



FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

TRABAJO FIN DE GRADO
REVISIÓN DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE
UNIDADES

Autor: Jesús Díaz-Suelto Berrueco

Fecha: 15 de septiembre de 2020

Tutor: Arturo Romero Salvador

ÍNDICE

- Resumen (Página 3)
- Objetivos (Página 3)
- Resultados y discusión (Página 4)
- Conclusiones (Página 13)
- Bibliografía (Página 14)

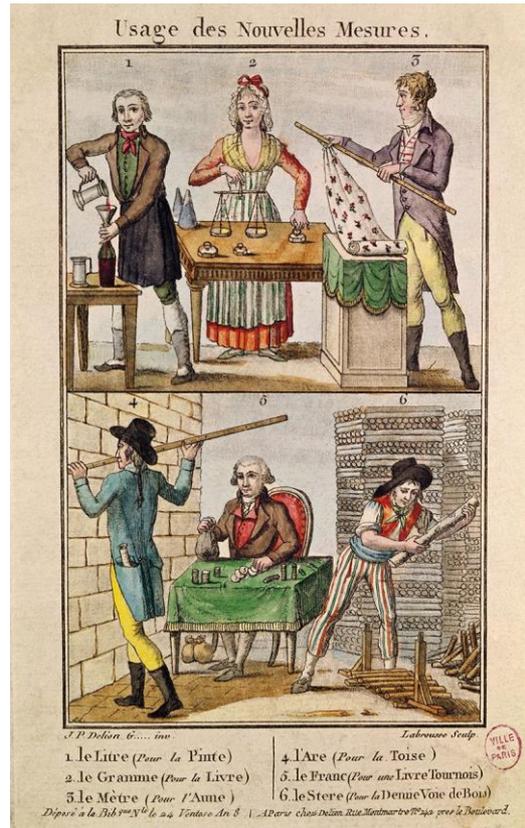
Resumen

El Sistema Internacional de Unidades es la base de la metrología en la ciencia moderna. Sin embargo, este sistema no ha existido siempre y, por tanto, no es estático, ha estado en constante evolución durante décadas. Ahora, en el año 2019, se ha conseguido establecer una revisión en la que las unidades básicas de masa, temperatura, intensidad de corriente eléctrica, y cantidad de sustancia, son redefinidas en función de constantes universales tales como la constante de Planck, h , la frecuencia de transición del átomo de Cesio, $\Delta\nu_{Cs}$, la velocidad de la luz en el vacío, c , la carga elemental, e , la constante de Boltzmann, k , la constante de Avogadro, N_A , y la eficacia luminosa de la radiación monocromática de 540×10^{12} Hz, K_{cd} , mientras que las definiciones de las unidades básicas de tiempo, longitud, e intensidad lumínica, se reformulan para adaptarse a la revisión. Así, conseguimos tener unas definiciones más estables, con incertidumbres procedentes de las constantes y no de la manipulación de patrones físicos u atómicos.

Objetivos

Observar las convenciones a las que se han llegado en la comunidad científica para redefinir las unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades, explorar los métodos prácticos que aplican estas definiciones, y discutir el impacto final que tiene esta revisión en la evolución científica, pasando por repasar los orígenes del Sistema Internacional y por qué esta revisión es el culmen de décadas de avances científicos.

Resultados y discusión.



El Sistema Internacional de Unidades tiene su origen establecido en el Sistema Métrico Decimal, durante la Revolución Francesa, en 1799. En aquellos tiempos, se establecieron los dos patrones de platino que sirvieron como materiales de referencia para la medida del metro y el kilogramo, y fueron preservados en los Archivos de la República. Si damos un salto temporal a la actualidad, vemos que, en concreto, el patrón del kilogramo ha sufrido una degradación con el paso de los años, exponiendo una falta de estabilidad en el tiempo y en el espacio, características fundamentales para un material de referencia.

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

Fórmula que determina la degradación de la masa del material de referencia del kilogramo original.

