

SENSÓRICA Y METROLOGÍA CUÁNTICAS

JUAN MIGUEL IBÁÑEZ DE ALDECOA QUINTANA

JUAN LUIS CALVO SANZ

Medir es, ante todo, tratar de comprender el mundo que nos rodea. Desde los albores de la civilización, los seres humanos hemos intentado cuantificar todo aquello que nos rodea. A partir de estimaciones intuitivas, la humanidad ha evolucionado hacia sistemas basados en parámetros de medición extremadamente precisos, asistidos por dispositivos que nos ayudan en la vida cotidiana y de los que dependen hoy en día sistemas como la navegación y el comercio global.

Pero esta evolución tuvo en 2019 un cambio significativo con la redefinición del Sistema Internacional de Unidades (SI), basándose, desde este momento, en constantes universales como la constante de Planck (h), la velocidad de la luz (c) y la carga elemental (e).

De este modo, nuestras mediciones son hoy exactas, reproducibles en cualquier lugar del universo y más confiables que nunca. Siendo los sensores cuánticos, de nueva generación, los que van a llevar esta precisión un paso más allá.

A diferencia de los sensores tradicionales, estos sistemas ofrecen una precisión y consistencia superior al mantenerse calibrados de forma natural gracias a sus constantes físicas subyacentes, eliminando el error por la pérdida gradual de precisión o de la deriva, que un sistema de medición clásico suele tener a lo largo del tiempo.

En última instancia, la sensórica y la metrología cuántica redefinirán los límites de lo que es posible medir y, por lo tanto, conocer y controlar.

FUNDAMENTOS DEL MUNDO CUÁNTICO

La sensórica cuántica es el campo de las tecnologías cuánticas con mayor potencial, a corto plazo, donde se espera que ocurran importantes aplicaciones prácticas fuera del laboratorio.

Según el último informe de McKinsey de 2025, la sensórica es la tecnología cuántica más cercana a su implementación comercial a gran escala. Esta tecnología ha alcanzado ya una fase de madurez en el ámbito de la investigación para desarrollar aplicaciones comerciales.

En comparación con la computación cuántica, aunque está progresando rápidamente, aún existen serias preocupaciones, sobre aspectos como su escalado o la corrección de errores. Los sensores cuánticos, por el contrario, tienen una ventaja objetiva gracias a la alta sensibilidad de sus estados cuánticos a las perturbaciones externas.

En el contexto de la Industria 4.0, la posibilidad de medir basándose en constantes fundamentales sin recurrir constantemente a recalibraciones externas y eliminando la deriva, una de las limitaciones más comunes de los sistemas de medición tradicionales, supone un cambio radical en nuestros procesos de medición y producción.

Tal y como apunta BCG¹, se está llevando a cabo una transición de la metrología basada en componentes físicos a un modelo basado en principios físicos que no cambian. Esto permite, por primera vez, una interoperabilidad global real en procesos de fabricación de alta tecnología, como la fotónica integrada o la nanofabricación de semiconductores, donde pequeños errores pueden tener un impacto muy elevado.

Para entender todo el potencial de los sensores cuánticos, se debe ir más allá de la comprensión convencional. Los sensores tradicionales funcionan como transductores que convierten una magnitud física en una señal eléctrica. Por el contrario, en los sensores cuánticos incorporan directamente fenómenos subatómicos forma parte del principio de funcionamiento.

Por esta razón, este tipo de sensores pueden ser altamente sensibles y precisos, ya que utilizan estados cuánticos como el elemento fundamental, no requiriendo correcciones frecuentes ni calibraciones externas. Es ahí donde reside buena parte de su ventaja y de su atractivo fuera del laboratorio.

La Superposición y la Sensibilidad Extrema

La superposición cuántica junto con otros aspectos como la coherencia o la interferencia, son los principios físicos que permiten la enorme precisión de los sensores cuánticos.

Mientras un sistema clásico solo puede estar en un estado a la vez, un sistema cuántico puede existir en varios estados simultáneamente hasta que se mide. Esto permite

¹ Boston Consulting Group

obtener una sensibilidad extrema a perturbaciones externas y es lo que hace que los sensores cuánticos sean muy precisos.

