

PERSPECTIVAS DE ARGENTINA FRENTE A LA SEGUNDA REVOLUCIÓN CUÁNTICA, EN EL AÑO INTERNACIONAL DE LA CIENCIA Y LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS (IYQ2025)

■ **Mariela Portesi¹, Silvia Ledesma² y
Leandro Tosi³**

¹ Vicedirectora del Instituto de Física La Plata (IFLP)
Investigadora CONICET - Profesora Ordinaria FCEX /
Universidad Nacional de La Plata.

Tesorera de la Asociación Física Argentina (AFA) - Miembro
del Colegiado Directivo de AAPC

² Profesora Titular Consulta, FCEN, UBA Investigadora
Principal de CONICET

Secretaria de Investigación, FCEN, UBA

Secretaria de la Red Iberoamericana de Óptica.

³ Investigador Grupo de Circuitos Cuánticos Bariloche, CAB-
CNEA. Investigador CONICET. Docente Instituto Balseiro,
UNCUYO-CNEA.

El presente número ha surgido como un aporte desde la Asociación Física Argentina (AFA) con motivo del **Año Internacional de la Ciencia y las Tecnologías Cuánticas (IYQ2025)**, establecido por la Organización de las Naciones Unidas para reconocer el siglo transcurrido desde el desarrollo inicial de la mecánica cuántica. Esta iniciativa mundial, a la que nuestro país adhirió, ha perseguido proponer actividades a todos los niveles destinadas a aumentar la concientización pública sobre la importancia de la ciencia cuántica y sus aplicaciones.

La física cuántica fue concebida para explicar la interacción entre la radiación electromagnética y los átomos. Gran parte de las tecnologías presentes hoy en el mundo como la electrónica, las comunicaciones y los dispositivos para procesar la información, la óptica (incluyendo los láseres), la mecánica (incluyendo las aleaciones), la ciencia de materiales (incluyendo a los superconductores) y las aplicaciones médicas (como la resonancia magnética nuclear), entre otras, se sustentan fuertemente en la comprensión profunda de los mecanismos de interacción entre la radiación electromagnética y la materia, y de las propiedades de todos los tipos de materiales, obtenida durante el último siglo a partir de la mecánica cuántica. Esa primera "revolución cuántica" ciertamente le ha dado su forma a nuestro mundo moderno. Ha dado lugar, además, a grandes debates vinculados a los fundamentos de la teoría cuántica, que han sido abordados inclusive desde las ciencias sociales. Sin embargo, no estamos extrayendo todo el potencial de la mecánica cuántica.

En efecto, todos los diferentes grados de libertad en los sistemas físicos pueden ser protagonistas en la mecánica cuántica, y pueden comportarse cuánticamente si son puestos en las condiciones adecuadas. Experimentos pioneros en los años '80, galardonados en 2025 con el Premio Nobel de Física, demostraron que circuitos eléctricos realizados por el ser humano, mucho más grandes que los electrones que orbitan alrededor del núcleo de un átomo, pueden en efecto entrar en el régimen cuántico, y ser preparados en un estado cuántico correspondiente a una superposición de corrientes fluyendo en direcciones opuestas en el cable. Más aún, hoy en día pueden fabricarse sistemas macroscópicos cuyo movimiento mecánico está dictado por estos comportamientos anti-intuitivos de la cuántica, y la operación en estos límites ha llevado al desarrollo por ejemplo de sensores (de posición, masa, energía, etc) con sensibilidades impensadas en el pasado e inaccesibles en sistemas clásicos. El diseñar y fabricar dispositivos, y de forma más general máquinas, cuyas variables de estado (como posición y momento, polarización, espín o por ejemplo las corrientes en circuitos eléctricos) se comportan según las leyes de la mecánica cuántica, constituye la gran visión de la “segunda revolución cuántica” de la ciencia y la tecnología, que está hoy en sus albores con iniciativas de máxima prioridad en los países y comunidades más desarrolladas del mundo, e incluso en las empresas globales más poderosas de nuestro planeta (IBM, Intel, Google, Microsoft, etc). Si su alcance llegará a ser tan grande como el de la “primera revolución”, con impacto inmenso en áreas originalmente no previstas, es algo que aún no se sabe. Pero de lo que la comunidad científica en el mundo, y quienes toman decisiones políticas respecto a la inversión en ciencia y tecnología, están convencidos, es que posee el potencial para cambiar las reglas del juego en muchas tecnologías al dar lugar a máquinas capaces de realizar tareas más allá de los límites de sus versiones clásicas, independientemente de cualquier progreso que puedan tener estas tecnologías convencionales.

