INVESTIGACIÓN Y APLICACIONES PRÁCTICAS

De los codos a los qbits: metrología y detección en la edad antigua, la edad moderna y la edad cuántica

Morgan Mitchell



Abstracción de herramientas cuánticas de medición. Conceptualización: Luisa Quiroga

La detección y la metrología cuánticas son uno de los cuatro pilares canónicos de la tecnología cuántica, al lado de la computación cuántica, la simulación cuántica y la comunicación cuántica. La detección es la medición de los fenómenos fugaces que nos rodean; la extensión de nuestros sentidos naturales con medios tecnológicos. La metrología se suele definir como «la ciencia de la medición», un término que esconde más de lo que revela. Como veremos, la metrología es, al mismo tiempo, una práctica antigua implicada en el ascenso y la caída de las civilizaciones y una tecnología a la vanguardia de la investigación actual. En las últimas décadas, la detección y la metrología han utilizado cada vez más la física cuántica, cosa que ha dado lugar a la detección y la metrología cuánticas. En este artículo esbozaré la naturaleza de estos temas y el papel único que tiene la física cuántica en la detección y la metrología.



Materialización de la longitud en el antiguo Egipto: patrón de codo real encontrado en la tumba de Maya, tesorero de Tutankamón. Copyright Alain Guilleux – Fotos Egypte

(photosegypte.com)

Las mediciones en la civilización antigua: el codo

Un fragmento de estela conocido como la piedra de Palermo muestra que una unidad de longitud, el codo, se utilizaba en el antiguo Egipto, como mínimo desde el siglo XXVII a.C., para medir el nivel del agua del Nilo. Esta fecha es verdaderamente antigua, de poco después de la invención del lenguaje escrito. El nombre de «codo» proviene del latín, pero esta misma medida, con diferentes nombres, se utilizó en Mesopotamia, el Levante, Egipto y la antigua Roma. En el mundo islámico, el codo se utilizó hasta bien entrado el periodo medieval, más de tres mil años después de su primer uso registrado en Egipto. Sobrevivió a la civilización egipcia, sus ciudades, sus dioses, sus leyes y su lengua.

El codo es aproximadamente la distancia que va del codo a la punta del dedo medio. Es una medida cómoda, muy fácil de utilizar en el comercio sencillo: si pedimos a un vendedor de tejidos dos codos de una ropa, es fácil comprobar si lo que nos da es realmente lo que le hemos pedido. No cuesta mucho imaginar a una sociedad pretecnológica que sale adelante bien con medidas informales como esta. Pero las civilizaciones de Mesopotamia, Egipto y el Levante necesitaban medidas mucho mejores. Construían estructuras monumentales, comerciaban con bienes en ciudades lejanas y gobernaban grandes territorios. Para hacerlo, les hacían falta medidas precisas y que un gran número de personas las aplicaran de manera uniforme.

Klenovsky et al. [1] ofrecen una descripción vívida y sucinta de cómo debió funcionar:

> Unos 3.000 años a.C., se decretó que la unidad de longitud egipcia, el codazo real, fuera igual a la longitud del antebrazo, medido desde el codo doblado hasta la punta del dedo medio, más la anchura de la palma de la mano del faraón. Se cortó un patrón en un bloque de granito negro para que perdurara para siempre. Para difundir esta unidad de longitud, a los obreros que construían tumbas, templos y pirámides se les suministraron reglas de la medida de un codo hechas de madera o de granito. El arquitecto o capataz real de cada obra se encargaba de transferir, y después de mantener, la unidad de longitud de las reglas de codo de los trabajadores, que se tenían que comparar con el patrón maestro de codo real cada luna llena. No hacerlo se castigaba con la muerte. [2]

Eso ilustra varios elementos clave de la metrología tal como se practica actualmente:

- En primer lugar, está la unidad, en este caso el codo real. Era una unidad diferente del codo común utilizado en los mercados. El codo real se divide en siete palmas, cada una de las cuales se divide en cuatro dedos.

- En segundo lugar, está la definición de la unidad: el codo real es la longitud del antebrazo más la anchura de la palma de la mano del faraón. Una vez definida la unidad, se puede medir una cosa en codos reales, utilizando al faraón como referencia. Eso no es nada práctico, ya que de esta manera el faraón sólo sirve para una vez.

- En tercer lugar, está el estándar primero, el patrón maestro en el bloque de granito negro, cortado de manera que coincida con la longitud del antebrazo del faraón más la palma de su mano. Este objeto manufacturado es la materialización del codo real y está hecho del material más duro, para hacerlo duradero y a prueba de manipulaciones. Este patrón estándar es único y, si se estropea o se pierde, fallará todo el sistema.

