



MARÍA LUQUE

Palabras clave: comunicación cuántica, computación cuántica, geopolítica, cooperación, diplomacia.

EL TRILEMA DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN EL RENACER GLOBAL DE LOS BLOQUES GEOPOLÍTICOS

# Un elefante cuántico en la sala

El sueño del Internet cuántico pone de manifiesto cuán necesaria es la cooperación internacional para construir infraestructuras tecnológicas. El escenario geopolítico, polarizado, plantea límites a esta cooperación tecnológica, y reduce los factores que determinarán estos esquemas a un trilema.

The trilemma of quantum technologies in the global revival of geopolitical blocks

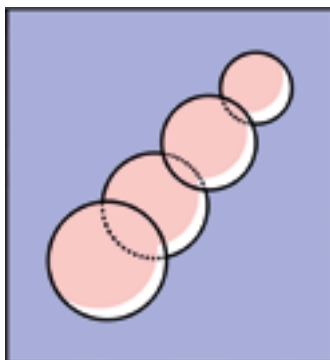
### A QUANTUM ELEPHANT IN THE ROOM

The dream of the quantum Internet highlights the need for international cooperation to build technological infrastructures. The polarized geopolitical scenario poses limits to this technological cooperation, and reduces the factors that will determine these schemes to a trilemma.

Keywords: quantum communication, quantum computing, geopolitics, cooperation, diplomacy.



ILUSTRACIÓN: NADIA HAFID



Las tecnologías cuánticas ofrecen oportunidades para dar un salto cualitativo en diferentes ámbitos que necesitan no solo de nuevas soluciones, sino de nuevos caminos para llegar a ellas. Se trata de una tecnología que se apoya en las leyes fundamentales de la naturaleza para proveer de músculo: sentir de manera más aguda (metrología y sensorización cuánticas), ver con mayor claridad, contemplar ángulos diferentes (simulación cuántica), analizar más rápido (computación) y comunicar de manera más segura (comunicación)<sup>1</sup>. Se trata de tecnologías habilitadoras de potencial transformador que rompe el *status quo* del equilibrio global —cómo y cuán efectivamente me protejo— y generan a su alrededor una carrera geopolítica por obtener sus rendimientos en un mundo cada vez más polarizado, con el objetivo de obtener una ventaja cuántica.

Para conseguirla, a largo plazo, necesitamos escalar física y operativamente los desarrollos tecnológicos en los que trabajamos actualmente, como la computación y la comunicación cuántica.

Encontramos un ejemplo paradigmático en el caso del Internet cuántico. Y es que necesitamos no un ordenador, sino una red de computación para alcanzar la fuerza computacional que requiere el resolver grandes desafíos. Es difícil construir ordenadores cuánticos lo suficientemente grandes para resolver los grandes desafíos de nuestra época. Investigadores en todo el mundo señalan que, para llegar a ese estadio, necesitamos un ordenador cuántico distribuido, esto es, uno que funcione en red<sup>2</sup>. Porque el poder de la computación cuántica reside en tener un gran número de *qubits*<sup>3</sup>. Y para eso, necesitamos una red de *networking* cuántico, un Internet cuántico que entrelace un significativo número de *qubits*.

No solo para lo anterior, también podemos aprovechar una red distribuida de nodos cuánticos para mejorar la *seguridad de las redes de comunicación*, y para mejorar la arquitectura de la conectividad global, con un control más exhaustivo del flujo de información. El Internet cuántico se presenta así como un posible relevo del sistema nervioso de la conectividad global, representando el desafío conjunto de la computación y de la comunicación cuántica. Y del *software* habilitador —los algoritmos cuánticos— que operen en la red, en lo que a computación se refiere.

La construcción de un Internet cuántico presenta desafíos técnicos a corto y largo plazo. La computación cuántica se encuentra en desarrollo, y algo tan básico como mantener la coherencia de los estados cuánticos de los *qubits* —la capacidad computacional— se trabaja desde diferentes perspectivas, desde los iones atrapados a las juntas super-

conductoras. La comunicación cuántica, base de la interconexión de la red, afronta desafíos como la pérdida paulatina de la intensidad de la señal fotónica a medias distancias, la corta memoria de los repetidores cuánticos o la dolorosa sincronización, necesaria para hacer efectivo el entrelazamiento entre fotones.

