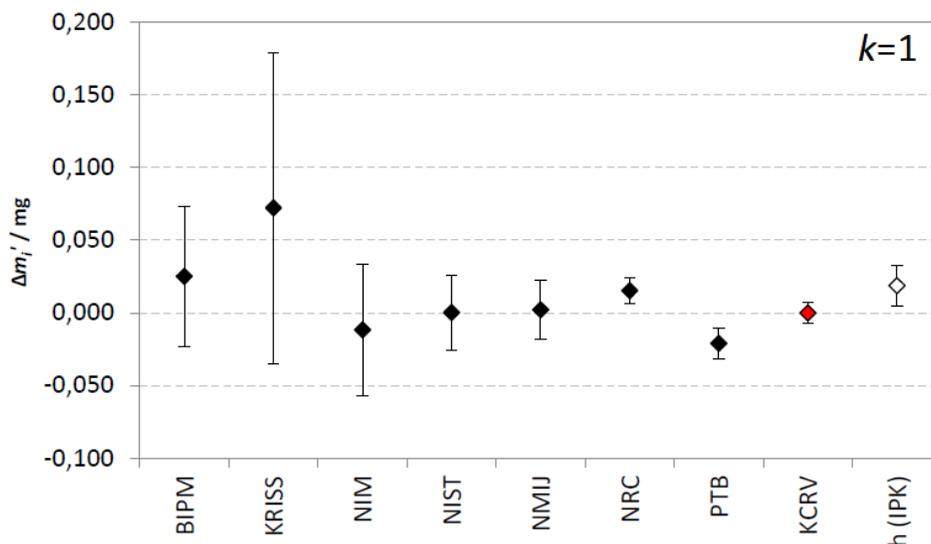


Fig. 7. Diferencias de valores de masa Δm_i de los resultados de las pesas de 1 kg reportados por los Institutos participantes y el valor de referencia (KCRV). Las diferencias fueron obtenidas entre los resultados de las realizaciones y los resultados del BIPM obtenidos por comparación contra los patrones de trabajo del BIPM. Las incertidumbres se presentan como incertidumbre estándar.

Como resultado de esta primer comparación clave de experimentos para la realización del kilogramo organizada por el CCM, se puede observar que los resultados declarados por el NRC y por el PTB fueron los que presentaron menor incertidumbre asociada, sin embargo, sus resultados no fueron consistentes entre sí a un nivel de confianza de aprox. 95 % ($k=2$).

¹ Balanza de joule es una balanza electromecánica que equilibra la fuerza magnética con la fuerza mecánica, la cual es capaz de realizar la unidad de masa de manera primaria.

El valor de referencia de la comparación clave presentó una desviación de $-18.8 \mu\text{g}$ con respecto a la unidad de masa mantenida por los patrones de trabajo del BIPM, y una incertidumbre estándar de $7.5 \mu\text{g}$.

La trazabilidad de la masa en México después de la redefinición del kilogramo

La trazabilidad de la masa en México se deriva del valor del patrón nacional de masa, el prototipo No. 21 (k21) el prototipo No. 90 (k90) y el prototipo No. 96 (k96), en donde hasta antes del 20 de mayo del 2019, el k21 su valor proviene de las verificaciones internacionales de los prototipos nacionales o mediante calibraciones subsecuentes en el BIPM utilizando las patrones de trabajo del BIPM, y los k90 y k96 de los patrones de trabajo del BIPM (copias del IPK), también con trazabilidad al IPK.

Una vez calibrados los k21, k90 y k96, estos patrones son la fuente de trazabilidad del valor de masa para todas las mediciones de esta magnitud que se realizan en el país, y las cuales ligaban los valores de masa a la definición de la unidad de masa, el IPK.



Fig. 8 El patrón nacional de masa, el k21, y las dos copias adicionales del IPK, el k90 y el k96, las cuales se mantienen en el CENAM. Prototipos de platino – iridio (90 % Pt, 10% Ir)

En CENAM se calibran los patrones de masa de acero inoxidable de 1 kg contra los prototipos de platino iridio, k21, k90 y k96, con la mejor incertidumbre posible, con la intención de mantener la exactitud del valor de masa a los siguientes eslabones de la cadena de trazabilidad.