- En cuarto lugar, están los patrones secundarios, que son copias del patrón primero. Estos se utilizan para tomar medidas en el campo, están hechos de materiales menos valiosos y se pueden degradar. Eso es aceptable, porque se pueden hacer más copiando al patrón primero.

- En quinto lugar, hay un procedimiento de calibración de los patrones secundarios respecto del patrón maestro. Se descartan los inexactos y se hacen nuevos patrones secundarios según las necesidades.
- □ En sexto lugar, hay procedimientos administrativos, con medidas de ejecución por incumplimiento. [3]

Así pues, la metrología tiene dimensiones matemáticas, físicas y administrativas. También tenía dimensiones personales, políticas y religiosas. Al faraón egipcio se lo veneraba como un dios: el patrón maestro lo utilizaba como referencia física y los patrones secundarios se copiaban del primero. Esta proximidad al gobernante divino hacía que los patrones fueran objetos venerables, igual que lo es la ropa que viste a un santo.

> La metrología es, al mismo tiempo, una práctica antigua implicada en el ascenso y la caída de las civilizaciones y una tecnología a la vanguardia de la investigación actual

La grandeza del gobernante daba más legitimidad a los patrones, y la grandeza de un gobernante se puede inferir del alcance de la estandarización de su patrón. El emperador

Sargón de Acad consiguió estandarizar el codo en Mesopotamia, lo cual ayudó a unir su imperio, a facilitar el gobierno y a enriquecer a su pueblo mediante el comercio. Metrología e imperio son aliados y a menudo sufren la misma suerte: el codo de Sargón de Acad cayó en desuso como medida después de la caída del Imperio acadio.

Crisis y renacimiento: Ilustración y metrología revolucionaria

A lo largo de los milenios, los imperios y sus estándares metrológicos fueron y vinieron, con pocos cambios respecto al del antiguo modelo egipcio. En Europa, el último emperador que impuso un conjunto uniforme de medidas fue Carlomagno, hacia el 800 d.C. Después de Carlomagno, el poder imperial disminuyó y proliferaron reinos más pequeños. Los gobernantes locales definían patrones de medidas que se adaptaran a sus objetivos, a menudo para conseguir más tributos de sus súbditos. En vísperas de la Revolución Francesa, se calcula que en Francia se utilizaban unas 800 unidades de medida diferentes, con un cuarto de millón de definiciones locales diferentes. [4] El comercio en estas condiciones era extremamente difícil. En efecto, el sistema político había corrompido la metrología para su propio beneficio.

Los revolucionarios franceses consideraron que el antiguo sistema de unidades, igual que el sistema político del antiguo régimen, era ilegítimo, profundamente injusto para la gente común y que era necesario sustituirlo a gran escala. Después del asalto de la Bastilla en 1789, Luis XVI convocó los Estados Generales para negociar con los representantes del pueblo. La mayoría de pueblos incluyeron en su lista de demandas el establecimiento de medidas uniformes. En 1790, la Asamblea Nacional Francesa, el órgano de gobierno *de facto* durante la Revolución Francesa, votó a favor de crear un nuevo sistema de medidas, que se tenía que convertir en el *Système International d'Unités* (SI), el sistema métrico que utilizamos hoy.

El nuevo sistema se basaba en propuestas de los pensadores de la Ilustración del siglo anterior. Estos querían ser racionales y universales, reformar las medidas «para todo el mundo, para siempre», y situar la metrología sobre una base duradera, al abrigo de las vicisitudes de la política. El pueblo ya no sufriría bajo reglas inventadas por faraones y retorcidas por emperadores y aristócratas. Estos eran los elementos clave:

- Las unidades eran digitales (relacionadas por potencias de diez) y eran las mínimas posibles, con el metro como referencia para otras unidades; por ejemplo, un litro se define como un decímetro cúbico.

- Las unidades se definían por estándares naturales disponibles universalmente. Un kilogramo era el peso de un litro de agua pura. El metro era una diez millonésima parte de la distancia del polo al ecuador, a lo largo del meridiano de París.

- Se definieron patrones y calibraciones primeros y secundarios.
- La gobernanza del sistema métrico sería internacional, por tratado.

