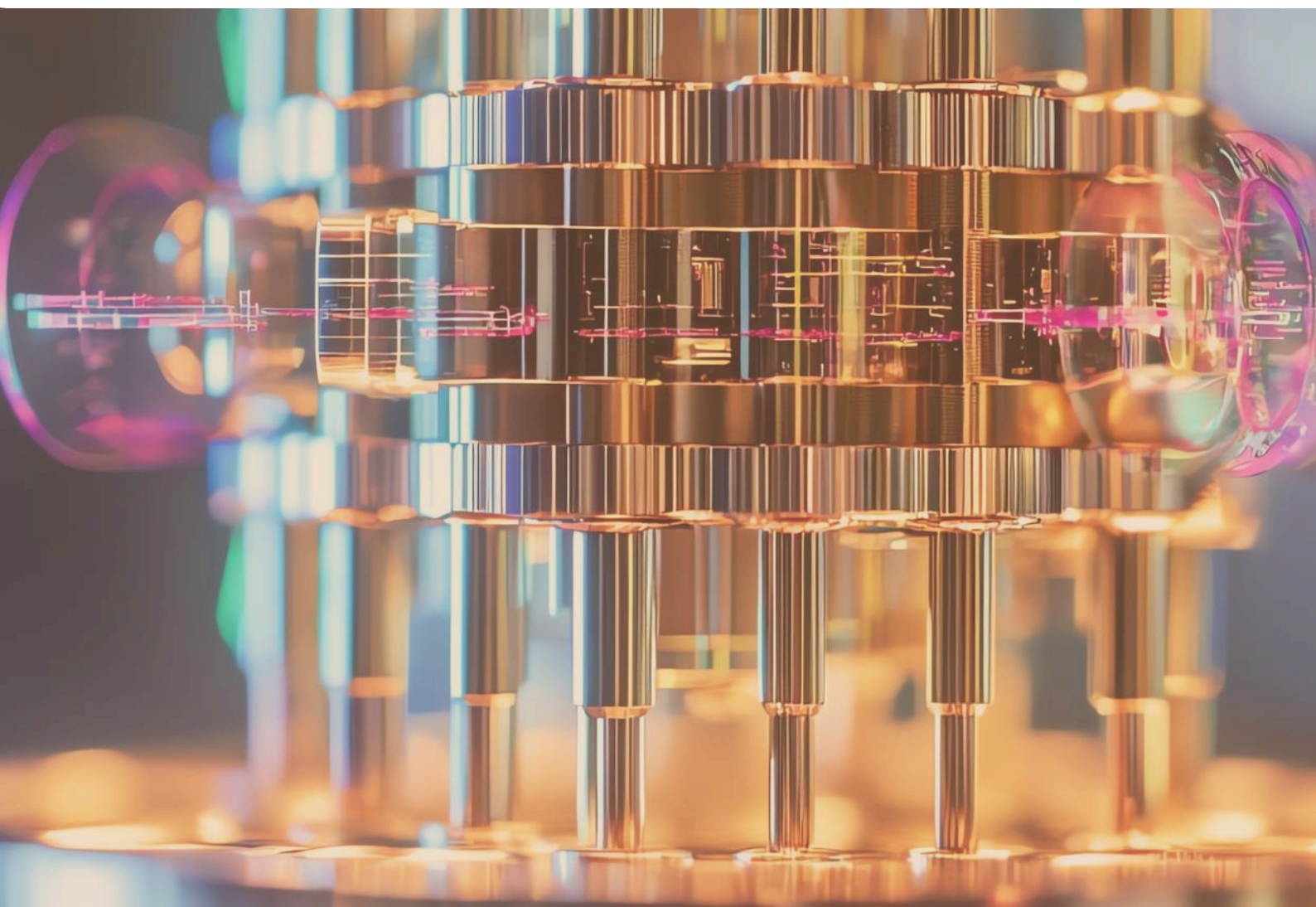


White paper - **Computación Cuántica en España: Oportunidades y Retos para un Ecosistema Competitivo**



Ayuda PTR2024-002903 financiada por:

Secretaría técnica a cargo de:



Plataforma Tecnológica Española
de Tecnologías Disruptivas



MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



AGENCIA
ESTATAL DE
INVESTIGACIÓN



ÍNDICE

Resumen ejecutivo	1
1. Introducción	2
2. Panorama Actual del Ecosistema Cuántico Español (2025)	3
3. Capacidades y Fortalezas	5
3.1. Infraestructura y Centros de Investigación	5
3.2. Red Empresarial	6
3.3. Aplicaciones Reales y Casos de Uso	7
3.4. Colaboración Internacional	8
4. Retos Estratégicos	9
4.1. Madurez y Desafíos Tecnológicos	9
4.2. Estrategia Nacional Coordinada	11
4.3. Escasez de Talento Especializado	12
4.4. Financiación Limitada	16
4.5. Riesgos de Seguridad Cuántica	16
5. Sinergias con Tecnologías Disruptivas	17
5.1. Inteligencia Artificial (IA) y Big Data	18
5.2. Blockchain	21
5.3. Ciberseguridad	24
5.4. 6G y Comunicaciones	27
5.5. Accesibilidad Digital	29
6. Rumbo hacia el Liderazgo Cuántico	31
6.1. España como Hub Cuántico Europeo	31
6.2. La necesidad de la aplicación cuántica en las industrias	32
6.3. Palancas de Transformación	36
6.4. Visión de Largo Plazo	36
7. ¿Cuánto vale la cuántica y cuál es su potencial?	37
7.1. Un marco para medir los intangibles del ecosistema español (enfoque Futurlytics®)	37
7.2. Capitales de valor	37
7.3. Tres perspectivas de valoración	38
8. Responsabilidad ética, sostenible e inclusiva	39
8.1. Sostenibilidad y gobernanza responsable	39
8.2. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible	41
8.3. Ética aplicada y salvaguardas frente al sesgo	42
8.4. Diversidad, igualdad e inclusión como motor de excelencia	44
8.5. Hacia una inteligencia cuántica compartida	45
9. Conclusión y Llamado a la Acción	45
Anexo A. Participantes en la elaboración del white paper	47
Anexo B. Referencias y Documentación Técnica	49
Anexo C. Siglas y Acrónimos	53

RESUMEN EJECUTIVO

Este white paper ofrece una visión completa del estado de la computación cuántica en España en 2025, destacando el rápido avance del país gracias a nuevas infraestructuras, una red creciente de empresas especializadas, la Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas y su integración en programas europeos. Analiza fortalezas como el tejido científico-técnico, los primeros casos de uso reales y las sinergias con IA, blockchain, ciberseguridad y 6G, pero también señala retos clave: coordinación institucional, escasez de talento, financiación limitada y riesgos de seguridad.

El documento propone palancas estratégicas para consolidar a España como hub cuántico europeo y subraya el potencial económico, industrial y social de esta tecnología, planteando un llamado a la acción para acelerar su adopción y garantizar un desarrollo ético, sostenible e inclusivo. También se reflejan los primeros casos de uso reales en sectores como salud, energía, finanzas y logística, así como la participación activa de España en iniciativas europeas como EuroHPC y EuroQCI.

Entre los principales retos, el informe identifica la falta de madurez tecnológica del hardware, la necesidad de una estrategia nacional más cohesionada, la escasez de talento especializado y la financiación privada limitada, además del riesgo que supone la futura capacidad de los ordenadores cuánticos para vulnerar la seguridad criptográfica actual. Así, se subraya la importancia de acelerar la adopción de criptografía post-cuántica y del despliegue de redes cuánticas de comunicación seguras, en paralelo al desarrollo industrial.

El trabajo concluye que España se encuentra en un punto de inflexión: cuenta con fortalezas científicas y empresariales suficientes para convertirse en un hub cuántico europeo, pero requerirá ejecutar eficazmente su estrategia, atraer talento y asegurar una gobernanza y financiación sostenidas. La computación cuántica se plantea así como un motor de competitividad, seguridad digital y desarrollo sostenible, cuya consolidación exige decisiones estratégicas inmediatas para garantizar un impacto real antes de 2030.

1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías cuánticas representan uno de los pilares de la próxima revolución científica y tecnológica. Entre ellas, la computación cuántica ocupa un lugar central, ya que permite procesar información de manera radicalmente distinta a los ordenadores tradicionales. Basada en fenómenos como la superposición y el entrelazamiento, ofrece la posibilidad de resolver problemas complejos en tiempos reducidos, abriendo la puerta a avances disruptivos en campos como la medicina, la energía, la seguridad y las finanzas, entre otras. Este año 2025 ha sido proclamado por UNESCO (junto con la United Nations General Assembly) como el “International Year of Quantum Science and Technology (IYQ)”, destacando el papel clave de la ciencia cuántica en el desarrollo sostenible, la innovación y la cooperación global.

Europa ha situado las tecnologías cuánticas como una prioridad estratégica. Programas como el Quantum Flagship (1.000 M€), la European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) y el EuroHPC marcan la hoja de ruta para garantizar la soberanía digital europea. España participa activamente en este movimiento a través de iniciativas como Quantum Spain, que con más de 22 M€ de inversión busca crear una red nacional de ordenadores cuánticos accesibles. A esta iniciativa se suma la Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas 2025–2030, recientemente aprobada, que constituye el primer marco integral para coordinar la investigación, la formación y la transferencia tecnológica en este ámbito. Aunque su despliegue operativo aún está en fase inicial, esta estrategia representa un punto de inflexión para nuestro país: alinea la política científica e industrial con la agenda cuántica europea y sienta las bases para transformar la inversión pública en capacidades tecnológicas sostenibles y competitivas.

El impacto de la computación cuántica no es únicamente tecnológico: también es económico y geopolítico. La carrera cuántica marcará la competitividad de las naciones y su capacidad de liderazgo en la economía digital del futuro.

En paralelo a estos desarrollos estratégicos, comienzan a emerger casos reales de aplicación cuántica en dominios concretos, incluso utilizando circuitos poco profundos y compatibles con las limitaciones actuales del hardware cuántico. Un ejemplo significativo es el uso de algoritmos híbridos de Quantum Machine Learning para la clasificación de consumidores, donde investigadores de la Universitat de Barcelona y la Universidad Mediterránea de Reggio Calabria, en un piloto realizado con datos reales, han logrado resultados ligeramente superiores a los modelos clásicos en tareas de predicción aplicada al marketing. A esto se suma el avance en el sector logístico, donde se están implementando algoritmos cuántico-clásicos para optimizar rutas, inventarios y gestión de flotas, con el objetivo de reducir costes operativos y emisiones mediante la exploración simultánea de múltiples soluciones en problemas de alta complejidad. Asimismo, en el ámbito energético ya se están aplicando algoritmos cuánticos en proyectos piloto para mejorar la planificación del flujo de potencia en redes eléctricas, facilitar la integración de energías renovables y optimizar las estrategias de almacenamiento, con mejoras potenciales en eficiencia y sostenibilidad.

Este tipo de experiencias refuerzan la idea de que la computación cuántica ya no es solo una promesa de futuro, sino una herramienta emergente que empieza a prometer valor real. La posibilidad de mejorar la sensibilidad de los modelos sin aumentar la complejidad computacional, o de ajustar decisiones sin necesidad de reentrenamiento profundo, abre nuevas oportunidades para sectores como la salud, la banca, la logística o la energía. La transición hacia una cuántica útil, incluso en hardware ruidoso de escala intermedia (NISQ), ya está en marcha.

2. PANORAMA ACTUAL DEL ECOSISTEMA CUÁNTICO ESPAÑOL (2025)

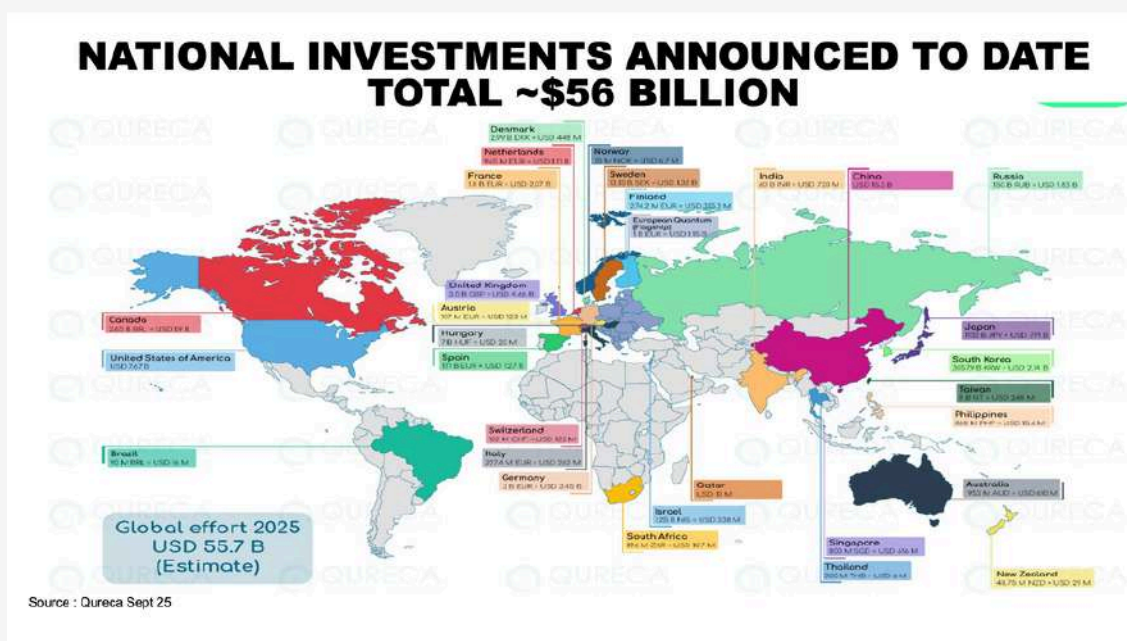
España vive un momento decisivo en el desarrollo de la computación cuántica. El año 2025 ha supuesto un punto de inflexión para el ecosistema cuántico español. Durante este periodo, España ha pasado de una fase de consolidación institucional a la definición de una estrategia nacional con proyección europea, combinando avances en infraestructura, industria y gobernanza. La Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas 2025–2030, presentada por los Ministerios de Ciencia e Innovación y de Transformación Digital, contempla una inversión pública superior a 800 millones de euros, con un potencial tractor estimado de hasta 1.500 millones si se moviliza la inversión privada y europea asociada. Este esfuerzo sitúa a España entre los países europeos con mayor compromiso presupuestario relativo respecto a su PIB en el ámbito cuántico.

En el terreno científico y tecnológico, centros como Qilimanjaro Quantum Tech, IQM España, Gradient, Eurecat, CTIC o ITG se han consolidado como impulsores del ecosistema cuántico nacional, contribuyendo al desarrollo de tecnologías de computación, comunicaciones seguras y arquitecturas híbridas cuántico-clásicas. A su vez, instituciones y organizaciones como el Barcelona Supercomputing Center (BSC), Basque Quantum (BasQ), el ICFO, TECNALIA, CESGA y el CSIC continúan liderando el desarrollo de capacidades en hardware, comunicaciones y simulación. Destaca la instalación en el BSC del primer ordenador cuántico de acceso público en España, conectado a la red EuroHPC, lo que sitúa al país entre los pocos con infraestructura cuántica integrada en el sistema europeo de supercomputación.

La dimensión industrial ha experimentado también un impulso significativo. Empresas como LKS Next, Quantum Mads, Quside, aQuantum, VeriQloud y Quantum Shield, junto con startups como Multiverse Computing, LuxQuanta, Qilimanjaro, QCentroid, Inspiration-Q y Barbara IoT, han consolidado su presencia internacional y colaboran activamente en proyectos europeos que vinculan la computación cuántica con sectores estratégicos como finanzas, energía, salud y defensa. Estas empresas ejemplifican la transición del conocimiento científico hacia la innovación aplicada, con un creciente interés de inversores públicos y privados.