A la hora de afrontar estos retos, será clave el desarrollar soluciones y *hardware* que sean interoperables: diferentes tipos de repetidores cuánticos deberían poder trabajar entre ellos, redes heterogéneas deberían poder integrarse a medida que los “cinturones” de Internet se interconecten. Para ello, el desarrollo común de estándares tecnológicos será clave.

Con la tecnología aún en su infancia, hay que trabajar pensando en las grandes infraestructuras que lo habilitarán. Afianzando pasos en esta aventura, Europa tiene la Alianza del Internet Cuántico<sup>4</sup>. Estados Unidos tiene Q-Next, el programa nacional de ciencias de la información cuánticas.

El ejemplo del Internet cuántico pone de manifiesto cuán necesaria es la cooperación entre ecosistemas de innovación para alcanzar estas cotas de desarrollo tecnológico. Los ecosistemas público-privados de I+D actuales se mantienen dentro de los límites de las fronteras nacionales, tal es el caso de los Estados Unidos o China. O dentro de las fronteras del continente europeo, en el caso de la Unión Europea<sup>5</sup>. Sin embargo, será potencialmente necesario explorar estas fronteras, diluirlas, en algunos casos, para desarrollar por completo infraestructuras operativas como el Internet cuántico. Será necesario un papel protagonista del Estado en estos proyectos.

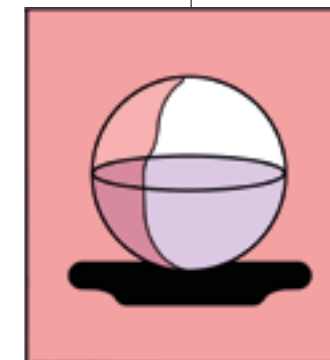
El escenario geopolítico actual, polarizado y con la seguridad física y digital de los países en riesgo, plantea lími-

tes a la cooperación necesaria para llevar a cabo proyectos internacionales. Se materializan de nuevo las narrativas Occidente frente a Oriente. Volvemos cíclicamente a la guerra, explícitamente multidimensional: psicológica, física, digital. Las tecnologías cuánticas prometen darnos un respiro en lo que a protección y defensa de las comunicaciones y de las conexiones se refiere, con un compromiso a largo plazo —el desarrollo paulatino de computación y comunicación conectada—, una misión —la soberanía tecnológica como garante de un orden liberal— y una necesidad de colaboración para alcanzar estos hitos.

Frente a esta necesidad, naciones en todo el globo afrontan un conflicto de confianza y de cooperación que deberán resolver para plantear su hoja de ruta nacional en lo referente a las tecnologías cuánticas. En este escenario, cada país tendrá que hacerse preguntas en dos dimensiones: ¿con quiénes coopero? y ¿con qué contribuyo ¿con quién gano, con quién pierdo?.

Para ayudarse a dar respuesta a las preguntas anteriores, se propone un sencillo esquema de tres dimensiones que es necesario ponderar a la hora de elaborar una estrategia cuántica: el trilema cuántico. Que consta de:

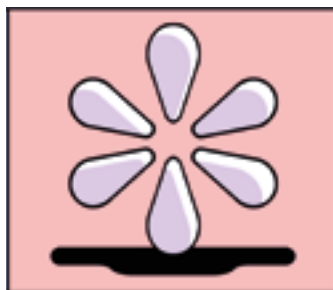
**El desarrollo de estándares tecnológicos.** Ser proactivos generando estándares de calidad y de construcción técnica determinará la influencia de cada país, o de cada bloque, en la generación de productos finales de tecnologías cuánticas: desde la construcción de repetidores cuánticos, hasta la *suite* de protocolos para poner en marcha nodos de una red<sup>6</sup>, pasando por la estructura de los cinturones de comunicación cuánticos: enteramente



Necesitamos no un ordenador, sino una red de computación para alcanzar la fuerza computacional que requiere resolver grandes desafíos