Este dato, junto a la evolución constante de los métodos de fabricación, la disminución de las incertidumbres de medición, y que haya algunas unidades básicas de medida que sean dependientes de otras, ponen en evidencia que el sistema ha de revisarse de forma constante y redefinirse.

Para establecer este proceso de redefinición, debemos entender en primera instancia cuales son las unidades básicas, las derivadas, en qué consistían antes de la revisión, y cómo se han determinado sus definiciones.

- Nacimiento y evolución del Sistema Métrico Decimal hasta el Sistema Internacional de Unidades.

Las unidades básicas son un número pequeño de unidades conformadas por el kilogramo, el segundo, el metro, el amperio, el kelvin, el mol y la candela. Son aquellas unidades que no se definen en función de otras. Estas unidades, cuando se dan productos de potencias entre sí, nos darán las llamadas unidades derivadas, que, si no incluyen ningún factor numérico, serán además llamadas coherentes.

Son estas unidades básicas las que se encarga de definir el Sistema Internacional de Unidades y las que se busca redefinir en esta revisión.

Esta revisión no es un proceso único y eventual. Es la culminación de siglos de avances científicos que nos han permitido pulir la definición de estas unidades básicas (y como consecuencia, de sus derivadas), de forma que la incertidumbre en la medida se cada vez menor.

En una primera instancia, estas unidades básicas se definieron en función de artefactos físicos. Es decir, emplearon “propiedades invariables del planeta” para definir estas unidades. Como hemos citado antes, el nacimiento de este sistema vino por la definición del kilogramo y el metro en función de unas barras de platino como patrones de referencia, si bien sus definiciones exactas eran, por la parte del metro, la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre, y el kilogramo como el peso de un decímetro cúbico de agua pura a su densidad máxima. Esto ya nos supone un problema al relacionar ambas unidades.

Todo esto, se asentó en la primera Conferencia General de Pesas y Medidas en 1889.

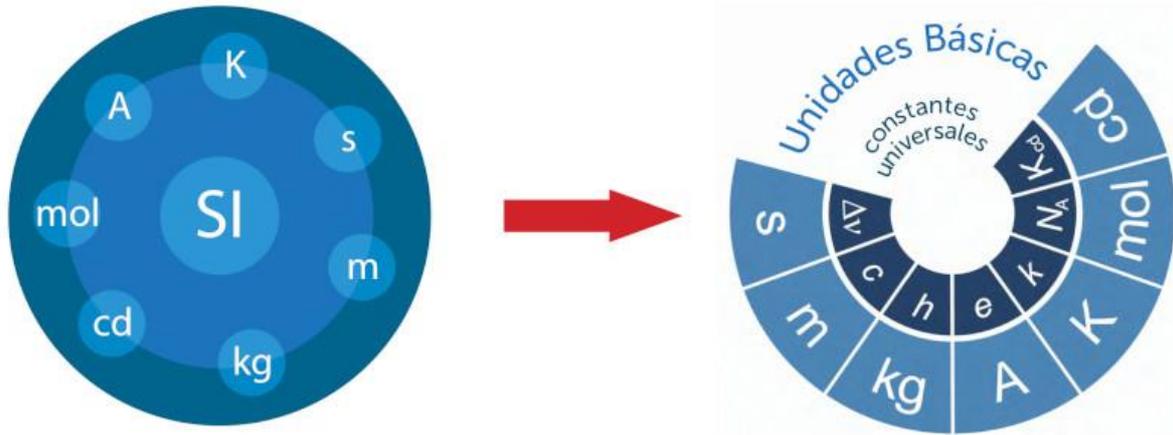
Anteriormente, en el Tratado de la Convención del Metro, en 1875, también se definió el segundo, como la ochentayseismilcuatrocientosava parte del día solar medio.

Estas tres unidades conformarían el llamado MKS (metro, kilogramo, segundo)

El auge de la ciencia durante los siglos XIX y XX permitió incorporar más unidades a este sistema. La asociación británica para el avance de la ciencia (conocida como B.A.A.S., ahora simplemente B.A.) introdujo el sistema de unidades prácticas, con el ohmio, el voltio y el amperio, que sería integrado junto al MKS por Giorgi en 1901.

