

FLICHMAN, Eduardo Héctor. Longitud en física clásica. In: MARTINS, R. A.; MARTINS, L. A. C. P.; SILVA, C. C.; FERREIRA, J. M. H. (eds.). *Filosofia e história da ciência no Cone Sul: 3º Encontro*. Campinas: AFHIC, 2004. Pp. 153-158. (ISBN 85-904198-1-9)

LONGITUD EN FÍSICA CLÁSICA

Eduardo Héctor Flichman *

Resumen – El problema acerca de cómo establecer y generar escalas y medir las cantidades físicas correspondientes a magnitudes primitivas, entre las cuales la longitud y la duración son relevantes, suele parecer trivial y sencillo, pero en realidad presenta ciertas dificultades muy interesantes desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia. Aquí no se trata de las sofisticadas escalas que se usan en la actualidad, sino de aquéllas a partir de las cuales se desarrollan posteriormente las que ahora se aplican. No podemos mencionar longitudes de onda o frecuencias correspondientes a características de determinados átomos si no comenzamos con algo mucho más elemental, a partir de lo cual podremos llegar a las escalas hoy aceptadas: las varas rígidas y los procesos repetibles o periódicos. El sencillo planteo empírico-teórico de varas rígidas y procesos repetibles presenta dificultades que pueden parecer insalvables y que requieren cierto análisis, que intentaré realizar aquí.

1 INTRODUCCIÓN

Para estar en condiciones de comprender el desarrollo de un sistema de unidades en física, resulta indispensable aclarar previamente varios conceptos. Uno de ellos es la noción de *magnitud física* y, en particular, la de *magnitudes físicas fundamentales* o *primitivas*, pues a partir de las escalas correspondientes se generan las escalas de todas las demás magnitudes, las *magnitudes derivadas*. Las escalas primitivas deben construirse mediante operaciones físicas, para algún rango macroscópico de valores. Posteriormente, mediante métodos indirectos de medición, se extiende el rango de la escala hacia valores mayores y menores. El ejemplo que presentaré en este trabajo será el de la magnitud *longitud*. Las magnitudes primitivas dan lugar al desarrollo de un álgebra dimensional que, a su vez, permite fijar las unidades derivadas a partir de las primitivas. Sin embargo, en última instancia, el álgebra dimensional nos da la posibilidad de invertir el juego y elegir unidades derivadas como si fuesen primitivas y viceversa. Es lo mismo que sucede con los axiomas y los teoremas de un sistema axiomático. Pero el comienzo de la construcción debe relacionar las unidades primitivas con las

* Universidad Nacional de General Sarmiento; Universidad de Buenos Aires (UBA), Buenos Aires, Argentina. E-mail: flichman@mail.retina.ar

magnitudes primitivas y las unidades derivadas con las magnitudes derivadas.

El problema acerca de cómo establecer y generar tales escalas primitivas suele parecer trivial y sencillo; sin embargo, presenta serias dificultades teóricas, extremadamente interesantes desde el punto de vista de la filosofía de la ciencia. Aquí no se trata de las sofisticadas escalas usadas actualmente, sino de aquéllas a partir de las cuales se desarrollan posteriormente las que ahora se aplican. No podemos mencionar longitudes de onda o frecuencias correspondientes a características de determinados átomos si no comenzamos con algo mucho más elemental: las varas rígidas, a partir de lo cual podremos llegar, luego de sucesivas correcciones y sofisticaciones, a las escalas de longitud hoy aceptadas. Existe también otro tipo de correcciones y sofisticaciones que obligan a modificar nociones y operaciones para que concuerden con las nuevas teorías físicas; pero aquí solo nos referiremos a la física clásica, que de por sí, ya presenta complicaciones mucho mayores que las que uno podría haber imaginado antes de involucrarse en estos problemas de fundamentación. El aparentemente sencillo planteo empírico-teórico de varas rígidas presenta dificultades que pueden parecer insalvables y que requieren un profundo análisis, que intentaré realizar aquí.

