

Nota de investigación: El Sistema Internacional de Unidades de Pesos y Medidas

Miguel Aguilar

Resumen

En este documento, explicamos el origen de los estándares internacionales para medir distancias (metro) y masa (kilogramo).

Contenido

1. Introducción
2. Aprendizaje esperado
3. Orígenes del Sistema Internacional de Unidades
4. El kilogramo

Introducción

Antiguamente, cada pueblo tenía sus propias unidades de medición. No se conocía el metro o el kilogramo. Esto dificultaba muchas actividades, sobre todo cuando involucraban a personas de varios países. A medida que mejoraron las comunicaciones entre los pueblos y aumentó el contacto entre culturas, se fue haciendo necesario convenir en unidades de medición para todos. La ciencia, en particular, es una empresa colaborativa que necesita de la participación de cientos de personas en todo el mundo, quienes deben comunicarse datos entre sí de la manera más precisa posible. Sin embargo, llegar a acuerdos sobre la medición ha resultado sumamente complicado y ha requerido el trabajo de científicos, políticos y hasta aventureros para alcanzarlos. A continuación veremos los aspectos más importantes de esta historia.

Aprendizaje esperado

Al finalizar la revisión temática, el participante describirá los aspectos más relevantes de la historia del Sistema Internacional de Unidades y cómo adoptamos su versión vigente, con la finalidad de familiarizarlo con los estándares actuales.

Orígenes del Sistema Internacional de Unidades

Si necesitamos saber qué tan grande es algo, podemos hacer una medición, pero lo que sea que usemos para medir debe coincidir con lo que otras personas usan para el mismo efecto. Si no se tiene un patrón de medida común, no se puede comunicar a todo el mundo el resultado de una medición. Por ejemplo: no te sirve de nada que te digan que dos ciudades están a veinte *verstas* de distancia si no sabes qué es una *versta* (antigua unidad de medida rusa que equivale a 1.0668 km). Por lo tanto, tenemos que ponernos de acuerdo con qué unidad vamos a usar para medir, es decir, necesitamos un patrón estándar que todos conozcamos y manejemos de la misma manera.

El esfuerzo por encontrar estándares de medición adecuados comenzó en la Antigüedad, tiempo en el que cada pueblo tenía su propia unidad estándar: medían con varas, con partes

del cuerpo o con otros recursos. Por ejemplo, en Egipto se utilizaba la palma o la falange del dedo pulgar para medir objetos pequeños, y la distancia entre el codo y los dedos para cosas un poco más grandes. No obstante, no había mucha uniformidad en estas prácticas, puesto que, a veces, incluso dentro de un mismo pueblo, llegaban a usarse varias unidades diferentes. El Imperio romano fue uno de los primeros en tratar de obligar a todos los habitantes de su enorme territorio a usar la misma unidad para medir distancias: la milla romana, que correspondía a mil pasos¹. A los romanos también les debemos la libra como unidad de masa. Sin embargo, cuando su imperio se derrumbó, los pueblos que había conquistado volvieron a usar sus propias unidades. Esta situación continuó por toda la Edad Media, tiempo durante el que los reyes trataron de imponer unidades dentro de sus propios dominios. Por ejemplo, en 1120, el rey de Inglaterra decretó que la yarda sería el estándar de longitud en sus tierras y equivaldría a la distancia que había entre la punta de su nariz y el final de su brazo extendido. Por su parte, Francia utilizaba el pie, que era la longitud del pie de Luis XIV, el rey. El problema con estos estándares era que cambiaban cuando llegaba un nuevo rey (Serway y Jewett, 2008, p. 4). Además, aun dentro de un mismo país, no todos seguían las unidades que disponía el rey. Kula (1986) señala que el derecho a establecer unidades de medición se consideraba un símbolo de autoridad y soberanía, por lo que muchos gobernantes locales, comerciantes e incluso la Iglesia competían por imponer sus propias unidades de medición. Historiadores modernos calculan que, para el siglo XVIII, sólo en Francia se usaban 250 mil unidades diferentes de pesos y medidas (Alder 2002, p. 2). Esto facilitaba los fraudes y abusos, puesto que los gobernantes, por ejemplo, cambiaban las unidades para usar unas al momento de cobrar impuestos y otras al pagar salarios. Una de las consignas que se gritaban en las protestas populares durante los primeros años de la revolución francesa era: “A quoi nous servirait la destruction de régime féodale si les seigneurs resteraient les maîtres d'agrandir ou de diminuer leurs mesures à volonté” [¿De qué servirá la destrucción del sistema feudal si los señores siguen teniendo la libertad de aumentar o disminuir las medidas a voluntad?]² (Kula, 1986, p. 234).

