

2025-2030
2025-2030

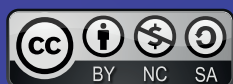


ESTRATEGIA DE TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS DE ESPAÑA

Esta impresión se ha realizado con el propósito de presentar la Estrategia de Tecnologías Cuánticas de España para su difusión y consulta. La autoría de esta publicación corresponde al Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública, que ha coordinado su elaboración y revisión con la participación de expertos en el ámbito de las tecnologías cuánticas.

Edita

Ministerio para la Transformación Digital
y de la Función Pública



Licencia Creative Commons Reconocimiento -NoComercial-Compartirigual3.0 España (CC BY-NC-SA3.0ES). Usted es libre de compartir (copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato), y adaptar (remezclar, transformar y crear a partir del material), bajo las condiciones de: Reconocimiento – Debe reconocer adecuadamente la autoría, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de una manera que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace. No Comercial – No puede utilizar el material para una finalidad comercial. Compartir: Igual – Si remezcla, transforma o crea a partir del material, deberá difundir sus contribuciones bajo la misma licencia que el original.

ESTRATEGIA DE TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS DE ESPAÑA

ÍNDICE

Prólogo	6
Capítulo I. Introducción	8
Capítulo II. Análisis Estratégico de las Tecnologías Cuánticas	12
Impacto económico	13
Impacto social	16
Impacto medioambiental	18
Impacto sobre la ciberseguridad y la privacidad	21
Esfuerzo internacional	21
Capítulo III. España: de dónde partimos	30
Capítulo IV. Objetivos estratégicos	48
Capítulo V. Prioridades de la Estrategia	52
Prioridad 1: Potenciar las empresas españolas en tecnologías cuánticas	54
Iniciativa 1.1: Casos de uso de innovación industrial aplicada	57
Iniciativa 1.2: Incubadoras y bancos de prueba en red para fomentar las <i>spin-offs</i> cuánticas españolas	57
Iniciativa 1.3: Incremento de las inversiones de capital riesgo en <i>startups</i> y <i>scaleups</i> cuánticas españolas	58
Iniciativa 1.4: Apoyo al crecimiento internacional: Born Global y Campeones Europeos	59
Iniciativa 1.5: Hacia una política industrial tecnológica, incluyendo las tecnologías cuánticas	60
Prioridad 2: Algoritmia y convergencia tecnológica entre la IA y la cuántica	61
Iniciativa 2.1: Garantizar el acceso a las capacidades de computación cuántica y el refuerzo del proyecto Quantum Spain	63
Iniciativa 2.2: Casos de uso en algoritmia y en convergencia entre IA y cuántica	64
Prioridad 3: Hacer de España un referente en comunicaciones cuánticas	66
Iniciativa 3.1: Colaboración de entidades de excelencia en comunicaciones cuánticas	68

Iniciativa 3.2: Desarrollo de misiones satelitales para distribución cuántica de claves	69
Iniciativa 3.3: Abordando retos de las comunicaciones cuánticas y ópticas	72
Prioridad 4: Demostrar el impacto de la sensórica y la metrología cuánticas	73
Iniciativa 4.1: Impulso al desarrollo de patrones cuánticos en el Centro Español de Metrología	75
Iniciativa 4.2: Impulso a la utilización del reloj cuántico del ROA	76
Iniciativa 4.3: Casos de uso de sensórica y metrología cuánticas para sectores estratégicos	78
Prioridad 5: Reforzar la privacidad y la confidencialidad de la información en el mundo postcuántico	79
Iniciativa 5.1: La privacidad postcuántica, un nuevo derecho digital	80
Iniciativa 5.2: Fomento de la compra pública innovadora	81
Iniciativa 5.3: Acompañamiento en la transición hacia la criptografía postcuántica	82
Iniciativa 5.4: Certificación nacional en ciberseguridad de los productos cuánticos	83
Prioridad 6: Reforzar las capacidades: infraestructuras, investigación y talento	84
Iniciativa 6.1: Refuerzo de infraestructuras de salas blancas y laboratorios	86
Iniciativa 6.2: Mantenimiento y mejora de las infraestructuras para la investigación fundamental y aplicada	86
Iniciativa 6.3: Impulso a las industrias auxiliares y tecnologías habilitadoras	87
Iniciativa 6.4: Líneas piloto de chips cuánticos en el seno de la Chips JU	87
Iniciativa 6.5: Refuerzo con los programas de investigación básica y aplicada	88
Iniciativa 6.6 Estudio de nuevos perfiles en formación profesional y nuevos programas educativos	89
Prioridad 7: Promover un ecosistema español cuántico sólido, coordinado y líder en la UE	90
Iniciativa 7.1: Creación de una entidad que aglutine a todo el ecosistema cuántico	91
Iniciativa 7.2: Mapeo del ecosistema cuántico	92
Iniciativa 7.3: Creación de un premio a las tecnologías cuánticas en España	93
Iniciativa 7.4: Estrategias complementarias y planes	94

Capítulo VI.

La financiación: una área abierta a la continuidad 96

Oportunidades de financiación a nivel europeo	100
---	-----

Capítulo VII.

Gobernanza de la Estrategia de Tecnologías Cuánticas de España 106

PRÓLOGO

Las tecnologías cuánticas han llegado para marcar un punto de inflexión en la historia de la ciencia. Su desarrollo supondrá una revolución sin precedentes en la investigación y en la industria porque las tecnologías cuánticas transformarán nuestra comprensión del mundo y nuestra capacidad para afrontar los grandes retos del siglo XXI. Retos para los que Europa debe estar preparada y para los que España tiene propuestas transformadoras.

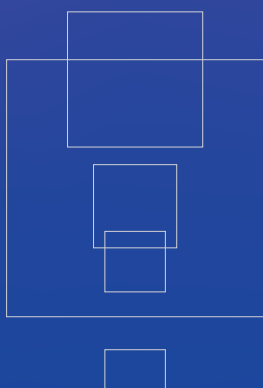
La **transformación digital, impulsada por el Gobierno de España**, debe aprovechar la oportunidad histórica que suponen las tecnologías cuánticas para fortalecer nuestra soberanía digital, estimular nuestra competitividad y garantizar un desarrollo sostenible, ético y regulado.

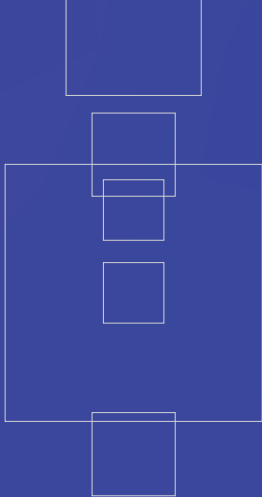
De ahí la trascendencia de la Estrategia de Tecnologías Cuánticas de España 2025-2030. Una Estrategia que surge del consenso y el trabajo de dos Ministerios transversales: el Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública y el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Pero nace también del proceso participativo con otros Ministerios, Universidades y centros de investigación, con las Comunidades Autónomas y Entidades Locales implicadas en clústeres y planes complementarios, así como de la cooperación con empresas, *startups* y ecosistema cuántico español.

Este esfuerzo colectivo cobra aún más sentido en el contexto actual, en el que la competencia global por el liderazgo cuántico se intensifica rápidamente, como ya sucede con otras tecnologías disruptivas como la Inteligencia Artificial. Todo ello en plena sintonía con las iniciativas europeas y con una mirada atenta al contexto internacional.

El Gobierno de España asume con esta Estrategia un reto sin precedentes: hablamos de una hoja de ruta que permitirá consolidar todos los avances en la materia, acelerar el ritmo en la carrera tecnológica y amplificar su impacto en la España de hoy y en la España del mañana.

Porque el propósito de esta Estrategia es proporcionar un marco común que oriente las decisiones, alinee recursos y genere confianza en todo el ecosistema cuántico nacional.





La Estrategia constituye, además, un llamamiento a la cooperación, al diálogo y a la acción coordinada. Aspiramos no solo a impulsar avances científicos e industriales, sino a crear un ecosistema robusto, integrado y responsable que garantice que los beneficios de las tecnologías cuánticas lleguen de forma inclusiva y equitativa a toda la ciudadanía. La colaboración público-privada y la implicación activa de la sociedad civil serán fundamentales para afrontar con garantías los desafíos éticos, sociales, regulatorios y geopolíticos que implican estas tecnologías.

Además, queremos resultados tangibles. Queremos orientar la innovación hacia casos de uso concretos que respondan a las necesidades de las personas y a los desafíos económicos y estratégicos del país. Y es que las tecnologías cuánticas abren oportunidades transformadoras en ámbitos clave como los nuevos materiales, la salud, la logística, la energía, la defensa, el sector espacial o la seguridad digital. Ámbitos en los que su aplicación puede marcar una diferencia decisiva.

La innovación tecnológica exige visión, ambición y compromiso. **España puede y debe impulsar una transformación digital profunda, sostenible e inclusiva.**

Por eso invitamos a todos los actores del sector a acompañarnos en el camino hacia la España cuántica. Llegamos tarde a otras revoluciones, pero en esta estamos decididos a posicionarnos de forma diferencial desde el principio y con determinación.

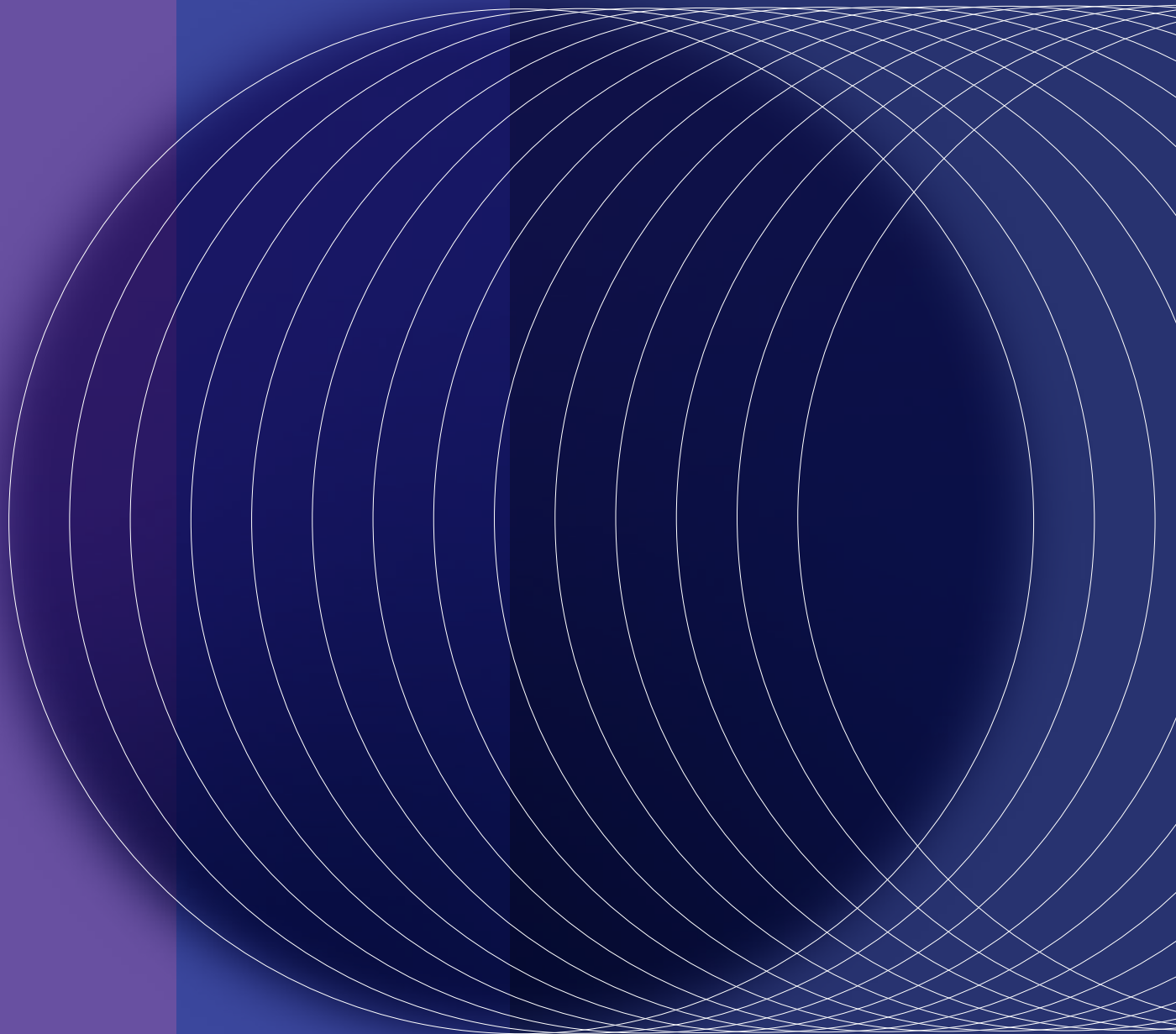


Diana Morant Ripoll,
Ministra de Ciencia, Innovación
y Universidades



Óscar López Águeda,
Ministro para la
Transformación Digital
y de la Función Pública

CAPÍTULO I:

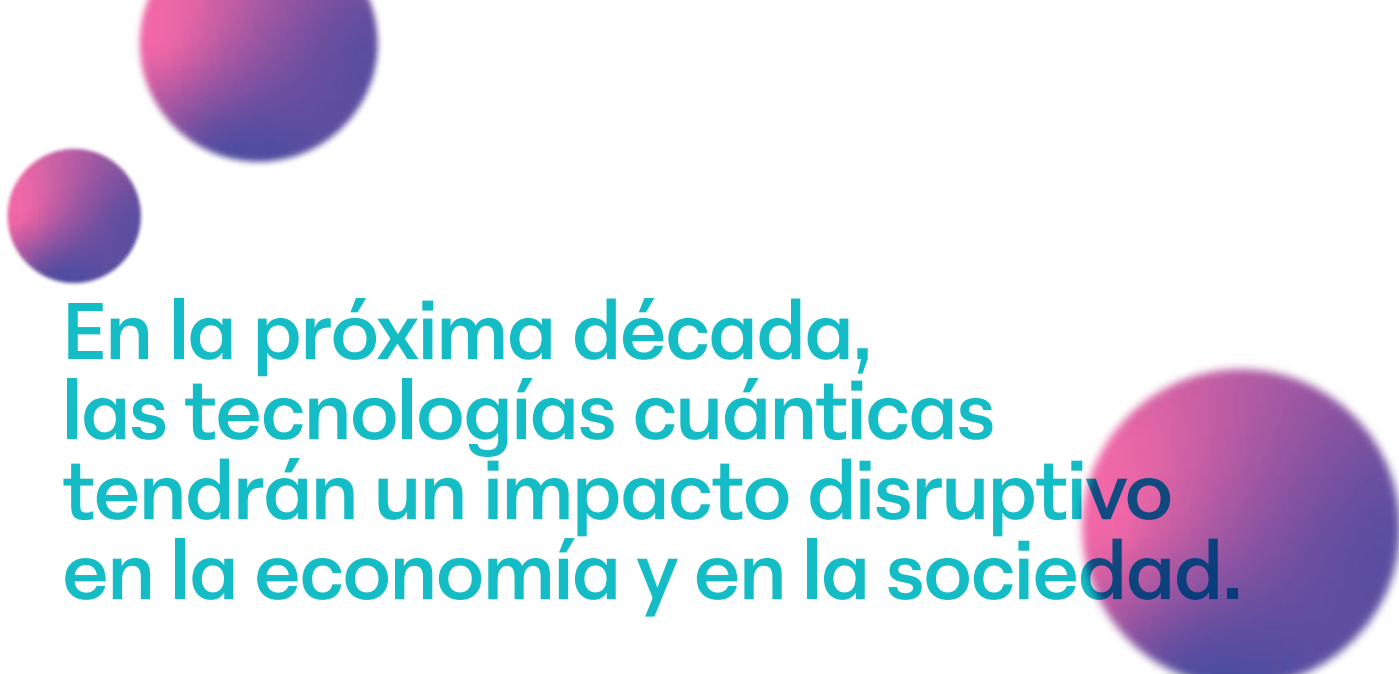


Introducción

Las tecnologías cuánticas se basan en los **principios de la mecánica cuántica**, la rama de la física que estudia el comportamiento de la materia y la energía a escalas extremadamente pequeñas, como átomos y partículas subatómicas.

Los descubrimientos de la **primera revolución cuántica**, a principios del siglo XX, marcaron un hito en la comprensión y aplicación de las propiedades de la mecánica cuántica, como las interacciones entre moléculas, átomos o partículas más pequeñas como fotones o electrones, dieron lugar a innovaciones tecnológicas con las que hoy en día convivimos. Estas han facilitado un avance transcendental de las comunicaciones y de la computación, como es el caso de los semiconductores, que son la base de los microprocesadores, o el láser, que ha tenido un papel fundamental en las comunicaciones por fibra óptica.

La **segunda revolución cuántica, en la que estamos inmersos**, va más allá y explota los conocimientos que hemos adquirido en el manejo de los fenómenos cuánticos. A diferencia de la tecnología clásica, que se rige por las leyes de la física tradicional, **las tecnologías cuánticas aprovechan fenómenos cuánticos**, como la superposición, el entrelazamiento y la interferencia, que se manifiestan especialmente en partículas subatómicas y en sistemas de estado sólido a temperaturas extremadamente bajas para desarrollar dispositivos con capacidades revolucionarias.



En la próxima década, las tecnologías cuánticas tendrán un impacto disruptivo en la economía y en la sociedad.

Las tecnologías cuánticas se suelen clasificar en tres grandes grupos: la **computación** cuántica, la **comunicación** cuántica y la **sensórica** y **metrología** cuánticas.

En primer lugar, la **computación cuántica** promete una potencia de cálculo exponencialmente superior a la ofrecida por la computación clásica actual, lo que nos permitirá encontrar soluciones más eficientes a problemas complejos, e incluso a problemas hasta ahora irresolubles. Mientras que un ordenador convencional opera sobre bits (cada uno de los cuales toma un valor definido, 0 o 1), **un ordenador cuántico opera sobre cúbits** (sistemas físicos que pueden estar en superposiciones cuánticas de los estados 0 y 1). Esta característica, junto con el paralelismo y la interferencia cuánticos, aumentan en gran medida la potencia de cálculo, reduciendo, a minutos, cálculos que llevarían siglos o directamente no serían abordables con la computación ordinaria.

Mientras se avanza en conseguir un ordenador cuántico universal, se trabaja en modelos computacionales alternativos: **la simulación y la emulación cuánticas y la computación inspirada en la cuántica**. La **simulación cuántica**, también conocida como computación cuántica analógica, soluciona problemas de alta complejidad al modelar su comportamiento con un sistema cuántico específico. Por otro lado, la **emulación cuántica** se centra en aproximar el comportamiento de ordenadores y simuladores cuánticos, mediante algoritmos especializados que pueden ejecutarse en superordenadores clásicos.

Finalmente, la **computación inspirada en la cuántica** plantea nuevas soluciones clásicas descubiertas a partir de herramientas de emulación y de entender cómo funcionan los algoritmos de los ordenadores cuánticos.

Esta capacidad supondrá previsiblemente un riesgo para la seguridad digital, ya que los ordenadores cuánticos posiblemente puedan romper los algoritmos actuales de criptografía. Para mitigar esta contingencia, se podrá implementar **algoritmos de criptografía postcuántica** (PQC, por sus siglas en inglés), resistentes a posibles ataques de ordenadores cuánticos.

Por otro lado, la **comunicación cuántica** permitirá transmitir información a grandes distancias, lo que mejorará la seguridad y recurrirá al entrelazamiento y a la teleportación cuántica para extender las distancias entre la comunicación entre el transmisor y el receptor. Para garantizar la seguridad, además, se utilizarán herramientas como el entrelazamiento y el principio de no clonación para implementar la **distribución cuántica de claves** (QKD, por sus siglas en inglés) entre distintos puntos, de manera que sea resistente a ataques cuánticos y clásicos. En el futuro, esta disciplina nos permitirá posiblemente crear una red o **internet cuántica**. Estas redes abrirán nuevas formas todavía inexploradas de computación y sensado distribuido, además de poder estudiar los límites últimos de la cuántica.

Por último, los **sensores cuánticos** son capaces de medir propiedades físicas con una **precisión notablemente superior a la de los sensores tradicionales**. Por ejemplo, pueden detectar diferencias mínimas de temperatura o cambios en el campo electromagnético o de presión con una exactitud muy superior a la de hoy día. La **metrología cuántica**, por su parte, utiliza la mecánica cuántica para mejorar la trazabilidad de las mediciones dentro del Sistema Internacional de Unidades y que sean comparables, reproducibles y robustas.

En la próxima década, **las tecnologías cuánticas tendrán un impacto disruptivo en la economía** y, al igual que ha sucedido en el pasado con otras revoluciones tecnológicas, transformarán la sociedad de maneras que hoy resultan inimaginables. Será, por ello, imprescindible dominarlas para garantizar la seguridad de las comunicaciones, de los datos y de las infraestructuras críticas; pero, sobre todo, para aumentar nuestra competitividad industrial y económica y poder actuar en mercados cada vez más globalizados.

CAPÍTULO II:

Análisis estratégico de las tecnologías cuánticas

Impacto económico

Las tecnologías cuánticas emergen como un motor clave para la economía y el empleo en sectores como la ciberseguridad, la logística, la biotecnología, las telecomunicaciones, la defensa y la energía. Se estima que **el tamaño del mercado global de las tecnologías cuánticas alcanzará entre los 106.000 y los 173.000 millones de dólares para 2040¹.**

Desde un punto de vista económico, la computación cuántica podría mejorar la eficiencia en el sector financiero, optimizar modelos de riesgo y acelerar la toma de decisiones en mercados complejos. Se estima que, por sí sola, tendrá un tamaño de mercado global de entre **28.000 a 72.000 millones de dólares para 2035 y de entre 45.000 a 131.000 millones de dólares para 2040**. En cuanto al sector de la comunicación cuántica, se alcanzará un tamaño de mercado de entre **11.000 y 15.000 millones de dólares para 2035**, con valores de hasta **36.000 millones de dólares en 2040**. Mientras tanto, la **sensores cuántica**, pese a su menor volumen en el mercado, se estima que alcanzará un tamaño de **500 millones a 2.700 millones de dólares para 2035**, aumentando hasta **6.000 millones de dólares en 2040**.

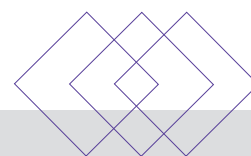
Según las proyecciones, debido al crecimiento en el valor del mercado cuántico, y de su carácter transversal, el mercado de tecnologías cuánticas podría generar un valor añadido para el conjunto de la economía de hasta **2 billones de dólares para 2035**, entendiendo que dicho valor añadido provendría mayormente de **su impacto en sectores como la química, ciencias de la vida, finanzas y movilidad**.

El tamaño del mercado global podrá alcanzar los

173.000 M\$

para 2040

¹ Quantum Economy Blueprint 2024 del Foro Económico Mundial; Quantum Technology Monitor 2024, McKinsey.



CASO DE USO

Ajustes de valoración de crédito (*Credit valuation adjustments*)

El **cálculo de los ajustes de valoración de crédito (CVA)**, crucial en la gestión del riesgo financiero, puede beneficiarse enormemente de la computación cuántica.

Algoritmos como la estimación de amplitud cuántica (QAE) y simulaciones de Monte Carlo permiten evaluar con mayor rapidez y precisión los riesgos de incumplimiento, explorando múltiples escenarios simultáneamente. Esto **reduce los costes de computación y agiliza la toma de decisiones en mercados volátiles**.

Su capacidad para modelar escenarios complejos **mejora la gestión del riesgo en instituciones financieras**, transformando la manera en que se evalúa la incertidumbre en los mercados.

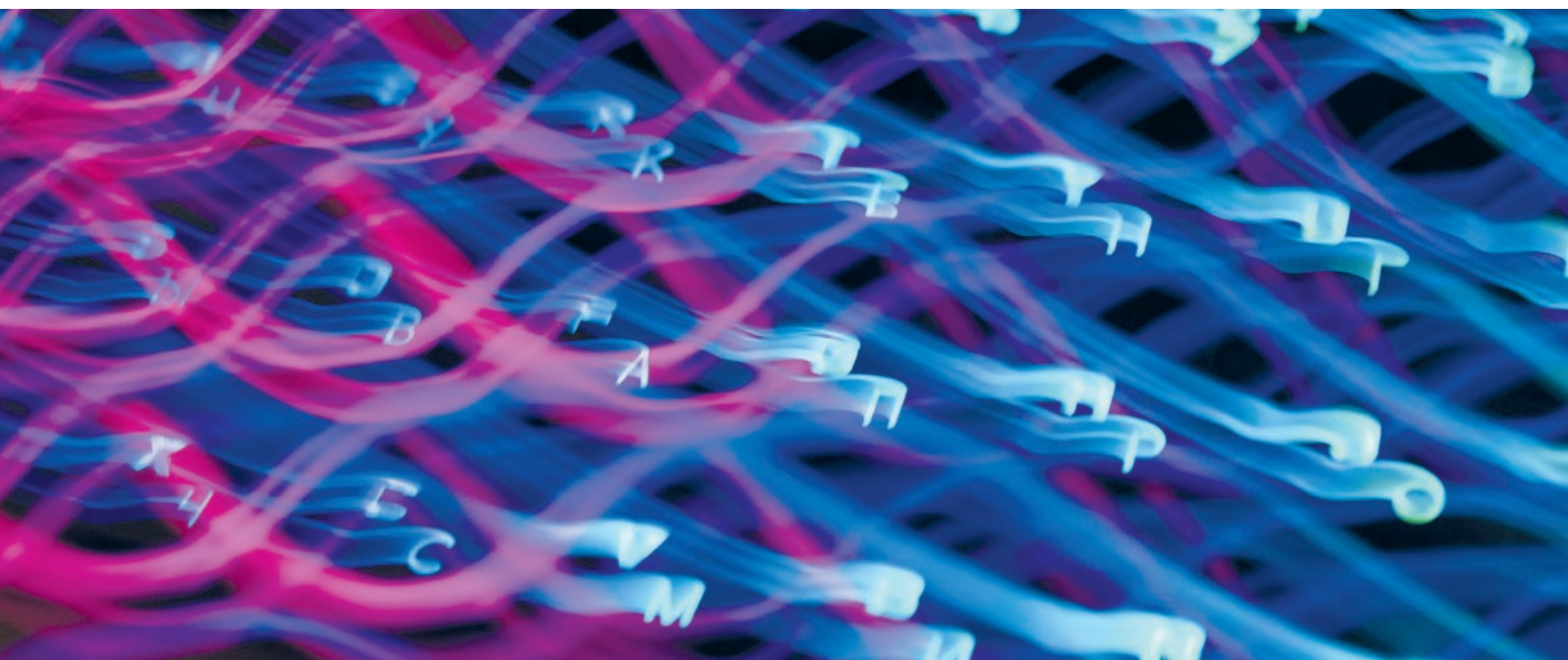
El desarrollo de estas tecnologías también generará un **efecto multiplicador en la economía**, al estimular la innovación, atraer inversiones extranjeras y fomentar la creación de nuevas empresas y *startups*. Actualmente, el sector ha acumulado **42.000 millones de dólares en financiación gubernamental** a nivel mundial y **8.500 millones de dólares en inversión de *startups* cuánticas**². A pesar de un descenso en las inversiones en *startups* cuánticas del 27 % en 2023, en favor de las *startups* de IA generativa, las tecnologías cuánticas siguen atrayendo grandes flujos de inversión por su potencial disruptivo en múltiples industrias, y su combinación con la IA se mantendrá al alza durante los próximos años.