1 Ezratty, O. (2021). “Understanding Quantum Technologies” en *Le Lab Quantique*.  
 2 Quantum Internet Research Group. *Architectural Principles for a Quantum Internet*. IETF, 2022. Disponible en: <https://www.ietf.org/id/draft-irtf-qirg-principles-10.html#name-introduction>  
 3 Fundeu recomienda el uso de *cúbit* en vez del inglés *qubit*. No obstante, al estar extendido el uso de *qubit*, hemos preferido mantener el criterio de cada autor/a.  
 4 Más información sobre el Quantum Internet Alliance en: <https://qi.eu/about-quantum-flagship/projects/european-quantum-internet-alliance/>  
 5 Acin, A. et al. (2018). “The quantum technologies roadmap: a European community view” en *New J. Phys.* Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/aad1ea>  
 6 Kozłowski W.; Dahlberg A. y Wehner S. (2020). “Designing a quantum network protocol” en CoNEXT. Proceedings of the 16th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. Disponible en: <https://research.tudelft.nl/en/publications/designing-a-quantum-network-protocol>  
 7 Más información en: <https://www.nist.gov/news-events/news/2020/07/nists-post-quantum-cryptography-program-enters-selection-round>

# El escenario geopolítico actual plantea límites a la cooperación necesaria para llevar a cabo proyectos tecnológicos internacionales



8 Más información en: <https://www.cenelec.eu/areas-of-work/cen-cenelec-topics/quantum-technologies/>  
 9 Más información en: [https://www.escondigital.com/ciberseguridad/la-comunicacion-cuantica-tensa-la-carrera-hacia-la-ciberseguridad-en-europa\\_31519\\_102.html](https://www.escondigital.com/ciberseguridad/la-comunicacion-cuantica-tensa-la-carrera-hacia-la-ciberseguridad-en-europa_31519_102.html)  
 10 Más información en: <https://eurohpc-ju.europa.eu/calls/call-expression-interest-hosting-and-operation-european-quantum-computers-integrated-hpc>

cuánticos, implementados en superposición sobre estructuras de comunicación clásicas —Internet— y otras múltiples piezas y arquitecturas.

Ser un *standard-setter*, que implica, a la par, que los estándares sean aceptados por países y por potenciales fabricantes, también determinará con qué grado de dependencia tecnológica de otros países construimos nuestros sistemas tecnológicos. En este sentido, actores públicos y privados han trabajado conjuntamente en el seno de la Unión de Telecomunicaciones Internacional (ITU) para desarrollar estos estándares. Estados Unidos espera para 2022-2023 el set de estándares del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST)<sup>7</sup>, que trabaja con diversas iniciativas nacionales y con el consorcio industrial QED-C. La Unión Europea ha presentado su estrategia de estandarización, y se esperan esfuerzos conjuntos del organismo de estandarización CEN-CENELEC<sup>8</sup>, la Comisión y la industria cuántica europea. La pregunta aquí sería determinar en qué corriente de estándares nos apoyamos, y si coadyuvamos a desarrollarla, invirtiendo capacidades nacionales de I+D.

**La transferencia tecnológica.** Será necesario articular modelos de transferencia tecnológica entre países y entre regiones para cooperar en el desarrollo de infraestructuras conjuntas. Como ejemplo, la Unión Europea desarrolla la Infraestructura de Comunicación Cuántica (EuroQCI) cooperando con empresas y centros de innovación de los 27 países europeos. Y éstos implementan sus proyectos de comunicación cuántica, como España, con miras a integrarlos, o a que sean interoperables, con esta infraestructura europea, que plantea en sus contratos de desarrollo mantener la completa propiedad intelectual de la tecnología desarrollada<sup>9</sup>. Encontramos un ejemplo diferente en los Estados Unidos, que plantean la cooperación bilateral estratégica con países amigos, en acercamientos 1-1, en su *National Strategic Overview for Quantum Information Science* (2018). La pregunta aquí sería en qué ámbitos o dimensiones de desarrollo de tecnologías cuánticas estamos dispuestos a cooperar, o en qué ámbitos necesitamos cooperar.

**El modelo energético.** El uso energético de los futuros ordenadores cuánticos, y de estos conectados en red, plantea actualmente preguntas sobre eficiencia energética y sostenibilidad medioambiental difíciles de contestar. Como planteamiento más experimental, proponemos seguir la

pista de las últimas investigaciones científicas, que esgrimen que la energía requerida para la refrigeración de los ordenadores cuánticos es significativamente mayor que la energía requerida para computar, un patrón inverso al que presenta la computación convencional. Diseñar ordenadores cuánticos, centros de computación y cinturones de comunicación de un Internet cuántico nacional, regional o, quién sabe, global, requerirá resolver conjuntamente el reto de generar sistemas de refrigeración efectivos, cuyo uso energético no escale con el tamaño del sistema. Planteamos, siempre en nuestra opinión, que es probable que el garantizar la sostenibilidad energética de las infraestructuras cuánticas haya de tener en cuenta la geopolítica energética del momento, y que requieran estos esfuerzos de alianzas en dimensiones más allá de la tecnológica.

