

# La Nueva Definición del Kilogramo en el SI (a través de la constante de Planck $h$ )

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el Sistema Internacional (SI) reconoce como una de las magnitudes base a la masa. Desde la primera Conferencia general de pesas y medidas en 1889, el prototipo internacional del kilogramo es una masa de 1 kg de platino iridio que materializa la unidad de masa, actualmente se encuentra en Francia. A partir del prototipo internacional se ha dado respaldo (Trazabilidad) a los patrones de masa de los diferentes países del mundo por medio de calibraciones.

La definición de masa en la actualidad y los cambios que se aproximan con la nueva definición de masa en base a una constante natural (constante de Planck) va a aportar un gran avance en la comunidad científica y los diferentes sectores de la industria. Siendo actualmente de gran impacto e interés para la metrología.

## II. LA UNIDAD DE MASA EN LA ACTUALIDAD

### A. Definición de la unidad de masa en la actualidad

La definición actual de la unidad de masa fue adoptada en 1889 en la 1ra Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), y confirmada en la 3ra Conferencia General de Pesas y medidas en 1901, (Actualmente: BIPM) 1998.

*“El kilogramo es la unidad de masa, es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo”*

### B. Exactitud que se alcanza con el prototipo internacional del kilogramo

Los patrones nacionales de platino iridio de los Institutos Nacionales de Metrología, son comparados con el prototipo internacional del kilogramo empleando un comparador de masas, obteniendo una incertidumbre relativa de  $1 \times 10^{-9}$ . Para el caso de las masas de acero inoxidable la incertidumbre relativa es del orden de  $1 \times 10^{-8}$  (a causa de la contribución de la incertidumbre por empuje del aire).



Fig. 1 Foto del prototipo internacional del kilogramo, que se encuentra en Paris - Francia.

El prototipo internacional del kilogramo resguardado en Paris por más de 100 años ha alcanzado una deriva en masa de al menos  $0,5 \mu\text{g}$  por año, perdiendo aparentemente  $50 \mu\text{g}$  de masa respecto a los patrones de los demás Institutos Nacionales de Metrología (INMs). La estabilidad de la unidad de masa es un problema porque no se sabe cómo fue que derivó en todos estos años.

### **C. La masa en el tiempo como parte del SI**

El SI se instauró en 1960, en la XI Conferencia General de Pesas y Medidas, durante la cual inicialmente se reconocieron seis unidades físicas básicas:

Metro, kilogramo, segundo, amperio, kelvin y candela. En 1971 se añadió la séptima unidad básica: el mol.

**La CGPM en su reunión del 2011, propuso revisar el SI de manera que las definiciones del kilogramo, Amper, Kelvin, y mol quedaran ligadas a valores numéricos de constantes**

En el 2014 los resultados de investigaciones realizados por institutos para la nueva definición del kilogramo no fueron representativos para la CGPM, se solicitó apoyo a los diferentes INMs.

El 1 de julio del 2017 se llegaron a obtener las incertidumbres requeridas de los **valores de constantes** por lo que el SI fue revisado por la CGPM y considerado el 1 de julio del 2017. En esta fecha también se establecen los datos de las constantes (valores numéricos exactos de las constantes) por parte de CODATA.

En el 2018 se establecerán las nuevas definiciones del SI

En mayo del 2019 se aprobará la nueva definición del kilogramo.

### **III.- LA NUEVA UNIDAD DE MASA**

Hay dos experimentos que vienen desarrollando la nueva definición del kilogramo, ambos experimentos trabajan la relación el kilogramo con las constantes naturales, son el experimento de la balanza de watt y el experimento de la constante de Avogadro, ambos experimentos se relacionan entre sí **por la constante molar de Planck** (de gran exactitud),  $N_A h = 3,990\ 312\ 7110(18) \cdot 10^{-10} \text{ Js/mol}$  con una incertidumbre relativa de  $4,5 \times 10^{-10}$

Entonces ambos experimentos pueden colaborar en la redefinición del kilogramo.