El Estado ha reforzado su compromiso con el desarrollo cuántico mediante la financiación de proyectos orientados a la comunicación cuántica segura, como MadQCI y la iniciativa paneuropea EuroQCI, que impulsan el despliegue de redes cuántico-clásicas con distribución de claves cuánticas (QKD) como elemento central de resiliencia y soberanía digital. En paralelo, el CSIC, con el apoyo de la Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial (SEDIA), ha puesto en marcha en Asturias un simulador cuántico basado en átomos de Rydberg, concebido como infraestructura estratégica para avanzar hacia un futuro computador cuántico universal de desarrollo nacional y fortalecer las capacidades de investigación e innovación del país.

Foto 1: National Investments Announced to Date total \$50 billion



Fuente: Qureca septiembre 2025

A nivel comparativo, España ha consolidado su posición como actor emergente dentro del ecosistema cuántico europeo. Aunque su inversión total aún es inferior a la de potencias como Alemania (3.000 M€) o Francia (1.800 M€), el país avanza en el despliegue de capacidades científicas e infraestructuras estratégicas. No obstante, persisten desafíos relevantes en materia de coordinación institucional, donde la publicación tardía de una estrategia nacional y la limitada articulación entre administraciones, comunidades autónomas y sectores productivos ralentizan la consolidación de un modelo competitivo a escala global. De igual modo, la transferencia tecnológica hacia la industria aún requiere un impulso decidido que permita transformar el conocimiento ya generado en aplicaciones comerciales y en generación de valor económico sostenido.

En conjunto, 2025 marca el tránsito de España de la fase experimental a la estructuración de un ecosistema cuántico maduro. Con una estrategia nacional de largo plazo, infraestructuras operativas y startups competitivas, el reto inmediato será transformar esta base en una cadena de valor industrial y tecnológica sostenible, capaz de generar impacto económico, empleo cualificado y soberanía digital antes de 2030.

3. CAPACIDADES Y FORTALEZAS

El ecosistema cuántico español cuenta con una base sólida compuesta por centros de excelencia, empresas innovadoras y proyectos estratégicos que lo posicionan en el mapa europeo. Estas capacidades constituyen los pilares sobre los que España puede afianzar su liderazgo en el desarrollo de tecnologías cuánticas.

3.1. Infraestructura y Centros de Investigación

El núcleo de un ecosistema tecnológico competitivo reside en sus infraestructuras y en su capacidad para generar y transferir conocimiento. En los últimos años se ha consolidado en el país una red de instituciones que combinan excelencia científica, atracción de talento y cooperación internacional. Estos nodos estratégicos impulsan la investigación básica, la formación avanzada y la creación de prototipos con potencial de transferencia industrial.

Algunos de los muchos referentes que podemos encontrar son:

- Barcelona Supercomputing Center (BSC): pionero en la integración entre supercomputación y computación cuántica, participante en el proyecto HPCQS dentro de EuroHPC.
- Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA): especializado en simulación molecular y modelado de materiales.
- Biqain: hub referente de innovación bajo la estrategia Basque Quantum (BasQ) que impulsa proyectos de investigación con aplicabilidad directa en empresas locales.
- CSIC: alberga grupos de investigación en comunicaciones cuánticas, hardware cuántico (átomos de Rydberg, qubits moleculares) y algoritmos.
- TECNALIA: referente nacional en hardware, comunicaciones y ciberseguridad cuántica, con laboratorios punteros en chips de diamante.
- Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO): líder en fotónica aplicada y comunicaciones seguras.
- Eurecat: centro tecnológico especializado en quantum machine learning y criptografía post-cuántica.
- Quercus Software Engineering Group (UEx): ingeniería de software cuántico, especializado en el diseño, verificación y optimización de algoritmos y lenguajes cuánticos.

El ámbito universitario refuerza esta red con programas de posgrado y doctorado en tecnologías cuánticas, ingeniería de la información o algoritmos híbridos, ofrecidos por distintas universidades y centros de investigación nacionales. En conjunto, estas instituciones participan activamente en proyectos europeos, colaboran con la industria y consolidan una base científica y formativa con impacto internacional.

Foto 2: Ordenador cuántico



Fuente: Shutterstock

3.2. Red empresarial

El tejido empresarial cuántico se ha convertido en uno de los motores más dinámicos del ecosistema nacional. En pocos años, diversas startups y pymes tecnológicas han logrado posicionarse en el panorama internacional, ofreciendo soluciones de hardware, software y servicios avanzados. Muchas surgen como *spin-offs* universitarias o de centros de investigación, ejemplificando una transferencia tecnológica eficaz y la conexión entre ciencia y mercado.

Entre los principales actores destacan:

- **Multiverse Computing:** soluciones cuántico-inspiradas basadas en redes tensoriales para la optimización y compresión de modelos de IA.
- **Qilimanjaro:** desarrollo de hardware accesible y sistemas de control de superconductores.
- **LuxQuanta:** comunicaciones seguras mediante distribución de claves cuánticas (QKD).
- **Quside:** componentes de alta precisión para sistemas de generación y detección cuántica.
- **QCentroid:** solución de computación cuántica “as a service” (QaaS) y plataforma QuantumOPS que permite el desarrollo y la integración de algoritmos cuánticos en múltiples proveedores.
- **LKS Next:** desarrollo de aplicaciones cuánticas combinando computación cuántica, IA y gemelos digitales, e integración de soluciones postcuánticas en IoT.
- **Quantum Mads:** soluciones de optimización, predicción y simulación, en formato SaaS y a medida, mediante modelos híbridos que combinan HPC, IA y computación cuántica
- **Inspiration-Q:** start-up del CSIC especializada en algoritmos de inspiración cuántica para optimización, finanzas y aprendizaje automático.
- **aQuantum, Entanglement Partners y Quantum Motion:** ampliación de la red nacional de innovación.

Este entramado industrial aplica la tecnología cuántica a sectores estratégicos como las finanzas, la salud, la energía, la logística o la defensa, contribuyendo a diversificar la economía y reforzar la competitividad internacional del país.

3.3. Aplicaciones Reales y Casos de Uso

La computación cuántica está pasando de la investigación teórica a la aplicación práctica. En el ámbito nacional se desarrollan proyectos piloto que validan su potencial en sectores de alto impacto económico y social, demostrando su utilidad en escenarios reales y fortaleciendo la posición de España como espacio de experimentación tecnológica.

Ejemplos relevantes incluyen:

- **Salud:** simulaciones moleculares para acelerar el descubrimiento de fármacos.
- **Finanzas:** optimización de carteras y evaluación de riesgos mediante algoritmos cuánticos.
- **Logística:** planificación de rutas y gestión de flotas en entornos complejos.
- **Energía:** optimización de redes inteligentes y predicción de demanda.
- **Ciberseguridad y defensa:** desarrollo de protocolos de criptografía post-cuántica en colaboración con organismos especializados.

Estos proyectos evidencian la transición de la investigación fundamental a la innovación industrial y consolidan la reputación del país como laboratorio europeo de aplicaciones cuánticas.

Un ejemplo representativo de esta transición es el proyecto CUCO, liderado por **GMV**, que reunió a un consorcio de seis empresas (BBVA, DAS Photonics, GMV, Multiverse Computing, Qilimanjaro Quantum Tech y Repsol), cinco centros de investigación (BSC, CSIC, DIPIC, ICFO y Tecnalia) y una universidad pública (Universitat Politècnica de València). Este proyecto impulsó el desarrollo y validación de algoritmos cuánticos aplicados a sectores estratégicos de la economía española —energía, finanzas, espacio, defensa y logística—, consolidando un modelo de colaboración público-privada pionero en el ámbito cuántico nacional.

Foto 3: España en el ecosistema



Fuente: Generada por IA

3.4. Colaboración Internacional

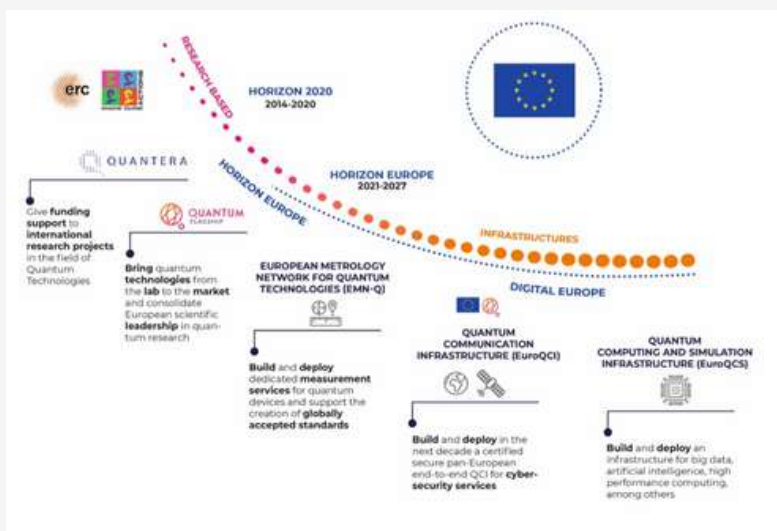
La cooperación exterior es un eje central de la estrategia nacional. La participación activa en consorcios multilaterales permite acceder a financiación competitiva, infraestructuras avanzadas y redes de talento, acelerando la madurez del ecosistema.

España se integra en algunos de los principales programas europeos en tecnologías cuánticas:

- **Quantum Flagship:** más de veinte proyectos en curso de la Unión Europea, con ejemplos como OpenSuperQ+ para desarrollo de hardware escalable o PASQuanS2 para simulación de sistemas complejos en física y química.
- **HPCQS:** integración de simuladores cuánticos en la infraestructura de supercomputación continental.
- **Quantum Internet Alliance (QIA):** construcción del futuro internet cuántico europeo.
- **EuroQCI:** despliegue de redes seguras de comunicación cuántica con participación nacional destacada.
- **RIPAISC:** promoción de la colaboración entre universidades, centros tecnológicos y empresas de España e Iberoamérica.

La implicación en estas iniciativas consolida la posición de España como actor cooperativo dentro del Espacio Europeo de Investigación, contribuyendo a la creación de una industria cuántica competitiva y alineada con los principios de soberanía tecnológica y responsabilidad ética promovidos por la Unión Europea. La participación española en programas europeos facilita el acceso a proyectos de gran escala, pero no sustituye la consolidación de un tejido industrial completo. Europa dispone de los recursos necesarios, pero competir con las grandes potencias requiere una coordinación más intensa del sistema para fortalecer la competitividad y el liderazgo en tecnologías cuánticas.

Foto 3: From vision to reality - The Quantum Fleet



Fuente: EU Flagship

4. RETOS ESTRATÉGICOS

El desarrollo de la computación cuántica en España ha avanzado de manera notable durante los últimos años, impulsado por programas como Quantum Spain y su integración en la infraestructura europea EuroHPC. Sin embargo, el ecosistema nacional aún enfrenta barreras estructurales, tecnológicas y organizativas que deben superarse para consolidar una posición competitiva dentro del espacio europeo y global.

Estos desafíos no son únicamente tecnológicos: abarcan también la coordinación estratégica, el talento, la financiación y la seguridad. En conjunto, se articulan en cinco ejes interdependientes.

4.1 Madurez y desafíos tecnológicos

Aunque España cuenta con capacidades destacadas en hardware fotónico, software cuántico y comunicaciones seguras, la tecnología global se mantiene en una fase precomercial (*NISQ*). Persisten limitaciones en fidelidad y coherencia de los qubits, corrección de errores y escalabilidad de los sistemas, lo que impide alcanzar aún la denominada *ventaja cuántica útil*, entendida como el punto en el que un ordenador cuántico resuelve un problema de interés práctico más rápido o con mayor eficiencia que cualquier sistema clásico.

Pese al número significativo de empresas activas en el ámbito de software y aplicaciones, la participación en eslabones adyacentes de la cadena de valor como la fabricación, componentes, control o QEC es minoritaria. Esta situación entraña riesgos relevantes para el territorio, que afectan a la autonomía tecnológica, la atracción de inversión, la generación de talento y la capacidad de trasladar la I+D a mercado.

I. Modelos de negocio frágiles y dependientes del hardware: gran parte de las empresas, cercanas al software, dependen de hojas de ruta de terceros y se ven obligadas a buscar ingresos adyacentes para sobrevivir durante la maduración tecnológica.

II. Aplicabilidad guiada por capas de bajo nivel: por naturaleza tecnológica, las primeras oportunidades comerciales las captarán quienes controlen implementación de bajo nivel, la interacción con el hardware.

III. Déficit de fabricantes y arrastre de inversión: sin tractores de hardware y componentes, se reduce el efecto llamada de CAPEX e inversión privada.

IV. Internacionalización limitada: la integración vertical de grandes fabricantes y la baja demanda limitan cuotas de mercado para software vendors independientes.

V. Acceso costoso y complejo a plataformas: barreras de acceso y precios desalineados con la utilidad frenan la experimentación y la prueba de valor.

VI. Atracción y retención de talento debilitada: la ausencia de empresas en fabricación, QEC, control e instrumentación reduce el pull para perfiles críticos.

VII. Efecto arrastre insuficiente sobre sectores adyacentes: electrónica, fotónica, criogenia pierden oportunidades de escalado.

VIII. Fuga de IP y datos sensibles: uso forzoso de nubes/plataformas extranjeras en fases críticas de I+D.

IX. Dependencia estratégica: limita la soberanía tecnológica y la capacidad de influencia sobre decisiones en la UE

Superar este umbral requerirá:

- Investigación fundamental sostenida: inversión en materiales avanzados, electrónica criogénica y control cuántico.
- Corrección de errores cuánticos (QEC): desarrollo de técnicas escalables para convertir qubits físicos en qubits lógicos fiables, garantizando la ejecución de algoritmos complejos sin pérdida de información y favoreciendo la interoperabilidad de plataformas cuánticas.
- Desarrollo industrial: creación de estándares europeos de interoperabilidad y consolidación de una base nacional de fabricación y ensamblaje cuántico.
- Arquitecturas híbridas: integración efectiva entre supercomputación (HPC) y computación cuántica (QC) para acelerar aplicaciones reales.
- Ingeniería de Software Cuántica: un desafío complementario es la consolidación de metodologías y herramientas específicas de ingeniería de software cuántica. La estandarización de procesos de desarrollo, verificación y validación de algoritmos cuánticos es clave para acelerar la madurez tecnológica y garantizar su fiabilidad. Iniciativas como RIPAISC promueven marcos metodológicos comunes y formación especializada en ingeniería cuántica de software, facilitando la interoperabilidad entre plataformas y la adopción industrial.

La integración de la computación cuántica con la inteligencia artificial y la supercomputación plantea un reto de gobernanza tecnológica. Europa debe garantizar que las infraestructuras híbridas sean eficientes, seguras y éticas, evitando concentraciones de poder y fomentando la autonomía estratégica abierta que promueven el European Chips Act y el Digital Europe Programme.

La ventana estratégica está abierta y la preparación del entorno operativo va por delante del “salto de los qubits”; quien consolide ahora integración, talento y propiedad intelectual en estas capas capturará más valor cuando lleguen los primeros sistemas tolerantes a fallos.

4.2. Estrategia Nacional Coordinada

La reciente aprobación de la Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas 2025-2030 representa un avance fundamental hacia una gobernanza más cohesionada del ecosistema español, situando la inversión pública en torno a 808 millones de euros con capacidad de movilizar financiación adicional pública y privada. No obstante, su despliegue aún requiere un marco de coordinación más sólido que integre de forma efectiva las capacidades existentes en universidades, centros de investigación, empresas tecnológicas y administraciones públicas.