Estas calibraciones se realizan en un ambiente controlado (p.ej. temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y densidad de aire constantes).

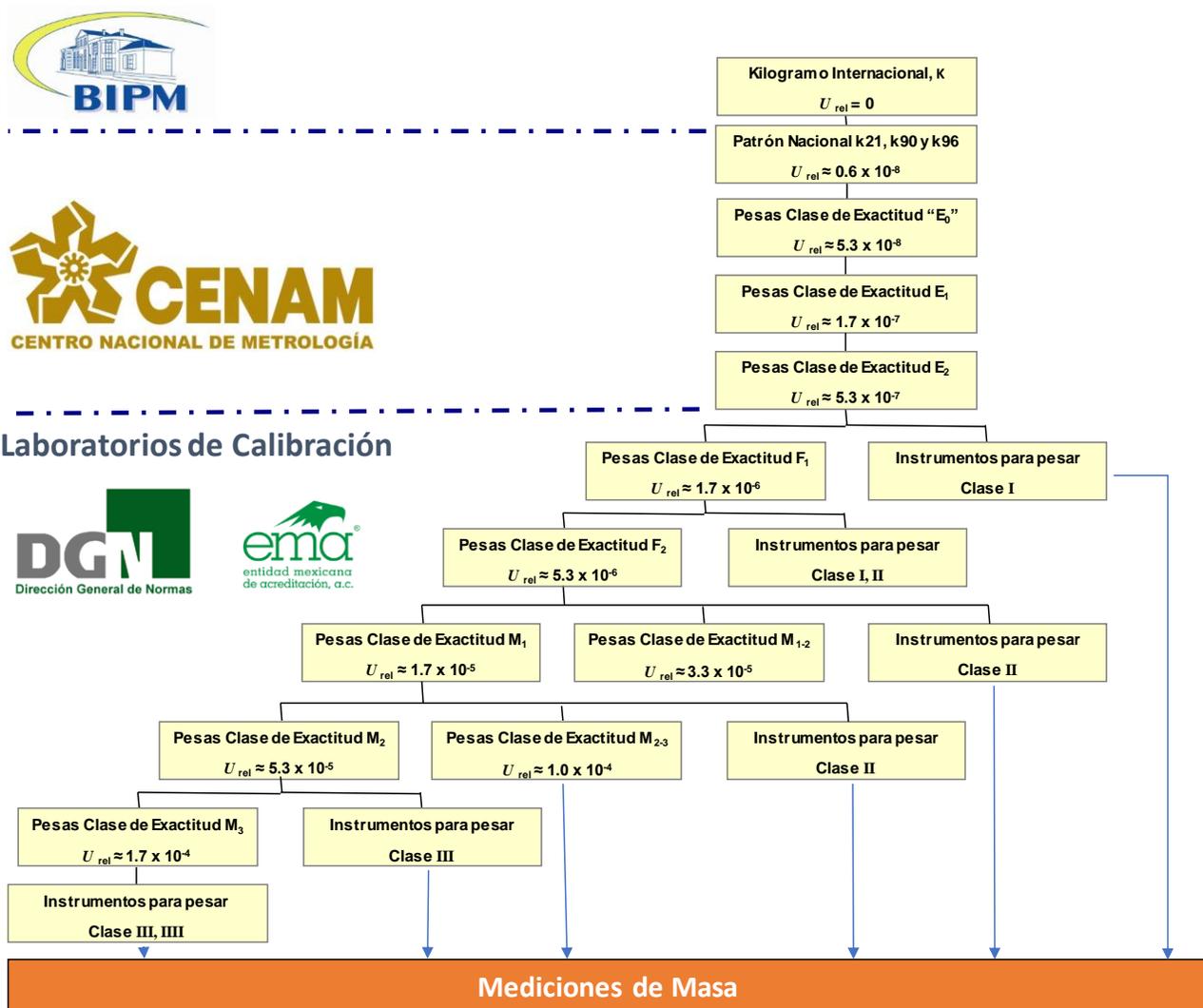


Fig. 9 Esquema de la trazabilidad de masa en México hasta antes del 20 de mayo del 2019. Incertidumbres relativas con un factor de cobertura igual a 2.