En términos matemáticos, un sistema cuántico puede describirse como una combinación de estados dentro de un espacio vectorial llamado espacio de Hilbert; cada estado lleva asociado un coeficiente complejo cuyo módulo al cuadrado indica la probabilidad de obtener un resultado al medir. La función de onda ψ recoge por completo ese estado y expresa cómo evoluciona en el tiempo la probabilidad de encontrar una partícula en un lugar concreto del espacio. La evolución en el tiempo permite ver qué resultados son más probables.

A modo de ejemplo, un sensor cuántico se puede ver como un sistema que tiene dos estados principales de energía, aunque no todos los tipos de sensores cuánticos tienen solo dos estados. El estado fundamental se denota como $|0\rangle$ y el estado excitado se denota como $|1\rangle$. La diferencia de energía entre estos dos estados se llama energía de transición y determina la frecuencia característica del sistema, dada por:

$$E = \hbar \omega_0$$

Donde $\hbar$ es la constante de Planck reducida y ω_0 la frecuencia de transición.

La energía cambia cuando aparece una interacción o perturbación externa, llamada $V(t)$ y la denominada frecuencia de transición puede experimentar una pequeña variación. De esta forma, la sensibilidad del sensor cuántico se puede definir como la variación de la energía o de la frecuencia frente a dicha perturbación.

Esta interacción externa $V(t)$ hace que la energía cambie, existiendo una la relación entre $\hbar$ y ω_0 , cuando hay una interacción externa $V(t)$.

$$\gamma = \frac{\partial E}{\partial V}$$

Siendo γ la sensibilidad del sistema frente a la perturbación. En definitiva γ indica cuánto cambia la energía del sistema si aplicamos una pequeña perturbación V .

Estas perturbaciones cambian la fase relativa entre los estados superpuestos. Incluso cambios muy pequeños se acumulan con el tiempo y se vuelven medibles. La interferometría es un ejemplo de cómo se pueden alcanzar resoluciones muy pequeñas, como el nanómetro (10^{-9} m) o el femtosegundo (10^{-15} s).

El Entrelazamiento: sincronización global

Cuando dos o más partículas quedan unidas de tal manera que el estado de cada una depende del estado de las demás, sin considerar la distancia entre ellas, se produce el entrelazamiento cuántico.

En la práctica, las partículas entrelazadas funcionan como si de sistema único y coherente se tratase. Lo que sucede en una de ellas tiene repercusiones en las demás.

Esto posibilita que, en la sensórica cuántica, numerosas partículas puedan reaccionar al mismo tiempo ante un estímulo externo, por ejemplo, una alteración gravitatoria o un campo magnético. Cuando se realiza de forma colectiva, la señal que se quiere medir se amplifica, mientras que el ruido aleatorio decrece, lo cual mejora considerablemente la relación entre la señal y el ruido. Reflejándose directamente en la precisión obtenida.

De forma general los sensores, denominados clásicos, están limitados por el Límite Cuántico Estándar (SQL), donde la incertidumbre disminuye con la raíz cuadrada del número de partículas N :

$$\Delta X \sim \frac{1}{\sqrt{N}}$$

En cambio, en los sistemas cuánticos, que están entrelazados, pueden acercarse al conocido Límite de Heisenberg, donde la precisión escala de forma mucho más favorable:

$$\Delta X \geq \frac{1}{N}$$

Esto implica una mejora cuadrática en la sensibilidad. Por tanto, el entrelazamiento convierte un conjunto de partículas en un sensor colectivo capaz de superar los límites de la medición clásica.

Coherencia y decoherencia: el desafío de la fragilidad

La capacidad de un sistema cuántico para mantener relaciones de fase bien definidas entre sus estados se puede considerar coherencia, ya que permite la superposición y, en ocasiones, el entrelazamiento. La coherencia es un recurso esencial en un sensor cuántico, ya que posibilita que el sistema reúna información acerca de las alteraciones externas mediante variaciones de fase, lo cual da como resultado mediciones más exactas.

Cuando la coherencia se ve afectada por la interacción con el medio, los efectos de interferencia que posibilitan la ventaja cuántica dejan de existir. El sistema continúa siendo cuántico desde el punto de vista físico, pero ya no tiene la capacidad de usar sus características para aumentar la sensibilidad; su desempeño se asemeja entonces al de un sensor clásico.