#### **A.- La Balanza de Watt**

En 1975 Brian Kibble propuso un método (experimento con la balanza de corriente) donde se obtiene una relación entre la corriente, la tensión, la masa, la aceleración de la gravedad y la velocidad, magnitudes que se pueden medir con buena exactitud (notablemente mayor a la inducción magnética), Kibble publicó esta propuesta.

El NPL y el NBS (hoy: NIST) iniciaron también a trabajar en la propuesta de Kibble, donde el NPL trabajó con una balanza de brazos iguales y un imán permanente, y el NBS utilizó una polea y una bobina superconductor para generar el campo magnético.

A partir de 1998 fueron más los INMs que empezaron a trabajar en la propuesta de Kibble para la nueva definición del kilogramo entre ellos está: OFMET-Suiza (Hoy: Metas), BIPM-Francia, LNP-Francia, KRISS-Corea del Sur, MSI-Nueva Zelanda, NMIJ –Japón, UME-Turquía.

*El nombre de Balanza de Watt es debido a que el watt es la unidad de la magnitud con la cual se compara una potencia mecánica con una eléctrica.*

**Como obtenemos la nueva definición del kilogramo:** La balanza de Watt establece en consecuencia la relación entre una masa, la aceleración de la gravedad, una velocidad, dos frecuencias, y la constante de Planck.

Así se define el kilogramo a través del metro, el segundo y la constante de Planck. El metro se define a través del valor de la velocidad de la luz y el segundo se define a través de la constante atómica.

A través de la definición de la constante de Planck en el nuevo SI, la balanza de Watts es una posible realización de la unidad del kilogramo. Van haber otros trabajos siempre que se refieran a las constante naturales establecidas como por ejemplo el experimento de Avogadro.

Los trabajos de la balanza de watt finalmente obtuvieron la siguiente ecuación:

$$m = \frac{1}{4} n_{1m} n_{1g} n_2 f_m f_g \frac{h}{g_V}$$

donde se muestra como la constante de Planck ( $h$ ) define al kilogramo, de esta manera va a ser posible en el futuro determinar la masa de un patrón de masa a partir de  $h$ .

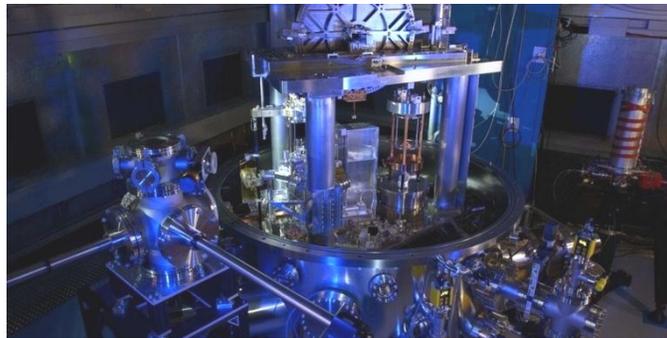


Fig. 2 Foto de la Balanza de Kibble, ubicada en el NIST- USA.

### **B.- Experimento de Avogadro**

Desde 1971 el PTB inicio un proyecto para determinar de forma más exacta la constante de Avogadro partiendo de monocristales de silicio, pero aún los resultados obtenidos no eran los requeridos por la CGPM para emplearlo en la definición del kilogramo. En el 2004 se reunieron varios INMs para determinar la constante de Avogadro con una exactitud hasta ahora nunca lograda, es entonces que en el 2011 se logra alcanzar una incertidumbre relativa de  $3 \times 10^{-8}$ , aquí usaron un monocristal de silicio casi perfecto (la esfericidad no fue lo suficientemente perfecta para lograr un mejor resultado). Solo perfeccionando la esfericidad y la superficie de esfera de  $^{28}\text{Si}$  se obtuvo una incertidumbre relativa de  $2 \times 10^{-8}$  para la constante de Avogadro, en el año 2015.