Tras esgrimir estrategias en estas aristas, será imprescindible pensar en esquemas de incentivos a la hora de cooperar con otros países: ¿Con quién y por qué genero interdependencias de uso de lo cuántico? Analizar qué países podrán usar nuestros algoritmos, quiénes obtienen vía libre para comprar nuestro desarrollo tecnológico. Un análisis de capacidades y de necesidades enfocado a enriquecer el desarrollo tecnológico mediante la cooperación, garantizando un uso rentable y escalable de nuestras tecnologías. Sirviendo la tecnología al desarrollo de soluciones comunes a retos compartidos.

Teniendo en cuenta que, con la cooperación en la construcción de infraestructuras compartidas, surge la necesidad de especialización o de trabajo planificado y en red, algo que fomenta, por ejemplo, la Unión Europea, y que puede verse también en sus recientes expresiones de interés para hospedar y operar, de manera descentralizada, ordenadores cuánticos integrados en el EuroHPC, el ecosistema de supercomputación europeo<sup>10</sup>.

Con los anteriores dilemas en mente, los países han de ser activos determinando su papel en los órdenes colectivos de desarrollo tecnológico que se generen en estos bloques. Países como Reino Unido, China, Estados Unidos, Alemania, Japón, Australia, Israel, Rusia, Francia y Taiwán han lanzado ya sus estrategias cuánticas nacionales.

Tanto estos como los países restantes han de esgrimir una estrategia propia que permita que su inversión cuán-

tica dé réditos en el medio y en el largo plazo. Esto pasa por proveer al ecosistema de I+D y empresarial con un mercado amplio para sus aplicaciones comerciales (capital), por alimentar proyectos comunes que garanticen nuestro bienestar y seguridad (intangibles comunes) y por reservarnos la ventaja competitiva que nos permita conservar nuestra seguridad y nuestra libertad en este mundo polar (el interés nacional).

Se hace necesario articular una diplomacia tecnológica responsable para elevarse como potencias cuánticas, articulando una visión para sí y para el mundo. A nivel de país, se habrá de establecer una visión y misión nacional, priorizando estratégicamente las líneas de desarrollo del proyecto nacional, así como las líneas de I+D prioritarias. En su relación con el mundo, será necesario plantear estrategias que creen esquemas de cooperación comunes. Entrelazando intereses con

otros países, así como se entrelazan fotones.

En un mundo polar en el que las ganancias se hacen tangibles si actuamos de manera colectiva, se torna en responsabilidad salir al mundo a hacer la diplomacia de lo que necesitamos, de lo que no queremos, y de lo que estamos dispuestos a contribuir. El mundo tiende hacia una supremacía cuántica a la carta: de nacionalización o cooperación y especialización. Trabajemos en una verdadera diplomacia tecnológica, identificando y cooperando en resonancia con nuestros compañeros de viaje.

## Bibliografía

- Aguado, A.; López, V.; Diego, D.; Peev, M.; Poppe, A.; Pastor, A.; Folgueira, J.; y Vicente, M. (2019). "The engineering of software-defined quantum key distribution networks" en *IEEE Communications Magazine*. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1907.00174>
- Kozłowski W.; Dahlberg A. y Wehner S. (2020). "Designing a quantum network protocol", CoNEXT 2020 - Proceedings of the 16th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies, pp. 1-16. Disponible en: <https://research.tudelft.nl/en/publications/designing-a-quantum-network-protocol/>
- Martin, M.; Hughes, C.; Moreno, G.; Jones, E.; Sickinger, D.; Narumanchi, S. y Grout, R. (2021). "Energy use in quantum data centers: Scaling the impact of computer architecture, qubit performance, size, and thermal parameters" en *National Renewable Energy Laboratory*. Disponible en: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2103/2103.16726.pdf>
- U.S. National Science & Technology Council (2018). *National Strategic Overview For Quantum Information Science*. Disponible en: [https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/2018\\_NSTC\\_National\\_Strategic\\_Overview\\_QIS.pdf](https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/2018_NSTC_National_Strategic_Overview_QIS.pdf)