Aunque el sistema métrico tiene una nomenclatura neutra y secular y eliminó unidades

derivadas de monarcas divinos como el codo o el pied de roi (el pie de Carlomagno), introduce de contrabando un elemento divino a las definiciones de las unidades. Muchos de los científicos de la Ilustración que diseñaron el sistema métrico suscribían el deísmo, una teología racionalista que postula un creador no intervencionista, cuya existencia se revela en su creación: el mundo natural. Un metro o un kilogramo, referidos a la tierra o en el agua pura, volvían a ser medidas vinculadas a la divinidad.



Materialización de la longitud después de la Revolución Francesa: patrón público del metro, plaza Vendôme, París.

La realidad desordenada: la metrología postrevolucionaria

Los planes universalistas del sistema revolucionario resultaron difíciles de implantar. El metro era la clave del sistema métrico y se definía en función de la medida de la Tierra. Medir el meridiano era difícil: la expedición de 1792 de Delambre y Méchain acabó con la muerte de Méchain y la producción de un patrón primero, el *mètre desde Archives,* a partir de los datos defectuosos de Méchain. Se produjeron y distribuyeron patrones secundarios. Algunos se instalaron en las paredes de los edificios; espacios donde podía acceder cualquier ciudadano. La imagen del metro muestra un patrón secundario en una pared en París.

Los trabajos de prospección para medir la longitud del meridiano continuaron a lo largo del siglo XIX, incluida una expedición espectacularmente atrevida de un catalán del norte de veinte años, Francesc Aragó. [5] También se avanzó en la comprensión de la forma de la Tierra. Estos perfeccionamientos dieron lugar a cálculos fluctuantes de la duración del meridiano y a debates interminables, como suele pasar en ciencia. Quedó claro que el patrón de la Tierra no llevaría en la medida ideal «para todo el mundo, para siempre» que se imaginaron en 1790. En 1867, el patrón de la Tierra se abandonó efectivamente cuando el metro internacional se definió como la longitud del *mètre desde Archive*s, conocido para reflejar de manera inexacta la dimensión de la Tierra, sin embargo, con todo, un patrón primero perfectamente funcional que ya se utilizaba.

A la difusión del sistema métrico ayudaron las guerras napoleónicas, que desestabilizaron la política europea y ofrecieron oportunidades a los reformadores de mentalidad racional. Una vez más, metrología e imperio se aliaron. Irónicamente, la población civil francesa se resistió al nuevo sistema que se había creado para liberarla, y durante un tiempo volvieron a las medidas tradicionales. Finalmente, sin embargo, el sistema métrico se extendió a casi todos los rincones del mundo. Sin embargo, la promesa mayor de los revolucionarios no se cumplió. Ahora la base del sistema eran los artefactos conservados en París, patrones primeros que no disfrutaban de universalidad y que se basaban en tratados —por lo tanto, en política— para su legitimidad y uso.

Un regalo de la física microscópica: la metrología cuántica

Un problema fundamental para la metrología revolucionaria es la mutabilidad del mundo clásico. El sistema métrico se definió utilizando la Tierra y el agua pura, a causa de su inmutabilidad percibida. Pero las dimensiones de la Tierra sufren alteraciones debidas a las mareas, la actividad sísmica, el vulcanismo, etc. Además, la velocidad de rotación de la Tierra —utilizada para definir el segundo— no es constante. La precisión de cualquier metrología basada en la Tierra necesariamente será limitada.

Otro problema básico es la accesibilidad. Mientras que el agua pura se puede obtener en cualquier lugar con recursos modestos, las mediciones del meridiano de París se tienen que hacer en Francia y en España, con un gran coste y esfuerzo. Aunque, visto retrospectivamente, la Tierra puede haber sido una mala elección como referencia, el hecho es que la física clásica no ofrece ninguna otra buena opción. La física anterior a 1900, la de Newton, Lagrange y Maxwell, entre otros, describe magnitudes continuas que pueden adoptar cualquier valor. Esta física mantiene el silencio sobre si estos valores pueden cambiar en el tiempo o de un lugar a otro. Que la densidad del agua era de hecho la misma en todas partes era una observación puramente empírica; no hay nada en la física clásica que diga que tiene que ser así.

> El descubrimiento a partir de 1900 de los átomos y las partículas subatómicas dio nuevas esperanzas a la metrología universal. La promesa de medir «para todo el mundo, para siempre» se iba haciendo realidad

El descubrimiento a partir de 1900 de los átomos y las partículas subatómicas, como los electrones, los protones y los neutrones, dio nuevas esperanzas a la metrología universal. Estos elementos microscópicos obedecen a la física cuántica, no a la física clásica. El mundo microscópico es discreto: los números enteros de átomos y las partículas ocupan un número contable de estados con energías específicas y bien definidas. La física microscópica también es uniforme: todos los átomos de un elemento e isótopo determinados son idénticos, con propiedades inalterables. [6] ¿Qué pasaría si la metrología,

en lugar de utilizar artefactos como patrones, utilizara átomos? Las líneas espectrales atómicas ya eran conocidas en el siglo XIX, y el año 1827 ya se utilizaron propuestas para hacerlas como patrones. Los avances del siglo XX en espectroscopia y en desarrollo de la teoría cuántica asentaron estas propuestas sobre una base sólida.