En el caso de Europa, se prevé que el mercado de computación cuántica alcance un valor de **2.406 millones de dólares en 2030**, partiendo de los 220,7 millones registrados en 2022, lo que supone una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 34,8 % durante el período 2023-2030. Este crecimiento está impulsado, principalmente, por el **aumento de inversiones públicas y privadas**, así como por la **creciente demanda de soluciones de optimización** en sectores como la

² En este documento, el término 'cuántica' se emplea como una forma coloquial y abreviada para referirse a las tecnologías cuánticas, que abarcan aplicaciones derivadas de los principios de la mecánica cuántica en ámbitos como la computación, la comunicación y la sensorica. No obstante, 'cuántica', en sentido estricto, hace referencia a la rama de la física que estudia estos fenómenos. Esta simplificación se mantiene para facilitar la lectura, pero debe entenderse en su contexto tecnológico.

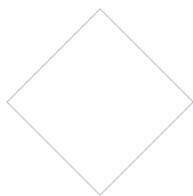
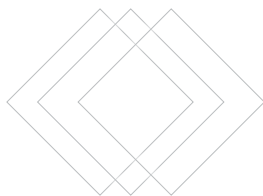
automoción, la energía, la sanidad y las finanzas. A nivel empresarial, se observa un incremento progresivo en la adopción de la computación cuántica como herramienta para resolver problemas complejos que superan las capacidades de los sistemas clásicos, consolidando a Europa³ como un actor relevante en la carrera global por estas tecnologías emergentes.

Adicionalmente, las tecnologías cuánticas están llamadas a transformar profundamente el **sector de la defensa y seguridad**⁴ a través de capacidades disruptivas que cambiarán radicalmente la guerra electrónica y las comunicaciones, la seguridad de las infraestructuras críticas y la inteligencia militar. Esto obligará a los Estados a replantear sus estrategias de defensa frente a un panorama tecnológico en rápida evolución.



³ Fortune Business Insights. *Europe Quantum Computing Market Size, Share & Industry Analysis* (2024). Disponible en: <https://www.fortunebusinessinsights.com/europe-quantum-computing-market-107725>

⁴ NATO. *Emerging and disruptive technologies* (2024). Disponible en: https://www.nato.int/cps/bu/natohq/topics_184303.html



Aplicaciones clave como los sistemas de comunicaciones seguros, la detección de plataformas o la precisión en los datos en tiempo real podrán mejorar significativamente gracias al desarrollo y el despliegue de estas tecnologías. La computación cuántica permitirá comprometer, o incluso romper, ciertos esquemas de cifrado tradicionales, e impulsar el desarrollo de nuevos métodos de criptografía cuántica resistente a ataques. La comunicación cuántica proporcionará, asimismo, canales de comunicación prácticamente invulnerables a la interceptación, fortaleciendo la seguridad de las redes militares y gubernamentales. A su vez, la detección y el radar cuántico revolucionarán las capacidades de vigilancia y reconocimiento, lo que permitirá detectar aeronaves furtivas y submarinos con una precisión sin precedentes.

Finalmente, los sensores cuánticos permitirán una navegación ultra-precisa sin depender de la señal GNSS (Global Navigation Satellite System), un aspecto crucial en entornos de interferencia electrónica o ciberataques. Por otro lado, la disponibilidad de plataformas únicas y espacios restringidos libres de interferencias externas ofrece un importante potencial para la validación y experimentación de sensores cuánticos. Estas capacidades no solo pueden fortalecer el ámbito militar, sino que también tienen el potencial de impulsar innovaciones en el sector civil basadas en esta tecnología avanzada.

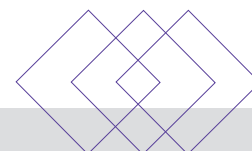
Impacto social

Desde el **punto de vista social**, estas tecnologías tienen el potencial de mejorar múltiples aspectos de la sociedad, desde la salud hasta la movilidad y la ciberseguridad. En **salud**, la computación cuántica permitirá realizar simulaciones avanzadas de procesos biomoleculares, y acelerar así el descubrimiento de fármacos y tratamientos personalizados, con un impacto proyectado de cientos de miles de millones de dólares en la industria farmacéutica⁵.

⁵ World Economic Forum, Quantum Economy Blueprint. *Insight Report* (2024). Disponible en: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Quantum_Economy_Blueprint_2024.pdf



Las tecnologías cuánticas serán una herramienta clave para el sector de la seguridad o las telecomunicaciones, pero también para la salud, la movilidad o los desastres climáticos.



CASO DE USO

Optimización de rutas de autobuses (*Bus routes optimization*)

El tráfico urbano y la gestión del transporte público pueden beneficiarse de los avances en computación cuántica.

Analizando en tiempo real variables como flujos de tráfico, eventos urbanos y patrones de movilidad, los algoritmos cuánticos optimizan las rutas de autobuses, **reduciendo tiempos de espera y mejorando la eficiencia operativa**. Esto contribuye a una movilidad más ágil, disminuye la congestión y facilita la adopción de vehículos de bajas emisiones.

En **transporte y logística**, los algoritmos cuánticos podrán optimizar rutas y reducir la congestión, mejorando la eficiencia del transporte público⁶ y reduciendo las emisiones de CO₂.

Sin embargo, aunque la tecnología cuántica representa soluciones innovadoras que favorecerán la resolución de los desafíos que encuentra el enfoque *One Health*, el acceso desigual a estas tecnologías podría agravar **desigualdades económicas y tecnológicas**. Estos desequilibrios aumentarían la brecha digital y tecnológica, limitando el acceso a sus beneficios en regiones con menor desarrollo tecnológico.

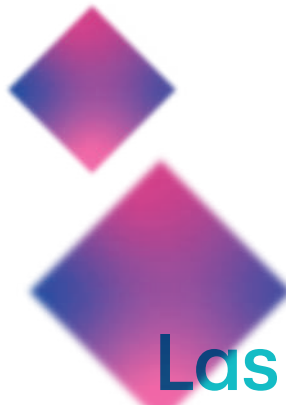
⁶ Yarkoni, Neukart, Tagle, Magiera, Mehta, Hire, Narkhede & Hofmann. *Quantum Shuttle: Traffic navigation with Quantum computing*. *Quantum Physics* (2020). Disponible en: <https://doi.org/10.1145/3412451.3428500>

Además, la automatización impulsada por la computación cuántica podría desplazar algunos puestos de trabajo⁷, lo que requiere estrategias de reconversión laboral para mitigar su impacto en la fuerza laboral. La falta de talento capacitado también es un desafío, dado que se prevé un aumento en la demanda de profesionales especializados en tecnologías cuánticas, lo que podría generar una escasez de expertos en el corto plazo.

Impacto medioambiental

Desde el **punto de vista medioambiental**, estas tecnologías pueden contribuir⁸ significativamente a **la sostenibilidad y la lucha contra el cambio climático**.

La computación cuántica tiene el potencial de **mejorar la previsión de producción energética**, permitiendo una integración más eficiente de las energías renovables en la red eléctrica y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. En la industria, esta tecnología acelerará el desarrollo de **biocombustibles avanzados y nuevos materiales**, promoviendo alternativas más sostenibles para la producción y almacenamiento de energía. También se espera que juegue un papel crucial en la **revolución de las baterías**, optimizando materiales para mejorar su eficiencia y vida útil.



Las tecnologías cuánticas pueden contribuir a la transición ecológica, por ejemplo, mejorando la previsión de producción energética.

⁷ Technological Forecasting & Social Change. Filippi, Bann, Sandro Trento. *Automation technologies and their impact on employment: A review, synthesis and future research agenda* (2023). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162523001336>

⁸ World Economic Forum. *How quantum technologies can help advance the UN Sustainable Development Goals* (2024). Disponible en: <https://www.weforum.org/stories/2024/09/how-quantum-technologies-advance-sustainable-development-goals/>



CASO DE USO

Predicción de producción energética (*Energy production forecasting*)

La integración eficiente de energías renovables depende de una predicción precisa de su producción.

Algoritmos cuánticos avanzados pueden analizar datos meteorológicos y operativos a gran escala para **anticipar la generación de energía**, reduciendo la incertidumbre y optimizando el equilibrio entre oferta y demanda. Esto permite una **mejor planificación en redes eléctricas** y una **menor dependencia de fuentes fósiles**, favoreciendo la sostenibilidad del sistema energético.



Otro avance clave es la aplicación de la computación cuántica en IA, donde los algoritmos de inspiración cuántica pueden contribuir significativamente al **ahorro energético**. Se estima que la reducción en el tiempo de parametrización de los modelos de IA permitirá optimizar el consumo de electricidad en los centros de datos, **aumentando su eficiencia y reduciendo su huella ambiental**. Esto es particularmente relevante, ya que se proyecta que hasta el 15 % de la energía global se destinará al desarrollo de modelos de IA en los próximos años⁹.

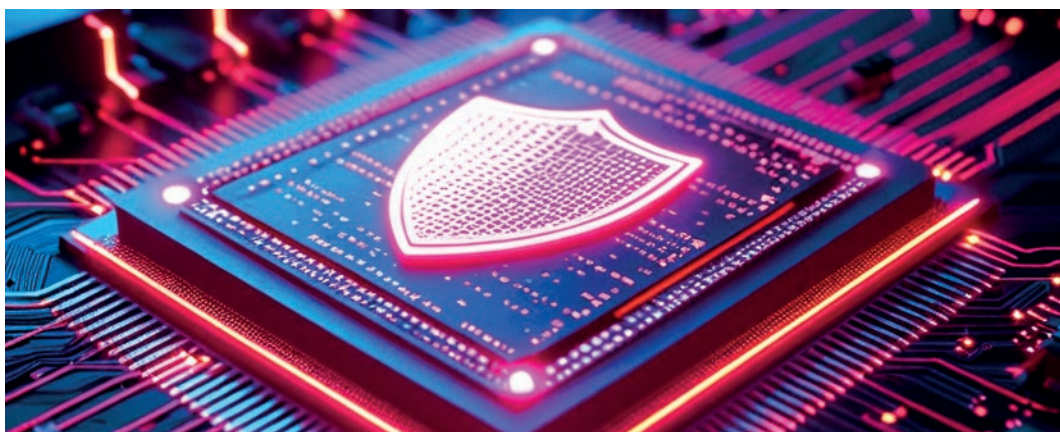
La sensórica cuántica protagonizará en el corto plazo una revolución tecnológica en ámbitos tan variados como la biomedicina, con sensores ultraprecisos, que permitirán la imagen de campos electromagnéticos a nivel celular o la navegación inercial sin GNSS. También se esperan aplicaciones en otros campos, como el medioambiental, optimizando la distribución de **energía renovable** y facilitando una transición energética más eficiente. Se espera que los **gravímetros cuánticos** jueguen un papel crucial, entre otras, en la exploración geotérmica sin necesidad de perforaciones invasivas y en el monitoreo de aguas subterráneas para mejorar la gestión de recursos hídricos.

Sin embargo, el despliegue de estas tecnologías también presenta desafíos ambientales. Los centros de datos cuánticos podrían consumir grandes cantidades de energía y, aunque a largo plazo podrían mejorar la eficiencia energética, en una fase inicial podrían incrementar la demanda de electricidad, elevando la huella de carbono global. Asimismo, el despliegue de estas tecnologías como, por ejemplo, el *hardware* cuántico, podría implicar procesos industriales intensivos en la búsqueda, la extracción y el uso de recursos naturales. Se estima que la infraestructura cuántica, en su fase inicial, podría requerir una cantidad significativa de materiales raros y superconductores, lo que plantea desafíos adicionales en términos de sostenibilidad y cadena de suministro.

⁹ World Economic Forum. *Quantum Economy Blueprint* (2024).

Impacto sobre la ciberseguridad y la privacidad

El despliegue de estas tecnologías también conllevará riesgos¹⁰ para los individuos y sus **derechos digitales**, y para la ciberseguridad en general. La computación cuántica, por ejemplo, podría comprometer los esquemas de cifrado actuales, exponiendo vulnerabilidades de las infraestructuras críticas y de estructuras gubernamentales, financieras y comerciales a posibles ataques. Esto podría comprometer la **privacidad de la ciudadanía y la seguridad de los sistemas digitales**, generando una crisis de confianza en la protección de datos personales, así como no personales, como los secretos comerciales o la propiedad intelectual.



Esfuerzo internacional

Dado el impacto económico, social y medioambiental de estas tecnologías, así como su relevancia estratégica en ámbitos como la defensa y seguridad, las principales potencias económicas han diseñado y están ejecutando estrategias enfocadas al **desarrollo y despliegue cuántico**, a través de importantes inversiones con el foco puesto en el largo plazo. Estas potencias económicas reconocen que las tecnologías cuánticas serán estratégicas para su competitividad y, sobre todo, para su soberanía tecnológica.

¹⁰ European Parliamentary Research Service. *Quantum technologies: Opportunities and risks* (2024). Disponible en: [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2024\)766237](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2024)766237)

Destacan países como **China**, con más de 15.300 millones de dólares estimados en inversión pública entre 2021 y 2027, centrada en seguridad, defensa e inteligencia artificial, según anuncios recogidos en 2023.