El principal desafío es que no resulta fácil preservar esa coherencia, debido a que cualquier componente del entorno, como las radiaciones, las vibraciones, el calor o los campos electromagnéticos, la alteran y destruyen el estado de superposición. Esto limita, por lo tanto, el tiempo disponible para medir.

Para prevenir la interferencia de factores externos, estos sistemas se enfocan en minimizar el contacto con el ambiente usando materiales específicos, enfriamiento

extremo para reducir la energía térmica y sistemas de aislamiento electromagnético y físico. Estas estrategias permiten que los sensores mantengan la coherencia durante un tiempo prolongado, lo cual les permite hacer mediciones muy precisas incluso fuera de ambientes controlados, como el laboratorio.

EL MECANISMO DE LA SENSÓRICA CUÁNTICA: DE LA PREPARACIÓN A LA LECTURA

Los sensores cuánticos operan de manera diferente a los sensores tradicionales. En lugar de limitarse a medir una magnitud física, requieren un protocolo específico antes, durante y después de llevar a cabo la medición. Este tipo de sensores preparan y controlan estados cuánticos que reaccionan ante perturbaciones externas y, que, a partir de esa interacción, generan una señal cuya variación se hace detectable con gran sensibilidad. Gracias a ello, pueden convertir propiedades que solo tienen sentido en el ámbito subatómico, como el espín atómico o la fase de onda, en señales detectables a escala macroscópica.

Estos estados cuánticos funcionan como instrumentos de detección muy sensibles que convierten variaciones mínimas, en el entorno, en resultados medibles, aprovechando los fenómenos cuánticos para sobrepasar los límites de la tecnología de sensores convencionales y realizar la medición.

Este protocolo se organiza en tres fases que aseguran la codificación, amplificación y lectura final de la información del entorno, siendo las fases más reconocidas de este protocolo, preparación del estado (inicialización), evolución (codificación/acumulación de fase), lectura (medición).

La etapa de inicialización consiste en preparar el sistema para que se encuentre en un estado controlado y definido. Para lograrlo, se utilizan microondas, láseres o señales de radiofrecuencia para enfriar y organizar los espines o las etapas de energía. De este modo, se establece un punto de partida estable con la menor interferencia posible. Después, el sistema interactúa con la magnitud que se desea medir, que puede ser, por ejemplo, rotación, gravedad o aceleración. En este momento, el estado cuántico se modifica y esta transformación, en general, queda registrada como un cambio de fase.

En este caso, el sistema funciona como un amplificador natural, donde mínimas alteraciones o interferencias se añaden o restan, y debido a efectos exclusivamente cuánticos, se consiguen detectar señales que están por debajo del límite clásico de sensibilidad. En esta etapa, el sistema se desarrolla bajo la influencia de la magnitud que se quiere medir y toma registro con una sensibilidad inalcanzable para la tecnología clásica.

Finalmente, se mide el estado cuántico y se convierte en un resultado clásico. Esta medición hace que el estado cuántico colapse, pero ya se ha recopilado la información. Al repetir el proceso múltiples veces y calcular un promedio de los resultados, se obtiene un valor final muy preciso.

TAXONOMÍA TECNOLÓGICA: LAS PLATAFORMAS FÍSICAS DE LA REVOLUCIÓN

Para clasificar los sensores cuánticos, de una forma rigurosa, debemos entender que este campo se divide no solo por la naturaleza física del sensor, sino también por el recurso cuántico que explota y la magnitud física que busca medir. Por tanto, sería apropiado considerar tres dimensiones:

1. **Clasificación funcional:** corresponde a la magnitud física medida. Define qué se detecta (p. ej., campos magnéticos, aceleración, temperatura, gravedad, etc.).
2. **Infraestructura tecnológica:** hace referencia a la plataforma física de implementación. Determina cómo se realiza la detección (p. ej., átomos ultrafríos, centros de nitrógeno-vacante en diamante, iones atrapados, circuitos superconductores, etc.).
3. **Recurso cuántico empleado:** alude a la propiedad cuántica que confiere ventaja frente a sensores clásicos. Incluye fenómenos como la coherencia, la superposición de estados o el entrelazamiento.