No deseo que el hecho de mencionar operaciones físicas para diseñar escalas se entienda como una adhesión a la perimida posición operacionalista. Aquí, el tipo de operación no será considerado como definición de la correspondiente magnitud. Pero será el mecanismo operacional, que incluirá en parte convenciones y en parte resultados empíricos, el que permitirá la conexión entre la *magnitud* (propiedad teórica irreductible en tanto tal) y la *operación* que mide las cantidades.

Usaré una metodología constructiva. Los métodos axiomáticos se generan *a posteriori*, y aquí solo deseo aclarar conceptos, que se generan constructivamente. La formalización llega después. Es claro que la limitación en el tiempo solo permitirá que me ocupe de *una* magnitud fundamental y de solo *algunos* de los problemas cuyo estudio concita. Elijo la que aparentemente es la más elemental, que servirá como modelo para las demás. Se trata de la *longitud*.

2 MAGNITUD, CANTIDAD, PATRÓN, UNIDAD Y MEDIDA

Señalaré una primera distinción, válida para cualquier magnitud física: la distinción entre magnitud, cantidad y medida. Las magnitudes físicas son en realidad *propiedades determinables*. Las *propiedades determinadas* que les corresponden son las que denominaré "cantidades físicas". El largo de una determinada cinta es una *cantidad*. El ancho de un río es otra. Ambas son *cantidades* correspondientes a una misma magnitud: la *longitud*. Debemos distinguir cuidadosamente entre la propiedad de la cinta: *tener una longitud de dos metros* y la propiedad de la cinta: *tener longitud*. O entre *tener (el río) un ancho de cincuenta metros* y *tener (el río) longitud en sentido transversal (ancho)*. Esa es la distinción *determinado-determinable*, entre cantidad y magnitud. No me involucraré aquí en el problema acerca de la existencia en tanto universales, de esos tipos de propiedades. Para que quede clara intuitivamente la diferencia entre las nociones de *magnitud*, por una parte, y *cantidad*, por la otra, podemos retornar a nuestro ejemplo de la cinta: la cinta tiene la propiedad de *tener longitud*. Esa propiedad de la cinta es una magnitud física. Pero la cinta también tiene la propiedad de *tener una longitud de dos metros*. Esa propiedad de la cinta es una cantidad física. La cinta es un particular, una entidad física. La longitud y la cantidad son universales, propiedades de ese particular.

La *medida* corresponde a otro concepto. Para estar en condiciones de aclararlo, debemos comprender, por ahora intuitivamente, lo que es la comparación de objetos físicos en cuanto a sus cantidades (obviamente, correspondientes a una misma magnitud, en nuestro caso, la longitud). Si comparamos las varas rígidas *a* y *b* (por ahora aceptamos intuitivamente la noción de *vara rígida*) superponiéndolas y haciendo coincidir un extremo, puede ocurrir que sobre una parte de *a* o de *b* o que también coincidan en el otro extremo, en el mismo instante. Hasta aquí solo podemos decir que

una es mayor que la otra o que tienen la misma cantidad. Sin embargo, veremos en seguida la metodología para que la comparación resulte cuantitativa. En ese caso podremos decir que, por ejemplo, a es 2,5 veces mayor que b . La comparación se habrá vuelto cuantitativa. Pero, sin embargo, para estar en condiciones de hablar de medición, necesitamos todavía de tres nuevos conceptos: *patrón*, *unidad* y *medida*.

En primer lugar, elegimos una vara rígida, como vara rígida *patrón básica*, de modo tal que podamos encontrar otras varas rígidas que tengan igual cantidad. Todas estas varas rígidas serán consideradas *patrones derivados*. Un modo de fijar la cantidad que denominaremos "unidad" de longitud será definirla como la cantidad correspondiente al cuerpo patrón básico. Hay otros modos, según los cuales la unidad no coincide con la cantidad correspondiente al patrón, pero no discutiremos aquí ese caso más general. Resulta así que, como resultado de la definición de "patrón derivado" y de "unidad", toda vara rígida patrón, sea patrón básico o derivado, tendrá una longitud igual a la unidad. Nos queda por aclarar la noción de *medida*.