Estados Unidos, a través de iniciativas como la National Quantum Initiative Act 2018 y la CHIPS and Science Act 2022, ha estructurado su apoyo a la investigación cuántica con una inversión pública acumulada de 3.750 millones de dólares, a la que se suman 3.800 millones en inversión privada, lo que refleja el fuerte papel del capital riesgo en su ecosistema.

Canadá, por su parte, se ha comprometido a destinar más de 1.400 millones de dólares en inversión pública entre 2012 y 2029, y aproximadamente 1.300 millones en inversión privada. Su Estrategia Nacional Cuántica, publicada en enero de 2023, prioriza la investigación científica, la atracción de talento y la comercialización de soluciones, apoyándose en centros de innovación como DistriQ en Quebec.

Singapur ha destinado 138 millones de dólares a su programa cuántico desde 2018, con un enfoque específico en ciberseguridad, redes de comunicación cuántica e interoperabilidad tecnológica.

En el continente europeo, **Alemania** anunció en 2023 una inversión total de 5.200 millones de euros hasta 2026, con el objetivo de impulsar clústeres regionales de excelencia y desarrollar un ordenador cuántico universal con 100 cúbits operativos para ese año. El **Reino Unido**, a través de su Estrategia Cuántica Nacional 2023, ha comprometido el equivalente a 4.300 millones de dólares en inversión pública con planes concretos hasta 2035 para aplicaciones industriales y redes avanzadas. **Francia** anunció en 2021 un plan de 1.800 millones de euros centrado en computación cuántica, fotónica y creación de empleo en el sector. Finalmente, **Países Bajos**, mediante el programa Quantum Delta NL, ha destinado 965 millones de euros hasta 2030, con el objetivo de consolidar su ecosistema cuántico como uno de los más avanzados del continente¹¹.

¹¹ Datos extraídos de McKinsey & Company, *Quantum Technology Monitor*, abril de 2024, pp. 23–25, y World Economic Forum, *Quantum Economy for Society*, enero de 2024.

Las principales potencias económicas han diseñado estrategias enfocadas al desarrollo y despliegue de estas tecnologías, con inversiones a largo plazo.

En este contexto, **la competencia global en tecnologías cuánticas se intensifica**, y los países buscan posicionarse de manera política y económica, mientras también exploran la integración con IA y la supercomputación.

En la Unión Europea (UE), los informes de Mario Draghi¹², Sauli Niinistö¹³ y Enrico Letta¹⁴ han supuesto un reenfoque de nuestra acción conjunta, orientándonos hacia el refuerzo del mercado interno, la competitividad y la innovación en tecnologías duales. En la Brújula de Competitividad¹⁵, publicada en 2025, la Comisión reconoce que **las tecnologías cuánticas serán fundamentales para la seguridad económica y la soberanía tecnológica de la UE** en las próximas décadas. De hecho, la propia Comisión Europea ya establecía en la Brújula Digital¹⁶ en 2021 el objetivo de desarrollar un ordenador cuántico para 2030.

Muchas de las estrategias nacionales se pusieron en marcha gracias al impulso generado por la **iniciativa Quantum Technologies Flagship**¹⁷, lanzada en 2017 y dotada inicialmente con 1.000 millones de euros hasta 2027. A día de hoy, la UE tiene planificada una inversión de unos 8.000 millones de euros. De forma complementaria, la futura propuesta de un **Reglamento de Cuántica (Quantum Act)** aspira a consolidar un ecosistema industrial y científico paneuropeo, aumentando nuestra seguridad económica y autonomía digital. Sin embargo,

¹² Draghi, M. *The Future of European Competitiveness – A Competitiveness Strategy for Europe* (2024). Comisión Europea.

¹³ Niinistö, S. *Libro Blanco sobre Políticas de Defensa de la UE* (2024).

¹⁴ Letta, E. *El Informe Letta: Un conjunto de recetas para dinamizar la economía europea* (2024). Banco de España.

¹⁵ Comisión Europea. *Quantum Act: Regulación futura en tecnologías cuánticas*. Disponible en: <https://commission.europa.eu>

¹⁶ Comisión Europea. *Brújula Digital 2030: Objetivos estratégicos de la UE*. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu>

¹⁷ Quantum Flagship. Disponible en: <https://qt.eu>

la fragmentación de esfuerzos nacionales sigue siendo un desafío. Por ello, la UE ha instado a los Estados miembro a fortalecer la cooperación transfronteriza y evitar la competencia interna. Esta petición se ve reflejada en la **Declaración Europea sobre Tecnologías Cuánticas**¹⁸, impulsada por España durante su Presidencia del Consejo de la UE, que priorizó esfuerzos entre Estados miembro y la búsqueda de consensos. Por todo ello, cobra especial importancia un **plan común, coordinado y estratégico**, que evite la competencia interna entre estados y la duplicidad de esfuerzos, materializándose a través de la **Estrategia Europea de Tecnologías Cuánticas**, prevista para el año 2025. España está presente en los grupos de trabajo de la Comisión Europea, participando en el proceso de cocreación de esta iniciativa europea desde el primer momento, aportando información de valor y posicionamiento sobre nuestras fortalezas.

Por otro lado, crear sinergias y aprovechar la escala europea es clave para el **desarrollo de infraestructuras cuánticas**. Acciones prioritarias que nos permitirán conjuntamente tener una **red de infraestructuras** son:

- ◆ La **EuroQCI**¹⁹ (**European Quantum Communication Infrastructure**), para la implementación de una red segura de comunicaciones cuánticas, financiado por el pilar de Ciberseguridad del Programa Europa Digital y;
- ◆ El **EuroQCS**²⁰ (**Quantum Computing and Simulation infrastructure**) financiado por el pilar de la EuroHPC Joint Undertaking²¹ Programa Europa Digital para generar un ecosistema de supercomputación de alto rendimiento en la UE, integrando ordenadores y simuladores cuánticos en red para fortalecer la infraestructura de cálculo.

¹⁸ Comisión Europea. *Declaración Europea sobre Tecnologías Cuánticas* (2023). Disponible en: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/library/european-declaration-quantum-technologies>

¹⁹ Comisión Europea. *Iniciativa sobre la Infraestructura Europea de Comunicación Cuántica (EuroQCI)* (2024). Disponible en: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

²⁰ Quantum Flagship. *EuroQCS: European Quantum Computing & Simulation Infrastructure* (2022). Disponible en: <https://qt.eu/news/2022/european-quantum-computing-simulation>

²¹ Comisión Europea. *Infraestructura europea de comunicaciones cuánticas (EuroQCI) y EuroHPC*. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu>

Asimismo, en el ámbito del *hardware* cuántico, el impulso de una financiación europea específica es clave para el desarrollo de **líneas piloto de chips cuánticos**, que podrán abarcar tecnologías como la fotónica, superconductores, átomos fríos, iones atrapados, semiconductores y diamantes, teniendo en cuenta la diversificación necesaria en estas tecnologías habilitadoras.

A su vez, los programas de financiación como la Plataforma STEP²² (Strategic Technologies for Europe Platform), que se centra en proyectos de desarrollo o fabricación de tecnologías estratégicas pudiendo ampliar la financiación en ellas desde los Estados miembro, el European Tech Champions Initiative (ETCI), donde España contribuye con 700 millones de euros²³ para financiar las últimas rondas de inversión de capital riesgo, y el European Innovation Council (EIC) Accelerator²⁴, que se centra en operaciones presemilla y semilla, serán clave para que las *startups* cuánticas europeas puedan competir a nivel global sin depender de capital extranjero, además de **acelerar la industrialización de las tecnologías cuánticas**, salvaguardando nuestra autonomía estratégica.

Cobra especial importancia un plan común, coordinado y estratégico entre Estados miembro de la UE.



²² Comisión Europea. STEP. Disponible en: https://strategic-technologies.europa.eu/index_en

²³ Ministerio de Economía, Comercio y Empresa de España. Fondo European Tech Champions Initiative (ETCI). Disponible en: <https://portal.mineco.gob.es/es-es/comunicacion/Paginas/fonfo-European-Tech-Champions-Initiative-.aspx>

²⁴ Comisión Europea. Communication from the Commission. A competitiveness Compass (2025). Disponible en: https://commission.europa.eu/document/download/10017eb1-4722-4333-add2-e0ed18105a34_en

España se debe mover en un contexto altamente competitivo y debe priorizar sus inversiones en tecnologías cuánticas como clave para la soberanía digital y la seguridad económica.

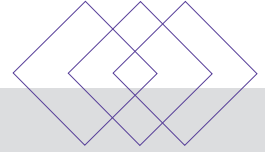
A nivel transatlántico, la OTAN ha activado una estrategia²⁵ para hacer frente a los cambios que, previsiblemente, introducirán estas tecnologías, al considerarlas como emergentes y disruptivas con **potencial de revolucionar la forma en que opera y conduce sus operaciones de defensa**. Destacan el Acelerador de Innovación en Defensa para el Atlántico Norte (DIANA, por sus siglas en inglés), la Comunidad Cuántica Transatlántica (TQC, por sus siglas en inglés), enfocada en la aplicación de las tecnologías cuánticas en defensa, y la Organización de Ciencia y Tecnología²⁶ (STO, por sus siglas en inglés), que promueve el intercambio de información entre actores clave y recientemente ha creado un Panel específico de Ciencia y Tecnología (TSI, por sus siglas en inglés) para cubrir las tecnologías cuánticas, entre otras.

Este análisis demuestra que España se debe mover en un contexto altamente competitivo y debe **priorizar sus inversiones en tecnologías cuánticas** como elemento clave para la **soberanía tecnológica y la seguridad económica nacional y europea**. En este escenario, el país no puede quedarse atrás ; debe aprovechar las oportunidades derivadas del desarrollo y el despliegue de estas tecnologías, asegurando su integración en la cadena de valor global y contribuyendo activamente al ecosistema cuántico europeo.

Para ello, es esencial entender el punto partida de España y su ecosistema, de manera que se puedan reforzar las áreas donde ya se cuenta con fortalezas y desarrollar al máximo las oportunidades de liderazgo, además de preparar a la sociedad para el cambio disruptivo que implican estas tecnologías, promoviendo una transición estructurada que garantice beneficios económicos y sociales a largo plazo. La coordinación nacional entre actores clave será determinante para consolidar un ecosistema cuántico robusto y competitivo que posicione a **España como un referente europeo en esta revolución tecnológica** y, a la vez, le permita aprovechar sinergias y recursos europeos a medio y largo plazo.

²⁵ OTAN. *NATO releases first ever quantum strategy* (2024). Disponible en: https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_221601.html

²⁶ OTAN. *DIANA, TQC y STO: Tecnologías emergentes en defensa* (2024). Disponible en: https://www.nato.int/cps/fr/natohq/topics_184303.htm?selectedLocale=en

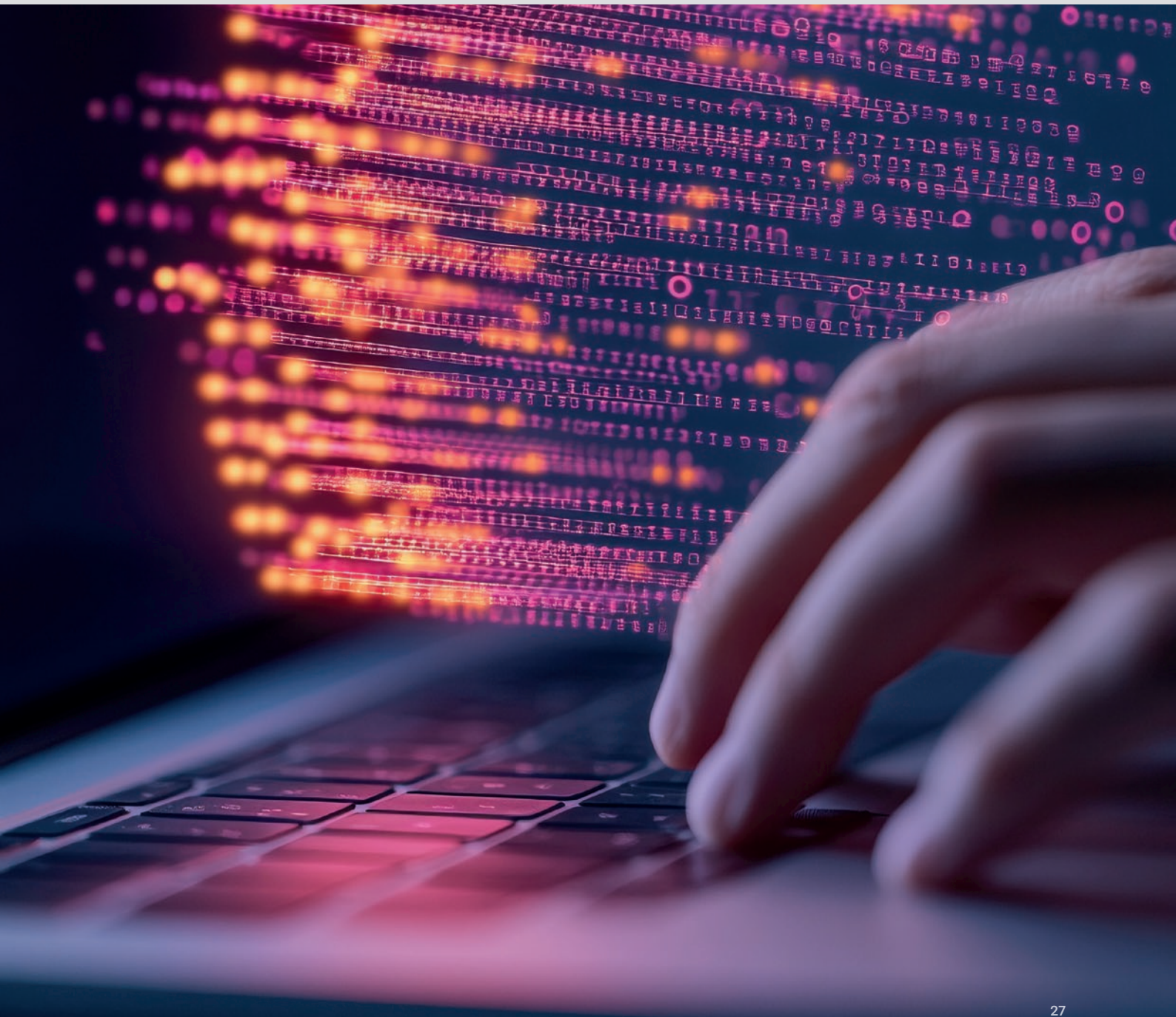


CASO DE USO

Simulación de riesgos climáticos (*Climate risk simulation*)

Ante fenómenos climáticos extremos, la **capacidad de anticipar riesgos es fundamental**.