La condición de lograr una incertidumbre relativa de  $2 \times 10^{-8}$ , se deriva de la propagación de incertidumbre de medición en la disseminación del prototipo internacional de masa.



Fig. 3 Esfera de  $^{28}\text{Si}$ , se observa la esfericidad y la superficie perfecta de la esfera. Foto del PTB

### C.- Resultados con la nueva definición del kilogramo

Los resultados de las mediciones con la balanza de Watt del NPL y del NIST lograron incertidumbres relativas de  $10^{-6}$  para determinar la constante de Planck.

Con el experimento de la constante de Avogadro también se pudo determinar la constante de Planck (usando otras constantes naturales).

Ambos resultados (la balanza de Watt y el experimento de la constante de Avogadro) tenían discrepancias considerables, pero recientemente con mejoras en ambos experimentos se logró obtener resultados del NRC (con el experimento de la balanza de Watt) y del IAC (International Avogadro Coordination) con una incertidumbre relativa de  $2 \times 10^{-8}$ , siendo éstas aceptables por el CGPM.

El NIST con el experimento de la balanza de Watt ha logrado una incertidumbre de  $5,6 \times 10^{-8}$ . Se espera que más adelante estas mediciones (ambos experimentos) se vuelvan consistentes entre sí.

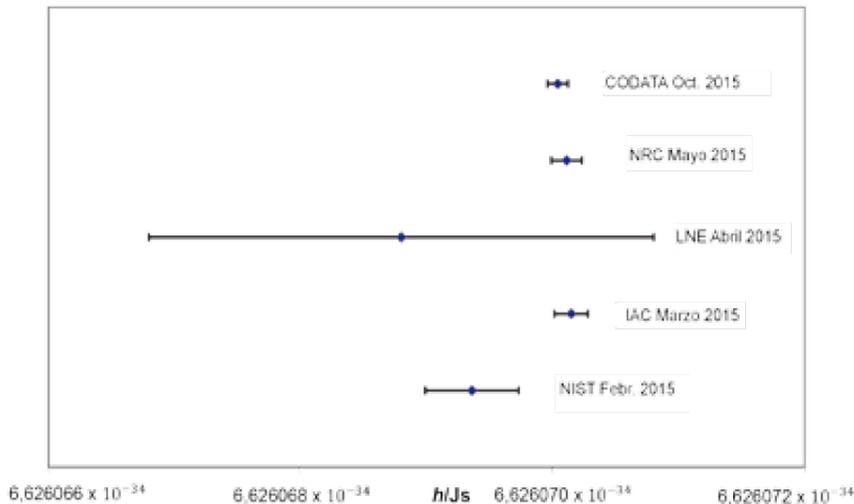


Fig. 4 Constante de Planck – resultados de medición del año 2015: NIST [10], IAC [11], LNE[13], CODATA [14]

El experimento de la Esfera de silicio nos ayuda a obtener la constante de Avogadro  $N_A$  con una incertidumbre menor a  $2 \times 10^{-8}$  y a determinar la masa de la esfera lo cual ayudara a verificar la constate de Planck  $h$  que se obtuvo del experimento de la balanza de watt (Kibble).

#### **D.- La nueva definición del kilogramo**

En base a todo lo anteriormente explicado para el 2018 se espera adoptar la nueva definición para el kilogramo de la siguiente manera:

**“El kilogramo, símbolo kg, es la unidad de masa del SI. Se define asignando el valor numérico fijo de  $6,626\ 070\ 040 \times 10^{-34}$  a la constante de Planck  $h$  cuando ésta se expresa en la unidad  $J \cdot s$ , que es igual a  $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ , donde el metro y el segundo están definidos en términos de  $c$  y  $\Delta\nu_{Cs}$ .”**