Este enfoque permite comprender no solo qué mide el sensor, sino también cómo lo hace y por qué puede superar los límites clásicos de precisión.

Desde el punto de vista industrial y estratégico, una segmentación por su tecnología o plataforma física es una de las clasificaciones más adoptadas. Esta se apoya principalmente en cuatro pilares tecnológicos:

- **Espines en estado sólido:**

(Centros nitrógeno-vacante (NV) en diamante y defectos cuánticos): los centros NV en diamante son imperfecciones atómicas que se producen cuando en una red cristalina de diamante, en lugar de tener dos átomos de carbono adyacentes, se reemplazan con un átomo de nitrógeno y una vacante.

A diferencia de los SQUID²s, que requieren criogenia, los centros de nitrógeno-vacante (NV) en diamante tienen un espín electrónico direccionable ópticamente, incluso a temperatura ambiente, por lo que los convierte en sensores cuánticos multifuncionales.

Esto posibilita la magnetometría nanométrica, que es útil para el control de calidad de chips y potencialmente en la detección precoz de enfermedades a través de campos magnéticos neuronales³. Gracias a su escala atómica, pueden también integrarse en puntas de microscopios o nanopartículas, logrando cartografía magnética subcelular. Y en la industria de semiconductores, posibilitan el análisis no invasivo de defectos en circuitos integrados.

² Supercomputing Quantum Interference Devices. Un SQUID es un dispositivo superconductores extremadamente sensible que mide campos magnéticos débiles mediante interferencia cuántica.

³ IDTechEx

Un reto fundamental es producir diamantes con centros NV controlados de manera reproducible.

– **Átomos neutros (Vapores y nubes ultrafrías):**

- **Vapores atómicos:** se basan en celdas selladas que contienen gases de átomos alcalinos (rubidio, potasio o cesio). Usados para medir campos magnéticos, logran, en algunos regímenes, sensibilidades parecidas a las de los SQUIDS, pero sin requerir criogenia, normalmente en condiciones de temperatura controlada, lo que posibilita la creación de dispositivos que son más compactos, útiles y fáciles de transportar.

Mediante técnicas ópticas, estos sistemas posibilitan la manipulación y lectura de la coherencia del espín atómico.

Con esta plataforma se ponen en funcionamiento los magnetómetros bombeados ópticamente (OPMs⁴). Los cuales detectan la precesión generada por campos magnéticos externos y alinean los espines atómicos a través del bombeo óptico láser.

- **Nubes ultrafrías (Interferometría):** se la utilización de átomos enfriados, en vacío, a temperaturas extremadamente bajas por láser. Por interferometría, de ondas de materia, estas pueden medir gravedad, rotación y aceleración con precisión absoluta, reduciendo significativamente la deriva de los sensores mecánicos.

– Circuitos superconductores (SQUIDS - dispositivos de interferencia cuántica superconductora y dispositivos Josephson):

Son sensores que se fundamentan en un anillo superconductor con una o dos uniones Josephson, por las cuales la interferencia cuántica a través de estas uniones permite detectar variaciones minúsculas de flujo magnético. Son los sensores de flujo magnético más sensibles. A pesar de que necesitan temperaturas criogénicas, son el estándar vigente en la magnetoencefalografía (MEG)⁵.

Con sensibilidades excepcionales en la escala de femtoteslas (10^{-15} T), pueden medir el flujo magnético, lo que posibilita la detección de señales magnéticas producidas por corrientes neuronales, incluso a través del cráneo humano.

Aunque los SQUIDS continúan siendo la norma en cuanto a medición biomagnética precisa, su uso más notable es la magnetoencefalografía, que posibilita el análisis de la actividad cerebral con resolución temporal de milisegundos, lo cual no es posible con técnicas de imagen estructural como la resonancia magnética.

⁴ Optically Pumped Magnetometer

⁵ MagnetoEncephaloGraphy

No obstante, se enfrentan a un reto estratégico en comparación con otros tipos de sensores cuánticos alternativos que funcionan a temperatura ambiente, sin requerir la criogenia. De momento, esta tecnología seguirá limitada a entornos controlados y estáticos hasta que se consiga una miniaturización eficaz de los sistemas de refrigeración. Esto deja mercados como los de movilidad, navegación de precisión o inspección de campo, al alcance de los sensores de NV en diamante, que, aunque presentan menor sensibilidad, ofrecen la ventaja de funcionar a temperatura ambiente y con sistemas compactos y portátiles.