Algoritmos cuánticos pueden **simular escenarios de huracanes, sequías o inundaciones** con mayor precisión, ayudando a gobiernos y empresas a **diseñar estrategias de mitigación** más eficaces. Esto fortalece la resiliencia de infraestructuras y economías ante el cambio climático.



Aplicación práctica de las tecnologías cuánticas a los ODS

2 HAMBRE CERO



En **agricultura (ODS 2: Hambre Cero)**, la computación cuántica podría optimizar la producción de cultivos, mejorar la asignación de recursos y facilitar el monitoreo del estado de las plantas. Además, permitiría acelerar el desarrollo de fertilizantes de nueva generación y alternativas a pesticidas ecológicos y seguros, acelerando el análisis genético de cultivos y los procesos de mejoramiento agrícola.

6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO



En **gestión del agua (ODS 6: Agua Limpia y Saneamiento)**, tecnologías como los gravímetros cuánticos permitirían un monitoreo más preciso de los acuíferos subterráneos, esenciales para el suministro de agua potable y la agricultura. Los sensores cuánticos altamente sensibles podrían detectar contaminantes en el agua con mayor rapidez y precisión que las tecnologías actuales, mientras que las simulaciones cuánticas contribuirían al desarrollo de nuevos sistemas de filtración y purificación.

11 CIUDADES Y
COMUNIDADES
SOSTENIBLES



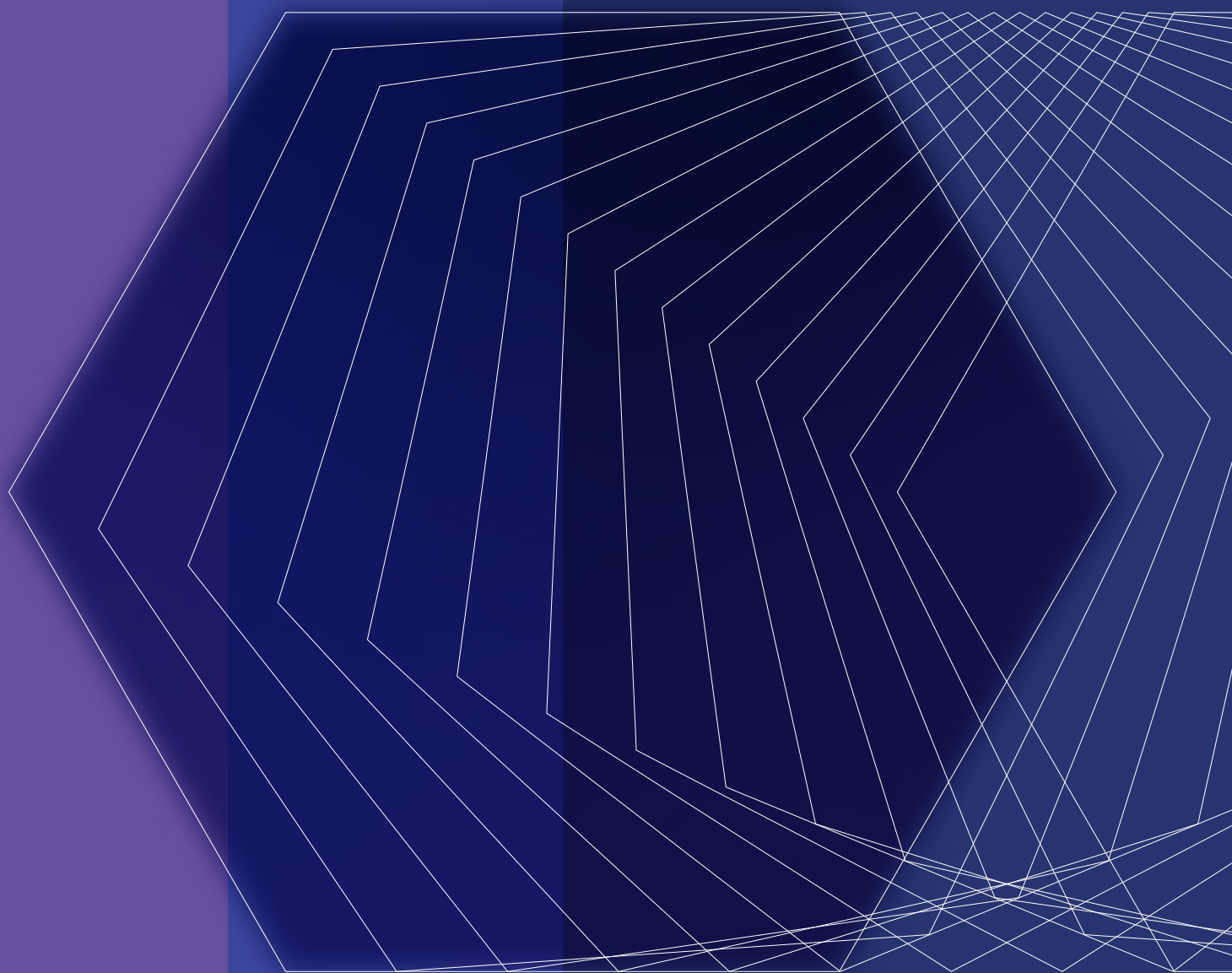
Para **ciudades más sostenibles (ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles)**, la computación cuántica ayudaría a mejorar la planificación urbana, optimizar el tráfico y reducir la contaminación mediante la gestión eficiente del transporte. Además, facilitaría la creación de nuevos materiales para infraestructuras más resistentes y sostenibles. También se espera que contribuya a una predicción más precisa de fenómenos climáticos extremos como sequías, terremotos e inundaciones.

13 ACCIÓN
POR EL CLIMA



En cuanto a la **acción climática (ODS 13: Acción por el Clima)**, la computación cuántica podría acelerar la descarbonización, optimizando el uso de energía y reduciendo emisiones de CO₂. Las simulaciones cuánticas en química y ciencia de materiales serían clave para desarrollar nuevas tecnologías de energía renovable, mejorar baterías y avanzar en métodos de eliminación de carbono. También permitirían una mejor previsión de la producción de energía eólica y solar, apoyando la transición hacia un sistema energético sostenible.

CAPÍTULO III:



España:
de dónde
partimos

España parte de una **posición sólida en el desarrollo de tecnologías cuánticas**, con inversiones realizadas desde el año 2020 gracias al Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia por el Gobierno de España, y gracias también a las Comunidades Autónomas y Entidades Locales. Esto ha permitido experimentar avances significativos en el desarrollo de las tecnologías cuánticas, especialmente en computación y comunicaciones cuánticas, así como la aparición progresiva de ecosistemas autonómicos y nacionales.

En el ámbito científico, España cuenta con una **base investigadora sólida y reconocida** en áreas clave de las tecnologías cuánticas, así como una creciente inversión en capital humano. El Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU) ha impulsado diversas iniciativas en este ámbito, enmarcadas en la **Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación (EECTI)**²⁷ 2021-2027, y en el **Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación (PEICTI)**²⁸ 2024-2027.

España contribuye regularmente a la financiación de **grupos de investigación fundamental y aplicada**, lo que la ha consolidado como un referente en las diferentes tecnologías, especialmente en la creación de dispositivos cuánticos de comunicación óptica, su integración en redes comerciales y en el ámbito de los sensores cuánticos. Desde 2016, a través de la Agencia Estatal de Investigación (AEI), se han financiado con 46,8 millones de euros un total de 366 proyectos, además de 51 millones de euros para ayudas a la contratación de personal especializado en tecnologías cuánticas (138 contratos de investigación Ramón y Cajal, 122 Juan de la Cierva, 19 del Programa Torres Quevedo y 6 ayudas para la formación de doctores en colaboración con la industria).

²⁷ Ministerio de Ciencia e Innovación. *Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021-2027* (2021). Disponible en: <https://www.ciencia.gob.es/en/Estrategias-y-Planes/Estrategias/Estrategia-Espanola-de-Ciencia-Tecnologia-e-Innovacion-2021-2027.html>

²⁸ Ministerio de Ciencia e Innovación. *Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación* (2024). Disponible en: <https://www.ciencia.gob.es/Estrategias-y-Planes/Planes-y-programas/PEICTI.html>



35

laboratorios
colaboran
en la Plataforma
Temática
Interdisciplinar
en Tecnologías
Cuánticas
del CSIC

En el ámbito de la investigación, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) lidera la **Plataforma Temática Interdisciplinar en Tecnologías Cuánticas (PTI QTEP-CSIC)**²⁹, que agrupa a 35 laboratorios de 21 centros españoles y se organiza en tres áreas: tareas de adquisición (sensórica y metrología), comunicación, y procesamiento de información cuántica (computación y simulación). Esta red de colaboración integra en sus actividades de investigación y formación a numerosas universidades, organismos públicos de investigación y empresas. Por ejemplo, se ha creado un **laboratorio de computación cuántica en Oviedo (CINN)**³⁰, un **laboratorio de comunicación cuántica en Madrid (ITEFI-CSIC)**³¹ o el **máster interuniversitario en tecnologías cuánticas de España**³², coordinado por el CSIC a través de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP), en colaboración con otras nueve universidades.

El **Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)** se ha consolidado como uno de los centros de referencia internacional en tecnologías cuánticas, liderando investigaciones pioneras en fotónica cuántica, sensores cuánticos de alta precisión y comunicaciones cuánticas seguras. Su trabajo ha sido clave en el desarrollo de sistemas avanzados de detección cuántica y en el despliegue de infraestructuras para redes de distribución cuántica de claves.

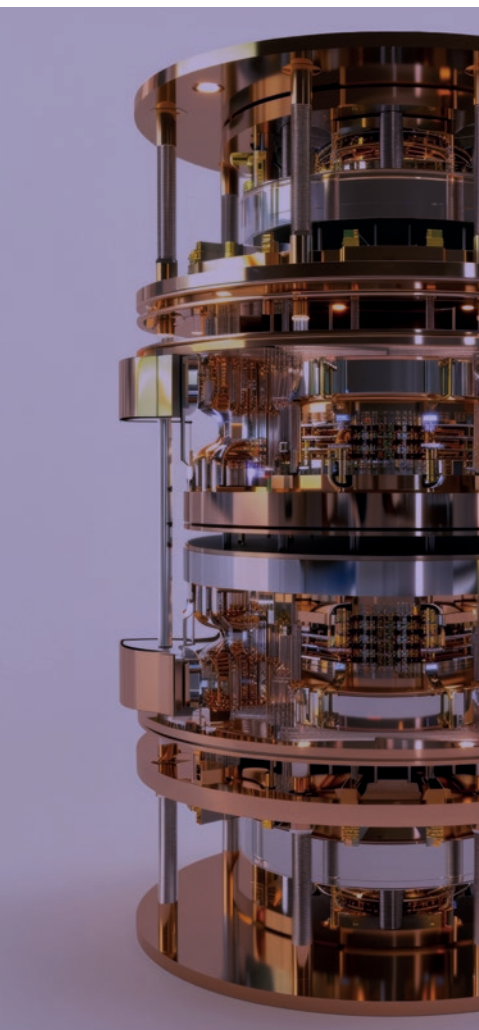
Otro organismo clave en investigación española es el **Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)**, que investiga sobre la **compensación de los efectos adversos de la turbulencia atmosférica**, un desafío clave para la implementación de estas tecnologías en entornos operativos. El IAC es un referente mundial en la aplicación astrofísica de estas técnicas.

²⁹ CSIC. *Plataforma Temática Interdisciplinar en Tecnologías Cuánticas (PTI QTEP-CSIC)*. Disponible en: <https://www.qtep.csic.es>

³⁰ Centro de Investigación en Nanomateriales y Nanotecnología (CINN-CSIC). *Laboratorio de Computación Cuántica en Oviedo*. Disponible en: <https://cinn.es/>

³¹ Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI-CSIC). *Laboratorio de Comunicaciones Cuánticas en Madrid*. Disponible en: <https://www.itefi.csic.es/es/gicsi/laboratorio-comunicaciones-cuanticas>

³² Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP). *Máster Interuniversitario en Tecnologías Cuánticas (2024)*. Disponible en: <https://www.uimp.es/postgrado/estudios/fichaestudio.php?any=2024-25&lan=es&plan=P04M>



En la actualidad está construyendo la infraestructura IAClink, una instalación única en el mundo gracias a la línea de visión directa entre los observatorios del Roque de los Muchachos y del Teide. Como curiosidad, la primera demostración³³ de comunicaciones cuánticas en espacio libre se realizó entre la isla de La Palma y Tenerife en el año 2007.