El ejemplo paradigmático de la ciencia y las tecnologías cuánticas es hoy el de las “**computadoras cuánticas**” cuyos **principios básicos (ver Artículo 1)** y **posibles implementaciones físicas (ver Artículo 2)** constituyen actualmente un activo campo de investigación y desarrollo. Efectivamente, un procesador cuántico, incluso con un número moderado de bits cuánticos o qubits, podría dar lugar a una potencia enorme de cálculo gracias a la riqueza de la información cuántica y al carácter intrínsecamente paralelo de la evolución en los sistemas cuánticos. Esto resulta relevante especialmente para algunas tareas específicas para las cuales las máquinas clásicas son limitadas. Si bien una verdadera computadora cuántica es todavía un objetivo no alcanzado, varios laboratorios y empresas en el mundo ya operan, utilizando diversas tecnologías, procesadores con algunas centenas de bits cuánticos. Más aún, las potencialidades de las tecnologías cuánticas no se limitan al caso “modelo” de la computación cuántica. Simuladores cuánticos, sensores operando más allá del límite “estándar” del ruido cuántico, manipulación y propagación de información con estados cuánticos (por ejemplo para la criptografía físicamente inviolable usando fotones individuales), y la riqueza de los procesos y métodos cuánticos, constituyen áreas de oportunidad para nuevas tecnologías, materiales y métodos.

En el marco de la “segunda revolución cuántica”, las iniciativas gubernamentales en los países desarrollados (principalmente en Estados Unidos, países de Europa, Canadá, China, Japón y Australia) apuntan entonces a generar nuevos conocimientos y tecnologías que se estima tendrán impacto económico en gran diversidad de áreas incluyendo la energía, la salud, las tecnologías de la información, la salvaguarda, y la seguridad. Además, implementan planes activos para la educación en estas nuevas tecnologías. **Argentina no debe quedar excluida de estas tecnologías del Siglo XXI.** Resulta crítico y oportuno participar de estos avances científicos y tecnológicos identificando áreas de impacto inmediato en el país. Entendemos que la comunidad científico-tecnológica y educativa de nuestro país puede hacerlo apuntando al conocimiento fundamental y al desarrollo experimental. Hay una comunidad fuerte en el estudio de los fundamentos de la mecánica cuántica, en el modelado de sistemas cuánticos con disipación y decoherencia, en el estudio de termodinámica cuántica y sistemas cuánticos forzados, en el estudio de correlaciones cuánticas en el sensado y métodos de procesamiento de información cuántica, y también en el área del software cuántico. Las plataformas experimentales están también avanzadas en el área de los dispositivos eléctricos y ópticos de estado sólido, en las plataformas de iones atrapados, en el área de las comunicaciones cuánticas y en el desarrollo de herramientas electrónicas para procesamiento. **Una de las búsquedas de esta edición es dar cuenta del estado de situación en el país.** Viendo las capacidades actuales y su potencial, la participación de Argentina en el mundo de las ciencias y la tecnologías cuánticas podría hacerse en una instancia de transición entre la primera y segunda revolución cuántica, partiendo de los materiales y tecnologías actuales, para incursionar en aquellos dispositivos, materiales y procedimientos propios de la nueva segunda revolución cuántica. Toda innovación requiere, sin embargo, una inversión continua para permanecer actualizados, extraer el máximo de oportunidades de los recursos

disponibles, y aportar valor con nuevos desarrollos tecnológicos. Si estos desarrollos no se hacen localmente, deberán ser adquiridos implicando transferencia de recursos a terceros. El hacerlos, por otro lado, abre posibilidades de impacto nacional pero también tiene potencialidad en mercados regionales e internacionales.