Diversos análisis señalan que persisten retos en cuanto a sincronización de iniciativas y alineación operativa entre los distintos niveles de decisión y ejecución, lo que provoca solapamientos, duplicidades y ritmos desiguales en el desarrollo de infraestructuras, programas formativos y vías de adopción industrial.

El reto para los próximos años consiste en articular una hoja de ruta nacional única, con mecanismos estables de colaboración interregional y participación ampliada del sector privado, además de una integración efectiva con prioridades europeas como EuroQCI, Quantum Flagship y EuroHPC.

Abordar estas carencias permitirá transformar la masa crítica ya existente en ventajas competitivas sostenibles, reduciendo el riesgo de pérdida de posicionamiento internacional en la carrera cuántica.

Una coordinación nacional sólida permitiría:

- Optimizar recursos y evitar duplicidades.
- Priorizar áreas estratégicas como hardware, software o criptografía.
- Reforzar la cooperación internacional y la integración en consorcios europeos.

La reciente Estrategia Española de Tecnologías Cuánticas, impulsada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, representa un paso significativo hacia esta meta. Su planteamiento integral – que combina investigación básica, transferencia tecnológica, emprendimiento y seguridad – ofrece una oportunidad para articular una gobernanza nacional coherente. No obstante, su éxito dependerá de la capacidad para pasar del diseño estratégico a la ejecución efectiva, con un liderazgo claro, indicadores de seguimiento y mecanismos de coordinación interterritorial que garanticen continuidad más allá de los ciclos políticos.

Una entidad coordinadora que supervise la implementación, alineada con los programas europeos y con participación del sector privado, permitiría dotar de coherencia a las distintas iniciativas y maximizar el impacto de la inversión pública.

Foto 4: Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas



Fuente: Gobierno de España

4.3. Escasez de Talento Especializado

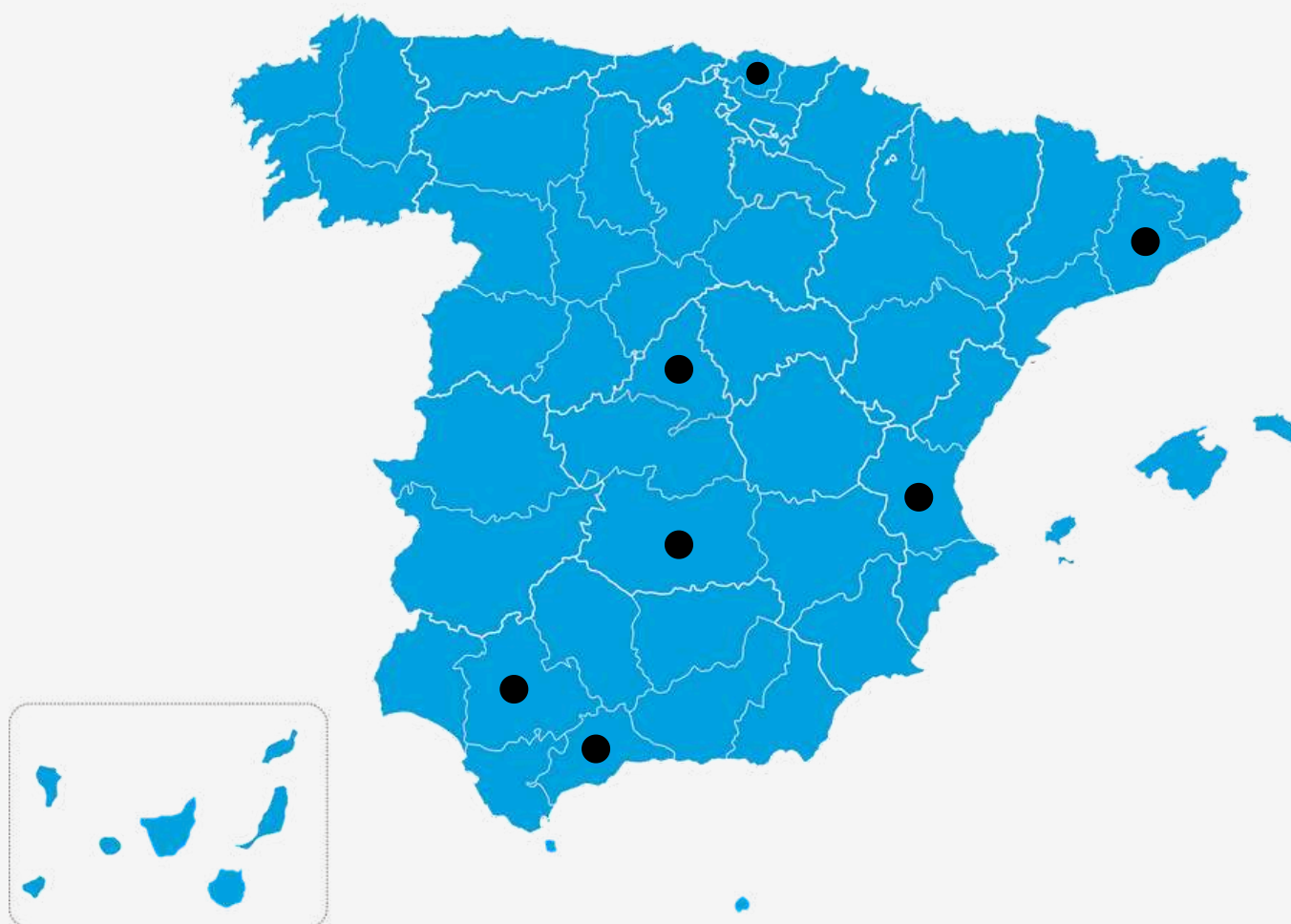
El talento es uno de los recursos más determinantes para el éxito del ecosistema cuántico. Europa necesitará más de 20.000 especialistas en la próxima década, mientras que España avanza en la ampliación de su oferta académica para responder a esa demanda emergente.

Actualmente, en distintas universidades del país se imparten más de una docena de programas de posgrado especializados que abarcan ámbitos como computación cuántica, comunicaciones seguras, tecnologías habilitadoras y aplicaciones industriales. Entre las propuestas más destacadas se encuentran los másteres de la Universitat de Barcelona (en colaboración con la Universitat Autònoma de Barcelona y la Universitat Politècnica de Catalunya), la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), la Universidad Nebrija, la UIMP junto con el CSIC (Menéndez Pelayo), la Universidad de Sevilla (US), la Universidad de València (UV) y la Universidad del País Vasco (EHU), junto con otras iniciativas orientadas a la formación técnica avanzada. Aunque la evolución general es positiva, la consolidación y retención del talento siguen siendo retos estratégicos para asegurar la disponibilidad futura de profesionales altamente cualificados en España.

Además, existen numerosas instituciones que ofrecen otros programas, cursos e iniciativas vinculadas al ámbito cuántico, entre ellas la Universidad de Málaga, la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), la Universidad de Deusto, la Universidad de Sevilla (US) y la Universidad de Barcelona (UB).

Universidad	Programa	Enlace oficial
Universitat de Barcelona (junto a Universitat Autònoma de Barcelona + Universitat Politècnica de Catalunya)	Máster en Ciencia y Tecnologías Cuánticas	https://web.ub.edu/es/web/estudis/w/masteruniversitario-md70d?
UPM – Univ. Politécnica de Madrid	Máster en Ingeniería Cuántica	Master in Quantum Computing Technologies UPM - Quantum Explore
	Máster en Tecnologías Cuánticas Aplicadas UPM – APTIE	https://www.masterq.es/
UC3M – Univ. Carlos III de Madrid	Máster en Tecnologías e Ingeniería Cuántica	https://www.uc3m.es/master/tecnologias-ingenieria-cuanticas
Universidad Nebrija	Máster en Ciencia y Tecnología Cuántica	https://www.nebrija.com/programas-postgrado/master/computacion-cuantica/
UIMP + CSIC (Menéndez Pelayo)	Máster en Ciencia y Tecnología Cuántica	https://www.uimp.es/postgrado/estudios/fichaestudio.php?any=2024-25&lan=es&plan=P04M&
US – Univ. de Sevilla	Máster en Mecánica Cuántica	https://www.us.es/estudiar/que-estudiar/oferta-de-masteres/master-universitario-en-fisica-nuclear-us-ucm-ub-ucbn-sdp/52250018
UV – Univ. de València	Máster en Física Avanzada (información cuántica / óptica cuántica)	https://www.uv.es/fisica-avanzada
EHU - Universidad del País Vasco	Máster en Ciencia y Tecnología Cuánticas	https://www.ehu.eus/es/web/master/master-ciencia-tecnologia-cuanticas

Foto 5: Mapa de universidades con oferta de programas relacionados con la Computación Cuántica



Fuente: Pixabay

Además, la fuga de investigadores hacia otros países (Estados Unidos, Alemania, Austria, Reino Unido o Países Bajos) refleja la necesidad de mejores condiciones de financiación, estabilidad y desarrollo profesional.

4.3.1. Déficit estructural de talento

El talento especializado constituye uno de los pilares más críticos para el desarrollo de la computación cuántica. Aunque en los últimos años España ha ampliado de forma significativa su oferta académica con nuevos programas de posgrado y doctorado específicos, este avance resulta aún insuficiente para cubrir la demanda prevista a escala nacional y europea. La formación existente contribuye a generar perfiles cualificados en áreas como ingeniería cuántica, algoritmia, fotónica avanzada y tecnologías habilitadoras, pero su capacidad actual sigue siendo limitada.

El reto principal no reside únicamente en la disponibilidad de programas, sino en el escaso volumen de profesionales que alcanzan cada año el mercado laboral, todavía reducido a unas pocas decenas de especialistas. Esta cifra contrasta con las previsiones de la Comisión Europea, que estima que Europa necesitará más de 20.000 expertos en tecnologías cuánticas para 2030, especialmente en ingeniería de hardware, algoritmia y criptografía avanzada.

La combinación de baja capacidad formativa y fuerte competencia internacional aumenta el riesgo de fuga de talento hacia polos científicos más consolidados en Alemania, Francia o Estados Unidos. Fortalecer las políticas de atracción, retención y especialización profesional se convierte, por tanto, en una prioridad estratégica para evitar cuellos de botella en el desarrollo industrial y tecnológico del país.

4.3.2. Áreas críticas de talento

Las necesidades de capital humano se concentran en:

- **Hardware cuántico:** superconductores, iones atrapados, átomos neutros y fotónica.
- **Software y algoritmos híbridos:** traducción de problemas industriales a entornos cuánticos.
- **Criptografía y ciberseguridad post-cuántica:** protección de infraestructuras críticas.
- **Gestión y transferencia tecnológica:** perfiles capaces de conectar ciencia, industria y administración.

La escasez de talento no afecta únicamente a investigadores de élite: el mercado demanda también ingenieros especializados en hardware cuántico, software cuántico, sistemas de comunicaciones cuánticas, técnicos de laboratorio y operarios de fabricación avanzada. Estos perfiles requieren nuevas titulaciones e itinerarios formativos interdisciplinares que combinen física, ingeniería electrónica, tecnologías de la información y ciencias de la comunicación, ya que la industria cuántica emergente exige capacidades a múltiples niveles. La investigación de la RAND Europe advierte que depender únicamente de físicos con doctorado es insuficiente para cubrir las necesidades de escalado del sector.

4.3.3. Visión estratégica

La transformación de la escasez de talento en una oportunidad dependerá de la existencia de estructuras de coordinación que alineen a ministerios, comunidades autónomas, universidades y empresas. Este pacto debería fijar objetivos concretos:

- Formar un número creciente de especialistas adicionales antes de 2030.
- Incrementar en un 50 % el retorno de investigadores españoles en cinco años.
- Garantizar que cada proyecto financiado con fondos públicos incluya un componente formativo asociado.

El reto del talento debe abordarse con la misma prioridad que la inversión en infraestructuras. Sin profesionales cualificados, España corre el riesgo de convertirse en mera usuaria de soluciones importadas; con una estrategia adecuada, puede transformarse en exportadora de conocimiento y fortalecer su liderazgo en la revolución cuántica europea.

4.4 Financiación limitada

La mayoría de la inversión actual proviene de fondos europeos y públicos – *Next Generation EU*, *Quantum Flagship*, *Quantum Spain*, *Estrategia Española* –, mientras que la financiación privada sigue siendo reducida. A diferencia de Alemania o Francia, donde se movilizan miles de millones mediante esquemas público-privados, el capital riesgo especializado en *deep tech* en España continúa siendo limitado.

Será necesario fomentar:

- Incentivos fiscales y financieros que estimulen la inversión privada.
- Fondos especializados para startups cuánticas y proyectos de escala.
- Mayor implicación de grandes corporaciones en sectores estratégicos como energía, banca o telecomunicaciones.

Solo mediante una base financiera diversificada el ecosistema podrá pasar de la fase piloto a la comercialización de soluciones cuánticas.

4.5 Riesgo de seguridad cuántica

Uno de los retos más sensibles es el impacto de la computación cuántica sobre la ciberseguridad. A medida que los ordenadores cuánticos alcancen suficiente potencia, podrán vulnerar los sistemas de cifrado clásicos (RSA, ECC), comprometiendo comunicaciones, datos financieros y registros gubernamentales. Incluso antes de que existan equipos tolerantes a fallos plenamente operativos, ya resulta plausible el escenario “harvest now, decrypt later”: información interceptada hoy podría quedar expuesta cuando la capacidad cuántica aumente.

La transición a criptografía postcuántica (PQC) no es inmediata, implica inventariar dependencias, actualizar protocolos y equipos, y coordinar múltiples proveedores. Se estima que el proceso completo podría tardar entre 5 y 20 años. Según el NIST, el 23% de los expertos en computación cuántica considera probable un ataque al RSA-2048 en 2030, porcentaje que aumenta al 50% en 2035, lo que subraya la necesidad de iniciar cuanto antes la migración.

España ya ha comenzado la transición hacia la criptografía post-cuántica mediante:

- Protocolos desarrollados por el CCN-CERT y alineados con los estándares del NIST.
- Adopción de algoritmos resistentes a ataques cuánticos y tecnologías de distribución cuántica de claves (QKD).
- Coordinación entre administraciones, empresas y organismos europeos para proteger infraestructuras críticas.

Garantizar la seguridad digital frente a la amenaza cuántica exigirá inversiones sostenidas, una cooperación público-privada estrecha y la adopción de estándares internacionales coherentes con el marco europeo de ciberseguridad.

5. SINERGIAS CON TECNOLOGÍAS DISRUPTIVAS

La computación cuántica no avanza de manera aislada. Su verdadero potencial se manifiesta al integrarse con otras tecnologías digitales de frontera que configuran la próxima generación del ecosistema digital europeo: inteligencia artificial, big data, blockchain, ciberseguridad, supercomputación y redes avanzadas de comunicaciones.

La convergencia entre computación cuántica, inteligencia artificial y conectividad avanzada – de las redes 5G hacia las 6G – abre el camino hacia infraestructuras distribuidas, seguras y ultraeficientes. Considerando la proyección temporal de la computación cuántica, la referencia a redes 6G resulta más coherente que al estándar 5G, ya que ambas tecnologías alcanzarán su madurez en horizontes similares (2030–2035). En consecuencia, este apartado se alinea con las estrategias europeas de conectividad avanzada, como la European 6G Initiative, la Smart Networks and Services Joint Undertaking (SNS JU) y los objetivos de la Digital Decade 2030, que promueven una infraestructura de datos integrada, interoperable y soberana.