De manera que la Academia de Ciencias de Francia decidió resolver esta situación buscando un nuevo estándar de medición de distancia ya no basado en un rey, sino en lo más objetivo que se pudiera encontrar. Los científicos a cargo querían usar una longitud de la naturaleza, por lo que decidieron valerse del tamaño de la Tierra. Esta unidad sería eterna, al menos tan eterna como la misma Tierra, y pertenecería a todos los pueblos como la Tierra pertenece a todos los pueblos. Ahora bien, como nuestro planeta es demasiado grande, decidieron dividir una sección del orbe en 10 millones, puesto que la división entre bases de diez era un símbolo de racionalidad para los ilustrados franceses. Aun así, la longitud que quedaba era muy grande, así que los científicos tomaron sólo un cuarto de meridiano (distancia que hay entre el ecuador y el polo norte) y lo dividieron en 10 millones. El resultado de esa operación se llamaría *metro* (que viene de la palabra medir). La Revolución francesa ya había proclamado los derechos universales del hombre y ahora haría lo mismo con la medición universal: el metro fue aceptado como estándar de medición en 1795 tras la Convención

¹ Quinientos, en realidad, porque contaban doble.

² Traducción del autor de esta nota.

Mundial de Ciencia celebrada en París. La misma convención implementó el segundo para medir el tiempo, que se definió dividiendo el día en 24 horas de 60 minutos, que, divididos a su vez en 60 partes, nos darían el segundo.

Por otro lado, también se definió que la masa se mediría con el kilogramo, fijado como la masa de agua que cabría en un cubo de diez centímetros por lado: así, la definición de esta unidad saldría a partir de la del metro. Entonces se hizo el cubo de agua, pero, a fin de que durara y pudiera servir de referencia para comparar su masa con otras, tuvo que hacerse un prototipo de otro material que no se evaporara como el agua, que, no obstante, se siguió usando para definir la masa de un kilogramo. Así, se usó una aleación de platino e iridio con la misma masa del cubo de agua a la que se le llamó Prototipo Internacional del Kilogramo. Otras unidades podrían obtenerse de la combinación de las anteriores. A este sistema propuesto por los franceses se le llamó Sistema Internacional de Unidades.

Con todo, el mundo tardó en convencerse de usar el Sistema Internacional de Unidades propuesto por los franceses. Poco a poco, más y más países comenzaron a ver las ventajas de usar los mismos estándares. Diecisiete países firmaron el Tratado del Metro en 1875, con el que se creó la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (Bureau International des Poids et Mesures). Sin embargo, este sistema tuvo que ser corregido en varias ocasiones. Por ejemplo, en 1881, el Congreso Internacional de Electricistas, llevado a cabo en París, propuso utilizar el centímetro, el gramo y el segundo como estándares siguiendo la sugerencia del físico y matemático Carl Friedrich Gauss (1777-1855). No obstante, en el congreso de 1935, el metro y el kilogramo volvieron a ser los estándares (el segundo no varió), pero para entonces se había hecho evidente que había errores en la determinación de los estándares.