En el esquema de la Fig.9, se aprecia que la incertidumbre expandida relativa de la masa del k21 era del orden de 0.6×10^{-8} , la cual era el punto de partida para la calibración de las pesas para alcanzar la incertidumbre requerida en las pesas clase E₁ OIML R111, aprox. 1.7×10^{-7} ($k = 2$, relativa), y de ahí derivar el valor de masa a las pesas de las siguientes clases de exactitud y a los instrumentos para pesar (e incluso a las magnitudes derivadas de la masa) mediante calibraciones. El esquema de trazabilidad de la Fig. 9 se modificó a partir del 20 de mayo del 2019.

A partir del 20 de mayo del presente (fase 1 de la Tabla 1), la trazabilidad de masa en México siguió derivándose de los valores de los prototipos de platino iridio, k21, k90 y k96, pero durante la fase 1, como consecuencia inmediata de la redefinición del kilogramo, su valor de incertidumbre se incrementó (ahora tiene una contribución adicional de $10 \mu\text{g}$).

A la fecha de escribir la presente nota, nos encontramos en la fase 2 del proceso de transición de la trazabilidad de masa (Tabla 1), siendo ahora el valor de consenso, el valor de referencia (e incertidumbre) para derivar la trazabilidad de los valores de masa de los prototipos de platino iridio k21, k90 y k96, siendo estos a su vez, el origen de la trazabilidad de las mediciones de masa en el país, y como consecuencia de depender el valor de consenso, la incertidumbre de los prototipos nacionales tuvo un nuevo incremento de incertidumbre (aproximadamente 20 microgramos).

El personal de la Dirección de Masa y Densidad del CENAM hace los ajustes convenientes, en cuanto a la trazabilidad interna, para que la oferta de sus servicios de calibración no se vean afectados. Los usuarios de calibraciones de masa de pesas clase E₁ (e inferiores), no notarán ningún efecto debido a este cambio en la trazabilidad de la masa. Sólo aquellos usuarios que solicitan servicios mejor que E₁, verán un pequeño incremento en la incertidumbre de la masa en 1 kg (incertidumbre de aprox. 36 µg en lugar de los 30 µg con $k = 2$ que anteriormente podían recibir), pero este incremento es mínimo y no afecta de manera considerable al uso pretendido de este tipo de patrones de masa. Este cambio en la incertidumbre en 1 kg, se verá reflejado de igual manera en la tabla de CMCs de CENAM que mantiene en el apéndice C del Arreglo de Reconocimiento Mutuo del Comité Internacional de Pesa y Medidas <https://kcdb.bipm.org/appendixC/>.

Debido a que uno de los requisitos establecidos por el CCM para llevar a cabo la redefinición del kilogramo, fue que la nueva definición del kilogramo fuese consistente con la definición anterior, las mediciones y valores que eran trazables al valor del IPK antes del 20 de mayo del 2019, después de esa fecha son trazables ahora al valor de la constante de Planck. Por lo tanto, los usuarios de los valores de masa no necesitaron realizar ninguna acción adicional para mantener la trazabilidad en el nuevo SI, p.ej. las pesas o juegos de pesas que estaban en estado de calibración válido seguían en el mismo estado de calibración, y deberían ser calibrados cuando les correspondía de acuerdo a su programa normal de recalibraciones.

En la figura 10 se puede ver el esquema de trazabilidad actual, en donde el Patrón Nacional de Masa, el k21, así como los prototipos de platino iridio k90 y k96, tienen como referencia para su valor de masa el valor de consenso, (Fase 2 del proceso de transición del valor del IPK a la constante de Planck mediante realizaciones independientes, tabla 1). El valor de consenso garantiza la coherencia y uniformidad de las mediciones de masa a nivel internacional, y eventualmente será actualizado en función de los nuevos resultados que se encuentren disponibles de los experimentos a nivel internacional.

Durante esta fase 2, los prototipos de platino iridio de México, k21, k90 y k96, seguirán siendo calibrados de manera periódica en el BIPM contra sus patrones de trabajo, y ahora, cuyo valor de masa está referido al valor de consenso. A partir de los prototipos de platino iridio k21, k90 y k96 se disemina la exactitud del valor de masa hasta llegar a los diferentes instrumentos para pesar y a las mediciones que con ellos se hacen, de manera muy similar a como se hacían antes del cambio en la definición de la unidad de masa.