En los próximos diez a quince años, la combinación de computación cuántica, inteligencia artificial y redes 6G permitirá procesar, transmitir y proteger información en tiempo real con latencia casi nula, habilitando nuevos servicios en salud personalizada, energía inteligente, movilidad autónoma o defensa. A ello se suman el despliegue de comunicaciones cuánticas seguras a escala europea (EuroQCI) y la adopción de criptografía post-cuántica (PQC), que convertirán la seguridad en un pilar estructural del futuro ecosistema digital.

España, al impulsar simultáneamente estas tecnologías mediante programas como España Digital 2026, la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial, la participación en la Agenda 6G europea y proyectos de comunicaciones cuánticas seguras como MadQCI y EuroQCI, tiene la oportunidad de situarse en la vanguardia de un modelo de desarrollo digital integral. La integración de la cuántica con la IA de nueva generación, el refuerzo de la ciberseguridad mediante criptografía resistente a la cuántica y la creación de redes cuánticas seguras consolidan la soberanía tecnológica y la competitividad europea.

5.1 Inteligencia Artificial (IA) y Big Data

La convergencia entre computación cuántica, inteligencia artificial y big data constituye una de las áreas más transformadoras del nuevo ecosistema digital. Esta integración multiplica la capacidad de análisis, mejora la eficiencia energética y permite generar conocimiento a partir de volúmenes masivos de datos, alineándose con las prioridades europeas de sostenibilidad, autonomía tecnológica y desarrollo de una IA confiable.

Su evolución puede estructurarse en tres fases interrelacionadas.

Fase 1. Aceleración híbrida (2–3 años)

El objetivo inmediato es ampliar las arquitecturas clásicas mediante coprocesadores cuánticos especializados que actúan como aceleradores de tareas críticas. Entre las principales líneas:

- Quantum Machine Learning (QML) híbrido: integración de capas cuánticas en *pipelines* clásicos para optimizar predicción, clasificación y toma de decisiones multiobjetivo. Plataformas como Amazon Braket o IBM Quantum Services ya permiten a investigadores y empresas ejecutar algoritmos híbridos en la nube, combinando hardware cuántico real con optimización clásica.
- Redes neuronales cuánticas (QNNs): arquitecturas variacionales que combinan cálculo cuántico y optimización clásica. Ofrecen mayor generalización con menos datos y reducen el consumo energético. Variantes como QCNN, QRNN y QTransformers – ya aplicadas en España para predicción multivariable por ARQUIMEA Research Center – sitúan al país en la frontera internacional.
- Modelos generativos híbridos (RAG cuántico): integración de módulos cuánticos de razonamiento semántico con modelos generativos de lenguaje, mejorando coherencia y fiabilidad. Este enfoque se está explorando en colaboración con Knowdle Foundation y Universidad de Oviedo en el desarrollo de la *Inteligencia Colectiva Cuántica*, que combina IA generativa y razonamiento contextual cuántico.
- Búsqueda semántica acelerada: empleo del algoritmo de Grover para optimizar la recuperación de información en grafos de conocimiento, reduciendo el tiempo y el consumo energético frente a los métodos clásicos.
- Optimización cuántica: uso de Quantum Annealing o QAOA para resolver problemas combinatorios complejos en logística, energía o sostenibilidad. Plataformas como Amazon Braket, D-Wave o Fujitsu Digital Annealer permiten explorar soluciones en superposición, acelerando la convergencia hacia los óptimos globales.

Estas aplicaciones tempranas ya muestran impacto en la práctica. Por ejemplo, Amazon Web Services (AWS) experimenta con modelos de *Quantum Annealing* para optimizar rutas logísticas y reducir el consumo energético de sus centros de datos, mientras startups españolas como LKS Next, Genetic AI Quantum Computing, Qilimanjaro, Quside, Multiverse Computing o Quantum Mads aplican técnicas híbridas cuántico-clásicas para mejorar la planificación industrial, el modelado financiero y la eficiencia energética en empresas del IBEX 35.

Fase 2. Ventaja algorítmica (~5 años)

El foco se traslada al desarrollo de algoritmos cuánticos nativos que aborden problemas intrínsecamente difíciles para la IA clásica:

- Modelado de sistemas complejos: simulación cuántica de moléculas, materiales o procesos biológicos con precisión física, acelerando el descubrimiento de fármacos, materiales y soluciones energéticas. Iniciativas de IBM y Google Quantum AI, junto con colaboraciones del ICFO o el DIPC, sitúan a España en redes internacionales de investigación aplicada en este ámbito.
- Gemelos digitales cuántico-clásicos: integración de simulación cuántica y optimización multiobjetivo para anticipar comportamientos en redes eléctricas, movilidad o infraestructuras críticas.
- Grafos semánticos y ontologías cuánticas: representación contextual del conocimiento mediante estados de probabilidad y relaciones entrelazadas, que habilitan razonamiento ambivalente y motores semánticos híbridos, en línea con proyectos de AISphere y Knowdle Foundation.
- Razonamiento por analogía cuántica: inferencia basada en superposición conceptual para transferir conocimiento entre dominios distintos (diagnóstico médico, estrategia empresarial, gestión de crisis).

En esta etapa, la IA cuántica deja de ser una herramienta de cálculo para convertirse en una infraestructura cognitiva capaz de comprender sistemas físicos, sociales y semánticos complejos y generar soluciones orientadas a resiliencia y sostenibilidad.

Fase 3. Cambio de paradigma (5–10 años)

En el horizonte largo, la integración cuántico-inteligente redefine el propio concepto de inteligencia artificial:

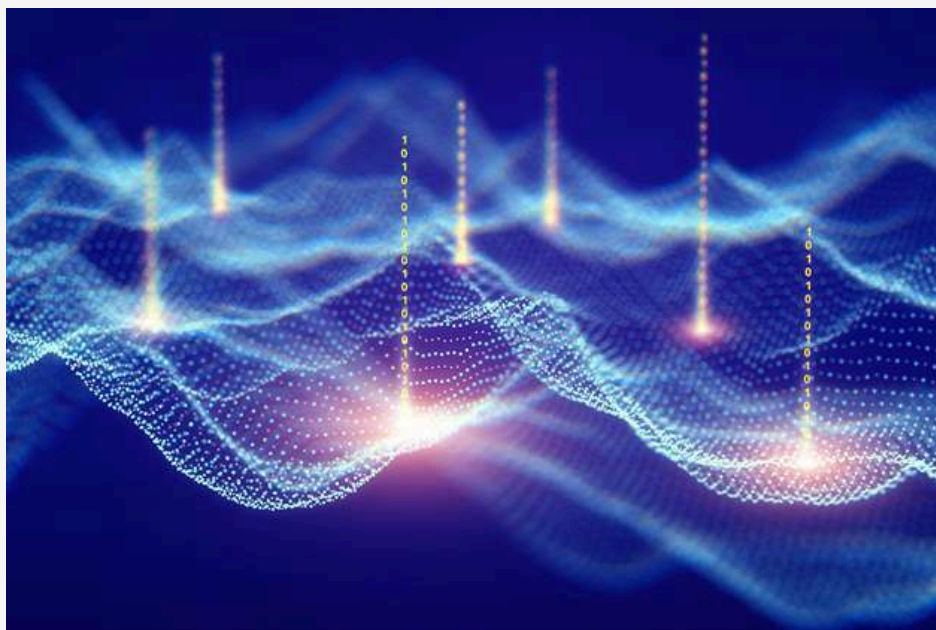
- Lógica y razonamiento cuántico: sistemas de inferencia que operan con estados superpuestos, capaces de manejar contradicciones y ambigüedades sin reducirlas a categorías binarias.
- Sistemas cognitivos cuánticos: asistentes de decisión que evalúan simultáneamente miles de escenarios y colapsan en la recomendación más coherente con el contexto técnico, ético o estratégico.

- Inteligencia Artificial General (AGI) cuántica: exploración teórica de si la superposición y el entrelazamiento pueden servir de sustrato físico para una inteligencia general adaptativa y autoorganizada.

Estas capacidades se complementan con la posibilidad de analizar datos no estructurados – texto, imágenes, datos clínicos o financieros – para generar predicciones más fiables y sostenibles. En banca, por ejemplo, BBVA y CaixaBank ya colaboran con IBM Quantum para evaluar la optimización de carteras y la detección de fraudes; en energía, Repsol explora la simulación cuántica para optimizar redes y predecir demanda; y en salud, el Barcelona Supercomputing Center colabora en proyectos europeos para personalizar tratamientos genómicos mediante IA cuántica.

En conjunto, la integración entre computación cuántica, inteligencia artificial y big data no representa una mejora incremental, sino un cambio de fase: convierte el dato en decisión estratégica más rápida, sostenible y contextual, alineando la innovación tecnológica con los objetivos de bienestar social, resiliencia industrial y soberanía tecnológica europea.

Foto 6: Ilustración abstracta en 3D que representa el uso de algoritmos de aprendizaje profundo para el análisis de datos de redes neuronales.



Fuente: [Joint - Forces.com](https://www.joint-forces.com)

5.2. Blockchain

La convergencia entre blockchain y computación cuántica define un punto de inflexión en la historia de la criptografía moderna. Esta intersección presenta una dualidad crítica: representa la mayor amenaza conocida para los sistemas criptográficos que sustentan la economía digital, pero también la oportunidad de crear infraestructuras distribuidas con seguridad y rendimiento superiores a los de cualquier sistema clásico.

Los computadores cuánticos de propósito criptográfico se proyectan para la próxima década, pero el riesgo es inmediato bajo el paradigma *harvest now, decrypt later* (HNDL): actores maliciosos ya almacenan datos cifrados para descifrarlos cuando la tecnología lo permita. En el caso de blockchain, esta amenaza se agrava por su inmutabilidad: las transacciones grabadas hoy permanecerán accesibles y vulnerables en el futuro.

La ruptura de los algoritmos asimétricos RSA, DSA y ECDSA mediante el algoritmo de Shor, así como la aceleración cuadrática de búsqueda del algoritmo de Grover, pone en cuestión la seguridad de más del 99 % de las transacciones actuales. En consecuencia, la transición hacia una Blockchain Post-Cuántica (PQB) se ha convertido en prioridad estratégica.

5.2.1. Criptografía Cuántica y Post-Cuántica

España avanza en el desarrollo de una arquitectura blockchain resistente a ataques cuánticos mediante dos líneas principales:

- **Criptografía Post-Cuántica (PQC):** el CCN-CERT lidera la evaluación de algoritmos basados en retículos (lattice-based) y árboles hash, alineados con los estándares del NIST (FIPS 203-205) y las directivas NIS2. Los esquemas SPHINCS+ y variantes de Merkle permiten firmas de un solo uso con alta resistencia cuántica. Estas soluciones se validan en pilotos de administraciones públicas y entidades financieras antes de su adopción masiva.
- **Distribución Cuántica de Claves (QKD):** los proyectos MadQCI (Madrid) y CESGA-Vigo (Galicia) integran QKD en el marco de EuroQCI-Spain, permitiendo transmisión de claves mediante fotones individuales. Los enlaces ópticos entre Madrid, Barcelona, Galicia y Canarias – con apoyo del INTA y el IAC – conforman el *backbone* nacional de seguridad cuántica, donde cualquier intento de interceptación es físicamente detectable.

Estas infraestructuras sitúan a España entre los primeros países europeos en desplegar una red cuántica aplicada a la protección de transacciones y comunicaciones distribuidas.

5.2.2. Transición a tecnologías de DLT Post-Cuánticas

La migración hacia algoritmos resistentes a la cuántica implica desafíos técnicos, económicos y sociales. Las firmas post-cuánticas requieren más espacio y tiempo de verificación (10–100× mayores que ECDSA), y su adopción plena exige coexistencia con sistemas híbridos durante al menos una década.

El CCN-CERT desarrolla guías técnicas para acompañar a administraciones e infraestructuras críticas en la transición, garantizando continuidad operativa y seguridad gradual. En paralelo, el Quantum Spain ofrece capacidades de testeo de algoritmos PQC y verificación de rendimiento en hardware cuántico nacional (BSC-CNS, CESGA).

En el ámbito global, redes como Ethereum y Bitcoin enfrentan el reto de actualizar sus mecanismos de firma sin comprometer la integridad histórica de la cadena. Propuestas como EIP-4337 (cuentas gestionadas por contratos inteligentes) y esquemas híbridos de verificación están siendo evaluadas por comunidades open source y empresas tecnológicas – incluidas Amazon Web Services (AWS) y IBM Research – para habilitar transiciones progresivas sin pérdida de interoperabilidad.

5.2.3. Contratos Inteligentes y Ejecución Cuántica

La computación cuántica no sólo redefine la seguridad, sino también la funcionalidad de los contratos inteligentes.

- Optimización cuántica de contratos: algoritmos de Grover y Quantum Annealing reducen la complejidad de búsqueda y evaluación de condiciones en contratos complejos, multiplicando la eficiencia energética y el rendimiento. En minería, un minero cuántico podría verificar \sqrt{N} nonces frente a los N clásicos, reduciendo drásticamente el coste computacional.
- Procesamiento probabilístico con Quantum Machine Learning: los contratos con componentes estocásticos, seguros paramétricos, derivados financieros o predicción de demanda, pueden evaluar múltiples escenarios simultáneamente, eliminando la dependencia del método Monte Carlo.
- Contratos híbridos cuántico-clásicos: arquitecturas mixtas distribuyen lógica estándar a procesadores clásicos y cálculos intensivos a coprocesadores cuánticos. El programa Quantum Spain, con 22 M € invertidos en hardware y emuladores, ya permite pruebas de este modelo en entornos controlados.

Además, el uso de firmas cuánticas ciegas ligeras (Light-Weighted Quantum Blind Signatures) y lenguajes especializados para verificación cuántica están sentando las bases de una nueva generación de contratos auto-verificables y energéticamente eficientes.

5.2.4. Consenso Cuántico

Los protocolos actuales de consenso – PoW, PoS, PBFT – se basan en garantías probabilísticas. La introducción del Quantum Byzantine Agreement (QBA) redefine el paradigma al utilizar entrelazamiento y no-localidad cuántica para validar transacciones instantáneamente sin intercambio clásico de mensajes.

En este modelo, los nodos entrelazados verifican el estado de la red mediante correlaciones físicas imposibles de falsificar, reduciendo la complejidad comunicacional y aumentando la tolerancia a nodos maliciosos hasta un 49 %. La integración progresiva de QBA en sistemas PoS o Algorand-BA* abre el camino a blockchains con seguridad incondicional respaldada por leyes físicas.

5.2.5. Infraestructuras Descentralizadas (DePIN) y Redes Cuánticas

Las DePIN (Decentralized Physical Infrastructure Networks) representan la próxima frontera: coordinación de recursos físicos mediante blockchain. La computación cuántica introduce nuevas capacidades en tres niveles:

- Quantum Cloud federado: coordinación de procesadores cuánticos heterogéneos (superconductores, fotónicos, Rydberg) a través de smart contracts. Centros como BSC-CNS, CINN (Asturias) y CSIC integran recursos nacionales en un ecosistema interoperable.
- Sensórica cuántica descentralizada: redes de gravímetros, magnetómetros o sensores inerciales cuánticos coordinadas por blockchain para monitorización ambiental, defensa o geofísica. Los proyectos del IAC y la infraestructura IAClink validan estas tecnologías en entornos reales.
- Memorias cuánticas en red y distribución de entrelazamiento: almacenamiento distribuido de estados cuánticos y entanglement as a service gestionado por contratos inteligentes, con verificación de fidelidad cuántica registrada en blockchain.