- Revisión del Sistema Internacional de Unidades de 2019.

Esta revisión busca que todas las unidades básicas se definan a partir de constantes universales. El kilogramo, el amperio, el kelvin, y el mol pasarán a definirse en función de la constante de Planck (h), la carga elemental (e), la constante de Boltzmann (k), y la constante de Avogadro (N_A), mientras que el metro, el segundo y la candela ya se definían por constantes universales con anterioridad, aunque se adaptarán a las nuevas definiciones. Ahora, vamos a revisarlas una a una.



Unidades básicas y constantes universales a las que se han relacionado con esta revisión.

- **Kilogramo**

“El kilogramo, símbolo kg, es la unidad SI de la 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 Δv_{cs} .”

Esta definición sustituye a la anterior que definía al kilogramo como la masa del Prototipo Internacional del Kilogramo $m(IPK)$. Ahora, fijamos el valor de h de forma exacta, y a través de la relación entre h y el kg, determinamos la masa $m(IPK)$ de forma experimental. De esta forma, la incertidumbre a la hora de otorgar a $m(IPK)$ el valor de un kilogramo es una incertidumbre típica relativa de 2×10^{-8} .



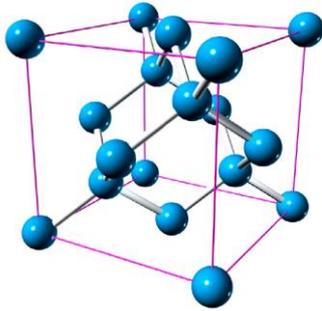
Figura 1: Prototipo Internacional del Kilogramo.

Para determinar la incertidumbre de la constante de Planck, se utilizan dos métodos primarios independientes: el método de Avogadro y la balanza de Kibble.

- Método de Avogadro.

Se basa en el concepto de que la masa de una sustancia pura es expresable según el número de entidades elementales de la misma. Gracias a los nuevos semiconductores, podemos utilizar los monocristales de silicio, que son extremadamente puros y de grandes dimensiones, sin dislocaciones, siendo posible que solo contengan un tipo de isótopo, el ^{28}Si .

Conociendo la masa molar de este isótopo, sabiendo que hay 8 átomos de silicio por celda unidad, se puede obtener la masa de una esfera de silicio de cierto volumen Vs.



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

Fórmula 1: Fórmula para calcular la masa por el método de Avogadro.

Figura 2: Diagrama de la estructura cristalina de la esfera de silicio.

- Balanza de Kibble.

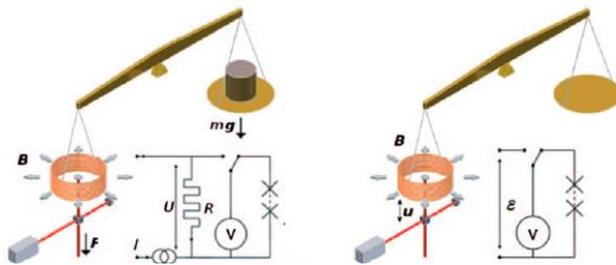


Figura 3: Esquema de funcionamiento de la balanza de Kibble

En este método, se equilibra la fuerza gravitatoria de un cuerpo con una masa m con la fuerza electromagnética de 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 .

$B \cdot I$ se calcula induciendo la bobina con una fuerza electromotriz ϵ , que se desplaza con una fuerza u . Obtendremos una ecuación, donde g es la aceleración de la gravedad: $mg = u = \epsilon$.

Gracias a que I es un cociente entre tensión (U) y resistencia (R), y que la constante de von Klitzing ($R_k = h/e^2$) mide nuestra resistencia, y U y ϵ se pueden medir con la constante de Josephson ($K_j = 2e/h$), podemos obtener la siguiente fórmula.

$$m = h \left(\frac{bf^2}{4gu}\right)$$

Donde f es una frecuencia de microondas y b una constante adimensional.

