

No, meteorología no. Metrología cuántica

No sé cuántas veces los pobres metrólogos/as habrán tenido que aclarar que ellos/as no se dedican a trabajar con borrascas, lluvias y pequeños claros a las dos de la tarde. Meteorología no. Metrología. Del griego *metron*, medida. Trabajan (sin desmerecer a los meteorólogos) con algo mucho más profundo, algo que ataca a las raíces de lo técnico. Sin los metrólogos y metrólogas, los expertos en las medidas, el mundo se vendría abajo.

Decir “esto pesa 2 kilogramos” y que todos estemos de acuerdo en lo que es “1 kilogramo” es crucial. Antes de que los franceses inventaran el metro hace unos 200 años (y posteriormente lo adoptáramos los españoles), en nuestro país convivían montones de unidades de longitud muy diferentes: la vara castellana, la legua, la braza, los pies, los palmos... Y aunque tenían el mismo nombre, en cada provincia cada una era ligeramente distinta. Un ingeniero podría volverse loco.

Es tarea de los metrólogos, entre otras labores, que esto no pase. Todos ahora compartimos las mismas unidades de medida, las unidades del Sistema Internacional. Y los metrólogos son los responsables de recrearlas con un nivel de precisión y exactitud descomunales. Por pequeña que sea la distancia entre cresta y cresta de una onda electromagnética (la luz de un láser, por ejemplo), los metrólogos te saben decir qué fracción de un metro mide. Estamos hablando de algo diminuto, una diez millonésima parte.

Y, para conseguir tener reglas, relojes y básculas de tanta finura, los metrólogos se han aprovechado de las extrañas reglas de la mecánica cuántica para alcanzarlo. Seguro que la «cuántica» no le es totalmente desconocida al público general. Al fin y al cabo, ya se hacen películas que la utilizan como excusa narrativa (véase *Antman*, de la franquicia Marvel) e incluso en tratamientos pseudoterapéuticos como excusa para robarle a la gente.

La mecánica cuántica no es otra cosa que las reglas que gobiernan en el mundo en miniatura, una vez llegas al tamaño de los átomos. Unas normas que difieren totalmente de las que estamos acostumbrados en nuestro día a día.

Sin los metrólogos, los expertos en las medidas, el mundo se vendría abajo

Si vas en coche al trabajo sigues una ruta específica, la trayectoria que te marca el GPS desde tu casa a tu oficina. En el mundo cuántico, las partículas no parecen seguir una única trayectoria. Por imposible que parezca, la cuántica nos sugiere que están recorriendo varias trayectorias al mismo tiempo, ubicándose en varios sitios simultáneamente con diferentes velocidades también simultáneas. Es la magia de la superposición cuántica.

Sí, sé que esto puede ser difícil de comprender. Mi consejo es: no lo intentes. No hay nada que comprender. La

cuántica simplemente es así: cosas que en nuestro mundo macroscópico nos parecen incompatibles (como puede ser estar en dos sitios a la vez) parece que sí están permitidas en el mundo en miniatura. Pero por raro y *explota-cabezas* que sea, lo cierto es que los físicos lo entienden bien. Dejando lo intuitivo de un lado, agarran con fuerza las matemáticas para poder predecir lo que ocurre con estas partículas díscolas. Y, con este lenguaje, son capaces de dominar lo cuántico. Cada día un poco más.

Y cuando más lo comprenden, más surgen las aplicaciones. Es en este punto en el que entran los metrologos. De hecho, actualmente varios estándares se realizan gracias a la cuántica: hoy en día no sabríamos cuánto vale un amperio (la unidad de intensidad eléctrica) o un voltio (la unidad de potencial eléctrico) si no fuera por la cuántica. Y esto, a su vez, tiene implicaciones en otras unidades. Por ejemplo, en cómo sabemos que un kilogramo pesa un kilogramo.

Tradicionalmente hemos sabido el valor de un kilogramo porque había una pesa que lo decía. Los metrologos custodiaban en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas un cilindro protegido bajo varias campanas para que no perdiera ni un átomo, el llamado Prototipo Internacional del Kilogramo¹. El peso de este cilindro era lo que le daba valor al kilogramo, por lo que la seguridad sobre él era tremenda.

Este cilindro tenía sus gemelos, protegidos a su vez en otros centros metrologicos por todo el mundo. Cada cierto tiempo los prototipos se comparaban para ver si todos seguían pesando lo mismo. Lamentablemente, con el tiempo, se vio que los cilindros estaban divergiendo: la masa de cada uno estaba cambiando. Los metrologos ya sospechaban que esto podía pasar. Que nuestras medidas dependieran de un objeto físico al que le podría suceder cualquier desgracia no era la idea más inteligente. Así que cuando la tecnología correcta estuvo desarrollada, los metrologos dieron el salto y empezaron a definir lo que era un kilogramo no cómo el peso de un cilindro sino como el “peso” de algo más inmaterial.

Aunque lo correcto sería contar qué es y cómo funciona una balanza de Kibbler, permitidme esta simplificación: una vez que el valor del kilogramo estuviera encapsulado en un peso (la fuerza con la que la Tierra tira de un cilindro) se genera esta fuerza a través del electromagnetismo. Al igual que un imán imprime una fuerza sobre otro imán, una fuerza magnética, uno puede generar estas fuerzas magnéticas a través de la electricidad. La clave con la balanza de Kibbler es que es capaz de generar una fuerza magnética idéntica al peso del prototipo del kilogramo, solo haciéndole pasar la corriente eléctrica de valor correcto. Si alguien en alguna parte del mundo quiere saber cuanto pesa 1 kilogramo, solo tiene que comprar una de estas balanzas, activarla con esta precisa corriente, generar la fuerza magnética y tiene delante el peso exacto de un kilogramo (solo que en una modalidad electromagnética).