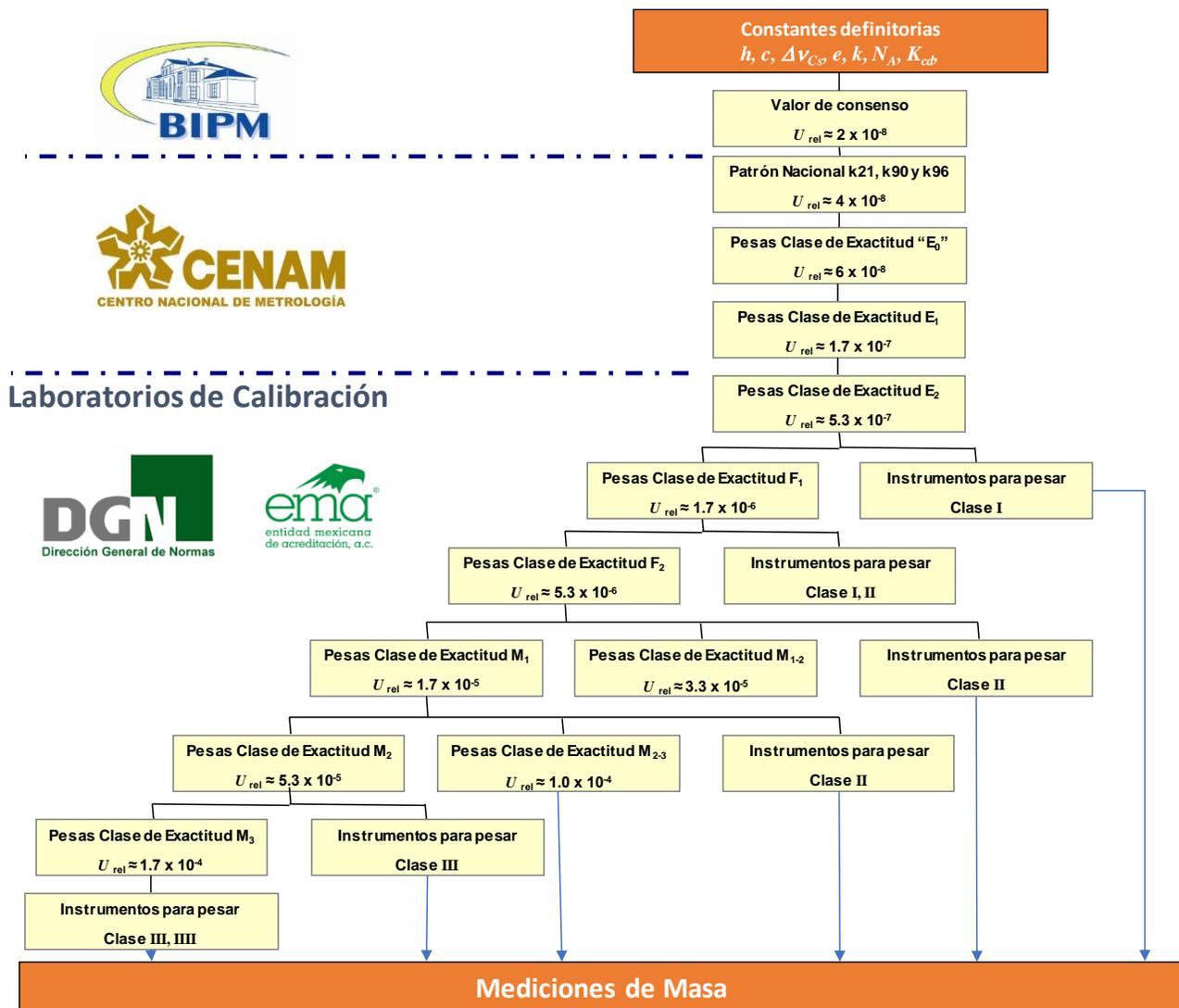


Fig. 10. Esquema de trazabilidad probable de masa en el nuevo SI. Los valores de incertidumbre se expresan como incertidumbre relativa a un nivel de confianza de aprox. 95 %.

