

El segundo en el Sistema Internacional de unidades y la conveniencia de distinguir entre tiempo y duración

Juan Tomé

Amonaria cosmológica / Libros / Los relojes no miden el tiempo: textos complementarios

www.cosmologica.amonaria.com



Este texto se concibió como complemento del libro “Los relojes no miden el tiempo”. Aunque puede leerse como separata, cobra sentido en relación con él.

Desde el 20 de mayo de 2019, la definición de segundo es: “El segundo, símbolo s, es la unidad de tiempo del SI. Se define tomando el valor numérico fijo de la frecuencia del cesio, $\Delta\nu_{Cs}$, la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio, igual a $9.192\,1631.770$ cuando se expresa en Hz, unidad igual a s^{-1} .” (Traducción de la definición que figura en bipm.org/en/CGPM/db/26/1/).

El segundo queda así establecido a partir del valor de la denominada «frecuencia del cesio», una constante de la naturaleza cuyo valor se considera fijo. Desde ese 20 de mayo de 2019, todas las unidades de las magnitudes fundamentales del SI, el segundo, el metro, el kilogramo, el amperio, el kelvin, el mol y la candela quedan definidas en función de las siguientes constantes de la naturaleza: la frecuencia de la transición hiperfina del Cs^{133} ($\Delta\nu_{Cs}$), la velocidad de la luz (c), la constante de Planck (h), la carga del electrón (e), la constante de Boltzman (k), del número de Avogadro (N_A) y la eficiencia luminosa de la radiación monocromática de 540 THz (K_{cd}). Los valores de esas siete constantes quedan fijados como absolutos para que sirvan de referencia para las unidades fundamentales. Definidas así, las unidades de las magnitudes fundamentales ganan en universalidad a costa de una mayor abstracción: es más difícil relacionarlas con el significado de las medidas en que participan. Con las nuevas definiciones de unidades gana la metrología pero pierde la didáctica, que tendrá que buscar las estrategias necesarias para dotar de significado físico a las unidades definidas de una forma tan abstracta.

El caso del segundo es ilustrativo. El segundo es, según la definición nueva, la inversa de la «frecuencia del cesio». Es, por tanto, un período, o en otras palabras, un intervalo temporal, un lapso de tiempo o una duración. De hecho, la definición de segundo hasta el 20 de mayo de 2019 era: “El segundo es la duración de $9.192\,1631.770$ periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133” (traducción de la definición que figura en bipm.org/fr/measurements-units), en todo equivalente a la nueva, pero que, en su misma redacción evidencia que el segundo es una duración, lo que dota a la unidad de un significado físico que en la definición nueva se oscurece. Al establecer que el segundo es una duración —“The second is the duration of ...”, y “La seconde est la durée de ...”, decían las definiciones en inglés y francés—, queda claro que todo lo que se mida en segundos (o en minutos, horas, días o años, que son múltiplos del segundo, o en décimas o centésimas o en cualquier fracción del segundo) son duraciones.

Sin embargo, en el lenguaje de la física, se ha dicho siempre, o casi siempre, que el segundo es la unidad de «tiempo», y así figura en los documentos oficiales de la Conferencia General de Pesas y Medidas y en las publicaciones del BIPM. Lo que sucede es que, en física, «tiempo» tiene dos significados: «tiempo magnitud», lo que se mide con cronómetros y relojes, y «tiempo dimensión», una de las cuatro dimensiones del espacio-tiempo, la dimensión de las relaciones de sucesión, la dimensión de los cambios. Las tres dimensiones restantes del espaciotiempo, las dimensiones del «espacio», constituyen el marco de las relaciones de posición, forma y tamaño. «Tiempo» y «espacio» son, para la Física, nombres de dimensiones. «Longitud» y «duración» son los nombres de las magnitudes relacionadas con esas dimensiones. Es raro encontrar trabajos que reflejen el esfuerzo de distinguir entre sus significados cada vez que se escribe la palabra «tiempo». Lo normal es lo contrario: usar «tiempo» sin preocupación por su ambigüedad. En el libro “Los relojes no miden el tiempo”, en un intento de clarificación, el «tiempo magnitud» es lo que se nombra siempre como «duración», reservando la palabra «tiempo» para el «tiempo dimensión» y sus marcas, la «coordenada tiempo». El «tiempo magnitud» o «duración» es la magnitud fundamental del SI de la que el segundo es la unidad.

