

Extrañas relaciones entre los Sistemas de Unidades y la Teoría de la Relatividad

Las mediciones constituyen la base en la cual se apoya la ciencia. Pese a la complejidad técnica de alguna de ellas, en esencia medir es tan solo comparar contra un elemento convenido como unidad. Esto parece muy simple, sin embargo la definición de cuáles deben ser las unidades convenidas se viene debatiendo desde el siglo pasado. El problema radica en que la elección no es única. Diferentes conjuntos de unidades son capaces de funcionar adecuadamente.

Una opción muy simple sería elegir un sistema de unidades basado en un patrón independiente para cada magnitud. De esta forma habría un patrón para longitudes, otro para masas, tiempos, volúmenes, peso, velocidad, etc. La elección podría hacerse así: para la longitud, el largo de una barra particular, y análogamente para masa y tiempo. (para este último, el período de un fenómeno repetitivo). La unidad de volumen podría ser la capacidad de una jarra patrón de platino-iridio a 20° C que se conservaría en la Oficina Internacional de Pesas y medidas de Sèvres; e igualmente con las demás magnitudes.

Seguramente habrá quien piense que la cantidad de unidades independientes, cada una con su correspondiente patrón sería excesiva. Esto causaría ciertos inconvenientes. Además de tener que ampliar las instalaciones de la Oficina Internacional, muchos acusarán a este sistema de ser culpable de que aparezcan coeficientes numéricos en todas las ecuaciones de las leyes físicas. La fórmula para calcular el volumen v de un cubo de arista a sería:

$$v = 0,0582 a^3 \quad [1]$$

midiendo el volumen en *Barriles* (medida colonial para el comercio de la cerveza) y la longitud en *Palmas* (distancia entre puntas de los dedos de la mano extendida). Por detalles

de éstas y otras interesantes unidades de medida obsoletas, ver Asimov, 1964.

Pocos estarán dispuestos a arrastrar el 0,0582 y otros coeficientes que aparecen. Sin embargo, que más da agregar algunos otros números a los que ya memorizamos (nuestro teléfono y los de nuestros amigos, direcciones, fechas de cumpleaños, π , e , g , c , etc.). (*) No, el problema principal reside en la Oficina de Pesos y Medidas. Los patrones no son perfectos, así como tampoco los instrumentos de medida. Lo que hoy nos parece un patrón adecuado, no lo será mañana. La resolución y estabilidad de dos marcas grabadas sobre una regla metálica pudo ser buena con la tecnología de principios de siglo, mas es insuficiente en la actualidad. Y cambiar los patrones no es tan sencillo. A raíz de la popularidad de la *Palma* ya se encuentran en todo el mundo gran cantidad de patrones secundarios (que han efectuado quizás una peregrinación metrológica a Sèvres) que no coinciden exactamente entre sí. Cada país puede haber oficializado su propia *Palma* (en el mejor de los casos). Las diferencias eran muy pequeñas para ser tenidas en cuenta. Sin embargo, nuevos instrumentos de comparación han hecho evidente que el patrón de Palma se deforma lentamente con el tiempo y que sus variaciones rápidas perturban la exactitud durante su comparación.

No nos queda otro camino que cambiar el patrón por uno mejor. El nuevo patrón trata de conservar el mismo valor histórico de la unidad original, pero esto es más cercano al valor homologado por un país que a los otros. Y eso obliga a cambiar el coeficiente de [1] por

(*) Y si esto le parezca arcano, ¿cuánto demora en comparar los precios de dos unidades tan corrientes e importantes como los *Barriles de Petróleo* y los *KWh* ?

0.058446. Todas las fórmulas relacionadas con este patrón cambian. Todos los instrumentos deberán recalibrarse, y lo peor es que todo esto sólo durará hasta la próxima revisión.

Hemos pasado muchas veces por esto. La última ocurrió en 1990 con los patrones del Voltio y el Ohmio (ver Taylor, 1990). Lo mejor es disminuir la cantidad de patrones a un mínimo y eliminar tantos coeficientes como sea posible. Basta con eliminar la dependencia entre los coeficientes y los patrones. Hubiéramos definido la unidad de volumen (el *barril*) como $1/0,0582$ (exactamente) del contenido de un cubo de una *Palma* de arista. Conservaríamos las unidades a que estábamos acostumbrados, y nunca habría cambiado la ecuación [1].

El Sistema de unidades moderno basa toda la mecánica en tres unidades independientes. El Electromagnetismo requiere una cuarta. Mucho se ha debatido sobre cuales deben ser esas cuatro unidades fundamentales. Un trabajo detallado fue presentado por Gerszonowicz en 1939. La mayoría de las propuestas eran de agregar una unidad eléctrica, pero también se llegó a proponer longitud, tiempo, voltaje y resistencia.

Sobre la magnitud eléctrica para definir la unidad hubo un gran debate. Se propusieron la corriente, el voltaje, la resistencia, la capacidad, la inductancia. También fueron propuestas la permeabilidad μ_0 y la cte. dieléctrica ϵ_0 . Estas dos últimas pueden parecer extrañas. Es posible hacer un resistor estable y definirlo como patrón de resistencia; análogamente con un voltaje, capacidad, etc. pero ¿qué significa tomar como patrón a la permeabilidad magnética? La idea es similar al ejemplo anterior. Analicemos un ley que contiene a μ_0 :

$$f = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{2i^2}{d} \quad [2]$$

siendo f la fuerza sobre dos conductores rectilíneos paralelos, l su longitud, i la corriente por ellos y d la distancia que los separa.