Las consecuencias de la nueva definición del kilogramo serán:

- Se asegura la estabilidad a largo plazo de la unidad SI de masa, permitiendo su realización en cualquier instante y lugar.
- La incertidumbre relativa será igual a la de h .
- Se reducirá la incertidumbre de las magnitudes eléctricas.

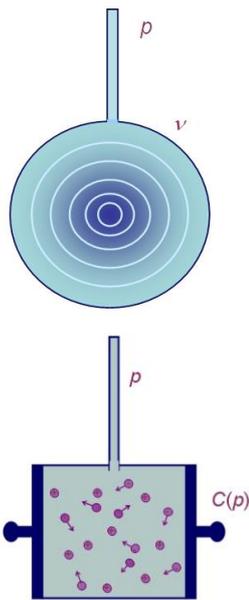
- **Kelvin**

“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 $J \cdot K^{-1}$, igual a $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de h , c , y $\Delta\nu_{CS}$.”

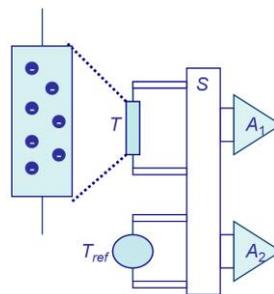
El Sistema Internacional de Unidades definía anteriormente la unidad de temperatura, el kelvin (y el grado Celsius), a partir de la temperatura termodinámica del punto triple del agua que, por definición y sin incertidumbre, tiene un valor de 273,16 K (0,01 °C).

La temperatura se relaciona siempre con la constante de Boltzmann en la forma kT como “energía térmica”. En otras palabras, la constante de Boltzmann es un factor de conversión entre el julio y el newton metro (energías térmica y mecánica respectivamente).

Para fijar el valor de k , se han utilizado unos termómetros llamados primarios o termodinámicos. En ellos, la relación entre mensurando y temperatura termodinámica es explícita, no dependen de otras constantes.



La termometría primaria sería el método para fijar el valor de k , y utiliza termómetros basados en sistemas físicos conocidos donde su ecuación de estado, que relacionen su temperatura termodinámica y otras magnitudes independientes, puede escribirse de forma explícita sin constantes desconocidas



Para fijar el valor de la constante de Boltzmann se utilizan tres tipos de termómetro: acústico, de constante dieléctrica, o de ruido Johnson (las tres figuras, en ese orden).

El acústico y el de gas se basan en la medición de propagación del sonido, por interferometría acústica en una cavidad cerrada. Se mide la longitud de onda de las ondas acústicas que se propagan por la cavidad.

La temperatura de un objeto también puede medirse observando fenómenos estadísticos cuánticos, y es lo que mide el termómetro de ruido Johnson a través de la agitación térmica de los electrones en una resistencia eléctrica. Se determina la temperatura midiendo el voltaje cuadrático medio en una resistencia eléctrica a bajas frecuencias.

A pesar de todo, el nuevo kelvin tiene un impacto mínimo a nivel industrial. Solo habrá cambios en las zonas criogénicas ($<20K$) y altas temperaturas ($>1000^{\circ}C$). El objetivo de la nueva definición es hacerla independiente de otras unidades.

- **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·s, donde el segundo se define en función de $\Delta\nu_{CS}$.”

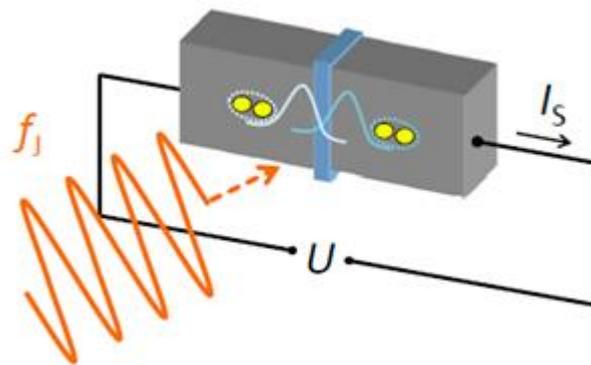
En la definición anterior, se definía el amperio como la intensidad de una corriente eléctrica constante que, manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de un metro el uno del otro, en el vacío, produciría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

Anteriormente, la realización experimental era a través de balanzas de tensión, resultaba muy compleja y accesible a pocos Institutos Nacionales de Metrología, por lo que muchos otros laboratorios recurrían a una realización indirecta.