Las magnitudes fundamentales del SI son siete. Seis de ellas tienen un solo nombre: longitud, masa, intensidad de corriente, temperatura termodinámica, cantidad de sustancia e intensidad luminosa. Pero hay una que tiene dos nombres: tiempo y duración (bipm.org/fr/publications/si-brochure/section1-3.html, tabla de 2014, no cambiada hasta mayo de 2019), lo que indica una situación anómala, nacida del uso indistinto de la misma palabra, «tiempo», para nombrar magnitud y dimensión. Otros índices de anomalías que el uso ambiguo de «tiempo» produce, se encuentran en frases referidas a medidas de «tiempo»: son las únicas en las que no aparecen los sistemas físicos a los que la medida se refiere. Así, si se dice que se va a medir la longitud de una mesa, o de un camino, etc.; o la temperatura de un café, o del aire contenido en una habitación, o de un gas interestelar, etc.; o de la masa de una estrella, o de unos tomates, o de nosotros mismos, etc.; se deja claro de qué sistemas materiales se quiere medir la longitud, la temperatura o la masa. Pero cuando se dice que se va a medir el tiempo de llegada al suelo una bola que se deja caer, o el tiempo necesario para llevar agua a ebullición, o el tiempo de espera en un semáforo, o el tiempo transcurrido desde el big bang, no está claro qué propiedad se mide y de qué sistema material se mide esa propiedad, sistema al que habría que entender aplicado el número resultante de la medición. Sin embargo, ser una propiedad medible de un sistema material es la definición de magnitud física, lo que hace sospechar que usar «tiempo» en esas frases no ayuda a entenderlo como «tiempo magnitud». Cuando se dice que una mesa tiene 7 metros, se piensa que esa cantidad es propia de la mesa; pero cuando se dice que la bola llegó al suelo los dos segundos, no queda claro que esos 2 segundos son una propiedad de la caída y nada más. Es muy fácil que en las frases construidas con la palabra «tiempo» parezca que lo que se midió fue el tiempo que pasó durante la caída, durante el calentamiento a ebullición, durante la espera del semáforo o desde que se produjo el estado big bang del universo, es decir, que se midió el tiempo mismo, no una propiedad de algún sistema material. Y al contrario, basta fijarse en frases referidas a medidas temporales donde no aparezca «tiempo» para que, naturalmente, aparezca la referencia al sistema material correspondiente. Por ejemplo, cuando se dice que un viaje, o una carrera, o una caída, duró tanto o cuanto; o cuando se

dice que la vida de una persona, o de una estrella, o la vida media de tal o cual isótopo, son tantos o cuantos segundos o tantos años; o cuando se dice que un ecosistema, o una economía, o un enfermo tardó tanto o cuanto en recuperar un estado de salud; en todos esos casos está claro que lo que se medía eran propiedades del viaje, de la caída, de las vidas, o de las recuperaciones, todos ellos procesos de los sistemas materiales que viajaban, vivían o se recuperaban. Eso es «duración», la propiedad medible de todos esos procesos, una propiedad que la palabra «tiempo» difuminaría si se usara en esas frases.

La no asociación entre medidas de “tiempo” y procesos que sufren sistemas materiales, sucede especialmente en Cinemática, donde son muy frecuentes las descripciones en términos de «espacio» y «tiempo». Siendo ese el campo de la TRE, el uso «tiempo» con el significado de «duración» dificulta llegar al significado más fecundo de las proposiciones y resultados de la Teoría.

La ambigüedad que afecta a «tiempo» no alcanza tan de lleno a «espacio». Aunque a veces se confunde «espacio» con «longitud» (basta pensar en los capítulos de Cinemática de textos de física básica, en aquella frase hecha “la velocidad es el espacio partido por el tiempo”), nadie dice que el metro sea unidad de espacio o, lo que sería dimensionalmente más correcto, que el metro cúbico sea unidad de espacio. Siempre se acierta a decir que el metro cúbico es unidad de volumen y que el metro es unidad de longitud. Se tiene claro que volumen y longitud son magnitudes, siendo el metro cúbico y el metro sus correspondientes unidades. Se tiene claro que el espacio es el conjunto de tres dimensiones espaciales y que ni el espacio ni ninguna de sus tres dimensiones se mide, porque no es magnitud física. Esta distinción clarificadora entre magnitud (propiedad medible de realidades físicas concretas) y dimensión (elemento básico del marco descriptivo abstracto de la realidad física) es la que se pierde cuando «tiempo» se usa indistintamente para «tiempo magnitud» y para «tiempo dimensión».