Por otro lado, con el cambio en la definición de la unidad de masa, los experimentos que se utilizan para realizar el kilogramo (y la medición de la constante de Planck previo a la redefinición), pueden ser diseñados para realizar otros valores nominales (diferentes a 1 kg) e incluso para otros valores de incertidumbre, p.ej. una balanza de Kibble para valores nominales ≤ 10 g, con incertidumbre relativa 1×10^{-6} , desarrollo que sería muy conveniente para aplicaciones industriales en el sector Químico o en el Farmacéutico, y cuya trazabilidad al SI se realizaría sin tener que seguir el esquema tradicional de la trazabilidad de masa (ver Fig. 13), sino mediante mediciones trazables a los efectos cuánticos correspondientes. En CENAM se está trabajando en el desarrollo de una de estas balanzas de Kibble de mesa para valores nominales iguales o menores a 10 g, ver Fig. 11.

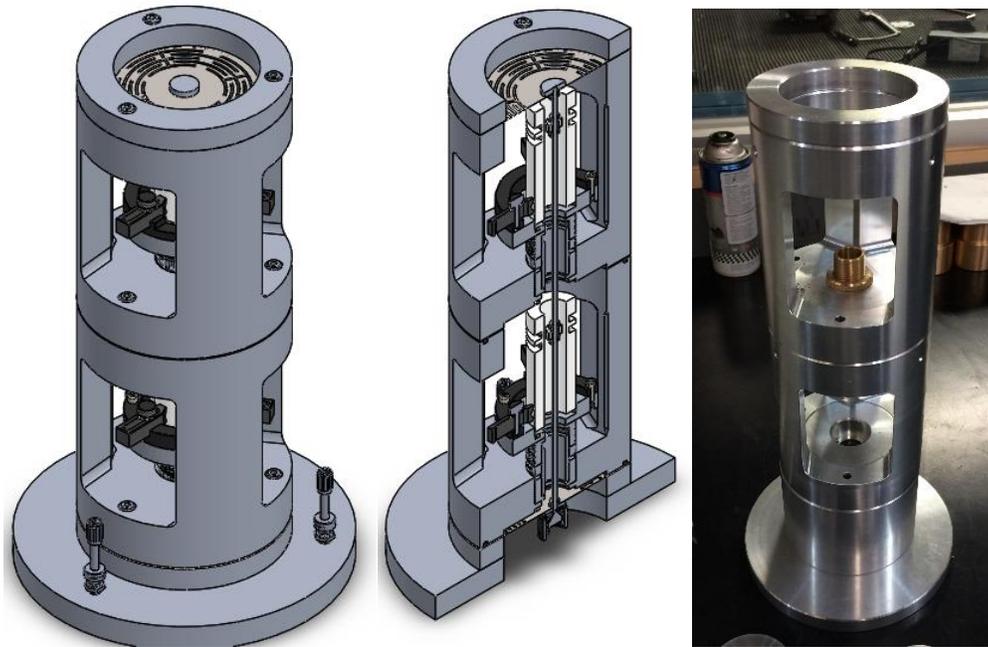


Fig. 11. Esquemas del diseño de la balanza de Kibble de mesa de CENAM, y el prototipo de la misma.

CENAM participa en un proyecto conjunto con el Instituto Nacional de Metrología de Alemania (PTB), en el estudio de la estabilidad de esferas de silicio natural, ^{nat}Si , las cuales podrían ser utilizadas como patrones de masa de nivel secundario (incertidumbre aprox. a la que se obtiene en pesas clase E_1), las cuales presentan ventajas similares a las realizaciones primarias (monocristales de ^{28}Si), en particular la estabilidad de su masa, debido a que este tipo de patrones forman una capa de óxido de silicio muy estable y muy dura que protege al centro de la esfera, y dicha capa puede ser monitoreada mediante técnicas ópticas (p.ej. elipsometría espectral), por tanto es posible realizar la limpieza de su superficie de manera muy reproducible y mantener bajo control las capas superficiales de la esfera y por consiguiente mantener bajo control su valor de masa. Este tipo de patrones (esferas), tendrían como propósito diseminar el valor de masa (calibrando pesas y/o balanzas) con trazabilidad a las constantes definitorias.