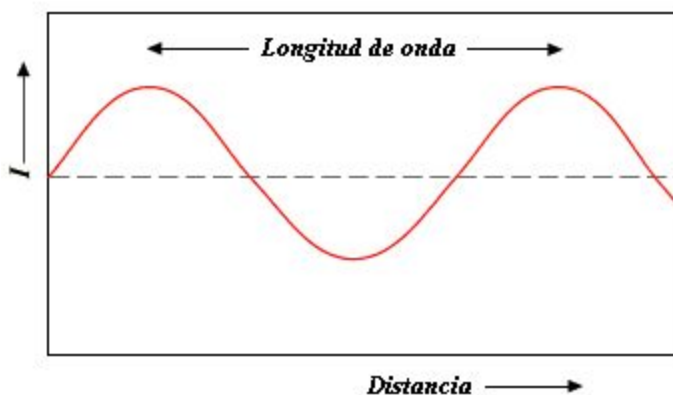
Como se dijo antes, los científicos del siglo XVIII querían definir el metro a partir de dividir entre 10 millones la distancia que hay entre el polo norte y el ecuador, pero no era fácil medir una distancia tan grande con los recursos de esa época. Hoy sabemos que los investigadores franceses se equivocaron por 2 290 m. ¿Qué tan diferente sería el metro si lo hubieran calculado bien? Podemos resolverlo de manera sencilla. Verás que no es tanto como parece. Lo único que tenemos que hacer es considerar el valor real de un cuarto de meridiano, es decir, 10 002 290 m y dividirlo entre 10 millones. El resultado será:

$$\frac{10\,002\,290}{10\,000\,000} = 1.000229 \text{ m}$$

Entonces el metro debería ser 0.000229 m más grande; es decir, un poco más de 0.2 milímetros, lo que mide, más o menos, el grosor de dos hojas de papel. En otras palabras, el metro era suficientemente preciso para hacer puentes y caminos, pero no para llegar a la luna.

Entonces, era necesario redefinir el metro con base en algo más estable, por lo que el descubrimiento, durante el siglo XIX, de que la rapidez de la luz es una constante universal fue un evento afortunado. Dicho de otra manera, de acuerdo con todo lo que sabemos sobre la luz, su rapidez es la misma sin importar el movimiento de quien la mida. Científicos reconocidos como Albert A. Michelson (1852-1931), el primer estadounidense en ganar el Premio Nobel de física, desarrollaron métodos muy precisos para medir dicha rapidez y descubrieron que ésta nunca cambiaba a pesar del movimiento de la Tierra. Ahora bien, ¿cómo puede usarse la luz para definir una distancia? Una opción era utilizar la longitud de las ondas de luz, aunque ese

valor puede variar de una onda a otra.³ Desde finales del siglo XIX se habían desarrollado métodos muy precisos para medir la longitud de onda de la luz, por lo que esto ya resultaba una opción tecnológicamente viable.



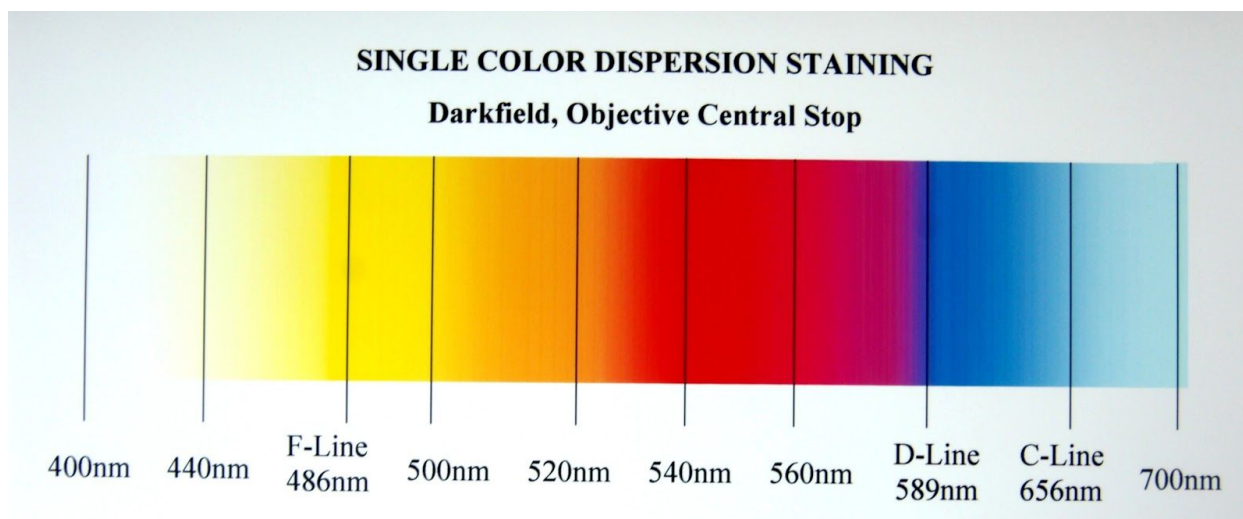
Wikipedia. (2004). Longitud de onda. [Ilustración]. Recuperada de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6e/Longitud_de_onda2.png