La medida de la longitud de una vara es el resultado de comparar la cantidad correspondiente a esa vara y aquélla correspondiente a una vara patrón. La operación de comparación es compleja y la esbozaremos en seguida. El resultado, es decir la medida de la longitud de la vara con respecto a la unidad es un número puro. Lo que de inmediato podemos saber es que todas las varas patrón, tanto la básica como las derivadas, tienen medida 1 respecto de la unidad fijada por ellas mismas. A partir de aquí, podemos ver que no importa más distinguir patrón básico de patrón derivado.¹ Supongamos que elegimos en nuestro ejemplo la vara b como patrón. La medida de a respecto de b resulta ser el número 2,5.

3 UNA DIFICULTAD: ¿QUÉ ES UNA VARA RÍGIDA?

Intentaremos ahora precisar la noción de *vara rígida*. ¿Qué es una vara rígida (ideal)? Se dirá seguramente que es una vara recta que no modifica su longitud o que no modifica la distancia entre sus puntos extremos, independientemente de las acciones que se ejerzan sobre ella. El problema que se plantea inmediatamente es que hemos elegido la vara rígida para crear una escala de longitudes, pero la noción misma de *vara rígida* necesita como noción previa la de *longitud* (o la de *distancia*, que se deriva de la de *longitud*). La circularidad es clara. Construir una escala de longitudes² requiere saber previamente qué es una vara rígida, pero saberlo requiere a su vez tener previamente la noción de *longitud*. Además, a ello se agrega la dificultad de comprender qué es ser recta, ya que la vara rígida debe ser recta. Esta es una segunda dificultad. Comencemos por la primera.

No tenemos más remedio que retroceder del concepto de *rigidez absoluta* al de *rigidez relativa a otra vara*. Intentaremos precisar esta última noción, para lo cual usaremos un primer criterio, que, veremos luego, necesitará de muchos otros para que el concepto quede (al menos parcialmente) aclarado.

3.1 Primer criterio

Diremos que una vara es rígida respecto de otra de igual longitud, cuando *siempre* que las superpongamos y hagamos coincidir un extremo de ambas, también coincidirá el otro extremo en el mismo instante. En una primera aproximación, esto nos permitirá poner a prueba la existencia de

¹ Podría objetarse que la longitud del patrón derivado podría no mantenerse la misma a medida que pasa el tiempo. Pero debemos recordar que tanto el patrón básico como el derivado son varas rígidas. Con respecto a ello, la noción de *vara rígida* será discutida en la próxima sección.

² Creo que el contexto muestra claramente que cuando me refiero a "longitud(es)", en general se trata de cantidad(es), no de magnitud.

cohortes de varas rígidas entre sí.

Aparecen nuevas dificultades. En primer lugar, el hecho de que condiciones externas, por ejemplo, la temperatura, pueden hacer variar la relación. No existen varas que mantengan la rigidez relativa mutua frente a condiciones externas diferentes o aun frente a iguales cambios de condiciones externas (una vara de madera y una metálica dejarán de ser mutuamente rígidas aunque las dos cambien su temperatura del mismo modo). Habrá que fijar las condiciones externas. Pero resulta que en general el conocimiento de las condiciones externas requiere del conocimiento previo de la longitud. Por ejemplo, una escala de temperaturas requiere de la noción previa de longitud y también de la noción previa de rigidez. Un termómetro es un cuerpo rígido y el mercurio en su interior se dilata de acuerdo con una escala de longitudes. Algo similar ocurre con cualquier otra escala, sea de temperaturas, presiones u otra. Se multiplican las circularidades. Más aún, el hecho de hacer coincidir ambos extremos *simultáneamente*, requiere de una noción previa de simultaneidad.³ Es decir, necesitamos la escala temporal. Ello no significa que la longitud se derive de la duración. Pero es indudable que una noción previa de simultaneidad es necesaria.

La solución a los problemas recién señalados se plantea de modo de aproximaciones sucesivas. Las nociones intuitivas previas de escalas termométricas, temporales, etc., nos permiten realizar evaluaciones aproximadas de la rigidez relativa. La rigidez así obtenida (pues se obtienen cohortes rígidas entre sí, dentro de ciertos límites) se usa para generar escalas termométricas, temporales, etc. Estas, más precisas que las previamente intuitivas, se usan para mejorar la puesta a prueba de las cohortes rígidas entre sí. Y las nuevas cohortes más precisas se usan a su vez para mejorar las otras escalas, y así sucesivamente. Si este proceso converge, el criterio funciona bien. Y de hecho converge. Es un resultado empírico. Así se obtuvo el (en otras épocas) famoso metro patrón de París y los metros patrones obtenidos a partir de él. Fue la mejor cohorte obtenida de varas rígidas entre sí.