– **Plataformas Emergentes y Especializadas:**

Aunque estas plataformas no han alcanzado todavía la madurez industrial de los vapores atómicos o de los Centros de Nitrógeno-Vacante o de los SQUID, constituyen al mismo tiempo líneas estratégicas con un alto potencial para la futura generación de sensores cuánticos.

- **Iones atrapados:** emplean átomos ionizados que se encuentran contenidos en trampas electromagnéticas dentro de cámaras de vacío. Gracias a su casi total aislamiento y al control individual por medio de láseres, proporcionan transiciones electrónicas muy estables y tiempos de coherencia extremadamente largos.
- **Átomos de Rydberg:** se fundamentan en átomos excitados a estados electrónicos muy elevados, en los que el electrón externo está alejado del núcleo. Esto les otorga una gran sensibilidad a las señales de radiofrecuencia y a los campos eléctricos.

– **Plataformas topológicas (en investigación):**

Se benefician de estados cuánticos que están protegidos por las características topológicas del material, las cuales tienen una resistencia inherente a la interferencia local y al ruido. A pesar de que siguen en estado experimental, estos sistemas tienen el potencial de posibilitar sensores más estables y menos susceptibles a la decoherencia.

Para traspasar las limitaciones de resolución de los sensores clásicos, cada plataforma hace uso de recursos cuánticos esenciales, sin embargo, su implementación industrial necesita un complejo balance técnico-económico, llamado desafío SWaP-C.

Este acrónimo, por sus siglas en inglés (*Size, Weight, Power and Cost*) resume los criterios de optimización de un sistema: tamaño, peso, potencia y coste.

APLICACIONES: DEL LABORATORIO A LA INDUSTRIA

Los sensores cuánticos están empezando a destacar en ciertos sectores estratégicos por el potencial de sus capacidades transformadoras. Están está siendo relevante en áreas muy diferentes, como son defensa, salud, navegación, geofísica o microelectrónica, y sin duda, tendrán un papel importante en la competitividad industrial en los próximos años. Con una sensibilidad mucho mayor que la de los sensores tradicionales y una precisión varias veces superior, esta tecnología puede captar magnitudes físicas que antes pasaban desapercibidas. Básicamente, permite detectar señales que estaban ocultas, lo que podría cambiar la forma en que entendemos nuestro entorno hoy en día.

En el ámbito de la defensa y la seguridad, actualmente se investigan tecnologías como los magnetómetros cuánticos (por ejemplo, SQUID y OPM), que se usarían para la observación submarina de baja detectabilidad. Estos permiten descubrir anomalías magnéticas (MAD⁶) capaces de captar señales que superan el rendimiento de los sensores tradicionales.

En telecomunicaciones e infraestructuras, el uso de relojes atómicos cuánticos será muy importante para la sincronización precisa de las futuras redes de comunicaciones. En el caso de vigilancia de infraestructuras críticas, los gravímetros y magnetómetros podrán ayudar a mapear cables y tuberías subterráneas, así como a detectar corrosión y fugas en gasoductos sin necesidad de intervención directa.

En salud y ciencia, prototipos basados en tecnologías como los OPMs están permitiendo sistemas de magnetoencefalografía portátiles que ya han demostrado mejoras en imagen y espectroscopía de alta resolución, sin requerir criogenia.

Una de las áreas con más impacto en la que se aplican los sensores cuánticos es en el transporte y la navegación, donde se puede lograr una navegación autónoma fiable incluso en sitios sin señal GPS, mediante la combinación de relojes atómicos con sensores inerciales como giróscopos cuánticos y acelerómetros.

En la industria, la geofísica y el medio ambiente se están utilizando magnetómetros y gravímetros cuánticos de átomos fríos para supervisar infraestructuras, investigar recursos y monitorizar peligros naturales y están ayudando a seguir la actividad volcánica, el mapeo de embalses y la localización de recursos estratégicos como gas, petróleo o minerales, todo ello sin requerir perforar el terreno.