Estas infraestructuras, complementadas con proyectos europeos como EuroQCI, IRIS² o Chips JU, garantizan que España participe en la definición de estándares internacionales (ETSI, ISO/IEC JTC 1/WG 14, EURAMET) y preserve su autonomía tecnológica.

5.2.6. Perspectiva Estratégica

La interacción entre computación cuántica y blockchain marca el inicio de una nueva capa de confianza digital: un sistema donde la verificación ya no depende de supuestos matemáticos, sino de principios físicos inmutables.

España se sitúa en posición de liderazgo regional al combinar una red cuántica nacional avanzada, una comunidad científica sólida y una agenda alineada con los objetivos de soberanía tecnológica europea, resiliencia digital y seguridad de infraestructuras críticas.

La transición hacia la blockchain cuántica no es solo un reto criptográfico, sino un paso decisivo hacia un ecosistema digital donde la confianza, la eficiencia y la sostenibilidad convergen bajo una misma arquitectura tecnológica.

5.3. Ciberseguridad

La ciberseguridad será uno de los campos donde la computación cuántica producirá un impacto más decisivo. La futura disponibilidad de ordenadores cuánticos capaces de quebrar los actuales algoritmos de cifrado (RSA, ECC) amenaza la base sobre la que se sostiene la economía digital y la protección de datos sensibles en todo el mundo. Anticipar esta transformación es esencial para garantizar la resiliencia de las infraestructuras críticas y la autonomía digital de Europa.

España ha iniciado una transición hacia un modelo de seguridad cuántica integral, que combina criptografía resistente, redes de comunicación cuánticas y análisis predictivo avanzado. Este enfoque busca no solo blindar el presente, sino preparar un ecosistema capaz de adaptarse a las nuevas amenazas y aprovechar las oportunidades tecnológicas emergentes.

5.3.1. Criptografía Post-Cuántica y Resiliencia Crítica

El CCN-CERT encabeza el desarrollo de criptografía post-cuántica (PQC), núcleo de la defensa preventiva frente a amenazas cuánticas. Los algoritmos de familias candidatas, como los basados en retículos (lattices) o los basados en hashes (como las firmas de Merkle), alineados con los estándares del NIST y la directiva NIS2, garantizan la seguridad de las comunicaciones y sistemas esenciales sin depender de la dificultad matemática de los problemas clásicos.

Las principales líneas de acción incluyen:

- Elaboración de un inventario criptográfico nacional y planes de migración por sectores críticos (energía, banca, salud, defensa).
- Validación de algoritmos mediante pilotos sectoriales controlados en administraciones y empresas estratégicas.
- Creación de una ventanilla de certificación post-cuántica, que permita homologar productos y servicios conforme a los nuevos estándares.

Esta transición, gradual y compatible con los sistemas actuales, permitirá mantener la operatividad de las infraestructuras nacionales mientras se adoptan esquemas de seguridad resistentes a la computación cuántica.

5.3.2. Infraestructura Cuántica de Seguridad Nacional

La seguridad digital del país depende cada vez más de la capacidad para proteger el intercambio de información. España está desplegando una red nacional de distribución cuántica de claves (QKD) integrada en el programa EuroQCI, destinada a garantizar comunicaciones inviolables entre instituciones críticas.

Los proyectos MadQCI (Madrid), CESGA-Vigo y los enlaces ópticos del IAC e INTA conforman una infraestructura distribuida que utiliza fotones individuales para generar y transmitir claves criptográficas.

- Conexiones seguras entre recintos y CPD gubernamentales.
- Estaciones ópticas terrestres en Madrid, Barcelona, Vigo y Canarias conectadas a satélites de enlace cuántico.
- Redes híbridas QKD-PQC, que combinan seguridad física con algoritmos resistentes, garantizando redundancia y continuidad operativa.

España se sitúa así entre los países europeos pioneros en integrar la computación cuántica en redes de telecomunicaciones estratégicas, fortaleciendo tanto la defensa nacional como la protección de datos industriales y científicos.

5.3.3. Investigación en Ciberdefensa Cuántica para la Detección de Amenazas

Se investiga cómo la computación cuántica podría permitir el paso de una ciberseguridad reactiva a una ciberseguridad predictiva. Los algoritmos cuánticos pueden analizar grandes volúmenes de datos y detectar anomalías en tiempo real con una capacidad sin precedentes.

Principales líneas de aplicación:

- Quantum Machine Learning (QML): identificación temprana de comportamientos fraudulentos en banca, seguros o comercio electrónico.
- Optimización cuántica: investigación sobre la potencial ventaja de los algoritmos de optimización cuántica (ej. QAOA) sobre los motores de orquestación clásicos (SOAR) en la selección y priorización en tiempo real de playbooks de respuesta automatizada (Machine Readable playbooks) y su representación visual (Human Readable playbooks) frente a ataques a gran escala.
- Simulación Cuántica de Ciberataques para el Modelado Preventivo: estudio de la integración entre capacidades cuánticas y algoritmos avanzados de IA para mejorar el modelado anticipatorio de amenazas y la detección temprana de escenarios de riesgo. Se busca desarrollar simuladores automatizados en tiempo real que identifiquen vulnerabilidades y activen remediación continua desde el diseño, avanzando hacia ciclos de ciberdefensa autónomos.

El desarrollo de estas capacidades podría posicionar a España a la vanguardia de la detección automatizada de fraudes y ciberamenazas, acelerando la respuesta ante ataques y reduciendo el tiempo medio de detección de intrusiones.

5.3.4. Gobernanza y Sostenibilidad del Ecosistema Cuántico

La evolución hacia una ciberseguridad cuántica requiere una gobernanza compartida entre instituciones públicas, sector privado y comunidad científica, junto con una evaluación continua de su sostenibilidad técnica y ambiental.

- Gobernanza coordinada: cooperación entre CCN-CERT, INCIBE, Fuerzas Armadas, universidades y empresas para definir estándares nacionales y garantizar interoperabilidad europea.
- Pruebas piloto con métricas de rendimiento: validación empírica de soluciones QC/QML comparadas con baselines clásicos ($p < 0,05$; $ROI \leq 18$ meses), demostrando mejoras operativas o de seguridad medibles.
- Integración con marcos ESG: la transición a PQC y QKD asegura trazabilidad de datos energéticos y emisiones, conforme a ISO 20121:2024 y al GHG Protocol (2025).

Indicadores técnicos: disponibilidad del enlace, tasa de generación de claves (kb/s), MTBF.

Indicadores ESG: porcentaje de series de consumo y residuos con integridad criptográfica verificada.

Con este enfoque, la seguridad digital y la sostenibilidad convergen como pilares de la soberanía tecnológica europea.

Foto 7: Seguridad digital en un centro de datos



Fuente: [Pinkwizard](#)

5.3.5. Hoja de Ruta Cuántica Nacional

La transición hacia un ecosistema cuántico seguro requiere planificación coordinada, priorización de casos de uso de alto impacto y evaluación continua basada en evidencia.

Fases de implementación:

- **Migración inmediata a PQC:** inventario criptográfico y transición por sistemas críticos conforme al plan CCN-CERT 2025.
- **Despliegue de pilotos QKD:** interconexión entre recintos y centros de proceso de datos bajo el marco MadQCI-EuroQCI.
- **Pruebas de concepto (PoC) en QC/QML:** comparación con *baselines* clásicos mediante test A/B y métricas de rendimiento cuantificables.

Indicadores de éxito:

- Reducción del tiempo de transición a PQC (<5 años).
- Integridad de datos verificada en el 100 % de los enlaces críticos.
- Inclusión de métricas ESG en auditorías de ciberseguridad.

5.4. 6G y Computación cuántica

La convergencia entre computación cuántica y comunicaciones 6G definirá la próxima etapa de la conectividad global. Las redes 6G no sólo ampliarán la capacidad y la velocidad de transmisión, sino que incorporarán principios cuánticos en su diseño para garantizar seguridad física verificable, eficiencia energética y soberanía digital.

5.4.1. Redes Ultraprotegidas mediante QKD

El desarrollo de redes ultraseguras basadas en distribución cuántica de claves (QKD) constituye el núcleo de la arquitectura de comunicaciones del futuro. Este mecanismo permite generar claves imposibles de interceptar sin ser detectadas, creando enlaces inmunes a espionaje.

En el marco de la European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI), España participa activamente a través de proyectos como MadQCI y empresas como LuxQuanta, que desarrollan sistemas QKD aplicables tanto a redes terrestres de fibra óptica como a enlaces satelitales.

Estas iniciativas consolidan una infraestructura nacional alineada con los estándares europeos de comunicación cuántica segura.

5.4.2. Optimización Cuántica del Tráfico y Reducción de Latencia

La computación cuántica aportará capacidades de optimización en tiempo real a la gestión de tráfico y recursos en redes 6G. Los algoritmos cuánticos podrán calcular rutas de transmisión más eficientes, equilibrar cargas y reducir la latencia hasta niveles submilisegundo, habilitando aplicaciones donde la inmediatez y fiabilidad son críticas.

Principales ámbitos de aplicación:

- Movilidad autónoma: coordinación segura y ultrarrápida entre vehículos y sistemas de tráfico.
- Telemedicina avanzada: transmisión instantánea de datos clínicos y control remoto de dispositivos.
- Industria distribuida: sincronización de procesos en plantas conectadas globalmente mediante redes inteligentes.

Estas funciones permitirán pasar de redes reactivas a redes autooptimizadas, capaces de adaptarse dinámicamente a la demanda y a las condiciones del entorno.

5.4.3. Hacia el Internet Cuántico

Los avances combinados en computación cuántica, fotónica y comunicaciones 6G convergen hacia la creación del internet cuántico: una red donde la información se transmite mediante estados cuánticos de luz en lugar de señales clásicas.

Este nuevo paradigma permitirá:

- Comunicaciones soberanas y seguras entre países, instituciones y empresas.
- Transmisión cuántica por fibra óptica y enlaces satelitales de largo alcance.
- Integración entre redes clásicas y cuánticas, garantizando interoperabilidad y resiliencia frente a ataques.

España, con su infraestructura avanzada de telecomunicaciones, su participación en EuroQCI y su implicación en la Agenda Europea 6G (SNS JU, Digital Decade 2030), se sitúa como actor estratégico en esta transición. La combinación de innovación pública y liderazgo industrial nacional – LuxQuanta, Telefónica, Hispasat, BSC, entre otros – refuerza su posición como nodo esencial en el futuro ecosistema de comunicaciones cuántico-clásicas europeas.

5.4.4. Visión Estratégica

La convergencia entre 6G y tecnologías cuánticas no es una evolución incremental, sino una transición sistémica hacia infraestructuras inteligentes, seguras y sostenibles. España tiene la oportunidad de integrar esta visión en su hoja de ruta digital, articulando tres ejes complementarios:

- **Innovación tecnológica:** desarrollo de hardware fotónico, algoritmos cuánticos y protocolos híbridos QKD-PQC.
- **Gobernanza y estándares:** participación activa en EuroQCI, ETSI y organismos de normalización cuántica.
- **Sostenibilidad digital:** diseño de redes con eficiencia energética y trazabilidad ESG verificable.

El despliegue coordinado de estas capacidades convertirá a España en pionera de la seguridad cuántica aplicada a la conectividad 6G, abriendo el camino hacia una red europea de comunicaciones de confianza, interoperable y resiliente frente a las amenazas de la próxima década.

5.5. Accesibilidad Digital

La accesibilidad digital es un pilar central de una sociedad inclusiva y un elemento clave de la transformación digital responsable. La computación cuántica, al multiplicar la capacidad de procesar y optimizar información compleja en tiempo real, abre nuevas posibilidades para el diseño de tecnologías adaptativas, personalizadas y universales.

5.5.1. Comunicación Inclusiva en Tiempo Real

El procesamiento cuántico del lenguaje natural permitirá un salto cualitativo en las herramientas de comunicación accesible.

- **Transcripción y subtítulo en tiempo real:** algoritmos cuánticos podrán analizar y traducir simultáneamente grandes volúmenes de audio y vídeo con mayor precisión, mejorando la accesibilidad de contenidos educativos, culturales y mediáticos para personas con discapacidad auditiva.
- **Traducción automática inclusiva:** el uso combinado de computación cuántica y modelos multilingües permitirá ofrecer subtítulos y narraciones adaptados a contextos culturales y cognitivos diversos.

Estas capacidades se integrarán en plataformas educativas, televisivas y administrativas, garantizando una participación plena en entornos digitales y presenciales.

5.5.2. Interfaces Adaptativas y Experiencia Personalizada

La capacidad de la cuántica para procesar datos heterogéneos a gran velocidad permitirá crear interfaces inteligentes adaptativas.

- **Modelos cuántico-clásicos de personalización:** análisis de patrones de interacción para ajustar visualización, navegación o control según las necesidades del usuario.
- **Asistentes cuántico-cognitivos:** sistemas que interpretan voz, texto e intención con baja latencia y ofrecen apoyo contextualizado a personas con discapacidad visual, motora o cognitiva.
- **Reducción de latencia en herramientas inclusivas:** la optimización cuántica disminuirá los tiempos de respuesta en lectores de pantalla, sistemas de reconocimiento de voz y aplicaciones móviles accesibles, aumentando la fluidez de la experiencia digital.

Estas tecnologías convierten la accesibilidad en una característica estructural del diseño digital, no en un añadido posterior.

5.5.3. Ética, Gobernanza y Sostenibilidad de la Accesibilidad Cuántica

La integración de tecnologías cuánticas en la accesibilidad debe enmarcarse en los principios europeos de diseño universal, ética tecnológica y sostenibilidad digital.

- **Alineación normativa:** cumplimiento del European Accessibility Act (2025) y de la Estrategia Europea de Datos, asegurando que los avances cuánticos se desarrollen con criterios de equidad, transparencia y control humano.
- **Gobernanza inclusiva:** colaboración entre instituciones públicas, sector tecnológico y organizaciones de la sociedad civil para garantizar la participación de usuarios diversos en el diseño y evaluación de soluciones.
- **Sostenibilidad operativa:** la eficiencia energética de los modelos cuánticos permitirá reducir el impacto ambiental de sistemas de accesibilidad en la nube, alineándose con los objetivos del Digital Decade 2030 y el European Green Deal.

5.5.4. Visión Estratégica

La computación cuántica aplicada a la accesibilidad digital representa una tecnología de equidad, capaz de traducir la innovación en inclusión. Su adopción permitirá desarrollar entornos digitales donde las herramientas de comunicación, aprendizaje y asistencia se ajusten dinámicamente a las capacidades de cada persona, eliminando barreras y ampliando oportunidades.

España, en consonancia con la estrategia europea, puede liderar la integración de la accesibilidad cuántica dentro de sus programas nacionales de innovación y gobierno digital, contribuyendo a una transformación tecnológica centrada en las personas, donde la accesibilidad se asume como un derecho estructural y no como una función complementaria.

6. RUMBO HACIA EL LIDERAZGO CUÁNTICO

El futuro de la computación cuántica en España se definirá por su capacidad de anticipar tendencias, integrar tecnologías y proyectar liderazgo dentro del espacio europeo. La próxima década será una etapa de maduración, en la que la cuántica dejará de ser un campo experimental para convertirse en un vector estructural de competitividad, sostenibilidad y seguridad.

La ventaja competitiva no dependerá únicamente del desarrollo de hardware o software propios, sino en articular un ecosistema conectado, interoperable y orientado a misiones de país. La clave estará en convertir la inversión científica en valor social e industrial, y en situar la cuántica en el núcleo de las transiciones energética, digital y geoestratégica que marcarán el horizonte 2030–2040.