De aquí a obtener varas rígidas de diferentes longitudes hay otra tarea pendiente. Se requiere, por ejemplo, obtener dos varas rígidas iguales y colocarlas una a continuación de la otra. La vara rígida superpuesta a ambas tendrá medida doble. No necesito repasar todo el mecanismo para encontrar múltiplos y submúltiplos, de modo de poder graduar luego una vara rígida, a partir de una unidad, para tener la más conocida y famosa escala de longitudes: la bienamada regla, que será utilizada para medir longitudes de cuerpos que no son necesariamente rígidos. Sin embargo, las dificultades no han desaparecido. La construcción de múltiplos y submúltiplos y luego, de la regla, requiere de más criterios.

3.2 Segundo criterio

La superposición, para que se pueda aplicar la construcción de múltiplos, submúltiplos y la regla, debe ser total; no solo de los extremos, sino de todo punto interior de las varas superpuestas. Este criterio evita varas que puedan cambiar su curvatura fácilmente, como ocurriría, por ejemplo, con un hilo delgado no tensado. No habría cohorte posible de hilos delgados, puesto que su curvatura podría modificarse en cada repetición. Si las varas son curvas (todavía no hemos dado un criterio para que no lo sean) deberán tener todas la misma curvatura en cada punto.

3.3 Tercer criterio

No basta con que los extremos de dos varas rígidas entre sí siempre coincidan. También los puntos interiores deben siempre coincidir. En caso contrario no se podrían construir los submúltiplos. Supongamos que tenemos la vara unitaria. Buscamos 10 varas rígidas entre sí tales que sean además

³ Aquí no nos ocupamos de la teoría especial de la relatividad, pero en ella se trataría de simultaneidad respecto del sistema de referencia respecto del cual las varas rígidas están en reposo: sistema de laboratorio.

iguales entre sí y que, colocadas una a continuación de la otra, se superpongan, el primer extremo de la primera vara con el primer extremo de la unidad y el último extremo de la última vara con el último extremo de la unidad. Y que ello ocurra siempre. En ese caso nos encontramos con varas que son décimos de la unidad. Pero si las marcas internas de la vara unitaria se mueven de modo que una parte de la vara unidad se contrae y otra se dilata, no podrá haber coincidencia interna con las varas submúltiplos. Y luego no se podrán construir los submúltiplos en la escala. Lo mismo para la regla en su totalidad.

De modo que otro criterio de rigidez relativa es que cualesquiera marcas internas de una vara rígida de la cohorte debe coincidir con la marca correspondiente en otra de la cohorte en cualquier superposición que se realice.

3.4 Cuarto criterio

Falta fijar el criterio que nos permita asegurar que las varas de la cohorte son rectas. Aquí el criterio operacional es curioso. Parece un criterio de carpintero o de herrero. Pero en realidad, también lo son los anteriores. Si, una vez que coinciden los extremos, hacemos girar ambas varas alrededor de su eje, no deben dejar de coincidir en todos sus puntos durante cualquier tipo de giro (por ejemplo, el giro de una vara más rápido que el de la otra). Este es un paso importante para asegurarnos que las varas son rectas. Seguramente habrá más criterios, pero creo que esto es suficiente para mostrar el grado de dificultad que tiene la caracterización de las varas rígidas.⁴

Cumplidos los criterios podemos construir la regla. Los patrones han cumplido su función fundacional y ya no son necesarios, salvo como patrón de revisión.

4 SEGUNDA DIFICULTAD: ¿HAY SOLO UNA COHORTE? PISTAS ONTOLÓGICAS

Queda un problema que permite a un filósofo realista hacer algunas consideraciones ontológicas muy interesantes. Podríamos suponer que encontramos más de una cohorte de varas rígidas entre sí (supongamos dos cohortes) tales que las varas de una cohorte no son rígidas respecto de las varas de la otra. Por ejemplo, vistas desde una cohorte, las varas de la otra estarían dilatándose y contrayéndose de manera periódica. En cambio, vista la primera cohorte desde la segunda, ocurriría lo mismo pero a destiempo. Cuando en el primer caso se observa dilatación, en el segundo se observa contracción, y cuando en el primer caso se observa contracción, en el segundo se observa dilatación.