Qué tan extendida o reducida sea la longitud de una onda de luz es lo que determina su color, por lo que debía especificarse de la manera más precisa posible qué color de luz se usaría, ya que todos los elementos de la tabla periódica pueden producirla si se calientan lo suficiente, pero algunos requieren más calor para que se vean y otros emiten luz de diferentes colores. Entonces, para que hubiera consenso, debía utilizarse la misma lámpara, por así decirlo; es decir, la misma fuente de luz. Después de probar con diferentes elementos, los científicos concluyeron que la luz que produce un gas compuesto por átomos de Kriptón⁴ era la mejor opción. En la naturaleza, pueden encontrarse átomos de este elemento diferentes entre sí, de modo que, para que no hubiera errores, se especificó que debía usarse el llamado Kriptón 86. Este átomo irradia una luz distintiva entre naranja y rojo. Así, se contaron cuántas longitudes de onda correspondían más o menos a la distancia del metro anterior para no tener que cambiar todas las medidas de todo el mundo. De esta manera, el metro se fijó como 1 650 763.73 longitudes de onda de la luz rojo-anaranjada del Kriptón 86. Esta definición fue pensada para que el metro siguiera siendo más o menos del mismo tamaño que en el pasado, pero ahora podía determinarse con mucha mayor exactitud. Una ventaja extra era que los científicos de cada país podían determinar la longitud que debía tener un metro en sus propios laboratorios, sin tener que estar haciendo comparaciones directas con el metro estándar de París. Cualquier

³ La longitud de onda es la distancia que hay entre dos crestas o dos valles de una onda. Piensa en las olas del mar: la distancia entre la parte más alta de una ola y la parte más alta de la que sigue es lo que llamamos longitud de onda. Ahora, en el ejemplo, esa distancia cambia por las condiciones del mar, pero Michelson descubrió, junto con otros científicos, que la longitud onda en la luz monocromática (de un solo color) es más estable que cualquier otra cosa que conociéramos.

⁴ Este elemento fue descubierto 1898 y se le llamó así por la palabra griega kryptos que significa oculto (la misma raíz da origen a palabras como criptografía o encriptado).

laboratorio con el equipo adecuado podía encontrar la distancia correcta y exacta que debía medir el metro.



Wikipedia. (2008).Dispersion Staining Color Pairs. [Ilustración]. Recuperada de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/27/Dispersion_Staining_Color_Pairs.JPGg

Usar la luz emitida por el átomo de Kriptón 86 fue lo mejor de la tecnología de 1960, pero pronto sería superada por el láser. Algunos problemas con la luz del Kriptón 86 (como el descubrimiento de que, en algunos casos, la longitud de sus ondas de luz presentaba alteraciones) motivaron una nueva definición basada en el láser, que la mejoró notablemente: la luz de un láser, en general, es más coherente que la emitida por otros medios; es decir, sus ondas no se desfasan unas de otras, son más uniformes y mantiene su frecuencia, lo que facilita las mediciones. Los físicos pronto se dieron cuenta de que podían comparar entre sí las longitudes de onda de diferentes láseres hasta en una parte en cien mil millones.⁵ Sin embargo, no podían dar el valor de esas longitudes de onda, porque se requería más exactitud que la que podía alcanzarse con el metro definido con el Kriptón 86. Es decir, las técnicas experimentales necesitaban mayor exactitud y el láser parecía ser la solución.