6.1. España como Hub Cuántico Europeo

España puede consolidarse como un nodo cuántico europeo si logra combinar tres vectores de futuro: integración tecnológica, cooperación internacional y escalabilidad industrial. Su fortaleza no proviene solo de la infraestructura científica, sino de su posición geoestratégica y en su capacidad para actuar como puente entre Europa y el denominado Sur Global, con especial conexión con América Latina como región prioritaria para la cooperación tecnológica, facilitando la apertura de nuevos mercados y la transferencia de innovación en tecnologías cuánticas.

Direcciones de desarrollo prioritario:

- Interconexión europea: ampliación de redes nacionales cuánticas integradas en EuroQCI y EuroHPC.
- Cuántica aplicada: impulso de casos de uso en sectores energéticos, sanitarios, financieros y de movilidad.
- Economía del dato segura: despliegue de entornos de confianza basados en criptografía post-cuántica.
- Talento internacional: atracción de investigadores y técnicos especializados a través de programas conjuntos con universidades europeas.
- Diplomacia científica: proyección de España como mediador y laboratorio de gobernanza tecnológica global.

El liderazgo cuántico español se construirá sobre la capacidad de cooperación, la agilidad regulatoria y la orientación hacia resultados medibles en innovación y bienestar social.

6.2. La necesidad de la aplicación de la cuántica en las industrias

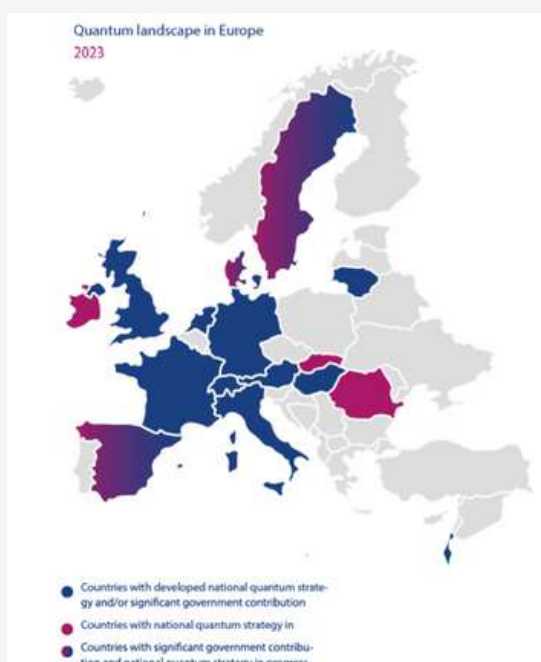
Existen múltiples aplicaciones y numerosos documentos, y ya se han hecho muchas referencias al respecto. Nos gustaría profundizar en una de las industrias que ha recibido menos atención por parte de los investigadores hasta ahora: la de defensa.

La computación cuántica se está consolidando como un activo estratégico para la defensa europea y aliada. Su relevancia no se mide en rendimiento computacional, sino en la capacidad de resolver problemas intratables para la supercomputación clásica, como la optimización logística a gran escala, la simulación de materiales avanzados o el modelado de sistemas complejos. En la próxima década, las instituciones europeas y atlánticas buscarán convertir estos avances en capacidades reales de misión, integrando infraestructuras híbridas (HPC+QC), software interoperable y mecanismos de validación rigurosos.

6.2.1. Estrategia Europea

La Quantum Europe Strategy, presentada por la Comisión Europea el 2 de julio de 2025, establece el marco político y tecnológico para convertir a Europa en potencia cuántica en 2030. No es solo una hoja de ruta científica, sino una agenda industrial y de soberanía tecnológica, centrada en tres objetivos: industrializar la computación cuántica, asegurar una cadena de suministro autónoma y promover aplicaciones de doble uso (civil-defensa).

Foto 8: Quantum landscape in Europe



Fuente: Strategic-Research-and-Industry-Agenda-2030

En este contexto, la UE ha definido una secuencia coordinada de acciones:

- EuroHPC ampliado (julio 2025): el Consejo aprobó la ampliación del mandato de la Empresa Común Europea de Computación de Alto Rendimiento (European High-Performance Computing Joint Undertaking), que desde 2018 gestiona la red europea de supercomputadores. Con esta reforma, EuroHPC integra la computación cuántica y pasa a ser el hub europeo de HPC+QC, ofreciendo entornos híbridos donde Estados miembros y proyectos estratégicos puedan probar algoritmos y cargas de trabajo en tiempo real.
- Quantum Grand Challenges (2025–2027): uno de los dos desafíos emblemáticos lanzados por la Comisión se centra en la computación cuántica tolerante a fallos, condición indispensable para aplicaciones de defensa, simulación y ciberseguridad.
- Hoja de ruta de Computación y Simulación Cuántica (2026): definirá métricas de madurez tecnológica (TRL), criterios de interoperabilidad del software stack y un marco de benchmarking entre soluciones clásicas y cuánticas, clave para evaluar avances medibles y orientar inversiones.
- Objetivos 2030–2035: alcanzar en 2030 ordenadores cuánticos con ≥ 100 cúbits lógicos corregidos de errores, y en 2035 sistemas con miles de cúbits lógicos, capaces de abordar simulaciones de dinámica de sistemas complejos o problemas combinatorios de defensa a escala continental.
- Industrialización y estandarización: entre 2025 y 2027 se lanzan líneas piloto de fabricación dentro de la Chips Joint Undertaking, preparando las primeras fundiciones cuánticas europeas hacia 2030. En paralelo, la hoja de ruta europea de estándares (2026) establecerá especificaciones para interfaces, APIs y métricas de fiabilidad, garantizando interoperabilidad y seguridad en el ecosistema.
- Aplicación a defensa: la Comisión, junto con la Agencia Europea de Defensa (EDA) y la ESA, está desarrollando una hoja de ruta de adopción para trasladar la computación cuántica a operaciones militares, simulaciones estratégicas y protección de datos sensibles, con validaciones en entornos controlados entre 2028 y 2032.

Europa ha pasado así de liderar la investigación básica a construir la infraestructura industrial y normativa que convertirá la computación cuántica en un recurso soberano. El objetivo: que hacia 2030 los primeros sistemas tolerantes a fallos puedan validarse en escenarios reales de defensa y seguridad, consolidando la autonomía tecnológica europea.

6.2.2. Perspectiva de la OTAN

La OTAN adoptó su Quantum Technologies Strategy en noviembre de 2023, marcando la primera posición formal de la Alianza sobre esta tecnología. El documento reconoce la doble naturaleza de la computación cuántica: una fuente de ventaja operativa si se domina y un riesgo estratégico si lo hace un adversario primero.

La estrategia se centra en líneas de acción concretas, que reflejan una aproximación pragmática y orientada a capacidades:

1. Mitigación del Q-day (horizonte 8–15 años): la Alianza considera prioritario prepararse para la llegada de un Cryptographically Relevant Quantum Computer (CRQC) capaz de romper el cifrado asimétrico actual. Para ello, impulsa la migración gradual de sus redes de mando y control hacia criptografía post-cuántica (PQC), conforme a los estándares del NIST publicados en agosto de 2024 y a las guías europeas para 2028–2035.
2. Optimización de operaciones: se están probando algoritmos QAOA y VQE para problemas de asignación dinámica de recursos, planificación logística y coordinación de activos multinacionales. Estas pruebas se ejecutan en entornos híbridos HPC+QC, comparando resultados frente a solvers clásicos para medir la aparición de ventaja cuántica práctica.
3. Simulación y gemelos digitales: se exploran aplicaciones de simulación cuántica para modelar dinámicas operativas y materiales estratégicos, como superconductores o recubrimientos stealth. Estas capacidades permitirán entrenar y evaluar estrategias complejas mediante gemelos digitales cuánticos.
4. Analítica avanzada: la OTAN investiga algoritmos de machine learning cuántico (QML) para acelerar la fusión de datos de inteligencia (IMINT, SIGINT, OSINT) y mejorar la detección de anomalías. En los próximos años se espera integrar pipelines híbridos IA-cuántica en entornos de ciberdefensa.
5. Interoperabilidad y pruebas: la Alianza impulsa benchmarks y estándares técnicos comunes para garantizar que las capacidades cuánticas puedan desplegarse conjuntamente entre los aliados sin comprometer la seguridad. La Transatlantic Quantum Community (2024) es el foro operativo que coordina esta cooperación.

El enfoque de la OTAN es eminentemente pragmático y defensivo: fortalecer la resiliencia frente al Q-day y, al mismo tiempo, identificar áreas donde la computación cuántica pueda ofrecer ventajas medibles antes de la tolerancia a fallos plena.

Foto 9: Logo OTAN



Fuente: <https://www.nato.int/es/what-is-nato>

6.2.3. Tendencias y Desafíos

La computación cuántica se encuentra en plena era NISQ, con sistemas limitados en escala y fidelidad. Los retos son tanto tecnológicos como estructurales:

- Corrección de errores (QEC): avanzar hacia cúbits lógicos estables y decodificadores eficientes.
- Arquitecturas híbridas HPC+QC: diseñar flujos de trabajo que asignen a lo cuántico los subproblemas donde aporta ventaja real.
- Interoperabilidad del software stack: consolidar un ecosistema europeo de software cuántico con APIs abiertas y middleware seguro.
- Verificación y benchmarking: garantizar reproducibilidad y fiabilidad de los resultados cuánticos frente a los clásicos.
- Talento aplicado: formar ingenieros con dominio conjunto de física, software y operaciones.

La clave de la próxima década será demostrar valor operativo verificable, con métricas claras y entornos de prueba que vinculen la I+D con las necesidades de defensa.

6.2.4. Casos de uso

- Optimización operativa: planificación de rutas multi-restricción y logística multinacional en tiempo real.
- Simulación: modelado de materiales estratégicos, dinámica de sistemas complejos y validación rápida de escenarios.
- Analítica e inteligencia: integración de QML para análisis masivo de datos y detección temprana de patrones de amenaza.

Estos ejemplos muestran que la computación cuántica actuará como un acelerador especializado, aportando ventaja práctica en ámbitos donde el tiempo, la precisión y la capacidad predictiva son diferenciales.

La computación cuántica no sustituirá a la supercomputación clásica: la complementará como tecnología estratégica dual, capaz de transformar cómo se modelan, optimizan y protegen los sistemas de defensa. Europa y la OTAN han trazado ya hojas de ruta coherentes – la Quantum Europe Strategy (julio 2025) y la NATO Quantum Technologies Strategy (noviembre 2023) – que convergen en una meta común: lograr autonomía cuántica, interoperabilidad y ventaja operativa práctica antes de 2035.

6.3. Palancas de Transformación

Para que las perspectivas anteriores se concreten, será necesario fortalecer cinco palancas estructurales:

1. **Gobernanza cuántica:** creación de un marco institucional que coordine actores, evalúe resultados y oriente inversiones hacia misiones de impacto nacional.
2. **Capital humano:** formación interdisciplinar y movilidad internacional de talento, conectando universidades, industria y administración.
3. **Financiación sostenible:** instrumentos estables de inversión público-privada y fiscalidad adaptada al riesgo deep tech.
4. **Infraestructuras compartidas:** centros de cálculo y redes cuánticas abiertas a universidades, empresas y startups.
5. **Diplomacia tecnológica:** presencia activa en foros globales que definan estándares, ética y gobernanza de la cuántica.

Estas palancas deben articularse bajo un marco común de planificación anticipatoria, orientado a resultados verificables y alineado con los objetivos europeos de soberanía tecnológica y sostenibilidad.

6.4. Visión de Largo Plazo

La computación cuántica se convertirá en el núcleo de la próxima gran revolución industrial. En 2040, su integración con inteligencia artificial, 6G y biotecnología habrá configurado una infraestructura cognitiva global donde los países líderes no serán los que más inviertan, sino los que sean capaces de conectar ciencia, industria y sociedad.

España tiene la oportunidad de estar entre ellos si mantiene una visión compartida: una cuántica orientada al bien público, sostenible en lo ambiental y abierta en lo tecnológico.

Más que una tecnología, la cuántica será un nuevo lenguaje de cooperación internacional, y su dominio marcará el paso de la innovación europea en las próximas décadas.

7. ¿CUÁNTO VALE LA CUÁNTICA Y CUÁL ES SU POTENCIAL?

7.1. Un marco para medir los intangibles del ecosistema español (enfoque Futurlytics®)

El valor de la computación cuántica no reside tanto en las máquinas como en los intangibles que las hacen posibles: el conocimiento acumulado, la propiedad intelectual, los algoritmos, los datos, las metodologías y las redes de colaboración. Medir y gestionar estos activos permite transformar la innovación en tracción económica, orientar la inversión pública y privada, y reducir el tiempo que separa el descubrimiento científico de su aplicación industrial. La cuestión no es “poner precio” a una tecnología, sino comprender qué capacidades la sustentan, cómo se evidencian y bajo qué condiciones pueden crecer de forma sostenible.

Según estimaciones de McKinsey y Boston Consulting Group, la computación cuántica podría generar entre 450.000 y 850.000 millones de dólares anuales en valor agregado para los usuarios finales a partir de 2035, con un mercado directo de hardware y software estimado entre 90.000 y 170.000 millones. Estas cifras no reflejan únicamente el valor de las máquinas, sino el de las capacidades que producen productividad y ventaja competitiva: algoritmos aplicados, propiedad intelectual protegida, talento especializado y alianzas duraderas.

7.2. Capitales de valor

El enfoque **Futurlytics** propone medir el valor cuántico a través de cuatro capitales complementarios que evitan solapamientos y permiten una lectura clara del ecosistema:

- **Capital humano:** talento, experiencia y dedicación efectiva de los equipos.
- **Capital estructural:** propiedad intelectual, algoritmos, datos, metodologías y procesos internos.
- **Capital cliente:** adopción temprana, pilotos pagados, contratos activos y resultados reproducibles.
- **Capital de alianzas:** participación en consorcios, acceso a infraestructuras y presencia en foros de estandarización.

Cada uno de estos capitales se valida mediante evidencias verificables –publicaciones, patentes, horas invertidas, madurez de algoritmos o trazabilidad de datos– que permiten establecer una base empírica y auditable para comparar iniciativas y orientar recursos con mayor precisión.

7.3. Tres perspectivas de valoración

El modelo combina tres perspectivas que ofrecen una visión integral del valor generado por la cuántica:

1. **Coste de reposición**, que estima cuánto costaría reconstruir hoy las capacidades acumuladas (I+D, horas cualificadas, prototipos, certificaciones y datos propios).
2. **Valor incremental**, que mide el impacto económico atribuible a la cuántica frente a alternativas clásicas en términos de eficiencia, reducción de fraudes o precisión de modelos.
3. **Valor de licenciamiento**, que estima los ingresos potenciales derivados de la explotación o cesión de la propiedad intelectual a terceros.

El objetivo no es generar puntuaciones abstractas, sino documentar con trazabilidad los resultados y sus fundamentos, evitando duplicidades entre métricas y manteniendo consistencia metodológica.

De las evidencias a la gestión

La distinción entre valor presente y valor futuro es clave. El primero refleja los activos ya demostrados –algoritmos en producción, patentes concedidas, pilotos con resultados reproducibles. El segundo proyecta el potencial atribuible a iniciativas aún en desarrollo pero con base técnica y comercial sólida.

El diferencial entre ambos no constituye una brecha contable, sino una hoja de ruta de gestión: qué competencias reforzar, qué procesos consolidar, qué pilotos escalar y qué alianzas priorizar para asegurar libertad de operación y acceso a infraestructuras críticas.

Un marco de valoración sólido no requiere complejidad excesiva, sino orden y consistencia documental: inventarios de intangibles, registros de dedicación, historial de pruebas, estado de la propiedad intelectual y participación en consorcios. Esta trazabilidad permite a inversores y administraciones contrastar afirmaciones, comparar avances y orientar la financiación sobre la base de evidencias.