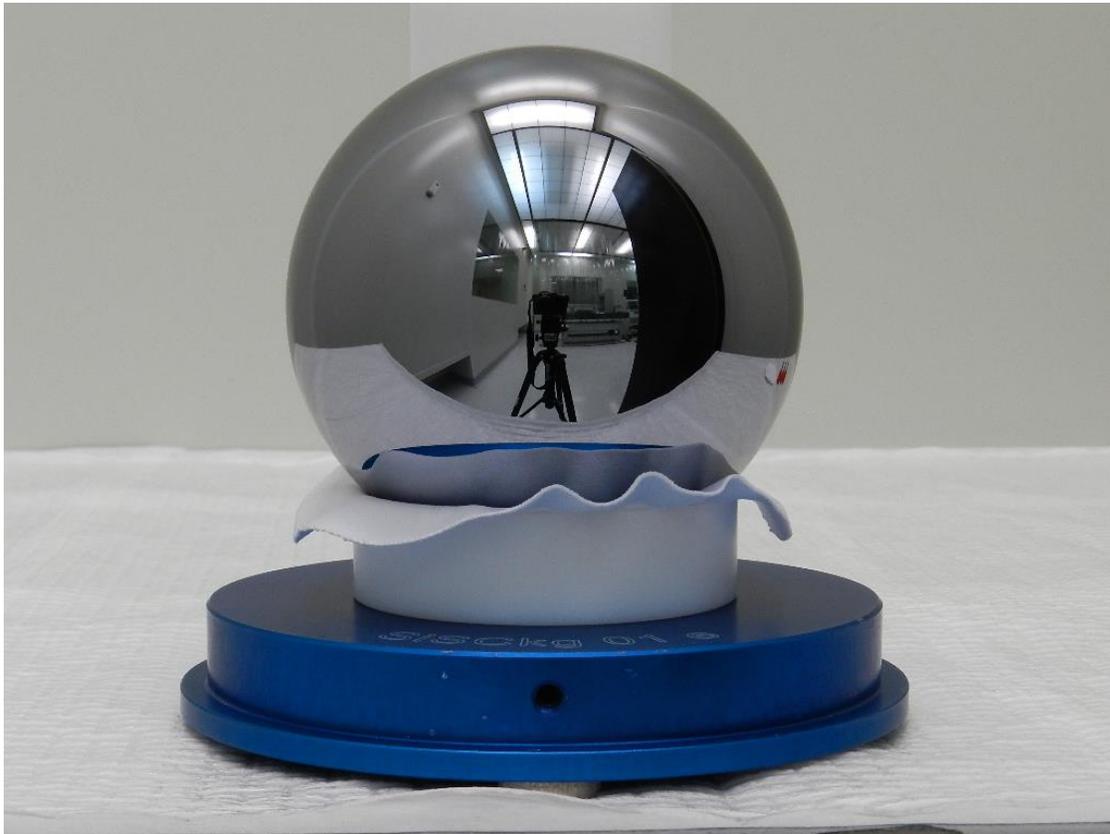


Fig. 12. Esfera de silicio natural utilizada en para el estudio de estabilidad en el que CENAM y PTB – Alemania se encuentran colaborando.

Este tipo de experimentos, en su momento podrían cambiar la forma en la que se veía la trazabilidad de las mediciones de masa en el anterior SI, ya que se agregan posibilidades en donde se podrían calibrar pesas por ejemplo de clase E2 directamente en un instrumento como la balanza de Kibble de mesa, con trazabilidad directa a la constante de Planck y al SI, (ver fig. 13).