Las nuevas tecnologías cuánticas, particularmente en lo relacionado a técnicas por resonancia magnética nuclear, encuentran especial campo de aplicación en el desarrollo de biomarcadores específicos y mejora de la resolución espacial para la medicina predictiva, preventiva, personalizada y participativa, que junto a otros desarrollos aportan al nuevo enfoque Una Sola Salud (One Health). En la **resonancia magnética nuclear (ver Artículo 3)** la segunda revolución cuántica encuentra grandes oportunidades de aplicación. Esto es porque los espines nucleares que se detectan representan un arreglo de entidades cuyas propiedades e interacciones responden a procesos cuánticos, y pueden por lo tanto ser manipulados y sondeados utilizando tecnologías basadas en la información cuántica. En este caso se utilizan típicamente espines de núcleos atómicos presentes naturalmente en los tejidos y procesos biológicos (siendo los más abundantes el protón hidrógeno, y el isótopo radioactivo del carbono, ^{13}C), y se utiliza como biomarcador por ejemplo su densidad, su difusión, y/o la dinámica temporal, las cuales pueden ser específicas a los diferentes tejidos, y particularmente a las características de estos en diferentes estados fisiológicos y patológicos. En la actualidad los biomarcadores relacionados con procesos y funcionalidades orgánicas se utilizan con una resolución espacial del orden del mm^3 . La detección temprana, específica y de mayor resolución espacial que se conseguiría con los desarrollos propuestos sería crítica para la prevención y mejor tratamiento de enfermedades, como el diagnóstico temprano de cáncer y su evolución luego de tratamientos con radio-, quimio- y/o inmunoterapia, y para estudios de funcionalidad en particular en temáticas de neurociencias y las consiguientes mejoras en el diagnóstico de enfermedades neurodegenerativas (como por ejemplo la enfermedad de Alzheimer), cuya prevalencia se ve incrementada con el crecimiento vegetativo de la población a nivel mundial.

El desarrollo de **sensores ultrasensibles (ver Artículo 4)** y de gran resolución espacial para detección de partículas o para el acceso metrológico a fenómenos físicos representa otra área accesible y competitiva, de gran impacto potencial a nivel local. En el mundo de los dispositivos de estado sólido, esto va de la mano de la comprensión de los materiales. Hay nuevos materiales que se han comenzado a llamar materiales cuánticos, por sus singulares propiedades, como protección topológica (asociada a las propiedades de las bandas de valencia y conducción y no a la forma del material). Desde el punto de vista metrológico, la ventaja es la trazabilidad. Más en general, el desarrollo local de estas tecnologías trae como beneficios la sustitución de importaciones, así como la posibilidad de ser competitivos en un mercado internacional. Por otro lado, la detección usando sensores de estado sólido de señales débiles como la de fotones únicos, masas o desplazamientos ultrapequeños, requiere la implementación de paradigmas nuevos. El desarrollo de dispositivos basados en sistemas cuánticos permitirá llegar al extremo físico de detección. Un sinnúmero de aplicaciones se verían afectadas por un incremento en la sensibilidad de detección, así mismo habilitaría el desarrollo de nuevos paradigmas de sistemas de detección. Otra aplicación que se visualiza es su utilización en radares "cuánticos", que plantean un método de detección de objetos que es prácticamente indetectable por el blanco observado.

Además, las tecnologías cuánticas aparecen como la única manera posible para **comunicaciones seguras (ver Artículo 5)**, a través del encriptado inviolable de claves mediante manipulación y propagación de fotones únicos en fibras ópticas. El desarrollo de detectores de fotones únicos, y el desarrollo de protocolos y métodos para su propagación en fibras, sería un primer paso en el sentido de aportar a estas tecnologías en la Argentina.

En un mundo en fuerte desarrollo, cada vez más competitivo, para la generación de riqueza y provisión de bienestar a su población, nuestro país necesita evitar el lugar de atraso tecnológico. **Los grupos de investigación en Argentina poseen la capacidad para emprender estos desarrollos, con personal cualificado en las áreas de las ciencias físicas y afines.** Se requiere para esto de la inversión indispensable en adecuaciones edilicias que soporten los requerimientos de estos nuevos laboratorios, la adquisición de equipamiento hoy inaccesible en Argentina, y la consolidación en la formación de recursos humanos especializados en estos nuevos conocimientos y tecnologías. Esperamos que ese sea el camino emprendido por nuestro país en los albores de esta nueva revolución cuántica.