En 1960, el metro —sistema internacional— se definió exactamente como 1.650.763,73 longitudes de onda de la luz emitida por el isótopo ^{86}Kr, (Kriptón-86) a la transición entre 2p10 y 5d5. [7] Sin duda, era práctico medir longitudes con luz de transiciones atómicas específicas, y más adelante con luz de láseres que están ajustados para resonar con transiciones atómicas. Después, el segundo se definió exactamente como 9 192 631 770 oscilaciones del átomo de cesio (Cs) en su transición hiperfina de estado fundamental. Los relojes atómicos con cesio —osciladores sintonizados con la frecuencia de transición del átomo de cesio— se convirtieron en los mejores cronometradores y se comercializaron. La promesa de medir «para todo el mundo, para siempre» se iba haciendo realidad. Pero el kilogramo se resistía obstinadamente a este enfoque, a pesar de todos los esfuerzos por contar el número de átomos en esferas de silicio cristalino puro para una posible definición del kilogramo como la masa de un número específico de átomos de silicio.



Desmaterialización de la longitud desde 1983: definición del metro en términos de la velocidad de la luz, c, la frecuencia
de transición hiperfina del cesio atómico ΔνCs y una fracción racional.

La última frontera: metrología a partir de constantes fundamentales

A partir del año 1887, los experimentos de Michelson y Morley habían demostrado que la velocidad de la luz era una constante, incluso para un observador en movimiento. Einstein construyó la muy exitosa teoría de la relatividad especial en torno a este hecho, incluida la famosa E = mc2, donde c es la velocidad de la luz. La relatividad y su constante c se convirtieron en una base de la teoría física, y las técnicas para medir c crecieron en sofisticación y precisión, con la ayuda de la invención del láser. Los metrólogos vieron una oportunidad: en lugar de definir el metro con longitudes de onda atómica específica, lo podrían definir con la velocidad de la luz y el segundo medido. En 1983, el metro se definió de esta manera, tal como se ha ilustrado anteriormente. Ahora la velocidad de la luz es una cantidad definida: exactamente 299.792.458 metros por segundo. Todas las «medidas de la velocidad de la luz» actuales son de hecho medidas de la longitud del metro.

> Disponer de un sistema de metrología a prueba de futuro es conseguir que pueda ser utilizado no sólo por las civilizaciones humanas existentes con las tecnologías actuales, sino también por cualquier civilización futura, sea cuál sea la tecnología que exista entonces

Si las definiciones de unidades atómicas hicieron que la metrología estuviera disponible «para todo el mundo» por la fácil disponibilidad de átomos idénticos, la definición con constantes fundamentales contribuye a hacer que la metrología esté disponible «para siempre». Cualquier referencia atómica dada, como la longitud de onda del ^{86}Kr, es probable que sea sustituida por técnicas metrológicas más precisas o más atractivas. Al referenciar las unidades a las constantes fundamentales que aparecen en la descripción de cualquier medida atómica, el sistema métrico se convierte en estable enfrente del cambio tecnológico. Este es el sueño de un sistema de metrología a prueba de futuro, que pueda ser utilizado no sólo por las civilizaciones humanas existentes con las tecnologías actuales, sino también por cualquier civilización futura, sea cuál sea la tecnología que exista entonces. En el 2018 se volvió a revisar el sistema internacional, de manera que ahora todas las unidades de longitud, tiempo, masa, eléctricas y térmicas se definen con las constantes fundamentales c (velocidad de la luz), e (carga de electrones), h (quantum de acción), kB (constante de Boltzmann, que relaciona la temperatura con la energía) y, $\Delta\nu_{Cs}$ la única cantidad de referencia de átomos que queda del sistema.