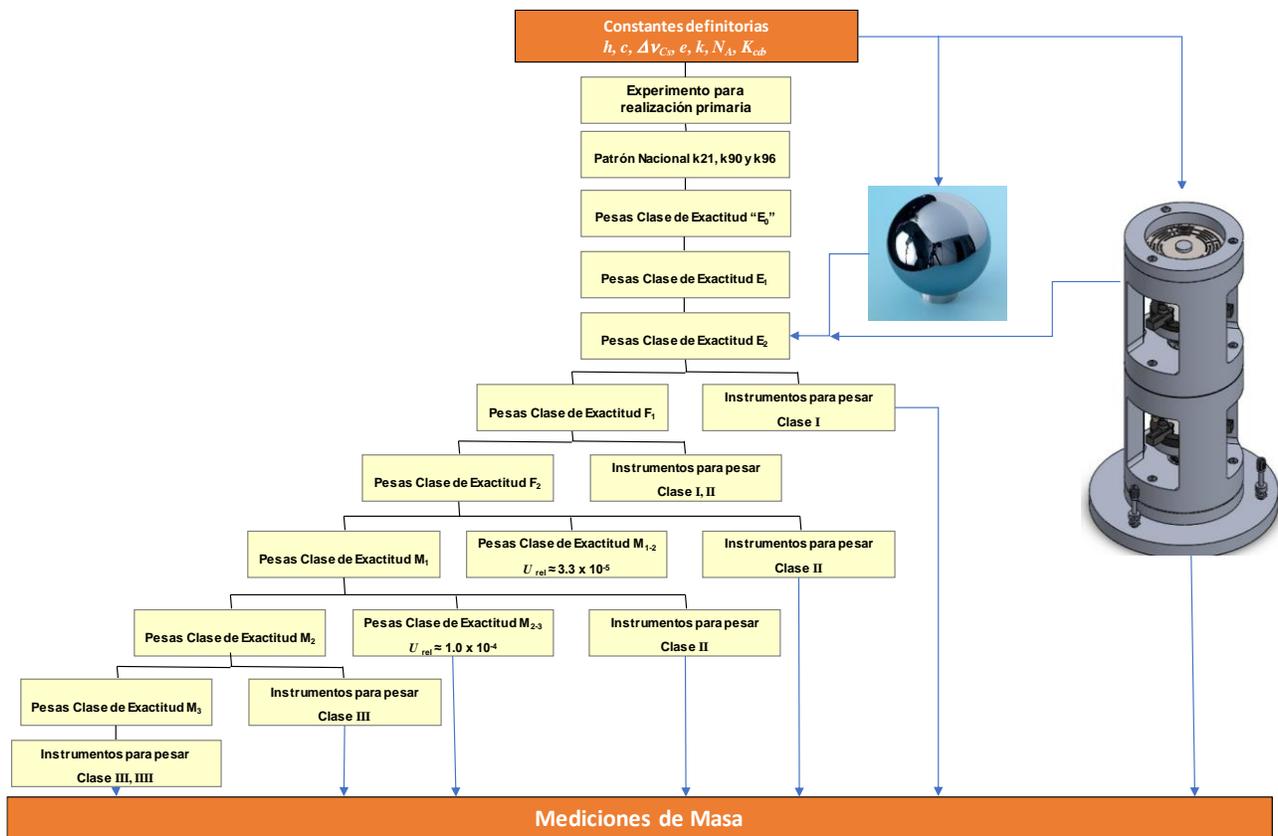


Fig. 13. Esquema de trazabilidad probable de masa en el nuevo SI, en donde se agregan algunas posibilidades para obtener mediciones trazables en el nuevo SI con el desarrollo de experimentos, no necesariamente primarios para la realización de medidas de masa, p.ej. balanzas de Kibble de mesa o esferas de silicio natural.

Conclusiones

El CCM estableció 3 fases adicionales y necesarias para una transición confiable de la trazabilidad en masa del Prototipo Internacional del Kilogramo a realizaciones independientes de la unidad de masa.

Al momento de escribir la presente nota, nos encontramos en la fase 2 para la transición de la trazabilidad en la unidad de masa del Prototipo Internacional del Kilogramo al valor de la constante de Planck, en la cual, la trazabilidad de las mediciones de masa pasa por un valor de consenso aprobado por el Comité Consultivo para la Masa y Unidades Relacionadas.

La trazabilidad de las mediciones de masa en México depende del valor del consenso, el cual es la referencia para los valores de masa de los prototipos de platino iridio k21, k90 y k96, y estos a su vez el origen de la trazabilidad de la masa en el país.

