

REFLEXIONES

EL CARÁCTER CRUCIAL DE LA CONJUNCIÓN ENTRE LA METROLOGÍA Y LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS PARA EL DESARROLLO CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO

José Luis Ocaña Moreno

Académico de Número de la Sección de Ingeniería de la Real Academia de Doctores de España
jlocana@etsii.iupm.es

El 7 de junio de 2024, la Organización de las Naciones Unidas proclamó 2025 como el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas, conmemorando los 100 años desde el desarrollo formal de la Mecánica Cuántica, ponderando las investigaciones que han conducido a su prominencia tanto científica como tecnológica en el contexto internacional.

En el documento oficial de proclamación de la efeméride, se hace énfasis en el hecho de que la Ciencia y Tecnología cuánticas resultan de vital importancia para el desarrollo económico y en el de que sus aplicaciones potenciales prometen avances en campos vitales para el bienestar de la Humanidad.

En consecuencia, la misión de la proclamación del Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas es aprovechar la misma para ayudar a sensibilizar al público sobre la importancia y el impacto de estas disciplinas y sus aplicaciones en todos los aspectos de la vida.

Por otra parte, el 20 de mayo de 1875 (hace 150 años) se firmó en París con rango de tratado internacional la conocida como Convención del Metro, que sentó las bases para el futuro advenimiento del Sistema Internacional de Unidades (SI) como elemento clave para el desarrollo de la Metrología como ciencia fundamental para el desarrollo científico y tecnológico.

El Tratado constituyó en su momento la piedra angular para disponer de una metrología universal coordinada con un lenguaje científico consolidado, siendo el militar español, General D. Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero determinante en su proceso de implantación.

Durante siglos, una vez superada la era de las diversas concepciones mitológicas del Universo, el desarrollo de patrones de medida ligados a pesos y dimensiones geométricas estuvo fuertemente dominado por una concepción antropométrica (el ser humano como medida de todas las cosas, según Protágoras, en el siglo V a.C.), hasta que con la llegada de Leonardo da Vinci, Francis Bacon, Galileo Galilei y otros destacados pensadores del Renacimiento fundadores de la “Ciencia Nueva” llevaría a un gran avance en la ciencia y sus aplicaciones técnicas que serviría para satisfacer las crecientes y más sofisticadas

necesidades de la Humanidad, de manera que el conocimiento de la naturaleza y el uso de instrumentos permitiría al ser humano gobernar la misma de acuerdo con sus intereses.

Sobre la base proporcionada por los sucesivos descubrimientos registrados a partir del Renacimiento, que ponían de manifiesto la posibilidad de una sistematización de las medidas basada en avances científicos, se llegó a la proposición del Sistema Métrico Decimal, nacido legalmente en Francia por decreto del 13 de Brumario del año IX (4 de noviembre de 1800) y que, tras la adopción progresiva por varios países, fue implantado como sistema universal por el Tratado del Metro (París, 1875) y confirmado por la primera Conferencia General de Pesas y Medidas (París, 1889). Mediante la definición del Sistema Métrico Decimal se pretendía buscar un sistema de unidades unificado que facilitara, primariamente, el tráfico comercial y, por añadidura, el intercambio científico-tecnológico, hecho que resultaba quimérico debido a la gran diversidad de sistemas de unidades vigentes en los distintos países, regiones e incluso ciudades de Europa y del resto del mundo civilizado en aquel momento.

Desde aquel entonces, y a través de los sucesivos descubrimientos científicos que han ido fortaleciendo la consistencia, trazabilidad y exactitud de los diversos patrones de medida integrados en el Sistema Internacional de Unidades (definido formalmente en la 11ª Conferencia General de Pesas y Medidas (Paris 1960)), la Metrología ha ido evolucionando como una disciplina fundamental para el desarrollo y validación experimental de los avances científico-tecnológicos que han ido conformando el universo altamente tecnificado de nuestros días.