Ahora, se permite realizar la definición del amperio de tres formas diferentes.

- a) En función de la ley de Ohm.

Esta ley relaciona la tensión aplicada sobre la resistencia y la corriente que circula por ella, con las realizaciones prácticas basadas en el efecto Josephson y en el efecto Hall. Con la nueva definición, las constantes K y R tendrán valores exactos.



Efecto Josephson

- b) Contar las cargas individuales que fluyen por un conductor por unidad de tiempo. Necesita un circuito llamado *Single Electron Tunneling* (SET). Las bombas de electrones controlan el transporte. Si es de forma cíclica a frecuencia f , con n electrones por ciclo, la intensidad será:

$$I = n e f = Q_s f$$

Q_s es la carga transportada. Lo ideal es que I sea igual a n .

Esto permite verificar las definiciones de voltio, ohmio y amperio.

- c) Con la relación entre el proceso de carga de un condensador, aplicando una rampa de tensión a un condensador de capacidad C y generando una intensidad de corriente, I .

La modificación de las unidades eléctricas generará modificaciones menores, en el orden de una parte en diez millones, pero se reducirán las incertidumbres de las experimentaciones al eliminar las de las constantes K y R.

- **Mol**

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

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

Anteriormente, se fijaba la masa molar del Carbono 12 en $M(^{12}\text{C}) = 0,012\ \text{kg/mol}$, pero ahora esta masa molar debe ser determinada experimentalmente.

La masa molar de cualquier átomo o molécula está relacionada con la masa de su entidad elemental de forma que:

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

Para determinar la constante de Avogadro, se utiliza el mismo experimento que para la realización del kilogramo, el experimento de Avogadro.

Para determinar el mol en sí, se utilizan tres métodos. El método gravimétrico, la ecuación de los gases ideales, y el método electrolítico.

- Método gravimétrico.

El número de entidades N de sustancia X o cantidad de sustancia n en una muestra se puede determinar mediante el producto de la fracción de masa de X en la muestra, por la propia masa de la muestra. Es un método simple y preciso, por lo cual es el más empleado de los tres, pero requiere conocer la fracción de la masa. Según la pureza de la sustancia, la incertidumbre será menor. Con sustancias de alta pureza, esta incertidumbre relativa es equivalente a 1×10^{-6} . Sólo es posible en pocos casos.

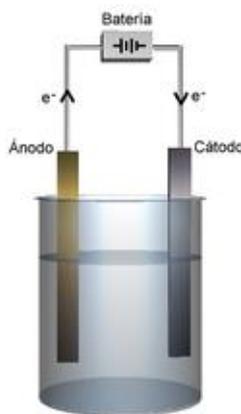
- Ecuación de los gases ideales.

Requiere la medida de presión, volumen y temperatura, ya que la constante molar (R , que es igual a $N_A k$) de los gases es conocida con exactitud.

$$PV = nRT$$

Principalmente se usa con gases puros.

- Método electrolítico



El número de entidades N que reaccionan en un electrodo es igual a la carga Q , dividida por ze , donde z es la valencia de los iones que reaccionan y e la carga elemental del electrón, que se conoce con exactitud. Este método depende de la eficiencia de la reacción electrolítica para el ion. Ésta será del 100% cuando el ion se encuentre en solitario.

El principal avance de la nueva definición de mol es desligarla de un nucleido particular, permitiendo seguir las condiciones de continuidad impuestas por el SI, con menor incertidumbre experimental.

Definiciones reformuladas para ajustarse a la revisión pero que no han sido redefinidas.

- **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, $\Delta\nu_{Cs}$, en 9 192 631 770, cuando se expresa en la unidad Hz, igual a s^{-1} .”

El segundo se realiza mediante relojes, es decir, patrones de frecuencia, 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.

- **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 $\Delta\nu_{Cs}$.”