Julio Palacios, un físico teórico que fue maestro de varias generaciones en la posguerra española, buen conocedor de la Teoría de la Relatividad, escribió en 1947, sobre la necesidad de distinguir entre los significados de «tiempo» y «duración».

“Parécenos que, así como se distinguen las ideas de línea y de longitud, debiera distinguirse entre *tiempo* y *duración*. En una línea se puede marcar un sentido y decir que un punto está delante o detrás de otro, sin necesidad de hablar de longitudes. Correlativamente, con sólo la idea de tiempo, puede decirse que un suceso es anterior a otro, y ordenarlos cronológicamente, sin necesidad de medir duraciones.

En física se opera con duraciones. No importa la fecha en que se hace una medida, sino la duración de determinado fenómeno. Sin embargo, se habla siempre de tiempo, lo que equivale a confundir la idea de longitud con la de línea. Nos atenderemos al léxico consagrado, y emplearemos la palabra tiempo con el significado de duración. En rigor, debiera decirse que, así como las líneas son los soportes de las longitudes, así el tiempo es el soporte de las duraciones.” (Palacios, Esquema físico del mundo, p 22-23)

Palacios señala una cuestión esencial: que la física opera con duraciones. El aspecto temporal importante de un fenómeno, o de un proceso, es su duración. La fecha, la hora, el momento, el valor numérico de la coordenada temporal en que tiene lugar es irrelevante para el transcurso del fenómeno. Es más, el Principio de homogeneidad temporal, básico para poder establecer comparaciones de procesos similares en distintos momentos o distintas épocas, y que es necesario para que el proceso de medida de duraciones pueda tener sentido (ver el texto complementario “Un postulado necesario para la medida de duraciones”), establece que el momento en que un fenómeno se produce debe ser irrelevante, no tiene que influir en el desarrollo del fenómeno. La coordenada temporal sirve para ordenar sucesos, en particular los que constituyen un proceso, lo mismo que la coordenada espacial a lo largo de una línea sirve para ordenar lugares. Pero la duración de un proceso no depende de las coordenadas temporales de los sucesos que lo constituyen, lo mismo que la longitud de un objeto no depende de las coordenadas espaciales donde el objeto se localice.

En la historia de la física, el tiempo como coordenada aparece con Galileo, en sus representaciones de las medidas de duración de los procesos de caída de bolas rodando por un carril inclinado. Galileo troceó el recorrido de la bola por el carril, marcando sus tres cuartos, su mitad, su cuarta parte, y se propuso medir las duraciones de las rodaduras de la bola por cada una de esas fracciones. Pero no disponía de relojes en el sentido moderno, relojes que le permitieran ir viendo sus marcas en distintos puntos del recorrido de las bolas que rodaban. Galileo usaba una clepsidra de vaciado con la que medía la duración cada una de las rodaduras concretas.

“En lo que a la medida del tiempo se refiere, empleamos una vasija grande llena de agua, sostenida a una buena altura y que, a través de un pequeño canal muy fino, iba vertiendo un hilillo de agua, siendo recogido en un vaso pequeño durante todo el tiempo en que la bola descendía, bien por todo el canal o solo por alguna de sus partes. Se iban pesando después en una balanza muy precisa aquellas partículas de agua recogidas del modo descrito, con lo que las diferencias y proporciones de los pesos nos iban dando las diferencias y las proporciones de los tiempos. Ocurría esto con tal exactitud que, como he indicado, tales operaciones, repetidas muchísimas veces, jamás diferían de manera sensible.” (Galileo, Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias, traducción de Javier Sádaba, p 300)

Suelta la bola Galileo y abre el grifo que deja caer agua en un recipiente. Cuando la bola llega a una marca determinada, cierra el grifo y pesa en una balanza el agua que ha caído. Está comparando dos procesos: rodadura de la bola por el carril y vaciado de la clepsidra. Los pone en marcha y los detiene a la vez. Supone que las duraciones de ambos son iguales. Supone además que el flujo de agua es uniforme, de forma que puede considerar que la cantidad de agua vaciada es proporcional a la duración. Esta suposición es necesaria para que el vaciado pueda ser tomado como patrón de medida. Los instrumentos de medida de Galileo son una vara de medir (el mismo carril de rodadura dividido en

partes iguales) y una balanza (para medir la masa de agua vaciada). No hay relojes. Hay comparaciones de procesos que se ponen en marcha y se detienen a la vez; y hay suposiciones acerca de uno de ellos: el que tiene que ser considerado como patrón.