A lo largo de los años se ha ido consolidando un consenso internacional generalizado para hacer avanzar nuevamente el SI en el sentido de su formulación inicial como instrumento para la comprensión contemporánea del mundo físico. De esta forma, cada vez han resultado mayores los inconvenientes para el mantenimiento de un sistema basado en patrones “físicos” (debido a su alterabilidad con el tiempo) y los sucesivos avances en el campo científico han ido motivando una percepción de la conveniencia de una redefinición del sistema sobre la base de las constantes físicas fundamentales, magnitudes que representan la vocación de universalidad con la que un sistema de unidades normalmente se propone.

En la reciente reformulación de 2018 (anunciada en el marco de la 26ª CGPM y vigente a partir del 20 de mayo de 2019) se llevó a cabo un cambio trascendente en la definición de las unidades del SI orientado a la definición de las magnitudes físicas fundamentales en términos de constantes fundamentales de la naturaleza y dependiendo en la menor medida posible de la utilización de patrones físicos como soporte final de las unidades. Con la definición explícita de este nuevo conjunto de constantes fundamentales, se ha pretendido, como objetivo fundamental, que las mediciones en los distintos campos de la Física estén en la menor medida posible asociadas a una comparación frente a prototipos físicos o sistemas físicos particulares. En dicha reformulación las unidades y patrones del SI implican para su definición la consideración de un conjunto fundamental de efectos de naturaleza cuántica que acerca a lo que en términos metrológicos recoge el concepto de Metrología Cuántica.

La Metrología Cuántica es un campo de estudio teórico y experimental de los métodos de altas resolución y precisión utilizados para la medida de magnitudes físicas basados en las particulares posibilidades ofrecidas por los efectos físicos de naturaleza cuántica, especialmente, la interferometría cuántica, la compresión de estados cuánticos y la correlación cuántica de partículas. Estos efectos no tienen parangón en una visión física clásica y suponen que, a través de la aplicación de la correspondiente metodología de análisis, el estado de un sistema pueda ser determinado con incertidumbres de medida muy inferiores a las obtenibles clásicamente.

La Metrología Cuántica ha adquirido cada vez más importancia en los últimos años debido a la necesidad de realizar mediciones cada vez más precisas en diversos campos, como las comunicaciones, la vigilancia ambiental y la Medicina, entre otros. La aplicación fundamental, que hoy en día constituye una floreciente realidad y se proyecta con enormes posibilidades, es el desarrollo de sensores cuánticos. Estos sensores pueden medir magnitudes físicas con una precisión sin precedentes en muy diversos campos tecnológicos gracias al uso de las propiedades de superposición, entrelazamiento-correlación cuánticos y Efecto Túnel para lograr altos niveles de sensibilidad y resolución y con minimización del ruido en la transmisión de la información.

A medida que va siendo mayor la penetración de las citadas potencialidades brindadas por la ciencia cuántica en los diversos ámbitos tecnológicos, va apareciendo un creciente número de tipos de “*sensores cuánticos*”, cada uno de ellos diseñado para medir y, en su caso, ayudar al control de una o varias magnitudes físicas específicas con las citadas sensibilidad y resolución aumentadas. El tipo específico de sensor cuántico utilizado en una determinada aplicación depende de los requerimientos específicos de detección y de la naturaleza de la magnitud objeto de medida, alcanzando cada vez un más amplio espectro de aplicaciones.

Ya en el momento presente, dichas aplicaciones se dan en campos tecnológicos muy diversos y revisten diferentes alcances, siendo el denominador común la utilización de las posibilidades brindadas por el comportamiento cuántico de la naturaleza a escala microscópica para lograr mejoras conceptuales sustanciales sobre los métodos metroológicos tradicionales.

Por citar los desarrollos más significativos hasta el momento, se consideran dignos de mención los siguientes tipos de sensores cuánticamente mejorados (la mayor parte con diferencias conceptuales significativas en el método de medida de magnitudes con relación a sus homólogos “clásicos”):

- Interferómetros: Utilizan las propiedades de coherencia y correlación cuánticas para medir con precisión y sensibilidad aumentadas la diferencia de fase entre dos o más ondas en aplicaciones ópticas y acústicas y siendo la base para un importante conjunto de otros sensores de magnitudes diversas, tales como sensores acústicos, giróscopos, gravímetros. De amplia repercusión ha sido la relativamente reciente observación por

primera vez con ayuda de este tipo de sistemas de ondas gravitacionales, descubrimiento que fue reconocido con el Premio Nobel de Física de 2017¹.