Pese a que varias aplicaciones todavía se encuentran en desarrollo o en niveles de madurez de prototipo (TRL7 4-7), hay otras, como ciertos magnetómetros y los relojes atómicos de microondas, que ya están a la venta. Su desarrollo indica que para el año

⁶ Magnetic Anomaly Detection

⁷ TRL: Technology Readiness Level, o Nivel de Madurez de la Tecnología

2030 serán factores fundamentales en la soberanía tecnológica y en la innovación industrial.

ANÁLISIS DE MERCADO E IMPACTO SOCIOECONÓMICO

Como se ha mencionado anteriormente, la sensórica cuántica ha pasado de ser un campo exclusivamente científico para convertirse en un ámbito tecnológico que cuenta con una importancia económica y estratégica creciente.

A pesar de que las estimaciones del mercado varían según la metodología y el horizonte temporal usado por los analistas, el sector ya ha comenzado una etapa de validación comercial, sobre todo por sus aplicaciones en el sector de defensa y en el sector aeroespacial.

A corto plazo, existe consenso sobre la evolución del mercado entre los analistas. Se estima que se duplicará su mercado desde los 400 M\$ en el año 2024 a unos 900 M\$ en el año 2028. No obstante, a largo plazo las proyecciones divergen de manera importante, existiendo estimaciones que van desde los 5.000-10.000 M\$ s en 2035, hasta los 31.000 M\$ en 2040, en un escenario muy optimista (McKinsey 2025), lo que pone de manifiesto la sensibilidad que existe en este mercado respecto a la velocidad de adopción industrial esperada.

A pesar de que el volumen actual es pequeño, su viabilidad técnica a corto plazo y repercusión en sectores como la navegación de alta precisión, defensa y aplicaciones aeroespaciales, están captando el interés de los inversores, aunque por el momento de forma muy concentrada. Se estima que más del 80% del capital inversor se está dirigiendo hacia un grupo muy limitado de startups, en un entorno donde la inversión pública y privada al resto del ecosistema cuántico se está impulsado fuertemente.

En cuanto al mercado, los relojes atómicos son quienes acaparan la mayor parte de las inversiones en este momento, debido a la demanda de una sincronización muy precisa en telecomunicaciones de nueva generación. Simultáneamente, los gravímetros y los magnetómetros cuánticos están aumentando rápidamente su uso en áreas como la vigilancia de redes eléctricas, el biomagnetismo, la exploración espacial y la prospección de recursos naturales.

A pesar de que los análisis presentan variabilidad, el éxito antes de 2030 dependerá de vencer obstáculos relacionados con la escalabilidad, el coste y la industrialización.

Por otra parte, más allá de su relevancia económica y tecnológica, la sensórica cuántica, puede convertirse en un habilitador fundamental de objetivos socioeconómicos y medioambientales de la Agenda 2030 de Naciones Unidas.

Por ejemplo, ciertos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como puede ser el ODS 2 (Hambre Cero) podría beneficiarse directamente de la optimización de la gestión hidrológica y de la agricultura de precisión a través de gravímetros que puedan crear mapas de acuíferos subterráneos. El diagnóstico precoz de enfermedades oncológicas y neurodegenerativas a través de biosensores moleculares podría permitir que la

medicina de precisión sea más asequible, ayudaría a contribuir con el ODS 3 (Salud y bienestar).

Además, el desarrollo del ecosistema y establecimiento de nuevas infraestructuras, basadas en tecnologías cuánticas, promueve la innovación tecnológica y desarrollo de la generación de talento y puestos de trabajo muy especializados, particularmente en zonas que antes no estaban involucradas este tipo de tecnologías. Esto podría ayudar a reducir la desigualdad tecnológica y garantizar una distribución más equitativa del progreso económico y desarrollo científico.

DESAFÍOS TÉCNICOS Y EL HORIZONTE 2030

La sensórica cuántica tiene un gran potencial, pero su expansión dependerá de superar diferentes barreras y de su integración en las infraestructuras existentes, además de su sensibilidad a factores ambientales.