Este primer valor de consenso fue calculado como la media simple de tres datos, el primero proveniente del valor del Prototipo Internacional de Kilogramo, utilizado por última vez en 2014, el segundo dato, proveniente del valor de referencia del estudio piloto de futuras realizaciones del kilogramo (CCM.R-kg-P1) realizado en 2016, y finalmente el tercer valor proveniente del valor de referencia de la primer comparación clave de realizaciones del kilogramo (CCM.M-K8.2019), organizada por el CCM en 2019.

El valor del Prototipo Internacional de Kilogramo, con base en el valor de consenso disminuyó 2 microgramos desde su última medición.

El CCM ha recomendado repetir las comparaciones clave de realizaciones del kilogramo en periodos de 2 años, por lo cual, el valor de consenso será actualizado consecuentemente.

Con base en los resultados de las comparaciones clave de las realizaciones del kilogramo disponibles, el CCM decidirá el paso a la fase 3, fecha en la que ya no será necesario calcular el valor de consenso, y ya será posible obtener valores de masa con trazabilidad al valor de la constante de Planck directamente de alguno de los experimentos disponibles y de manera independiente, en donde el valor de incertidumbre asociada (al valor de la masa), dependerá únicamente del experimento en particular.

Referencias

- [1] G. Girard International Report, **The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988 – 1992)**. Metrologia, 1994, 31, 317 – 336
- [2] OIML International Recommendation **R111-1 Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃, Part 1: Metrological and technical requirements**, Edition 2004 (E).
- [3] M. N. Medina, L. O. Becerra, J. A. Lumbreras, **2019: la definición del kilogramo en el SI revisado**, e – medida, Revista Española de Metrología, Volumen 7, No. 14 Diciembre 2018, <https://www.e-medida.es/numero-14/2019-la-definicion-del-kilogramo-en-el-si-revisado/>.
- [4] P. Cladé, F. Biraben, L. Julien, F. Nez, S. Guellati-Khelifa, Precise determination of the ratio h/mu: a way to link microscopic mass to the new kilogram, Metrologia 53 (2016) A75–A82
- [5] M. Stock et al. **Report on CCM Pilot Study CCM.R-kg-P1, Comparison of future realizations of the kilogram**, https://www.bipm.org/cc/CCM/Allowed/16/03-7B2_CCM-PilotStudy-FinalReport.pdf
- [6] **CCM detailed note on the dissemination process after the redefinition of the kilogram**, Approved at the 17th CCM meeting, 16 – 17 May 2019.
- [7] BIPM, The International System of Units (SI) -9th Edition 2019.
- [8] L.O. Becerra, L.M. Peña, **La trazabilidad de la masa después del 20 de mayo del 2019**. De La Metrologia, Volumen 18 Año 2019 N° 2, <https://ammac.mx/wp-content/uploads/2019/07/REVISTA-DIGITAL-AMMAC-VOL-18.pdf>
- [9] Consultative Committee for Mass and Related Quantities, **CCM detailed note on the dissemination process after the redefinition of the kilogram**, Approved at the 17th CCM meeting, 16-17 May 2019, https://www.bipm.org/documents/20126/41489673/CCM_Note-on-dissemination-after-redefinition.pdf/3743d0d0-d8cc-325c-3219-547a6ea47a47
- [10] M Stock et al, **A comparison of future realizations of the kilogram**, Metrologia 55 Number 1, 2018, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/aa9a7e>
- [11] M Stock et al, **Report on the CCM key comparison of kilogram realizations CCM.M-K8.2019**, Metrologia 57 07030, 2020, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/57/1A/07030>
- [12] BIPM, The International System of Units (SI) -9th Edition 2019.
- [13] Consultative Committee for Mass and Related Quantities, **RECOMMENDATION G 1 (2017) For a new definition of the kilogram in 2018**, 2017.
- [14] S Davidson, M Stock **Beginning of a new phase of the dissemination of the kilogram**, Metrologia 58 (2021) 033002, <https://doi.org/10.1088/1681-7575/abef9f>

M. en C. Luis Omar Becerra Santiago

Director de Masa y Densidad
Centro Nacional de Metrología
email: lbecerra@cenam.mx
Tel. 442 2 11 05 73