Galileo no tenía relojes que contaran segundos. Pero si se usa un reloj para estudiar el movimiento de caída de la bola por el carril inclinado, como se hace ahora en cualquier laboratorio escolar, no cambia nada. Se ponen en marcha y se detienen a la vez dos procesos: el movimiento que se quiere estudiar y el proceso reloj. Se admite que sus duraciones son iguales. Se supone uniformidad en el proceso reloj porque se supone repetición fiel de un proceso patrón elemental. Se representan la longitud de tramos parciales del movimiento frente a su duración, obtenida a partir de la duración del proceso patrón. La única diferencia es que el proceso patrón reloj está calibrado en unidades de duración (segundos) y la medida es directa, no indirecta como la de Galileo, que necesita pesar (mejor sería decir “masar”) en una balanza el agua vaciada para deducir la duración del vaciado, que se toma igual a la del movimiento de la bola.

Consiguió así Galileo asociar un número, el de la masa del agua recogida durante cada una de las caídas de la bola, con otro número, el que da la longitud de cada recorrido concreto de la bola. Como tomó el número que daba la masa de agua como duración del proceso de vaciado de la clepsidra, y como esta duración se igualaba, por principio implícito, a la duración de la rodadura de la bola, pudo Galileo relacionar las longitudes de los recorridos de la bola con las duraciones de sus rodaduras por el carril. Representó Galileo esos números en una gráfica de dos ejes perpendiculares, la longitud recorrida por la bola a una de los ejes y el tiempo empleado en el recorrido en el otro. Sin embargo, sus medidas fueron longitud y masa de agua. Desde lo medido a lo representado hay un genial proceso de interpretación. Estaba estudiando el movimiento acelerado de una forma radicalmente nueva, poniendo las bases de la cinemática matemática.

Hecha la representación, el *tiempo* se hace protagonista, mientras que las medidas realizadas pasan a un plano muy secundario. Se pasa por encima del proceso de interpretación que hizo Galileo, se pone el foco en los resultados presentados (al menos así ha sucedido al considerarlo históricamente), y se olvida que lo que se midió fueron masas de agua, en sentido estricto, o duraciones de procesos concretos si nos atenemos a lo que se compara en el proceso de medida. Además, el *tiempo* se representa mediante una línea continua. Se han medido duraciones de unas pocas fracciones concretas de la caída de la bola, pero la línea continua del tiempo añade la idea de que cualquier fracción es posible, que entre cualesquiera dos duraciones medidas hay tantas como se quiera, tantas como fracciones de la longitud del carril por el que rueda la bola. Lo mismo que el carril, el *tiempo* aparece como continuo.

Galileo inventó así el tiempo matemático, un concepto que construyó a partir de medidas de masas de agua que asoció a duraciones de procesos concretos de vaciado de una clepsidra. En adelante, el destino de «duración» y «tiempo» es confundirse. La línea donde se representan las duraciones medidas, el eje de coordenadas temporal, engulle las duraciones que sirven para construirla. Cuando, ahora, una multitud de relojes sincronizados materializan el tiempo matemático, los esfuerzos de distinción entre «tiempo» y «duración» pueden ser inútiles. Pero era «duración» (o «tiempo magnitud»),

algo muy concreto, lo que medía Galileo indirectamente pesando agua, y era «tiempo» (o «tiempo dimensión»), algo abstracto, lo que representó como resultado de su genio.

Para Palacios, cada una de las tres dimensiones del espacio sería soporte de longitudes. La dimensión tiempo sería el soporte de las duraciones, el marco para su medida. Mi punto de vista es que la dimensión tiempo se ha levantado sobre la magnitud duración. Al contrario que Palacios, no escribiría yo que “el tiempo es el soporte de la duración”, sino que la duración es el soporte del tiempo. Al menos, parece que fue así cuando el tiempo dimensión se inventó.

Bibliografía

Galileo Galilei, 1638, Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias, Edición de Solís y Sádaba, Editora Nacional, Madrid, 1976

Palacios, J., 1947, Esquema físico del mundo, Eds Alcor, Madrid