Con todo, ¿qué tal si sigue habiendo descubrimientos altamente precisos sobre la luz de los láseres? ¿No habría una manera de definir el metro que no tenga que estar cambiando a cada rato? Estas preguntas motivaron a los encargados de redefinir el metro a utilizar la luz de un láser de manera más indirecta. Resulta que la velocidad de la luz puede obtenerse si uno conoce la frecuencia y la longitud de una onda de luz. Los avances en electrónica permitieron medir la frecuencia de la luz de un láser con una precisión extraordinaria. Así, el láser se usaría para medir la rapidez de la luz y dicha rapidez, a su vez, se usaría para definir el metro. Finalmente, éste se redefinió en 1983 como la trayectoria que recorre una onda luminosa en el vacío durante una fracción de 1/299 792 458 de segundo. Esta definición tiene la ventaja de que, si se descubre que la velocidad de la luz es mayor de lo que pensamos, entonces la

⁵ Es decir, si la longitud de onda de un láser fuera sólo una cien mil millonésima parte más chica que la de otro, los laboratorios podrían detectarlo gracias a que existen instrumentos suficientemente precisos.

definición puede seguir siendo válida; sólo que el metro se consideraría ligeramente más corto. De esta manera ya no necesitamos estar cambiando la definición del metro, puesto que ahora está basado en una constante universal: la rapidez de la luz.

El kilogramo

El último cambio importante en el Sistema Internacional de Unidades ha sido la redefinición del kilogramo. Con el tiempo, se ha visto que el prototipo base del kilogramo gana masa debido a la contaminación y a la absorción de gases, lo que altera su valor. El aumento de un microgramo al año es muy poco a simple vista, pero sí afecta a muchas aplicaciones tecnológicas modernas que requieren mucha precisión. Para ello, el científico inglés Brian Kibble desarrolló en 1975 la balanza de Kibble, que tenía el fin de relacionar la medida de la masa de un kilogramo con una constante fundamental de la naturaleza: la constante de Planck⁶ descubierta por el científico alemán Max Planck que, como la velocidad de la luz, no cambia en todo el universo hasta donde sabemos. También un método llamado “densidad de cristales por rayos X” parece resolver algunos problemas técnicos que esa redefinición necesitaba. Gracias a esta tecnología, la redefinición del kilogramo se llevó a cabo y entró en vigor en mayo de 2019.

Lista de referencias

Alder, K. (2002). *The Measure of All Things. The Seven-year Odyssey and Hidden Error that Transformed the World*. New York: The Free Press.

Aguilar Sandoval, M., A. (enero-junio, 2019). Prácticas de medición, convencionalismo y geometría. *Signos Filosóficos*, 21(41), 8-35.

Castelazo Sinencio, I., (2016). *La próxima redefinición del kilogramo [Documento en línea]*. Recuperado de <https://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/descarga/pdf/Redefinici%C3%B3n%20del%20kilogramo.pdf>

Gibney, E., (2019), Physical kilogram is officially dead, *Nature*, Adelanto de publicación en línea. doi:10.1038/d41586-019-01614-8

Hewitt, P. G. (2007). *Física conceptual* (V. A. Flores Flores, Trad.). México: Pearson Educación.

⁶ La constante de Planck se descubrió como consecuencia de los estudios de inicios del siglo XX para explicar cómo los objetos transmiten calor. Resultó que sólo es posible explicar la manera particular en que se produce la radiación de calor si se considera que la energía se transmite no de manera continua, sino en paquetes de energía muy muy pequeños, dados por la constante de Planck. A esos paquetes de energía se les llamó *cuantos*. El descubrimiento de la constante de Planck se considera el inicio de la física cuántica.

Kula, W., (1986). *Measures And Men*. (R. Szepter, Trad.). New Jersey: Princeton University Press.

Lewis, M., J., T. (2004). *Surveying Instruments of Greece and Rome*. Cambridge: Cambridge University Press

Pérez Montiel., H. (2014). *Física general*. México: Patria.

Resnick, R., Halliday, D., Krane, K. (2002) *Física* (Vol. 1) (E. Alatorre Miguel, Trad.) (5ta ed.). México: Grupo Patria Cultural.

Serway, R., A., y Jewett, J., W. (2008). *Física para ciencias e ingeniería* (Vol. 1) (V. Campos Olguín, Trad.) (7ma ed.). México: Cengage Learning Editores.

Tippens, P., E. (2011). *Física, conceptos y aplicaciones* (A. C. González Ruiz, Trad.) (7ma ed.). México: McGraw-Hill/Interamericana.

Wilkie, Tom (27 de octubre de 1983). Time to remeasure the metre". *New Scientist*, pp. 258–263. Recuperado de https://books.google.com.mx/books?id=pKU5MXqo4UYC&pg=PA258&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false