Hacia un sistema nacional de reporte

España podría liderar la adopción de un sistema nacional de reporte anual de intangibles cuánticos, ligero y comparable, que no sirva para clasificar actores, sino para identificar cuellos de botella compartidos –déficit de talento senior, falta de datos de calidad o procesos de industrialización incipientes–.

Con esa información, sería posible diseñar políticas específicas basadas en resultados: compra pública por retos, coinversión condicionada a hitos o planes de adopción tecnológica en sectores regulados.

De las expectativas a las evidencias

El valor de la cuántica no depende de la especulación, sino de la evidencia verificable: Del conocimiento que se retiene y transmite, de la propiedad intelectual que se protege y se usa, de los algoritmos que funcionan en entornos reales, de los datos que los sustentan, y de las alianzas que garantizan su adopción a escala.

Un enfoque de medición basado en intangibles, coherente y verificable, convierte la innovación en gobernanza económica y competitividad sostenible.

La creación de un marco nacional de valoración de intangibles cuánticos, alineado con las directrices europeas en *deep tech* y activos intangibles, situaría a España entre los países pioneros en medir el impacto real de su estrategia cuántica. Esto fortalecería la transparencia de la inversión pública, la trazabilidad de los retornos y la comparabilidad internacional, consolidando su posición dentro de la European Quantum Technology Infrastructure (EQTI) y del futuro mercado europeo de innovación avanzada.

8. RESPONSABILIDAD ÉTICA, SOSTENIBLE E INCLUSIVA

El desarrollo de la computación cuántica debe avanzar bajo principios de responsabilidad ética, sostenibilidad y equidad, en coherencia con el European Green Deal, el AI Act, el Data Governance Act y la European Declaration on Digital Rights and Principles. Estas tecnologías no solo transformarán la capacidad de cálculo, sino también las estructuras económicas, laborales y sociales sobre las que operan. Asegurar que su despliegue sea ambientalmente sostenible, socialmente justo e inclusivo constituye una prioridad estratégica para Europa y un ámbito de liderazgo potencial para España.

8.1. Sostenibilidad y gobernanza responsable

El despliegue cuántico en España debe evaluarse bajo criterios de eficiencia energética, sostenibilidad material y gobernanza responsable, alineados con los objetivos del Green Deal y la Digital Decade 2030. La sostenibilidad cuántica trasciende el consumo eléctrico del hardware: abarca la trazabilidad de los datos, la circularidad de los materiales y la transparencia del impacto ambiental y social.

a) Consumo energético y huella del hardware.

Los sistemas superconductores demandan criogenia y control electrónico intensivo, lo que eleva su consumo energético. La investigación en *sustainable quantum computing* explora los límites termodinámicos, la eficiencia por operación y los márgenes de mejora en diseño (Sood et al., 2024; Meier et al., 2025).

b) Diseños de menor impacto.

Las arquitecturas fotónicas, la integración de nuevos materiales y los procesadores sin criogenia reducen la demanda energética y mejoran la reciclabilidad de componentes (WSJ, 2024).

c) Impacto evitado por optimización.

Las pruebas de concepto en optimización logística, planificación de recursos o diseño energético permiten cuantificar las tCO₂e evitadas frente a soluciones clásicas, midiendo distancia, tiempo y recursos ahorrados (Fitzek et al., 2024; Pérez Armas et al., 2024).

d) Gobernanza y reporting.

El seguimiento del impacto sostenible debe alinearse con ISO 20121:2024, el GHG Protocol (2025) y marcos nacionales como OECD/Dataestur, con indicadores como tCO₂e por m², porcentaje de energía renovable o residuos valorizados (ISO, 2024; OECD, 2024).

e) Seguridad de datos ESG.

La incorporación de PQC y QKD en los sistemas de verificación de datos ESG refuerza la trazabilidad y la integridad de las métricas (European Commission, 2025).

En conjunto, la computación cuántica sostenible constituye una oportunidad estratégica para que España lidere el desarrollo de infraestructuras digitales bajas en carbono, combinando innovación científica con compromiso ambiental y social.

Foto 10: Quantum computing governance principle, themes and core values



Fuente: WEF. Transitioning to a Quantum-Secure Economy WHITE PAPER SEPTEMBER 2022

8.2. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

La computación cuántica puede contribuir directamente a los ODS 7, 9, 11, 12 y 13, optimizando procesos energéticos, logísticos e industriales, reduciendo consumos y emisiones, y favoreciendo un uso racional de los recursos.

Estas aplicaciones confirman la convergencia entre la transición digital y la transición ecológica: integrar ambas bajo un marco común de eficiencia, trazabilidad y verificación permitirá transformar la innovación tecnológica en impacto climático y social medible.

Foto 11: Objetivos de Desarrollo Sostenible



Fuente: Global Goals for Sustainable Development

8.3. Ética aplicada y salvaguardas frente al sesgo

Hacia un marco ético de la IA Cuántica

Las tecnologías cuánticas constituyen un vector estratégico de la II Revolución Cuántica, con impacto directo en los modelos de computación, comunicaciones seguras e inteligencia artificial avanzada. En este contexto, el Quantum Machine Learning (QML) se perfila como un área clave por su capacidad para acelerar el aprendizaje automático mediante recursos cuánticos, ampliando la escala y complejidad de los problemas tratables en análisis de datos y optimización.

Este potencial conlleva, sin embargo, la necesidad de integrar desde etapas tempranas marcos éticos robustos y alineados con una filosofía democrática que priorice la justicia social, la equidad y la responsabilidad institucional, y empresarial – un nuevo modelo de RSC tecnológico que inspire más allá de la norma - ante los impactos socioeconómicos derivados de esta tecnología.

La ética cuántica propone extender los marcos éticos clásicos incorporando conceptos estructurales de la mecánica cuántica —incertidumbre, superposición y entrelazamiento— a la reflexión sobre la toma de decisiones tecnológicas. Ello implica asumir que las decisiones éticas en entornos de alta complejidad no son binarias, sino que se configuran en espacios de probabilidad y múltiples estados posibles, lo que exige aproximaciones holísticas y no lineales, con especial importancia derivada del concepto de “no linealidad”.

Este enfoque obliga a revisar categorías tradicionales como el “bien” y el “mal” en ecosistemas socio-técnicos caracterizados por dinámicas estocásticas reales, interdependencias globales y nuevos espacios de interacción social, cultural y política generados por sistemas complejos en entornos muy difusos de gestión. Para el contexto español y europeo, integrar esta perspectiva en la estrategia nacional de tecnologías cuánticas refuerza la alineación con marcos normativos de derechos fundamentales y valores democráticos, especialmente ante la aprobación prevista para 2026 del *Quantum Act* por parte de la Comisión Europea.

El QML hereda y amplifica los retos éticos ya identificados en la inteligencia artificial clásica: sesgos en datos, estructuras algorítmicas opacas y decisiones de diseño que pueden consolidar desigualdades y discriminaciones. La transición de estos modelos a arquitecturas cuánticas introduce una “opacidad cuántica” adicional, que dificulta aún más la auditabilidad, la explicabilidad y la verificación independiente de resultados, incluso para equipos expertos. Lo cual nos obligará a crear todo un nuevo campo epistemológico a definir, y a encontrar soluciones ante los retos que plantee.

En paralelo a los esfuerzos en Inteligencia Artificial Explicable (XAI), resulta necesario concebir un marco de eXplainable Quantum Machine Learning (XQML), que desarrolle principios, métricas y herramientas de transparencia y trazabilidad adaptadas a la especificidad de los algoritmos cuánticos. Este marco debería contemplar requisitos de diseño explicable, documentación técnica exhaustiva y mecanismos de verificación externa, integrables tanto en entornos de investigación como en despliegues industriales y de servicios públicos. Y especialmente pensados para las futuras ISOs que se establezcan para auditarlos y certificarlos.

Los sistemas QML dependen de conjuntos de datos que pueden incorporar prejuicios históricos o estructurales y, al operar sobre arquitecturas más complejas, corren el riesgo de replicar o amplificar estos sesgos en escenarios de difícil inspección. Esto condiciona de forma crítica ámbitos de alto impacto social como la salud, las finanzas, la seguridad o la gestión de servicios públicos, donde un error o sesgo no detectado puede generar efectos sistémicos.

Además, el acceso a infraestructuras cuánticas avanzadas presenta una fuerte tendencia a la concentración en grandes corporaciones y potencias tecnológicas, generando asimetrías en capacidad de cómputo y desarrollo algorítmico. Sin medidas específicas, esta concentración podría derivar en nuevas brechas en seguridad, privacidad y oportunidades económicas, colocando en desventaja a ecosistemas de innovación emergentes, pymes tecnológicas y actores del sector público.

Desde una perspectiva de “entrelazamiento ético” (un neologismo que aparecerá antes de lo previsto), las decisiones de diseño, financiación y despliegue de QML generarán impactos distribuidos que afectarán a múltiples actores, cohortes generacionales y territorios, por lo que requieren esquemas de gobernanza multinivel de nueva definición. La gobernanza de QML debe articularse sobre principios de inclusividad, transparencia y control democrático, evitando dinámicas de “ilustración oscura” basadas en la concentración de poder tecnológico en élites económicas o en modelos algocráticos promovidos por regímenes autoritarios, alejados de los principios sociales y culturales que compartimos en Europa.

Para el caso español, se propone avanzar hacia un modelo de gobernanza del QML alineado con los marcos europeos de derechos digitales, que incorpore: la evaluación sistemática de impacto ético y social, la participación de partes interesadas diversas (academia, industria, sociedad civil, administraciones) y la supervisión regulatoria informada técnicamente. Este modelo debería integrarse explícitamente en los instrumentos de planificación y financiación de la I+D+i cuántica promovidos por los agentes que son activos en el despliegue de esta tecnología y , especialmente, por las administraciones competentes.

La integración de la ética cuántica en el ciclo de vida del QML requiere mecanismos concretos, entre otros: (i) la incorporación de criterios éticos en las convocatorias de proyectos, (ii) la exigencia de planes de gestión de riesgos en QML y (iii) la definición de indicadores de impacto social y distributivo. Asimismo, es clave desplegar programas de formación especializada en ética y gobernanza de tecnologías cuánticas dirigidos a equipos de investigación, cuadros directivos del sector público y responsables de innovación en las empresas tecnológicas.

Dada la naturaleza global de las infraestructuras y las cadenas de valor cuánticas, se hace imprescindible promover la cooperación internacional para desarrollar estándares comunes de seguridad, transparencia y no discriminación en QML, minimizando disparidades entre países y regiones. España, a través de su ecosistema de parques científicos y tecnológicos, puede ejercer un papel tractor en la definición de buenas prácticas y marcos de referencia europeos en ética cuántica aplicada.

La consolidación de un enfoque de ética cuántica exige un liderazgo transformador, capaz de gestionar entornos de alta incertidumbre, sistemas complejos e impactos de largo plazo. Este liderazgo debe promover la integración sistemática de la dimensión ética en la agenda de innovación, la toma de decisiones estratégicas y el diseño institucional coordinado desde una óptica de cooperación público-privado de la II Revolución Cuántica.

Para el ecosistema español, resulta prioritario formar una nueva generación de profesionales, directivos públicos y responsables políticos que combinen competencias técnicas en tecnologías cuánticas con una sólida capacitación en ética, una filosofía política democrática asentada en la defensa de los derechos fundamentales. Solo así el desarrollo del QML y del resto de tecnologías cuánticas podrá orientarse hacia un modelo de progreso inclusivo, equitativo y transparente, evitando la reproducción de brechas previas y potenciando el “nuevo fuego de Prometeo (sin los errores del pasado)” como palanca de oportunidades sociales compartidas a nivel global.

La integración de algoritmos cuánticos en inteligencia artificial, ciberseguridad o toma de decisiones automatizada requiere una ética cuántica aplicada. Los sistemas cuánticos pueden reproducir sesgos de sus equivalentes clásicos e incluso amplificarlos debido a su complejidad y opacidad. Estos sesgos comprometen tanto la fiabilidad técnica como la legitimidad social.

Fuentes de sesgo estructural

- Desequilibrios en los datos o uso de variables proxy.
- Diseño algorítmico centrado exclusivamente en el rendimiento.
- Variaciones del hardware que generan resultados inestables.
- Brechas de acceso digital, lingüístico o territorial.

Salvaguardas operativas

- Transparencia documental con *Datasheets for Datasets* y *Model Cards*.
- Auditorías de equidad periódicas basadas en *equalized odds* o calibración intergrupar.
- Control y reversión automática ante disparidades significativas.
- Supervisión continua con paneles internos y externos.
- Diseño inclusivo mediante interfaces accesibles y multilingües.
- Cripto-gobernanza equitativa con estándares abiertos en PQC y QKD.

Indicadores de control (KPIs)

- Diferencial de precisión y acceso entre subgrupos.
- Porcentaje de modelos y datos documentados.
- Tiempo medio de corrección de sesgos.
- Nivel de cumplimiento de estándares ESG.

Estas medidas fortalecen la confianza pública y consolidan una gobernanza tecnológica coherente con los valores europeos.

8.4. Diversidad, igualdad e inclusión como motor de excelencia

La competitividad del ecosistema cuántico español depende de su capacidad para incorporar talento diverso e inclusivo en todas las fases de la cadena de valor. La Comisión Europea reconoce la igualdad de género como principio transversal en el European Research Area (ERA) y como requisito de elegibilidad en Horizon Europe (European Commission, 2023).

España puede situarse a la vanguardia impulsando programas de formación y liderazgo para mujeres en física cuántica, ingeniería y ciberseguridad, junto con políticas de atracción y retención en startups deep tech. La creación de una Red de Mujeres en Tecnologías Cuánticas, integrada en el Hub nacional y coordinada con la iniciativa Women in Quantum Technologies (WIQT), reforzaría la excelencia, la innovación y la sostenibilidad social del ecosistema.

Incorporar la diversidad no es solo una exigencia ética: incrementa la creatividad, la resiliencia y la capacidad de innovación de los equipos, elementos esenciales para competir en la próxima ola tecnológica europea.

8.5. Hacia una inteligencia cuántica compartida

La consolidación de una inteligencia cuántica colectiva redefine tanto la arquitectura técnica como el marco epistemológico de la inteligencia artificial. Supone pasar de un paradigma centrado en la eficiencia algorítmica a uno basado en la corresponsabilidad cognitiva, donde el conocimiento se produce, valida y redistribuye de manera cooperativa entre humanos, algoritmos y sistemas cuánticos.

Este cambio cultural y tecnológico sienta las bases de una inteligencia pública y compartida, orientada al bien común y a la sostenibilidad, que convierte la revolución cuántica en un proyecto colectivo de innovación y gobernanza democrática.

9. CONCLUSIÓN Y LLAMADA A LA ACCIÓN

España se encuentra en el umbral de una década decisiva para definir su posición en la revolución cuántica global. Los avances de los últimos años – desde la creación de Quantum Spain y el Hub de Comunicaciones Cuánticas, hasta la consolidación de capacidades en el CCN-CERT – han sentado las bases de un ecosistema tecnológicamente competente. Sin embargo, mantener el ritmo de las potencias líderes exigirá una transición deliberada desde la experimentación hacia la ejecución coordinada.

El reto no es solo tecnológico. Es estratégico, económico y geopolítico: la próxima década determinará quién diseña, gobierna y protege las infraestructuras cuánticas distribuidas que sostendrán la economía de datos del siglo XXI. La cuántica no es un sector más, sino un pilar de soberanía digital y seguridad nacional.

La Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas, con una inversión proyectada de 808 millones de euros y un efecto tractor estimado de 1.500 millones, consolida un marco de acción que integra capacidades científicas, industriales y de defensa. A ello se suma el Hub de Comunicaciones Cuánticas (Real Decreto 317/2025), impulsado por el CSIC, el ICFO, el IAC, el INTA y diversas universidades, que articula el desarrollo de la distribución cuántica de claves (QKD) y su aplicación a redes industriales, blockchain y comunicaciones críticas.

Aunque aún en desarrollo, este reparto funcional de competencias —con iniciativas enfocadas a la computación cuántica, a la comunicación segura y a la certificación de ciberseguridad— está evolucionando hacia un modelo de gobernanza alineado con las prioridades europeas, en particular con la iniciativa EuroQCI para redes cuánticas seguras y con la European Quantum Technology Infrastructure (EQTI). España está en disposición de contribuir no solo como usuaria, sino como codiseñadora de estándares europeos post-cuánticos, participando activamente en la definición de marcos de interoperabilidad y certificación.

El contexto internacional, sin embargo, subraya la urgencia de actuar. China ya lidera el despliegue satelital de redes QKD; Estados Unidos moviliza inversión privada masiva y marca estándares de facto; Europa continúa enfrentando el riesgo de fragmentación pese al avance del Quantum Act y la Declaración Europea sobre Tecnologías Cuánticas, promovida por España durante su Presidencia del Consejo. En este escenario, el margen temporal para consolidar una posición estratégica se mide en meses, no en décadas.

Para España, la cuestión es clara: o se construyen capacidades propias, o se asume dependencia tecnológica estructural. Superar la dualidad amenaza-oportunidad exige acción anticipatoria, orientada a fortalecer la base industrial y a acelerar la transferencia de la investigación hacia la producción.

La integración de blockchain y computación cuántica constituye un ejemplo emblemático de esta convergencia estratégica. Ambas tecnologías, aplicadas de forma coordinada, pueden generar sistemas distribuidos de confianza, auditoría y ciberseguridad imposibles de replicar con medios clásicos. España dispone ya de los elementos nucleares de un ecosistema cuántico integrado; el desafío inmediato es madurarlo y proyectarlo internacionalmente.

El llamado a la acción es inequívoco:

- Coordinar políticas públicas, programas de I+D y financiación privada bajo una estrategia de país.
- Ejecutar proyectos tractores con impacto industrial y visibilidad europea.
- Invertir en talento, estándares y gobernanza interoperable.
- Garantizar la transparencia, sostenibilidad y seguridad de las infraestructuras cuánticas nacionales.

La creación de un ecosistema cuántico soberano, interoperable y auditable debe concebirse como una política de Estado, sostenida por la colaboración público-privada y la visión de largo plazo.

ANEXO A. PARTICIPANTES EN LA ELABORACIÓN DEL WHITE PAPER

Dino Etcheverry Marsall

Cargo: CEO & Co-Founder

Empresa: Cognitive Blockchain Labs S.L.

Marca comercial: Fidestamp

Jesús Bonilla García

Cargo: Investigador Post-Doctoral

Institución: ARQUIMEA Research Center S.L.

Carlos Alejandro Peñuelas Angulo

Cargo: Investigador

Institución: Asociación Centro Tecnológico CEIT

María Dolores González Barbado

Cargo: Directora de Desarrollo de Negocio e Innovación, IFEMA Madrid

PhD Candidate, Universitat Oberta de Catalunya (UOC)

Grupo de investigación: NOUTUR – Nuevas Perspectivas en Turismo y Ocio

ORCID: 0000-0002-4213-2090

Marco López González

Cargo: Investigador

Institución: Decentralized Security

Laura Sáez-Ortuño

Cargo: Profesora / Investigadora

Institución: Universitat de Barcelona

ORCID: 0000-0001-6660-9458

Santiago Forgas-Coll

Cargo: Profesor / Investigador

Institución: Universitat de Barcelona

ORCID: 0000-0003-2288-3716

Javier Sánchez-García

Cargo: Profesor / Investigador
Institución: Universitat Jaume I
ORCID: 0000-0002-7865-0076

Marivi Domínguez

Medio: Granada Digital
Referencia: “Granada da el salto a la computación cuántica con el Centro de Innovación en Tecnologías Exponenciales”
URL: <https://www.granadadigital.es/granada-salto-computacion-cuantica-centro-innovacion-tecnologias-exponenciales/>

Luis Meijueiro

Institución: CINN – Centro de Investigación en Nanomateriales y Nanotecnología
Material audiovisual: “Simulación y computación cuántica”
URL: <https://youtu.be/wFvIGO6JzNg?si=xST0xdPdbM9sQUfh>

Aitor Moreno Fdz. de Leceta

Cargo: Responsable de Sistemas y Tecnologías Cuánticas
Institución: LKS Next
ORCID: 0000-0003-0556-4457

Juan Manuel Murillo Rodríguez

Cargo: Profesor / Investigador
Institución: Universidad de Extremadura
ORCID: 0000-0003-4961-4030

José García Alonso

Cargo: Profesor / Investigador
Institución: Universidad de Extremadura
ORCID: 0000-0002-6819-0299

Enrique Moguel

Cargo: Profesor / Investigador
Institución: Universidad de Extremadura
ORCID: 0000-0002-4096-1282

Ana María Sánchez Montero

Cargo: Responsable de Computación Cuántica
Institución: GMV Soluciones Globales Internet, SAU
ORCID: 0009-0007-0536-7206Computacu

Joan Mas Albaigès

Cargo: Director, Tecnologías Digitales
Institución: Eurecat

ANEXO B. REFERENCIAS Y DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

Publicaciones institucionales y de referencia

- AMETIC & ICEX Spain Trade and Investment – *Spain Quantum Industry Report*. Madrid, 2022.
- AMETIC – *Estudio de Casos de Uso de Tecnologías Cuánticas en España*. Madrid, 2024.
- APTE & Disruptive – *Informe de Situación 2024: Computación Cuántica en España*.
- Arizaga, I. et al. – *Tecnologías cuánticas: cómo apostar y acertar desde España y la UE*. Real Instituto Elcano & Tecnalia, Madrid, 2025.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID) – *Reporte de Tecnología: Computación Cuántica*. Washington D.C., 2025.
- EuroHPC Joint Undertaking (JU) – *Quantum Computing Infrastructure Deployment Strategy*. Luxemburgo, 2024.
- European Commission – *European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI)*. Bruselas, 2025.
- European Commission – *Quantum Europe Strategy*. Bruselas, 2 de julio de 2025.
- European Commission – *Amendment of the EuroHPC Joint Undertaking Mandate*. Bruselas, julio 2025.
- European Commission – *European Quantum Computing and Simulation Roadmap* (previsto 2026).
- Fundación General CSIC – *De bits a cúbits: Radiografía de la innovación cuántica*. Madrid, 2025.
- Gobierno de España – *Estrategia de Tecnologías Cuánticas de España 2025–2030*. Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública; Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Madrid, 2025.
- Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) – *Quantum Sensing for Astronomical Applications: Technical Report 2025*. La Laguna, 2025.
- OECD – *Measuring and Monitoring the Sustainability of Tourism at Regional Level in Spain*. París, 2024.
- SEGITTUR – *Smart and Sustainable Tourism through Data Sharing*. Datos.gob.es, 2024.

- The Quantum Insider – *MadQCI Overview*. 2024.
- NATO – *Quantum Technologies Strategy*. Aprobada en la Cumbre de Vilna, noviembre 2023.
- NATO – *Launch of the Transatlantic Quantum Community*. Bruselas, junio 2024.
- NIST (National Institute of Standards and Technology) – *First Post-Quantum Cryptography Standards Published*. Gaithersburg, agosto 2024.
- Spanish Government – *Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas*. Madrid, abril 2025.
- SIPRI (Stockholm International Peace Research Institute) – *Military and Security Dimensions of Quantum Technologies*. Estocolmo, julio 2025.
- UNESCO. (2025). *International Year of Quantum Science and Technology*. UNESCO. <https://www.unesco.org/en/years/quantum-science-technology>.
- European Quantum Industry Consortium (QulC). (2024). *Quantum computing for transportation and logistics*. Quantumconsortium.org. <https://quantumconsortium.org/publication/quantum-computing-for-transportation-and-logistics/>
- Post-Quantum. (2024). Use cases: Energy & Utilities. Postquantum.com. <https://postquantum.com/quantum-computing/use-cases-energy-utilities/>
- CINECA Quantum Computing Lab. (2023). Germany's action plan for quantum technologies. <https://www.quantumcomputinglab.cineca.it/en/2023/05/09/germanys-action-plan-for-quantum-technologies/>
- Gobierno de España. (2025, 24 abril). Spain's Quantum Technologies Strategy 2025-2030. La Moncloa. <https://www.lamoncloa.gob.es/lang/en/gobierno/news/paginas/2025/20250424-quantum-technologies-strategy.aspx>
- Council of the European Union. (2025). Quantum technologies funding note (ST-9237-2025-INIT). <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-9237-2025-INIT/en/pdf>
- El País. (2025, 24 abril). España destina 808 millones y prevé atraer 700 más para implementar el plan estratégico de tecnologías cuánticas. <https://elpais.com/tecnologia/2025-04-24/espana-destina-808-millones-y-preve-atraer-700-mas-para-implementar-el-plan-estrategico-de-tecnologias-cuanticas.html>

- Basque Quantum Alliance. (2024). Policy paper: Quantum technologies — How to bet and get it right in Spain and EU. <https://www.basquequantum.eus/en/news/policy-paper-quantum-technologies-technologies-how-bet-and-get-it-right-spain-and-eu>
- RAND Europe. (2025). Quantum’s future workforce needs more than physicists. The Quantum Insider. <https://thequantuminsider.com/2025/04/14/rand-europe-quantums-future-workforce-needs-more-than-physicists/>
- European Commission. (2024). European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI). <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>
- Quantum Flagship. (2024). European Quantum Communication Infrastructure ecosystem. <https://qt.eu/ecosystem/quantum-communication-infrastructure>
- EuroQCI Competence Consortium. (2024). About EuroQCI. <https://petrus-euroqci.eu/about-euroqci/>
- WEF. Quantum Computing Governance Principles. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Quantum_Computing_2022.pdf

Estándares y normativa técnica

- ISO – ISO 20121:2024 – Event Sustainability Management Systems.
- GHG Protocol – Standards & Guidance (2025).
- Federal Register – FIPS 203, 204 y 205: Estándares Federales de Criptografía Post-Cuántica, EE.UU., 2024.
- NIST – Transition to Post-Quantum Cryptography Standards (NISTIR 8547), 2024.
- Net Zero Carbon Events – A Net Zero Roadmap for the Events Industry, 2023.
- Artículos científicos y revisiones
- F.A. Aponte-Novoa, D. Jabba-Molinares, P.M. Wightman-Rojas – “Uso y Aplicaciones de la Integración Entre Computación Cuántica y Blockchain”, Mundo FESC, 11(21), 2021.
- J. Biamonte et al. – “Quantum Machine Learning”, Nature, 549, 195–202 (2017).
- M. Cerezo et al. – “Variational Quantum Algorithms”, Nature Reviews Physics, 3(9), 625–644 (2021).
- M.C. Caro et al. – “Generalization in Quantum Machine Learning from Few Training Data”, Nature Communications, 13, 4919 (2022).
- I. Cong, S. Choi, M.D. Lukin – “Quantum Convolutional Neural Networks”, Nature Physics, 15, 1273–1278 (2019).
- A. Pérez-Salinas et al. – “Data Re-Uploading for a Universal Quantum Classifier”, Quantum, 4, 226 (2020).

- Y. Chen, A. Khaliq – “Quantum Recurrent Neural Networks”, *Algorithms*, 17, 163 (2024).
- G. Li, X. Zhao, X. Wang – “Quantum Self-Attention Neural Networks for Text Classification”, *Science China Information Sciences*, 67, 142501 (2024).
- T. Fellner et al. – “Quantum vs. Classical: A Benchmark Study for Predicting Time Series with VQML”, *arXiv:2504.12416* (2025).
- S. Wehner, D. Elkous, R. Hansen – “Entanglement Distribution as a Service”, *npj Quantum Information*, 9(1), 78 (2023).
- N. Sangouard et al. – “Quantum Repeaters for Long-Distance Quantum Networks”, *Reviews of Modern Physics*, 93(2), 025001 (2021).
- D. Gottesman – “Quantum Digital Signatures and Blind Authentication”, *Quantum Information & Computation*, 23(1), 1–25 (2023).
- L.F. Pérez Armas et al. – “RCPSP with Quantum Annealing”, *Scientific Reports*, Nature (2024).
- F. Meier, H. Yamasaki – “Energy-Consumption Advantage of Quantum Computation”, *PRX Energy*, 4, 023008 (2025).
- A. Sebastián-Lombraña et al. – “A Blueprint for Large-Scale Quantum-Network Deployments”, *arXiv:2409.01069* (2024).
- Sood, V., R.P. Chauhan – “Quantum Computing: Impact on Energy Efficiency and Sustainability”, *Expert Systems with Applications*, 255, 124401 (2024).
- Sáez-Ortuño, L., Forgas-Coll, S., Ferrara, M. – “Quantum Kernel Methods: Convergence Theory and Applications”, *arXiv:2510.11744* (2025).
- Sáez-Ortuño, L. et al. – “Quantum Computing for Market Research”, *Journal of Innovation & Knowledge*, 9(3), 100510 (2024).

Otras fuentes relevantes

- Dataestur – Sustainability Report, 2025.
- Peral-García, D. et al. – “Systematic Literature Review: Quantum Machine Learning”, *Applied Soft Computing*, 2024.
- Barocas, S., Hardt, M., Narayanan, A. – *Fairness and Machine Learning*, 2019.
- D’Ignazio, C., Klein, L.F. – *Data Feminism*, MIT Press, 2020.
- Gebru, T. et al. – “Datasheets for Datasets”, *Communications of the ACM*, 64(12), 86–92 (2021).
- Hardt, M., Price, E., Srebro, N. – “Equality of Opportunity in Supervised Learning”, *NeurIPS*, 2016.
- Nerem, R.R. – “Quantum Bitcoin Mining”, *arXiv:2110.00878* (2021).

ANEXO C. SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AI – Artificial Intelligence

AGI – Artificial General Intelligence

CCN-CERT – Centro Criptológico Nacional – Computer Emergency Response Team

ENISA – European Union Agency for Cybersecurity

ERA – European Research Area

ESG – Environmental, Social and Governance

EuroHPC – European High-Performance Computing Joint Undertaking

EuroQCI – European Quantum Communication Infrastructure

FIPS – Federal Information Processing Standards

GHG Protocol – Greenhouse Gas Protocol

GEP – Gender Equality Plan

ICFO – Institut de Ciències Fotòniques

INTA – Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

IP – Intellectual Property

ISO – International Organization for Standardization

KPI – Key Performance Indicator

MadQCI – Madrid Quantum Communication Infrastructure

ML-KEM / ML-DSA / SLH-DSA – Algoritmos NIST de criptografía post-cuántica estandarizados en 2024

NISQ – Noisy Intermediate-Scale Quantum

NIST – National Institute of Standards and Technology

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development

PQC – Post-Quantum Cryptography

PoC – Proof of Concept

QAOA – Quantum Approximate Optimization Algorithm

QKD – Quantum Key Distribution

QC – Quantum Computing

QML – Quantum Machine Learning

QNN – Quantum Neural Network

QPU – Quantum Processing Unit

ROI – Return on Investment

WIQT – Women in Quantum Technologies

WSJ – Wall Street Journal