El metro se realiza mediante tres métodos:

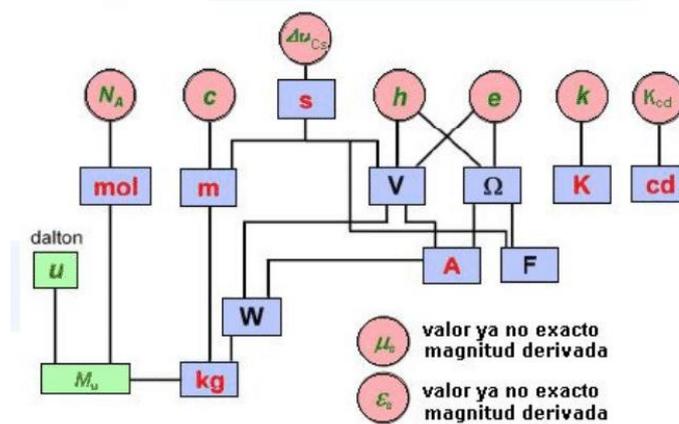
- Longitud l del camino recorrido en el vacío por una onda electromagnética plana en un tiempo t .
- Longitud de onda λ en el vacío de una onda electromagnética plana de frecuencia f .
- Por medio de una de las radiaciones de una lista actualizada periódicamente por el CIPM.

- **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 $lm \cdot W^{-1}$, igual a $cd \cdot sr \cdot W^{-1}$, o a $cd \cdot sr \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^3$, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de h , c , y $\Delta\nu_{Cs}$.”

La constante K_{cd} junto con las funciones de eficiencia luminosa espectral, relaciona magnitudes radiométricas y fotométricas, estableciendo un sistema metrológicamente consistente. La realización experimental de la candela y sus unidades derivadas se suele basar en unidades radiométricas empleando métodos basados en detectores patrón o en fuentes patrón (como un radiador de Planck).

Conclusiones



[Adaptado de B. M. Wood (NRC), Fundamental Constants - The Ultimate Metric, 978-1-4673-0442-9/12 ©2012 IEEE]

Gracias a esta revisión, absolutamente todas las unidades básicas y, por tanto, las derivadas, se encuentran definidas gracias a constantes universales y no gracias a otras unidades. Esto presenta una serie de consecuencias.

- La primera de todas, y la más importante, quizá, es que estos cambios son para la comunidad científica y que, en la vida diaria, no va a haber cambios ya que la redefinición no ha supuesto un cambio de paradigma.
- El SI ahora tendrá mayor influencia en los niveles de exactitud elevados, así, todas las prácticas se apoyarán en constantes y serán mucho más reproducibles a lo largo del tiempo y el espacio.
- El kilogramo ahora asegura su estabilidad a lo largo del tiempo en vez de tener una cierta degradación debida a la manipulación del patrón del kilogramo.
- Las definiciones están separadas de su experimentación, lo que permitirá en un futuro mejorar dichas prácticas cuando los medios científicos y los conocimientos lo permitan, sin alterar la definición en el proceso.

En definitiva, esta revisión es una mejora palpable a la hora de asegurar la reproducibilidad y la estabilidad de los experimentos científicos, dejando una puerta abierta para que si hubiese mejores métodos en el futuro, se pudiesen realizar los mismos sin necesidad de volver a revisar las definiciones del Sistema Internacional de Unidades.