1. Barreras Técnicas y de Ingeniería

- La barrera de la decoherencia

Como se ha comentado, los estados cuánticos son extremadamente frágiles, (superposición, entrelazamiento...) la degradación se produce rápidamente debido al ruido ambiental, tales como vibraciones mecánicas, fluctuaciones térmicas y la radiación electromagnética. La sensibilidad intrínseca de un sensor cuántico está limitada por el tiempo de decoherencia esencial T_x . Mantener esta coherencia fuera de los laboratorios científicos especializados controlados es un desafío físico crítico para su evolución.⁸

- Miniaturización e Integración (SWaP-C)

El principal desafío tecnológico es la mejora de los aspectos SWaP-C. Por ejemplo, muchos de los sistemas actuales son voluminosos debido a la necesidad de infraestructuras complejas como cámaras de vacío, láseres de alta potencia o enfriamiento criogénico, especialmente para los SQUIDS. Esto hace que no se pueda utilizar en plataformas portátiles como drones o automóviles.⁹

- Miniaturización a escala de chip

Existe un reto técnico para mantener los niveles de precisión a escala de chip, que requiere desarrollar procesos avanzados para producir estos sensores a esa escala a través de tecnologías nanofabricación.

⁸ Quantum Technology Monitor 2025, McKinsey.

⁹ Ibid

2. Barreras Económicas y de Mercado

- Competencia con los sensores clásicos

En muchos mercados, los sensores convencionales, son tan precisos para su función, que no existe una necesidad técnica real para que un sensor cuántico se considere necesario.

- El valle de la muerte

Pasar de prototipos de laboratorio, con bajos TRLs a productos comerciales con un TRL alto, es extremadamente costoso y requiere mucho tiempo y esfuerzo, lo que habitualmente, produce reticencias en los inversores, ya que la inversión no siempre garantiza el retorno a corto o medio plazo.

- Los costes de implementación

Los elevados precios de compra iniciales y los costes operativos de los sistemas cuánticos actuales frenan la adopción generalizada de esta tecnología, en estas primeras etapas de desarrollo.

3. Barreras Sociales Éticas y Educativas

- Necesidad de concienciación, formación y difusión

Existe una gran oportunidad para aumentar la comprensión de los beneficios de la sensórica cuántica entre inversores, clientes y usuarios finales mediante programas educativos diseñados para presentar nuevas tecnologías. La formación y difusión pueden acelerar significativamente la adopción y el aprovechamiento de estas innovaciones.

- Consideraciones éticas

El desarrollo de sensores cuánticos enfrenta barreras por consideraciones éticas, ya que su capacidad para detectar fenómenos antes indetectables puede plantear riesgos de privacidad.

- Complejidad regulatoria

En sectores como el de la salud, los reguladores requerirán evidencias de seguridad y eficacia antes de aprobar el uso de nuevos dispositivos en diagnósticos basados en principios cuánticos.

4. Barreras de Escalabilidad

- Especialización del talento

La fabricación y el mantenimiento de sensores cuánticos, al igual que el resto de las tecnologías cuánticas, requiere de expertos altamente cualificados, lo que limita su escalado y la posibilidad de disponer de una producción en masa que ayude a su desarrollo más rápido.

- Integración con sistemas

La integración de este tipo de sensores en infraestructuras ya existentes requiere una personalización importante, ya que la ninguno de los sistemas actuales fue diseñado para integrar componentes de sensórica cuántica.

CONCLUSIONES

La sensórica cuántica es hoy en día uno de los pilares más firmes de la denominada segunda revolución cuántica o de forma más modesta y realista, de la segunda generación de dispositivos cuánticos.

Todos los analistas coinciden en señalar que ha superado la fase estrictamente experimental o científica y se está consolidado como una de las tecnologías cuánticas que, con aplicaciones reales, puede transformar áreas como la defensa, el medio ambiente, las telecomunicaciones, la industria de semiconductores, o la energía, por poner solo algunos ejemplos.

Existe también un consenso de que su ventaja competitiva, no solamente radica en llegar a conseguir sensibilidades extremas, sino también en proporcionar una estabilidad y exactitud libre de deriva. Lo que permite que estas características disminuyan recalibraciones constantes y reduzcan los costes de operación, habilitando oportunidades antes impensables.