La detección cuántica

Paralelamente a estos desarrollos metrológicos, y beneficiándose, han aparecido una infinidad de tecnologías cuánticas para la detección. Ahora se utiliza una variante del experimento de Michelson i Morley para medir la velocidad de la luz para detectar ondas gravitatorias (premio Nobel de Física el año 2017). La física cuántica que nos permite entender las líneas espectrales atómicas se utiliza para diseñar instrumentos atómicos que hagan mediciones magnéticas extremamente precisas, con aplicaciones en imaginería médica. [8]

La información cuántica también se utiliza en la detección cuántica. Desde 1980, se sabe que el entrelazamiento cuántico, un facilitador de la computación cuántica que utiliza qbits (no acodado) también permite medidas más sensibles. Desde el 2010, los detectores de ondas gravitacionales han mejorado su sensibilidad mediante estados entrelazados conocidos como *luz comprimida*, también posibles con sensores atómicoss. [9]

Un instrumento metrológico lo bastante avanzado también se puede convertir, de hecho, en un sensor. Según la teoría general de la relatividad de Einstein, la velocidad de un reloj se ve afectada por la gravedad. Los relojes atómicos actuales son tan precisos que comparar dos puede permitirnos medir diferencias de profundidad a escala de centímetro dentro del potencial gravitatorio de la Tierra y, por lo tanto, cambios minúsculos en la forma de la

Tierra.

REFERENCIAS Y NOTAS

1 — Klenovsky, P.; Wouters, M.; De Waal, W. (2022). “The metrology behind trade”. *Nature Physics*, núm. 18, p. 842.

2 — Esta cita se ha extraído de un comentario escrito por tres metrólogos (que yo sepa, ninguno de ellos egiptólogo). El comentario no proporciona referencias, pero parece que proviene de un artículo de opinión de De Bièvre, P. (2005). “Learning lessons from Ancient Egypt”. *Accreditation and Quality Assurance*, núm. 10, p. 325-326. Para una discusión arqueológica sobre la misma cuestión, ver Monnier, F.; Pequeño, J.-P.; Tardy, C. (2016). «The use of the ceremonial cubit rod as a measuring tool. An explanation». *Journal of Ancient Egyptian Architecture* núm. 1, p. 1-9.

3 — La pena de muerte no es una característica habitual de los sistemas metrológicos modernos, pero la metrología comercial —por ejemplo la medición de energía eléctrica, de combustible, etc. — a menudo tiene consecuencias legales por incumplimiento.

4 — Palaiseau, Jean-François-Gaspard (1816). *Métrologie universelle, ancienne et moderne : ou Rapport des poids et mesures des empires, royaumes, duchés et principautés des quatre parties du mond*. Bordeaux: Lavigne jeune.

5 — La autobiografía de Francesc Aragó se puede encontrar en línea.

6 — Aunque la física cuántica tiene en cuenta el hecho de que las propiedades atómicas como la masa del electrón cambien con el tiempo, este cambio se manifestaría no sólo en un elemento, sino en todos, ya que una única teoría cuántica describe todos los átomos. Además, los efectos serían observables; por ejemplo, comparando el espectro de un átomo de muchos electrones con el espectro del átomo de hidrógeno de un solo electrón. Estas comparaciones se han hecho con una gran precisión y no se ha observado ningún cambio en las propiedades atómicas.

7 — Baird, K. M.; Howlett, L. E. (1963). “The International Length Standard”. *Applied Optic*s, núm. 2, p. 455-463.

8 — Boto, E. *et al.* (2017). “A new generation of magnetoencephalography: Room temperature measurements using optically-pumped magnetometers”. *NeuroImage*, núm. 149, p. 404-414.

9 — Troullinou, C. *et al.* (2021). “Squeezed-Light Enhancement and Backaction Evasion in a High Sensitivity Optically Pumped Magnetometer”. *Physical Review Letters*, núm. 127, 193601.



Morgan Mitchell

Morgan Mitchell es profesor ICREA en el Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO). Se licenció en Física con mención en Filosofía en el Swarthmore College y se doctoró en Física en la Universidad de California, en Berkeley. Ha realizado estancias postdoctorales con el grupo de Serge Haroche (Premio Nobel de Física del año 2012) en el Laboratoire Kastler-Brossel de París, y con el grupo de Aefhraim Steinberg en la Universidad de Toronto. Ha realizado contribuciones fundamentales en el ámbito de la detección cuántica, entre las que destacan los primeros usos de luz comprimida y spins atómicos comprimidos en magnetometría, y el primer sensor magnético que demuestra una resolución de energía por ancho de banda más allá del quantum de acción $\hbar$. Algunas de sus contribuciones a la metrología cuántica son el primer uso de estados entrelazados multifotones para una medición de superresolución, así como protocolos que permiten que los relojes atómicos ópticos funcionen más allá del límite del ruido de descarga.