El caso es que solo encontramos una cohorte de varas rígidas entre sí. Un filósofo realista sacará como conclusión, que ello le da una pista ontológica de la existencia de las cantidades ligadas a la longitud, como propiedades teóricas. El resultado, la existencia de una sola cohorte, es empírico. Desaparece la sola convención.

Lo mismo ocurre cuando estudiamos la manera de obtener la escala de longitudes, a que nos referimos más arriba. La existencia de una sola cohorte, así como ciertos otros resultados empíricos, no convencionales, como por ejemplo la aditividad de la escala de longitudes así obtenida, nos hace pensar nuevamente en la existencia, en sentido ontológico, de las cantidades ligadas a la longitud, como propiedades teóricas de los cuerpos físicos. La aditividad consiste en que la medida de la suma física de las longitudes de dos cuerpos rígidos es igual a la suma matemática de sus respectivas medidas. Esto es resultado del mecanismo de generación de la escala. Pero no siempre los

⁴ Que hace falta completar el criterio para asegurarnos que las varas son rectas quedó claramente señalado por una objeción planteada por Roberto Martins durante la exposición del presente trabajo en el *III Encuentro de Filosofía e Historia de la Ciencia del Cono Sur*, organizado por AFHIC (Asociación de Filosofía e Historia de la Ciencia del Cono Sur), en Aguas de Lindóia (San Pablo), Brasil, los días 27 al 30 de mayo de 2002.

mecanismos de generación de escalas permiten ese resultado. Por ejemplo, ello no ocurre en el caso de la temperatura del termómetro de mercurio. Y por lo tanto, el *status* de dicha temperatura no le permite una contrapartida ontológica como sí lo permite el de la escala de longitudes.

Un filósofo convencionalista dirá que se pueden describir los fenómenos a partir de otras bases y que el hecho de que los resultados sean los mismos muestra que no se pueden hacer conjeturas ontológicas teóricas. Por ejemplo, dirá que podríamos tomar un resorte en oscilación permanente y considerarlo como el cuerpo rígido patrón. En ese caso, tendríamos un mundo oscilante, pero las predicciones serían en cualquier caso igualmente adecuadas. Mi respuesta como filósofo realista es que es fundamental la capacidad de explicación que tiene la cohorte rígida, que no la tiene el resorte tomado como patrón. La oscilación del mundo no tendría explicación alguna. Más aún si oscila de maneras diferentes a medida que transcurre el tiempo. En cambio, sería muy fácilmente explicable por qué oscila el resorte y por qué cambia su manera de oscilar si elegimos como base la cohorte de varas rígidas. Al filósofo convencionalista, tanto como al instrumentalista, les importa menos explicar. Les importa más predecir. No veo la manera de convencerlos de las ventajas de la explicación.

Dejo de lado muchos otros problemas relacionados, como por ejemplo, las características tridimensionales del espacio euclidiano en el que trato aquí el tema de la longitud, así como también la relación entre longitud y distancia, por una parte (extensividad) y posición, por la otra (intensividad). Discutir esos temas llevaría un espacio mucho mayor que el que ocupa presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARNAP, R. *Philosophical foundations of physics*. New York: Basic Books, 1966⁵.
ELLIS, B. *Basic concepts of measurement*. Cambridge: Cambridge University Press, 1966.
HEMPEL, C. Fundamentals of concept formation in empirical science. *In: International Encyclopaedia of Unified Science*. Chicago: University of Chicago Press, 1952. Vol. 2, no. 7.
KRANTZ, D.; LUCE, D.; SUPPES, P.; TVERSKY, A. (eds.). *Foundations of measurement*. New York / London: Academic Press, 1971. Vol. 1.

⁵ Primera edición. Hay ediciones posteriores (*Introduction to the philosophy of science*). Hay traducción al castellano, varias ediciones (*Fundamentos lógicos de la física*).