Para fomentar el **liderazgo en investigación** fundamental y aplicada, también ha sido necesario desarrollar la infraestructura clave que facilite el trabajo de los investigadores. El MICIU financia y coordina tres Infraestructuras Científico-Técnicas Singulares (ICTS)³⁴, de notable importancia para las tecnologías cuánticas:

- **Micronanofabs**³⁵, compuesta de tres nodos³⁶, se dedica a la micro y nanofabricación y la fotónica.
- La **Red Española de Supercomputación (RES)**³⁷, coordinada por el **Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación**³⁸, que ofrece servicio a toda España con capacidades de supercomputación y computación cuántica y realiza inversiones en estas áreas.
- La **RedIRIS**³⁹, gestionada por la entidad pública empresarial Red.es, como red académica de comunicaciones nacional y plataforma de experimentación en estas tecnologías.

³³ Fürst, Schmitt-Manderbach, Weier, Ursin, Tiefenbacher, Scheidl, Barbieri, Perdigues, Sodnik, Kurtsiefer, Rarity, Zeilinger & Weinfurter. *Free-Space Decoy-State Quantum Key Distribution* (2008). Disponible en: <https://opg.optica.org/viewmedia.cfm?uri=OFC-2008-OWJ4&seq=0>

³⁴ Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU). *Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares (ICTS)*. Disponible en: <https://www.ciencia.gob.es/Organismos-y-Centros/ICTS.html>

³⁵ Micronanofabs. *Red de Salas Blancas de Micro y Nano Fabricación (ICTS)*. Disponible en: <https://micronanofabs.org/nosotros>

³⁶ Micronanofabs es una red distribuida formada por tres nodos situados en el Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM-CSIC), el Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microelectrónica de la Universidad Politécnica de Madrid (ISOM-UPM) y el Centro de Tecnología Nanofotónica de la Universidad Politécnica de Valencia (NTC-UPV).

³⁷ Red Española de Supercomputación (RES). *Infraestructura Científica y Técnica Singular (ICTS) de Supercomputación en España* (2024). Disponible en: <https://www.res.es>

³⁸ Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS). *Coordinador de la Red Española de Supercomputación* (2024). Disponible en: <https://www.bsc.es/es>

³⁹ RedIRIS. Disponible en: <https://www.rediris.es>

22 M€

invertidos en
Quantum Spain;
100% tecnología
europea

Cabe mencionar la **Estrategia Nacional de Deep Tech**, que está en proceso de desarrollo, impulsada por varios ministerios del Gobierno de España.

Además, el MICIU, en colaboración con seis Comunidades Autónomas⁴⁰ ha desplegado el **Plan Complementario de Comunicación Cuántica (POCC)**⁴¹, con una inversión total de 75 millones de euros entre 2021 y 2025, para apoyar el desarrollo de una infraestructura a escala nacional que permita crecer hacia la EuroQCI, potenciar el desarrollo de *hardware* y *software* para comunicaciones y procesamiento cuánticos, así como formación para la innovación y la empresa.

Por otro lado, el Ministerio de Defensa publicó su **Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa en 2020**⁴² para garantizar la superioridad operativa y la soberanía industrial en un entorno global competitivo. Este documento incluye la tecnología cuántica dentro de las líneas de I+D+i estratégicas para la defensa, con un enfoque en su potencial para la ciberseguridad, el procesamiento avanzado de datos y las comunicaciones seguras. **El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)**, dependiente del Ministerio de Defensa, se ha posicionado como **referente internacional en el ámbito de la óptica espacial** y es un actor clave en el desarrollo de sistemas espaciales de comunicaciones cuánticas, liderando iniciativas que abarcan desde la investigación hasta el despliegue. El INTA cuenta con un conocimiento consolidado en el desarrollo de plataformas espaciales, pruebas ambientales para sistemas espaciales y una red estratégica de estaciones terrenas. Además, sus capacidades en sistemas aéreos no tripulados (UAVs) refuerzan su papel en el desarrollo de tecnologías cuánticas de aplicaciones duales.

⁴⁰ Castilla y León, Madrid, Cataluña, Valencia, Galicia y País Vasco.

⁴¹ Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU). *Plan Complementario de Comunicación Cuántica: impulso a la infraestructura cuántica nacional y su integración en EuroQCI* (2022). Disponible en: https://www.ciencia.gob.es/en/Noticias/2022/Marzo/El_Ministerio_de_Ciencia_e_Innovacion_destina_54_millones_de_euros_al-Plan_Complementario_de_Comunicacion_Cuantica_para_reforzar_la_ciberseguridad_a_traves_de_la_I-D-I.html

⁴² Ministerio de Defensa. *Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID)* (2020). Disponible en: https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/e/t/etid_estrategia_de_tecnologia_e_innovacion_para_la_defensa_2020.pdf https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/e/t/etid_estrategia_de_tecnologia_e_innovacion_para_la_defensa_2020.pdf

75 M€

invertidos en el Plan
Complementario
de Comunicación
Cuántica

Desde el Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública (MTDFP) se ha impulsado la **Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial 2020 (ENIA)**⁴³ y su revisión (2024)⁴⁴ como base de posibles sinergias de futuro, reforzando **la posición de España en el ecosistema tecnológico global**. En el ámbito de las tecnologías cuánticas, el MTDFP ha realizado las siguientes inversiones, con fondos del Plan de Recuperación:

- Se ha puesto en marcha el **proyecto Quantum Spain**, coordinado por el BSC-CNS, con una inversión de 22 millones de euros⁴⁵, que ha permitido adquirir unas capacidades de computación cuántica sobre la base de superconductores y que permitirá apoyar la investigación⁴⁶ e innovación del ecosistema cuántico español⁴⁷.

⁴³ Gobierno de España. *Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial* (2020). Disponible en: <https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2020/ENIAResumen2B.pdf>

⁴⁴ Gobierno de España. *Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial 2024* (2024). Disponible en: https://portal.mineco.gob.es/es-es/digitalizacionIA/Documents/Estrategia_IA_2024.pdf

⁴⁵ Secretaria de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial. *Quantum Spain: Impulso al ecosistema cuántico español con una inversión de 22 millones de euros*. Disponible en: <https://espanadigital.gob.es/lineas-de-actuacion/quantum-spain>

⁴⁶ Las siguientes entidades de la Red Española de Supercomputación (RES) son los beneficiarios del proyecto Quantum Spain: el Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS), la Fundación Computación y Tecnologías Avanzadas de Extremadura (Computaex), el Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA), el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), el Consorcio de Servicios Universitarios de Cataluña (CSUC), el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), el Centro de Supercomputación de Castilla y León (SCAYLE), Navarra de Servicios y Tecnologías (NASERTIC), la Universidad de Zaragoza (UNIZAR), la Universidad de Valencia (UV), la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), la Universidad de Málaga (UMA) y la Universidad de Cantabria (UNICAN).

⁴⁷ Entre las entidades colaboradoras del proyecto Quantum Spain se encuentran la Universidad Complutense de Madrid (UCM), la Universidad de Barcelona (UB), la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB), el CSIC, la Universitat de les Illes Balears (UIB), la Universidad de Sevilla (US), la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), la Universidad de Oviedo (UNIOVI), la Universidad de Navarra (TECNUN), la Universidad de Granada (UGR), el Donostia International Physics Center (DIPC), el Institut de Ciències Fotòniques (ICFO), la Universidad de Santiago de Compostela (USC) y la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).



- Se ha puesto en marcha un **segundo ordenador cuántico**⁴⁸, ubicado también en el BSC-CNS. En este caso, basado en tecnología analógica, *quantum annealer*, cofinanciado por el EuroHPC JU con un total de 8,5 millones de euros, que permite diversificar en la construcción de sus infraestructuras de computación cuántica para dar servicio al ecosistema investigador e innovador.
- Con el fin de diversificar la inversión en tecnologías habilitadoras de computación cuántica, a través del **Centro de Investigación en Nanomateriales y Nanotecnología (CINN)**⁴⁹ se está construyendo un simulador y un ordenador basado en átomos de Rydberg, ubicado en Asturias, con una financiación de 7 millones de euros.

Estas iniciativas en computación cuántica se enfocan en proyectos específicos, reconociendo la **necesidad de escala europea para competir en la carrera internacional**. No obstante, resultan fundamentales para crear la infraestructura necesaria, el ecosistema cuántico y su industria auxiliar, probar avances tecnológicos y favorecer su implementación.

Todas estas inversiones en infraestructura y en investigación han generado **nuevas oportunidades de innovación y aplicación** de estas tecnologías en sectores estratégicos, como las telecomunicaciones, la energía o la defensa, propiciando el desarrollo de empresas y *spin-offs* de alto impacto en tecnologías cuánticas, algunas de ellas muy prometedoras en sus respectivos campos de actuación.

⁴⁸ Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (2025). Firma del contrato de adquisición del ordenador cuántico de EuroHPC ubicado en el BSC. Disponible en: <https://www.bsc.es/es/noticias/noticias-del-bsc/firma-del-contrato-de-adquisici%C3%B3n-del-ordenador-cu%C3%A1ntico-de-eurohpc-ubicado-en-el-bsc>

⁴⁹ Centro de Investigación en Nanomateriales y Nanotecnología (CINN). Disponible en: <https://cinn.es>



CASO DE USO

Fijación de nitrógeno para la agricultura sostenible (*Nitrogen fixation*)

El sector agrícola busca soluciones más sostenibles para la producción de fertilizantes, y la computación cuántica puede jugar un papel clave en este proceso. Mediante simulaciones avanzadas, es posible diseñar catalizadores que imiten la fijación biológica del nitrógeno, **reduciendo la dependencia de procesos industriales** altamente contaminantes.

Además de optimizar la producción, esto **facilita el acceso** a fertilizantes para pequeños agricultores y contribuye a la **reducción de emisiones** de gases de efecto invernadero.

España ya tiene experiencia ayudando a las *spin-offs* a entrar en el mercado, a las *startups* en cuántica a obtener financiación, y a demostrar con casos de uso cómo las tecnologías cuánticas pueden ayudar a conseguir una economía más productiva y eficiente. En un informe⁵⁰ publicado en 2022, se identificaban 32 empresas españolas interesadas en tecnologías cuánticas (12 de ellas grandes empresas y 20 pymes o *startups*), pero claramente este ecosistema ha crecido en los últimos años gracias a las *spin-offs* de instituciones de investigación. Además, existe un consenso institucional sobre la importancia de potenciar estas tecnologías, alineándose con la Unión Europea en la búsqueda de **mayor competitividad, autonomía y soberanía tecnológica**.

La transferencia de conocimiento entre investigación y mercado es por tanto fundamental, y muchas de las actividades quedan recogidas en el **Programa de Transferencia y Colaboración del PEICTI 2024-2027**. El Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI)⁵¹, ha representado un papel fundamental como agente financiador de la innovación cuántica. En los últimos cinco años (2020-2025), se han destinado 46,6 millones de euros a un total de 40 proyectos centrados en el desarrollo de tecnologías cuánticas y su aplicación en sectores

⁵⁰ AMETIC. *Informe La España Cuántica 2023*. Disponible en: <https://www.investinspain.org/es/publicaciones/ametic-report>

⁵¹ Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI). *Proyectos de I+D*. Disponible en: <https://www.cdti.es/ayudas/proyectos-de-i-d>

diversos (fundamentalmente TIC y energía, pero también con representación en el sector aeroespacial, en los sectores industriales y en los de seguridad y defensa). Se han utilizado tanto préstamos, a través de los **proyectos de I+D** de Transferencia Tecnológica Cervera⁵², como **subvenciones**, mediante el programa Misiones Ciencia e Innovación⁵³ que es la gran apuesta del CDTI para apoyar iniciativas estratégicas, intensivas en I+D y desarrolladas en colaboración público-privada. Bajo esta tipología, se han destinado ya 21 millones de euros para el desarrollo de tecnologías cuánticas. Entre ellos, por ejemplo, un proyecto de computación cuántica e IA para revolucionar la excelencia y la digitalización en el sector salud a través del PERTE de Salud de Vanguardia.

Del mismo modo, es muy representativa la **participación de empresas de base tecnológica**, enfocadas al desarrollo de estas tecnologías, en el programa de subvenciones NEOTEC⁵⁴. En total, desde 2020 hasta hoy, se han apoyado 16 proyectos relacionados con tecnologías cuánticas, con una subvención asociada próxima a los 5 millones de euros. Por su parte, dentro de las misiones del PERTE Chip⁵⁵, se han apoyado dos grandes proyectos (10 operaciones) con una subvención próxima a los 4,5 millones de euros para microelectrónica y semiconductores.

En las diversas Comunidades Autónomas y Entidades Locales de España se han establecido **clústeres de tecnologías cuánticas** para fortalecer sus ecosistemas de innovación y posicionarse en este ámbito emergente. Cataluña y el País Vasco han avanzado significativamente en la estructuración de sus ecosistemas cuánticos. Ambas Comunidades Autónomas han desarrollado modelos organizativos coordinados, que actúan como puntos de contacto y plataformas de colaboración para la industria, la academia y el sector público.