Así que, ahora en vez de proteger una pesita, solo tenemos que proteger unos numeritos: el valor de la intensidad de esa corriente eléctrica que recrea el kilogramo. Para medir con toda la precisión posible esa intensidad eléctrica recurrimos a fenómenos cuánticos. En este caso, al efecto Hall cuántico, un extraño fenómeno en el que los electrones de un material (que forman la corriente eléctrica) se ven involucrados.

He aquí una de estas conexiones entre la metrología y la cuántica: este efecto permite a los metrologos medir intensidades con una finura descomunal y así poder recrear cuánto es un kilogramo muchísimo mejor. Aunque la cuántica es rara, bien aprovechada puede llevarte a mejores resultados.

Estos avances han llevado al desarrollo de una disciplina nueva llamada *Metrología Cuántica* (vuelvo a insistir: no, meteorología no). Es la respuesta a la pregunta: en lo que a medir se refiere, ¿estamos aprovechando la cuántica todo lo bien que podemos? Sí, estamos cogiendo fenómenos raros de la cuántica para extraer mejor información, como si de un atajo se tratara. Pero lo estamos usando sin “mancharnos las manos” de la magia cuántica. Me recuerda mucho a cuál ha sido nuestra relación tecnológica con la cuántica. Aunque estas reglas estrambóticas parecen algo muy actual, lo cierto es que su descubrimiento se remonta 100 años atrás. Sus aplicaciones llevan entre nosotros mucho tiempo. Sin ir más lejos, los transistores con los que funcionan nuestros ordenadores y móviles funcionan gracias a que entendemos muy bien las normas de la cuántica. Sin

embargo los transistores como tal no manifiestan fenómenos cuánticos; necesitas a la cuántica para comprender los materiales con los que se hacen. Como ves no nos estamos “manchando la manos”. La cuántica participa en solo su construcción; los transistores no están “apagados” y “encendidos” al mismo tiempo. Es un medio para conseguir un fin.

Pero, ¿y si no lo fuera? ¿Y si pudiéramos aprovechar toda la variedad de fenómenos cuánticos para traer al mundo macroscópico aplicaciones? Esto es la metrología cuántica: pensar como la cuántica, ahora totalmente desatada, puede ayudarnos a medir mejor. La eliminación del ruido ambiental (el llamado *shot-noise*) puede ser una de estas mejoras. Todas las medidas tienen ruido, todo aparato de medida se ve afectado por las fluctuaciones de su entorno. Es el sonido molesto y constante de una radio mal sintonizada. Si uno quiere hacer mediciones muy precisas (alcanzar valores muy pequeños) le puede pasar que el ruido del ambiente sea mayor que la diminuta señal que quiere atrapar. El ruido de la radio tiene más volumen que el programa a escuchar.

La cuántica simplemente es así: cosas que en nuestro mundo macroscópico nos parecen incompatibles parece que sí están permitidas en el mundo en miniatura

La solución a esto puede estar en la física cuántica. Uno de los fenómenos más cuánticos que hay es el entrelazamiento, el resultado de que varios objetos estén unidos en unas superposiciones especiales. El entrelazamiento hace que sus componentes sean una unidad, que están extrañamente conectados, como si estuvieran sincronizados. Esta “conexión” puede aprovecharse inteligentemente para “detectar” este ruido y eliminarlo. A través de la cuántica, o mejor dicho a través de un truco cuántico y metrológico, podemos tomar mejores medidas.

Este tipo de aprovechamientos de la mecánica cuántica ya se han llevado a la práctica con éxito en proyectos muy famosos. En 2016 el observatorio LIGO hizo la primera detección directa de ondas gravitacionales; se detectó al propio espaciotiempo vibrando. Sucede que el espacio-tiempo, si lo pensamos como un medio, es muy poco elástico. Estas onditas eran extraordinariamente pequeñas: tan grandes como la milésima parte del tamaño de un protón. El ruido de fondo se las hubiera comido y no las hubiéramos detectado. Es gracias a la metrología cuántica que se consiguió aumentar la precisión del observatorio y conseguir esta gigantesca resolución.

Muchas veces en la vida ocurren combinaciones inesperadas. Híbridos que a uno le parecerían ridículos, como puede ser este “medir cuánticamente”. Sin embargo, estas acaban siendo las parejas más poderosas. Quién sabe qué logros técnicos se alcanzarán y los descubrimientos alucinantes que podremos hacer al poder “mirar” mucho mejor en las entrañas del mundo.

Vittorio Giovannetti et al. “Quantum-Enhanced Measurements: Beating the Standard Quantum Limit” en *Science*, 306(5700). 2004. Disponible en: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1104149>

Schlamminger S., Haddad D. (2019) "The Kibble balance and the kilogram" en *Comptes Rendus Physique*, Volume 20, Issues 1-2. 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070518301336>

Schnabel, R., Mavalvala, N., McClelland, D. et al. "Quantum metrology for gravitational wave astronomy" en *Nature Communications* 1, 121. 2010. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/ncomms1122>

Nelson, R. A. "Foundations of the international system of units (SI)" en *The Physics Teacher* 19, 596. 1981. Disponible en: <https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.2340901>