Por otra parte, a diferencia de la computación cuántica, la sensórica ya opera en TRLs altos en múltiples aplicaciones y con proyectos reales en áreas estratégicas, no solo demostradores, representando una de las primeras tecnologías cuánticas con un retorno de inversión real tanto para usuarios como inversores.

Sin embargo, todavía debe vencer algunas barreras, porque el verdadero reto ya no está en el ámbito científico, sino en el industrial y en la ingeniería.

La miniaturización, la robustez, la estandarización y el fortalecimiento de cadenas de suministro especializadas serán elementos cruciales para que sean adoptados en masa este tipo de sensores en las siguientes décadas.

La sensórica cuántica tendrá la capacidad de expandirse desde nichos estratégicos hasta una implementación más extensa en otros sectores civiles, convirtiéndose así en una tecnología estructural de la economía digital y la soberanía tecnológica, únicamente

cuando se unan estos elementos: marcos regulatorios claros, fabricación a gran escala e ingeniería de fabricación madura.

El ecosistema mundial presenta un patrón que se repite en otras tecnologías estratégicas, donde la defensa actúa como catalizador al aportar financiación inicial, validación en contextos críticos, proporcionando los primeros contratos de volumen que ayudan a cruzar el llamado valle de la muerte, transformando la innovación en producto.

Europa ha decidido emplear una estrategia centrada en la creación de infraestructura científica y capacidades soberanas a largo plazo mediante programas colaborativos, redes paneuropeas de instrumentación como el Proyecto Europeo de Infraestructura Cuántica para Gravimetría, Equip-G (por sus siglas en inglés) y convocatorias abiertas.

Todo esto se desarrolla en el marco de programas como Quantum Flagship, Horizon Europe y EuroHPC-JU entre otros. Este enfoque confiere importancia a un modelo de soberanía, gobernanza y desarrollo colaborativo.

En España, este dinamismo se manifiesta en el desarrollo de un ecosistema emergente y competitivo en el campo de la sensórica cuántica, apoyado por centros de investigación y consorcios tecnológicos que consideran que la metrología y la sensórica son áreas con grandes posibilidades de aplicación inmediata en el mercado. Además, se tiene el respaldo de programas públicos de financiación que ayudan a desarrollar tecnologías avanzadas.

Se puede afirmar que la sensórica cuántica ya no es una promesa, sino una transformación estructural en la forma en que se realizarán las mediciones y se llegará a conocer el entorno. Se inicia así una nueva etapa, en la cual la ventaja tecnológica dependerá de quién tenga una visión más a largo plazo para integrar, escalar, manejar y de esta forma, sacar partido de esta nueva tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

- Revista española de metrología. <https://www.e-medida.es/>
- BizkaiaTech <https://www.bizkaia.eus/es/web/bizkaiatech>
- Prof. Pablo Acedo: “Quantum Sensing and Metrology”
- Understanding Quantum Technologies. Olivier Ezratty
- Quantum Sensing Use Cases: Prospects and Priorities for Emerging Quantum Sensors
- The Next Five Years of Quantum Technology: Hype vs. Reality. Dr Tess Skyrme, IDTechEx
- Quantum Sensing Applications. Quantum Delta. The Netherlands
- Quantum sensing’s untapped potential: Insights for leaders. McKinsey Digital
- Demystifying the Quantum Technology Market. Dr Tess Skyrme, IDTechEx
- Quantum Sensing. Pitchbook. Ali Javaheri
- Quantum Sensing: Comparing the United States and China. Greg Austin. February 2024

- 2025 Global Quantum Sensing Industry Development Outlook. February, 2025
- The Global Quantum Sensor Market: Solid Growth But Spanning a Diverse Technology/Product Base. Bob Sorensen.
- Quantum Technology Monitor. McKinsey Digital. Junio 2025

SOBRE LOS AUTORES

Juan Miguel Ibáñez de Aldecoa Quintana es ingeniero industrial (especialidad electrónica) por la Universidad Pontificia Comillas (ICAI-ICADE). Cuenta también con un Máster en Dirección de Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones por la Universidad Politécnica de Madrid.

Juan Luis Calvo Sanz es Ingeniero Técnico en Informática por la Universidad Politécnica de Madrid y cuenta con un Máster en Dirección de Tecnologías de la Información por IDE-CESEM.