MADRID.	
VARA.....	0,843 metros.
METRO.....	1,18624 varas, ó 1 vara, 0 pies, 6 pulgadas, 8 lineas, 456 milésimas de linea.
VARA CUADRADA.....	0,710649 metros cuadrados.
METRO CUADRADO.....	1,407164437 varas cuadradas, ó 1 vara cuadrada, 3 pies cuadrados, 95 pulgadas cuadradas, 98 lineas cuadradas, 656 milésimas de linea cuadrada.
VARA CÚBICA.....	0,599077107 metros cúbicos.
METRO CÚBICO.....	1,66923420761 varas cúbicas, ó 1 vara cúbica, 18 pies cúbicos, 119 pulgadas cúbicas, 1367 lineas cúbicas, 177 milésimas de linea cúbica.
LIBRA.....	0,460093 kilogramos.
KILOGRAMO.....	2,173474 libras, ó 2 libras, 2 onzas, 12 adarmes, 409 milésimas de adarme.
MEDIA ARROBA PARA LÍQUIDOS.....	8,15 litros.
LITRO.....	1,963 cuartillos, ó 1 cuartillo, 963 milésimas de cuartillo.
MEDIA FANEGA PARA ÁRIDOS.....	27,67 litros.
LITRO DE GRANO.....	0,867 cuartillos, ó 0 cuartillos, 867 milésimas de cuartillo.
FANEGA SUPERFICIAL, LLAMADA MARCO DE MADRID, DE 4900 VARAS CUADRADAS DE BURGOS.....	34,238121 áreas.
FANEGA SUPERFICIAL DE 4900 VARAS CUADRADAS, MEDIDAS CON LA VARA DE MADRID.....	34,821801 áreas.
ÁREA.....	140,7164 varas cuadradas, ó 140 varas cuadradas, 6 pies cuadrados, 448 milésimas de pie cuadrado.
LEGUA DE 6666 $\frac{2}{3}$ VARAS CASTELLANAS.....	5,572699 kilómetros.
KILÓMETRO.....	1186,2396 varas, ó 1186 varas, 0 pies, 719 milésimas de pie.

Además, el Sistema Internacional de Unidades, refuerza aún más su naturaleza científica y su base lógica, y lineal. Si echamos la vista atrás, definir las unidades en base a constantes del universo es un avance inmenso respecto a los tiempos en los que se medían las distancias en varas, en pies, o en yardas, la masa en libras o arrobas, o las áreas en fanegas. Este avance fue en su momento ya una piedra clave en el desarrollo científico de los últimos dos siglos, y al pulirla cada vez más y más con estas revisiones, solo conseguimos abrir aún más puertas a futuros avances a la hora de unificar la ciencia, como dice el lema de la convención del metro, "para todos los tiempos, para todos los pueblos".

Bibliografía

- CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. *El Sistema Internacional de Unidades, SI*. <<https://www.cem.es/content/el-sistema-internacional-de-unidades-si>> [Consulta: marzo de 2020]
- CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. *Preguntas frecuentes respecto al SI revisado que entró en vigor el 20 de mayo de 2019*. <<https://www.cem.es/sites/default/files/files/Preguntas%20frecuentes%20sobre%20la%20revisi%C3%B3n%20del%20SI%2C%20que%20entr%C3%B3%20en%20vigor%20el%2020%20de%20mayo%20de%202019%20%28CEM%29.pdf>> [Consulta: marzo de 2020]
- De Mirandés, E. 2018. "La revisión del Sistema Internacional de Unidades" *Centro Español de Metrología*. <https://www.cem.es/sites/default/files/files/cem_revisionsi_edem_18mayo2018.pdf> [Consulta: mayo de 2020]
- Martín-Delgado, M. 2018. "El papel de las constantes naturales en la ciencia y su implicación en la revisión del SI" *8º Seminario Intercongresos de Metrología*. <https://www.cem.es/sites/default/files/files/redefinicion_si_mmd.pdf> [Consulta: mayo de 2020]
- Sanmamed, Y. 2018. "Redefinición de la unidad de intensidad de corriente eléctrica y su diseminación" *Centro Español de Metrología*. <https://www.cem.es/sites/default/files/files/redefinicion_del_amperio.pdf> [Consulta: junio de 2020]
- Newell, D.B. *et al.* 2018. "The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revisión of the SI" *iopscience.iop.org* <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/aa950a>> [Consulta: junio de 2020]
- BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. *The International System of Units (SI)*. <<https://www.bipm.org/en/measurement-units/>> [Consulta: agosto de 2020]
- CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. *Medidas antiguas*. <https://www.cem.es/cem/metrologia/medidas_antiguas?term_node_tid_depth_1=60> [Consulta: agosto de 2020]