En **Cataluña**, en 2021 se aprobó la creación del Consell de les Tecnologies Quàntiques de Catalunya, con las funciones de asesorar al Gobierno de Cataluña sobre políticas orientadas a impulsar las tecnologías

⁵² CDTI. *Proyectos de I+D de Transferencia Tecnológica Cervera*. Disponible en: <https://www.cdti.es/ayudas/proyectos-de-id-de-transferencia-tecnologica-cervera-0>

⁵³ CDTI. *Misiones Ciencia e Innovación*. Disponible en: <https://www.cdti.es/ayudas/misiones-ciencia-e-innovacion>

⁵⁴ CDTI. *Programa de subvenciones NEOTEC: apoyo a empresas de base tecnológica*. Disponible en: <https://www.cdti.es/ayudas/ayudas-neotec>

⁵⁵ CDTI. *Misiones PERTE Chip: apoyo a la microelectrónica y semiconductores en España*. Disponible en: <https://www.cdti.es/ayudas/misiones-perte-chip>

cuánticas. A través de iniciativas como el programa de I+D+i en el marco del Plan complementario en el área de comunicación cuántica, Vall Mediterrània de la ciència i les Tecnologies Quàntiques⁵⁶ y QuantumCAT se han implementado programas específicos para el desarrollo de talento en este campo, demostrando un enfoque integral en su estrategia cuántica, anunciada en 2023.

La Estrategia Basque Quantum (BasQ) de impulso a las tecnologías cuánticas, liderada por el **Gobierno Vasco**, en coordinación con las diputaciones forales de Álava, Bizkaia y Gipuzkoa, se puso en marcha en 2023. BasQ tiene como objetivo fundamental desarrollar en Euskadi uno de los principales nodos cuánticos del mundo, partiendo de su sistema científico especializado en tecnologías cuánticas. Esta estrategia incluye iniciativas como la ampliación de la capacidad científica, la articulación y fortalecimiento de la oferta universitaria, la inducción de un proceso de aceleración de casos de uso dirigido a empresas y agentes económicos y el impulso de nuevas empresas.

BasQ prevé la instalación y puesta en marcha, para finales de 2025, de una gran infraestructura de computación cuántica modular en Donostia/San Sebastián para avanzar hacia una infraestructura *fault tolerant* de máximas prestaciones. Esta iniciativa complementa, desde la perspectiva de aceleración de uso, la visión de impulso al desarrollo de la soberanía tecnológica de computación cuántica europea para la exploración de soluciones a nuevos problemas a medida que se dotan nuevas capacidades⁵⁷. Además, Bizkaia ha presentado su estrategia industrial cuántica denominada Biquin⁵⁸, con el objetivo de consolidarse como referente en tecnologías cuánticas a nivel europeo e internacional.

⁵⁶ Generalitat Catalunya. *El Govern aprova la iniciativa "Quàntica - Vall Mediterrània de la ciència i les Tecnologies Quàntiques" per impulsar l'ecosistema d'R+D+I en tecnologies quàntiques a Catalunya* (2022). Disponible en: https://exteriors.gencat.cat/ca/ambits-dactuacio/afers_exteriors/ue/fons_europeus/detalls/noticia/20220330_Quàntica

⁵⁷ Euskadi. *El Gobierno Vasco anuncia la instalación del ordenador cuántico en Euskadi* (2025). Disponible en: <https://www.euskadi.eus/gobierno-vasco/-/noticia/2025/gobierno-vasco-e-ibm-anuncian-instalacion-del-primer-ibm-quantum-system-two-europa-ibm-euskadi-quantum-computational-center-euskadi>

⁵⁸ Diputación de Bizkaia. *Bizkaia presenta la estrategia que consolida su liderazgo internacional en la industria tecnológica cuántica* (2024). Disponible en: <https://www.bizkaia.eus/es/web/comunicacion/noticias/-/news/detailView/26249>





Galicia también está invirtiendo en computación cuántica, posicionándose como un actor clave en el mapa nacional de capacidades cuánticas. Entre sus iniciativas destaca el lanzamiento del computador cuántico Qmio en el Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA). Esta infraestructura avanzada se enmarca dentro del Polo de Tecnologías Cuánticas de Galicia⁵⁹, una iniciativa que busca generar un ecosistema de innovación, investigación aplicada y transferencia tecnológica en torno a las tecnologías cuánticas.

La **Comunidad de Madrid** se está posicionando en el futuro cuántico europeo, con una estrategia orientada a convertir la región en un *hub* de referencia en tecnologías cuánticas aplicadas. Además del despliegue de MadQCI⁶⁰ —una red de ciberseguridad cuántica que conectará el área metropolitana con la futura infraestructura europea y extracomunitaria—, la región impulsa la creación de un clúster cuántico que facilitará a las empresas el acceso a redes internacionales, su participación en programas estratégicos de I+D+i, y su integración en mercados emergentes. Esta apuesta se construye sobre una base científica sólida, una red experimental ya operativa —la más grande de Europa en distribución de claves cuánticas— y una visión clara: consolidar un ecosistema regional que integre toda la cadena de valor cuántica, desde el conocimiento hasta la empresa, potenciando el emprendimiento, la colaboración público-privada y la autonomía tecnológica.

A través de la Fundación COMPUTAEX (Computación y Tecnologías Avanzadas de Extremadura), **Extremadura** se posiciona como un actor clave en el ecosistema nacional de tecnologías cuánticas, al albergar uno de los emuladores cuánticos disponibles en España sobre arquitecturas clásicas de supercomputación. Este recurso permite a la comunidad investigadora acceder a capacidades cuánticas y simuladores, facilitando así el desarrollo y validación de algoritmos cuánticos en un entorno accesible y de alto rendimiento.

⁵⁹ CESGA. *Polo de Tecnologías Cuánticas*. Disponible en: <https://www.cesga.es/infraestructuras/cuantica/>

⁶⁰ UPM. *Arranca el proyecto Madrid Quantum* (2023). Disponible en: https://www.upm.es/?id=872392728a477810VgnVCM10000009c7648a___&prefmt=articulo&fmt=detail

La **Junta de Andalucía**, a través de la Agencia Digital de Andalucía (ADA) y en el marco del proyecto Hércules⁶¹, está financiando el desarrollo de un ecosistema de innovación en tecnologías emergentes, incluyendo la computación cuántica. La iniciativa contempla la integración de *software* de emulación cuántica sobre el supercomputador Hércules, la formación de personal especializado, y la creación de una infraestructura abierta para que startups, empresas y personal investigador puedan acceder remotamente y trabajar en el diseño y prueba de algoritmos cuánticos.



CASO DE USO

Desarrollo de fármacos mediante simulaciones cuánticas (*Drug discovery through quantum simulations*)

La investigación biomédica se beneficia enormemente de la capacidad de la computación cuántica para modelar interacciones moleculares con altísima precisión. Esto permite **identificar compuestos prometedores, optimizar su diseño y reducir los tiempos y costes de desarrollo** de nuevos fármacos.

Su aplicación es clave para **acelerar el descubrimiento de tratamientos** para enfermedades complejas, mejorando la eficiencia de la industria farmacéutica.

La **Comunidad Autónoma de Aragón** también ha comenzado a desarrollar capacidades relevantes en el ámbito de las tecnologías cuánticas, destacando el papel del Centro de Supercomputación de Aragón (CESAR). Estas iniciativas se articulan en el marco de la Estrategia de Especialización Inteligente de Aragón (S3 2021-2027), que identifican las tecnologías cuánticas como una línea emergente de interés regional en el ámbito de las tecnologías habilitadoras.

⁶¹ Junta de Andalucía. *La Junta pone en marcha el superordenador Hércules, uno de los cinco más potentes de España* (2023). Disponible en: <https://www.juntadeandalucia.es/presidencia/portavoz/gobiernoaldia/189087/hercules/superordenador/IA/computacioncuantica/ConsejeriadelPresidencia/Interior/DialogoSocialySimplificacionAdministrativa/JuntadeAndalucia>

32

empresas españolas
interesadas
en tecnologías
cuánticas en 2022

La Rioja también ha decidido apostar por el desarrollo de las tecnologías cuánticas y ha invertido en un centro de Supercomputación con infraestructura avanzada para HPC, IA y simulación cuántica para el desarrollo de aplicaciones científicas, industriales y lingüísticas de alto rendimiento. Además, TECHRIOJA albergará uno de los nodos del Centro Nacional de Supercomputación asociado al centro de datos de Industrias del Español.

Por último, **Navarra** también ha comenzado a dar sus primeros en el ámbito de la computación cuántica, impulsando el desarrollo de un sistema de emulación de computación cuántica a través de la Universidad Pública de Navarra (UPNA).

Este conjunto de iniciativas refleja la importancia de una gobernanza que considere la organización territorial de los clústeres cuánticos en España, promoviendo la colaboración entre regiones para el beneficio de todo el ecosistema nacional.

En este contexto, se destaca que **España cuenta con una destacada presencia de científicos de primer nivel en el ámbito cuántico** que desarrollan su labor en centros de excelencia internacionales. Además, profesionales españoles ocupan posiciones clave en empresas tecnológicas globales que lideran el desarrollo de *hardware*, algoritmos y aplicaciones cuánticas. Esta proyección internacional pone de manifiesto la alta calidad formativa y científica del talento español, consolidando a nuestro país como un actor relevante en la vanguardia de la investigación cuántica.

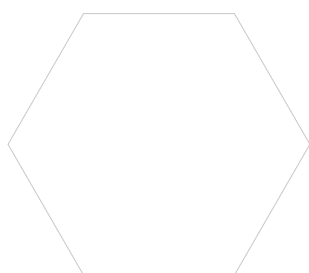
Sin embargo, España también se enfrenta a importantes **desafíos estructurales**, muchos de ellos compartidos con Europa, que limitan el crecimiento de este sector:

- La **falta de infraestructura tecnológica** limita la creación de productos y servicios cuánticos escalables. Además, la **dependencia de materiales críticos y componentes esenciales**, cuya disponibilidad es limitada, podría dificultar el desarrollo de *hardware* cuántico nacional.
- La **falta de fondos de capital riesgo** de gran escala en Europa dificulta la financiación de proyectos cuánticos. El retorno de inversión



en este sector requiere plazos largos, lo que desincentiva a los inversores privados.

- La **demanda para implantar este tipo de tecnologías** sigue siendo mínima, y todavía queda demostrar el valor añadido de estas innovaciones en entornos comerciales. Ello está ligado con la necesidad de estructurar y articular las cadenas de valor que permitan trasladar a la industria el conocimiento generado en el ámbito académico.
- La falta de coordinación entre las diferentes iniciativas públicas y privadas ha llevado a un **ecosistema nacional fragmentado**, en el que las regiones compiten por recursos, lo que podría afectar a la eficacia de los esfuerzos nacionales.
- El riesgo que supone para la seguridad, la **confidencialidad de la información y privacidad de los datos personales**. Este riesgo debe superarse a través del desarrollo e implementación de estándares de criptografía postcuántica (PQC) a todos los niveles.
- La **atracción y retención de talento** en el sector cuántico. La competencia global por profesionales altamente cualificados que se forman en España es intensa. Esto provoca una fuga de talento y una pérdida de la inversión en educación, y resta competitividad a nuestro mercado laboral.
- Es una desventaja competitiva la **ausencia de grandes corporaciones nacionales** con capacidad de escalar en el sector cuántico o de invertir en el desarrollo comercial de estas tecnologías, lo que dificulta la posibilidad de competir a nivel internacional.



A pesar de estos desafíos, existen **oportunidades** importantes para España y su ecosistema.

El país tiene la **posibilidad de consolidarse en sectores estratégicos** como la fotónica o las comunicaciones cuánticas, el software cuántico y de inspiración cuántica, la convergencia entre la IA y la cuántica, donde ya demuestra creciente liderazgo a nivel europeo. Por ejemplo,



⁶² Proyecto CUCO. Computación Cuántica para la Competitividad: aplicaciones en energía, finanzas, espacio, defensa y logística. Disponible en: <https://www.cuco.tech/proyecto>

el **proyecto CUCO**⁶², financiado por el CDTI, ha desarrollado casos de uso de algoritmia cuántica y de inspiración cuántica en sectores como energía, finanzas, espacio, defensa y logística. Asimismo, ha impulsado la formación de profesionales con habilidades en programación cuántica, un aspecto clave para el desarrollo de aplicaciones con un interés industrial.

Por otro lado, **la sensórica y metrología cuántica emerge como un sector de gran potencial** que España debe aprovechar. El riesgo de inversión en este campo es mucho menor que en otros, como la computación cuántica. Esto es así porque su nivel de madurez tecnológica y su potencial comercial son altos y están listos para el despliegue comercial. Sin embargo, se necesita infraestructura adecuada para potenciar el testeo y escalado de soluciones comerciales de sensórica cuántica, así como proyectos tractores significativos al respecto.

Por lo tanto, la oportunidad de España no solo reside en avanzar la investigación fundamental y aplicada, sino también en la **generación de un nuevo tejido industrial cuántico**, fundamental para consolidarse como un ecosistema competitivo a nivel europeo. Para ello, se deberán aprovechar la cooperación y las alianzas europeas a todos los niveles, lo que aumentará la masa crítica de empresas, innovadores e investigadores en estos sectores, potenciando su impacto y acelerando su desarrollo.



CASO DE USO

Composición musical asistida por computación cuántica (*Music composition assisted by quantum computing*)

La creatividad musical también puede beneficiarse del poder de la computación cuántica. Algoritmos especializados analizan patrones sonoros y armonías para **generar y optimizar composiciones** en función de estructuras musicales complejas.

Esta tecnología impulsa la **producción de música interactiva y facilita la experimentación**, abriendo nuevas posibilidades en la composición asistida y en la creación de bandas sonoras dinámicas.

Ecosistema cuántico en crecimiento con clústeres en Cataluña, País Vasco, Galicia, Asturias y Madrid.

Infraestructura científica avanzada (CSIC, BSC- CNS, ICFO, IAC, etc.) y laboratorios especializados.

Liderazgo en fotónica, comunicaciones cuánticas, *software* cuántico e IA.

Apoyo institucional con la Estrategia de Tecnologías Cuánticas (2025-2030).