Podría definirse la unidad de corriente como aquella que circula por una espira superconductora, que ya se sabe en que lugar se guardaría. Sin embargo, parece más efectivo atribuir a μ_0 un valor exacto convencional. Con ello la fórmula [2] se verifica cuando las magnitudes involucradas son iguales a las respectivas unidades. Una fórmula similar existe para la electrostática, con ϵ_0 en vez de μ_0 . Nuevamente podríamos usar esta fórmula para definir una unidad de medida, fijando el valor de ϵ_0 .

Se podría atribuir el valor más simple, la unidad, a estas constantes (y de hecho algo parecido propuso Gauss). Pero si ϵ_0 y μ_0 valiesen **1** ello tendría dos inconvenientes. El más notorio sería tener que desprendernos de nuestras viejas medidas en *m, kg, V*, etc. Nadie lo quiso hacer en el pasado y tampoco parece que ocurra en el futuro, pese a que hemos abandonado las *palmas* (aunque no del todo los *barriles*).

El segundo inconveniente es más sutil. Nadie escribe un coeficiente igual a **1** al comienzo de una fórmula. Con el tiempo se llega a creer que no lo existe, y que la fórmula es completa sin él. En el caso de las medidas de volumen, el coeficiente es **1** si la unidad de volumen fuese un cubo cuya arista es la unidad de longitud. Pero existe una diferencia. La proporcionalidad entre volumen y el cubo establecida en [1] está basada en dos hechos físicos. El primero es que vivimos en un espacio de tres dimensiones (por ello es 3 el exponente). El segundo es que empleamos una métrica euclidiana; ello asegura la constancia del coeficiente y lo independiza de las condiciones en que se realice la medida. Reflexionemos sobre esto último. Todos nosotros, terrícolas, hemos aprendido que la superficie del triángulo es $1/2$ base.altura. Esto es suficientemente cierto si trabajamos en nuestras casas.

Pero el "triángulo" que tiene por vértices el Polo Sur y las ciudades de Quito y Libreville (capital de Gabón) tiene base y altura iguales a 10000 km y sin embargo su superficie es de 64 millones de km² y no de 50 como predice la fórmula. Naturalmente, la explicación está en que vivimos sobre una superficie esférica; pero por miles de años el hombre pensó que vivía sobre una superficie plana (euclidiana). Y la fórmula del triángulo con coeficiente $1/2$ era universal.

Esto muestra que la constancia de los coeficientes en las fórmulas, así como ellas mismas, debe ser comprobada físicamente. Igualar los coeficientes a 1, induce a pensar que son inmutables (y no escribirlos a olvidarlos), y ello debe ser comprobado experimentalmente.

Los valores de los coeficientes electromagnéticos dependen de la constancia de las propiedades del espacio vacío. La teoría electromagnética asigna una realidad a los campos y al vacío donde ellos existen. En efecto, en el espacio ocupado por esos campos hay cierta cantidad de energía, cantidad de movimiento, velocidades de propagación., etc. Todas estas propiedades dependen de ϵ_0 y μ_0 . Asignar valores fijos a las propiedades del vacío no se distingue mucho de asignar una resistencia eléctrica a un determinada columna de mercurio. Quizás la diferencia radica en que sospechamos que el patrón de mercurio se deforma, contamina, etc, mientras que a las propiedades del vacío (ideal) las consideramos inmutables.

Pero no todos estamos convencidos de ello. Palacios (1960) propone una teoría que logra resultados similares a la teoría de la relatividad pero que está basada en principios opuestos. Según ella, existen referenciales inerciales privilegiados, y es posible distinguirlos de aquellos que están en reposo absoluto. La teoría acepta la constancia de la velocidad de la luz, pero propone variaciones en las otras "constan-

tes" (como ser ϵ_0) al pasar de un referencial inercial a otro.

Hace menos de 100 años la humanidad no creía que la velocidad de la luz fuera constante. Actualmente se la ha homologado debido a la nueva definición de metro (ver Miguez, 1990), cerrando la discusión para siempre. En efecto, la última definición de metro se basa en la distancia recorrida por la luz en un determinado tiempo. Más aún, esta definición ni más ni menos que asigna un valor exacto y constante a ϵ_0 ; $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 \cdot c^2)$. A μ_0 ya se le había asignado un valor fijo ($4\pi \cdot 10^{-7}$) desde hace mucho tiempo, al definir la unidad de corriente por la ecuación [2].

De acuerdo con la teoría de la relatividad estos valores deberían ser constantes en laboratorios no acelerados. De lo contrario podríamos determinar el reposo absoluto. De ello se desprende que la nueva definición del metro y el nuevo sistema de patrones así formado constituye, en cierta forma, una homologación de la teoría de la relatividad.

Aún no siendo escépticos y aceptando que la teoría de la relatividad sea correcta, ¿tenemos derecho a privar a las nuevas generaciones del entusiasmo que produce el desafío de encontrar en ella un error?

(Daniel Slomovitz)

Referencias

Asimov, I., "De los números y su historia, olvidenlo!", El Ateneo, pp129, 1982.

Gerszonowicz, S., "Nota sobre la elección de la cuarta unidad fundamental de la electrotécnica", *Boletín de la Fac. de Ingeniería de Montevideo*, Nº 7, pp 428, 1939.

Miguez, J.C., "El nuevo metro", *Boletín IEEE Uruguay*, 2, Nº 4, Julio 1990.

Palacios, J., "Relatividad, una nueva teoría". ES-PASA-CALPE, 1960.

Taylor, B.N., "New international representation of the volt and ohm effective January 1, 1990", *IEEE Trans. Instrum. and Measure.*, 39, pp2, 1990