Esta definición implica la relación exacta  $h = 6,626\ 070\ 040 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Invirtiéndola se obtiene una expresión exacta para el kilogramo en términos de las tres constantes de definición:  $h$ ;  $\Delta\nu_{Cs}$ ;  $c$ :

$$1 \text{ kg} = \left( \frac{h}{6,626070040 \times 10^{-34}} \right) m^{-2} \cdot s = 1,475521 \dots \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{Cs}}{c^2}$$

El efecto de esta definición es definir la unidad  $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$  (la unidad de las magnitudes físicas acción y momento angular). Junto con las definiciones del segundo y el metro, esto conduce a una definición de la unidad de masa expresada en términos del valor de la constante de Planck  $h$ .

La definición anterior del kilogramo fijaba el valor de la masa del prototipo internacional del kilogramo,  $m(K)$ , igual a un kilogramo exactamente, y el valor de la constante de Planck  $h$  tenía que determinarse experimentalmente. La presente definición fija el valor de  $h$  exactamente, y la masa del prototipo internacional del kilogramo ahora tiene que ser determinada experimentalmente.

El número elegido para el valor numérico de la constante de Planck en esta definición es tal que, en el momento de su adopción, el kilogramo es igual a la masa del prototipo internacional,  $m(K) = 1 \text{ kg}$ , con una incertidumbre estándar relativa de  $2 \times 10^{-8}$ , que es la incertidumbre estándar de las mejores estimaciones combinadas del valor de la constante de Planck al presente.

Nótese también que con la presente definición, las realizaciones primarias se pueden establecer, en principio, en cualquier punto de la escala de masas.

#### **IV.- IMPACTOS POSITIVOS DE LA NUEVA DEFINICIÓN DEL KILOGRAMO**

La nueva definición del kilogramo permitirá las realizaciones prácticas reproducibles en cualquier tiempo y lugar, donde el kilogramo estará ligado a la constante de Planck  $h$  (un invariante de la naturaleza).

Dejando atrás la definición del kilogramo basado en la masa de un patrón materializado.

##### **A. En la educación**

La nueva definición del kilogramo no alterara la vida diaria de los usuarios, dándose la continuidad de todo lo que se mantenía hasta hoy.

Son los laboratorios nacionales de Metrología (INMs) los que tendrán que realizar algún cambio en sus mediciones de alta exactitud, solo si esto es necesario.

De igual manera el contenido de libros que tenga información acerca de las antiguas definiciones deberán ser actualizadas con la nueva definición del kilogramo, así como su realización práctica.

### **B. En la industria**

El SI es un sistema de unidades permite cuantificar cualquier magnitud abarcando todo tipo de mediciones siendo así la base de la investigación científica y el sector industrial.

**Los estados firmantes de la convención del metro representan hoy en día el 98 % de la economía mundial, por lo que el Sistema de Unidades (SI) es la base del comercio y soporte de la Metrología mundial a través de los INMs**

Los estudios en mejorar la incertidumbre de la constante de Planck continúan por ambos experimentos.

El experimento de la constante de Avogadro tiene previsto contar para el 2017 con 4 esferas de silicio ( $^{28}\text{Si}$ ) de mejores características físicas que la actual y para el 2020 con 6 esferas más (pureza isotópica > 99,998 %  $^{28}\text{Si}$ ).

### **REFERENCIAS**

- [1] PTB mitteilungen, “Edición especial – Experimentos para el Nuevo SI, el Sistema Internacional de Unidades”. Berlin, E2016. 126, pp. 63–85, junio 2016.
  
- [2] E-medida. Revista Española de Metrología, España, vol.6- n°12. Noviembre 2017, pp.11–18. Taylor, B. N. & Mohr, P. J. (1999). On the redefinition of the kilogram. Metrologia, 36(1), 63-64. [www.bipm.fr/utis/common/pdf/CCEM24.pdf](http://www.bipm.fr/utis/common/pdf/CCEM24.pdf)