- Magnetómetros: Utilizan asimismo los principios cuánticos de coherencia, correlación de estados y Efecto Túnel para medir campos magnéticos con precisión mejorada sobre sus análogos clásicos sobre la base de la determinación de momentos magnéticos elementales (*"spin"*) de átomos, moléculas y sus componentes elementales. Una excepcional variante de este tipo de sistemas son los denominados SQUIDS (*"Superconducting Quantum Interference Devices"*), citados con anterioridad y capaces de determinar metrológicamente intensidades muy bajas de campos magnético mediante el empleo concurrente de materiales superconductores.
- Dispositivos de imagen óptica mejorada cuánticamente: Utilizan asimismo los principios de coherencia y correlación de estados cuánticos de momento cinético (*"spin"*) de átomos y moléculas para proporcionar capacidades de resolución espacial muy mejorada con relación a los métodos clásicos, siendo uno de los puntales fundamentales de los desarrollos en curso de exploración en el campo biomédico.

Como característica general de todos ellos, aparte de las ventajas fundamentales de poder sortear las limitaciones impuestas por el principio de incertidumbre de Heisenberg y los límites clásicos de generación de ruido en la transmisión de la información, permitiendo las citadas mayores precisión y sensibilidad en las medidas, los sensores cuánticos pueden operar en condiciones ambientales extremas, tales como campos magnéticos intensos o bajas temperaturas, (condiciones en las cuales los sensores clásicos presentan dificultades de funcionamiento), así como a niveles ultramicroscópicos (incluidos átomos y moléculas individuales), permitiendo su aplicación directa en campos que están experimentando un rápido desarrollo, como la micro-nanotecnología.

De acuerdo con lo expuesto, se advierte en conjunto que los sensores cuánticos ofrecen ventajas sustanciales sobre sus homólogos clásicos que les permiten una penetración tecnológica sin precedentes a medida que se incrementan progresivamente los desarrollos a los cuales sirven de base, siendo los sectores del conocimiento y desarrollo tecnológico en los cuales van tomando un posicionamiento más significativo los de telecomunicaciones, posicionamiento y medida del tiempo, navegación y tecnologías de defensa, investigación fundamental y exploración del espacio, vigilancia ambiental y, sobre todo, aplicaciones en el campo de la salud.

Al objeto de que todas estas aplicaciones puedan ser finalmente instrumentadas con un elevado grado de fiabilidad restan, sin embargo, avances significativos en la vía hacia la superación de las dificultades características que son la seña del comportamiento cuántico, a saber, la pérdida de coherencia entre las distintas partes de los sistemas y la necesidad de mantenimiento del entrelazamiento a grandes distancias. Asimismo, se deberán realizar esfuerzos notables en la integración de la complejidad tecnológica de los sensores en su

¹ Consultar: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/press-release/>

ámbito de medida y se necesitarán esfuerzos importantes en lo referido a calibración de los sistemas desde un punto de vista práctico y su normalización tecnológica.

Sin embargo, todos estos desarrollos, unidos a los espectaculares avances concurrentes en el campo de las tecnologías de información y la computación cuántica hacen pensar en un rápido devenir del progreso científico-tecnológico de indefectiblemente asociada al propio avance y penetración de la Ciencia y Tecnología Cuánticas.

En definitiva, se constata que el camino que en su día se inició con la implantación del Sistema Métrico Decimal y la posterior firma de la Convención del Metro ha fructificado ampliamente a lo largo del tiempo con el desarrollo del Sistema Internacional de Unidades, habiendo sido el desarrollo de la ciencia y tecnología cuánticas esencial para el logro de cada vez más precisas y físicamente fundadas determinaciones metroológicas.

De esta forma, se reconoce que la conjunción de las celebraciones del sesquicentenario de la firma de la Convención del Metro y del Año Internacional de la Ciencia y Tecnología Cuánticas es una feliz efemérides que, gracias al fundamental entronque entre disciplinas descrito, adquiere hoy un significado pleno y con una amplia proyección de futuro.