Proyectos estratégicos en marcha que impulsan casos de uso y formación en programación cuántica.

Infraestructura limitada para escalar el *hardware* cuántico, sobre todo desde el punto de vista de mercado

Acceso limitado a capital riesgo, principalmente privado, y falta de grandes corporaciones en el sector.

Fragmentación del ecosistema cuántico, con competencia regional por recursos.

Baja demanda comercial e industrial de tecnologías cuánticas en España.

Fuga de talento por alta competencia internacional.



Sensórica y metrología cuántica con alto potencial comercial.

Atracción de inversión y desarrollo de la industria cuántica nacional.

Cooperación europea para ampliar la masa crítica de empresas y personal investigador.

Posicionamiento como *hub* cuántico en sectores como defensa, energía y logística.

Desarrollo de criptografía postcuántica para la seguridad digital.

Retraso en la adopción de estándares de seguridad cuántica.

Dependencia de materiales críticos y componentes esenciales.

Competencia global con países avanzando rápidamente en computación cuántica.

Dificultad para retener talento especializado.

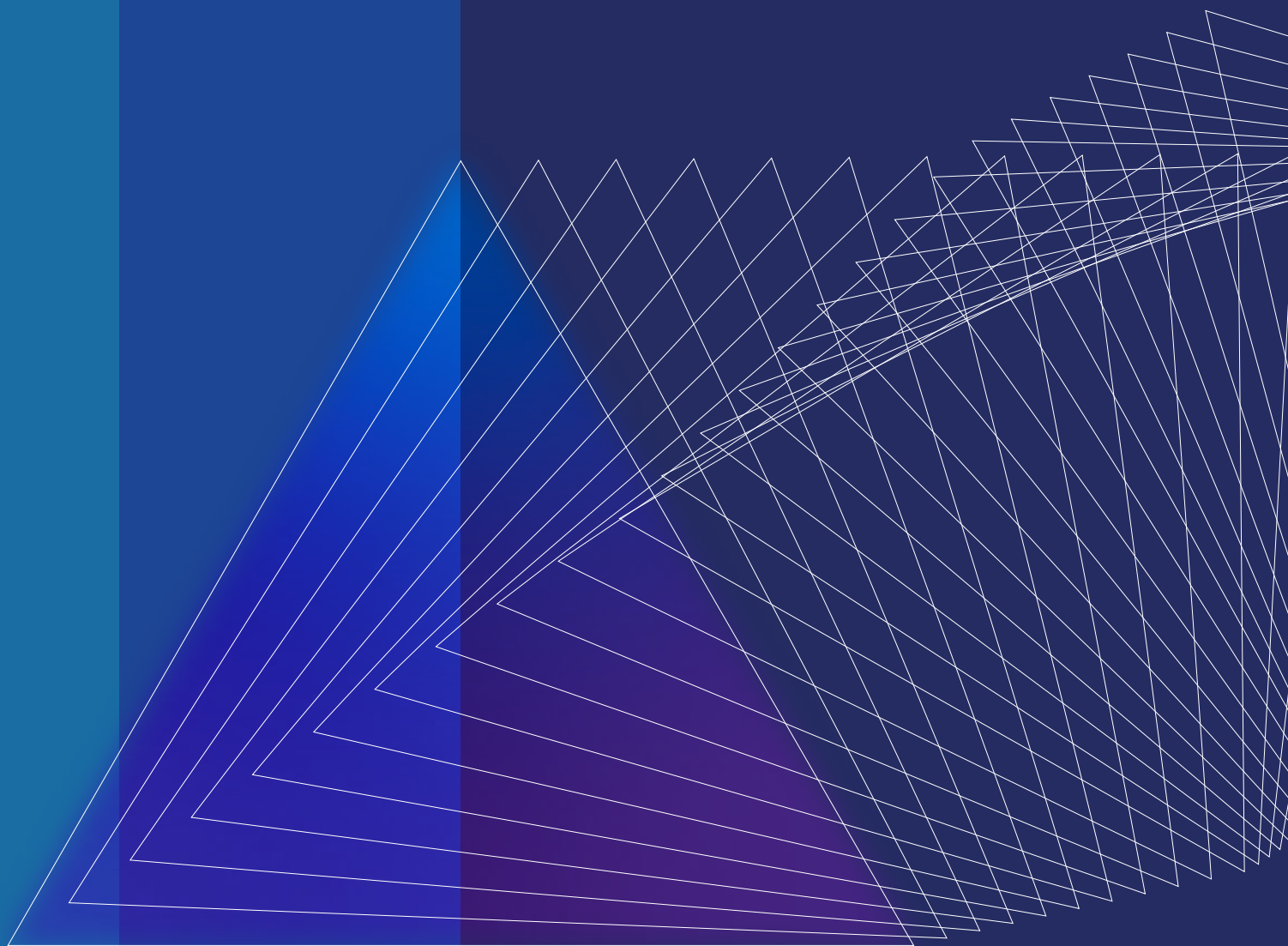
Riesgo de dependencia de actores internacionales en el sector.

Con todo ello, y enmarcando la parte del desarrollo científico de innovación en la Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación (EECTI) 2021-2027 y en el Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación (PEICTI) 2024-2027, se diseña la **Estrategia de Tecnologías Cuánticas de España (2025-2030)**. España se incorpora así a la carrera global en la que debe formar parte, priorizando inversiones en aquellas tecnologías cuánticas donde existen oportunidades de liderazgo y en palancas clave que acelerarán nuestra competitividad, con el objetivo de que **las tecnologías cuánticas estén más cerca del mercado**.





CAPÍTULO IV.



Objetivos estratégicos

Teniendo en cuenta los análisis anteriores y las inversiones ya realizadas en el país, la **Estrategia de Tecnologías Cuánticas de España (2025-2030)** se desplegará para cumplir cuatro objetivos estratégicos que serán clave para **convertir a España y su ecosistema cuántico español en una referencia europea e internacional para 2030**. Estos son:



1 Reforzar la investigación y la I+D+i para favorecer la transferencia de conocimiento y facilitar que la investigación llegue al mercado. Esto incluye establecer un diálogo continuo entre academia e industria, invirtiendo en incrementar el desarrollo de estas tecnologías.



2 Crear un mercado español cuántico, fomentando el crecimiento y la aparición de empresas cuánticas, y su capacidad de acceder a capital y de satisfacer la demanda.



3 Preparar a la sociedad para un cambio disruptivo, fomentando la seguridad a través de la encriptación postcuántica y la reflexión sobre un nuevo derecho digital: la privacidad postcuántica.



4 Consolidar el ecosistema cuántico de manera que traccione una visión de país y aproveche las oportunidades de financiación y liderazgo europeas e internacionales.

Para garantizar la consecución de estos objetivos para 2030, es imprescindible definir una serie de prioridades a implementar con iniciativas de tracción a corto, medio y largo plazo. En la definición de las prioridades y sus iniciativas, se debe adoptar un enfoque estratégico, evitando la dispersión de recursos y concentrándonos en aquellas con mayor potencial transformador. Esto implica fortalecer aquellas variantes cuánticas clave que pueden proporcionar ventajas estratégicas a nivel industrial, económico y de seguridad.

La Estrategia debe apoyarse en una **cooperación estructurada a nivel local, autonómico, nacional y europeo**, asegurando la coordinación de esfuerzos entre las Comunidades Autónomas y las Entidades Locales, el sector privado, la academia y la Administración General del Estado. Es fundamental avanzar de manera coordinada en un esquema colaborativo que maximice sinergias y evite fragmentaciones que puedan debilitar el impacto de las inversiones a nivel nacional o autonómico. A su vez, debemos **fortalecer la presencia de España en programas europeos e internacionales**, desarrollando capacidades que nos posicionen como un actor relevante en el ecosistema cuántico global. Además, dado el rápido avance de estas tecnologías y el cambiante contexto económico y geopolítico, la Estrategia deberá ser **flexible y revisable cada dos años**, para que se ajuste a los nuevos marcos de financiación y a la evolución del ecosistema cuántico español.

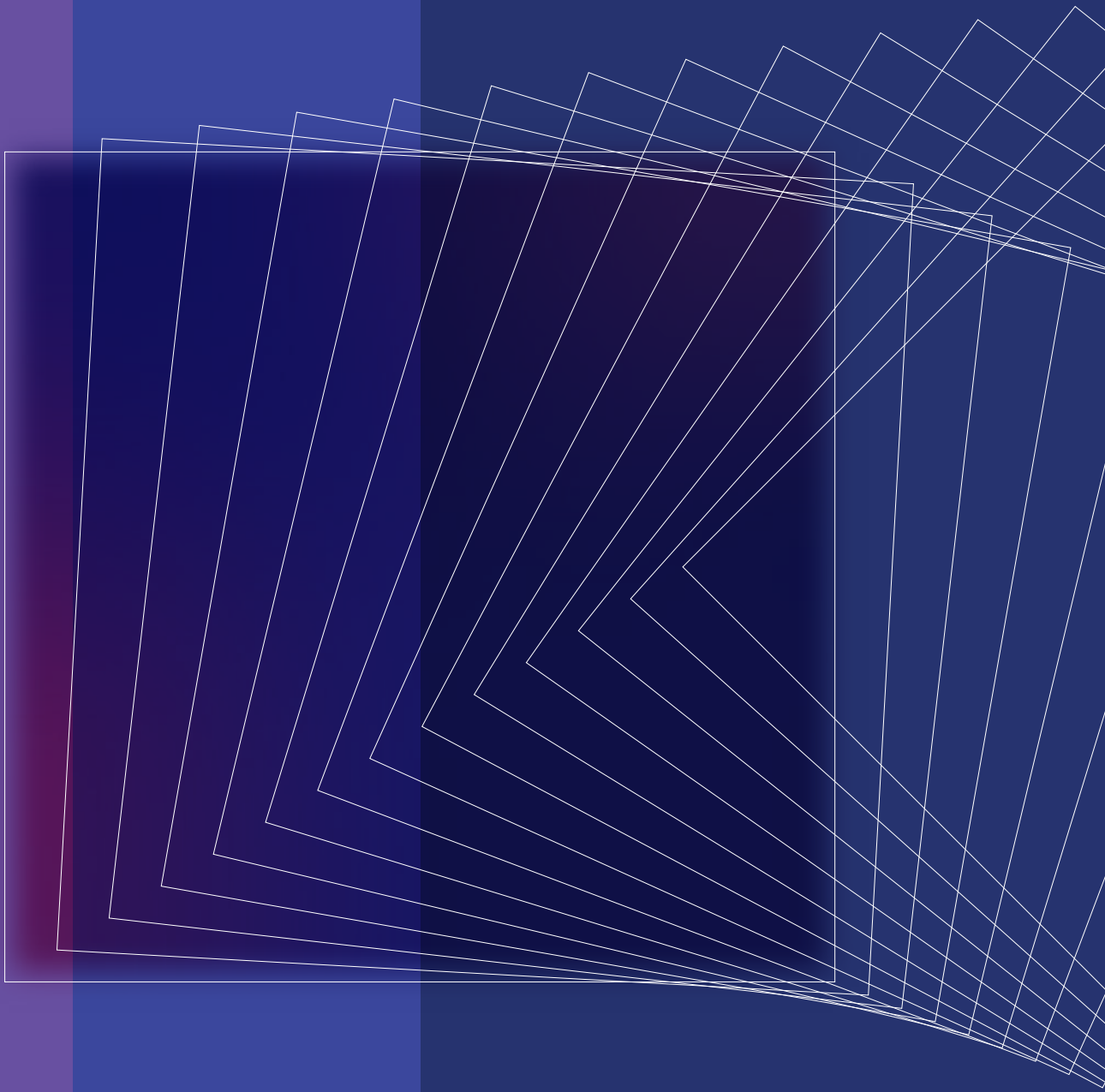
Con este enfoque, España no solo **reforzará su soberanía tecnológica y su competitividad industrial**, sino que también posicionará a las tecnologías cuánticas como un **catalizador de progreso científico** y un **pilar para el bienestar económico y social a largo plazo**.



Las tecnologías cuánticas en España deben posicionarse como un catalizador de progreso económico y bienestar social a largo plazo.



CAPÍTULO V.



Prioridades de la Estrategia

1

Potenciar las
empresas españolas
en tecnologías cuánticas

2

Algoritmia y convergencia
tecnológica entre
IA y Cuántica

3

Hacer de España un
referente en comunicaciones
cuánticas

4

Demostrar el impacto
de la **sensórica y**
metrología cuánticas

5

La **privacidad y confidencialidad**
de la información en
el mundo postcuántico

6

Reforzar las capacidades:
infraestructura,
investigación y talento

7

Promover un **ecosistema español**
cuántico sólido, coordinado
y líder en la UE



Prioridad 1: Potenciar las empresas españolas en tecnologías cuánticas

El potencial de las tecnologías cuánticas para reforzar la competitividad de España en numerosos sectores como finanzas, defensa, ciberseguridad, aeroespacial, telecomunicaciones, energía y logística, entre otros, genera **nuevas oportunidades de impulsar la aparición de actores en el mercado nacional cuántico**. Además, ese potencial se ve incrementado por las posibles sinergias de estas tecnologías con otras como la IA o la biotecnología⁶³.

Las barreras de entrada a este ecosistema cuántico, en las que interactúan demandantes y oferentes de bienes y servicios, son significativas. En este mercado, caracterizado por su naturaleza innovadora, destacan la dificultad de acceso a infraestructuras para el testeo de prototipos, como las infraestructuras de computación cuántica, la complejidad en la protección de los resultados de soluciones cuánticas, la falta de cultura empresarial en el ámbito investigador, la brecha entre investigación y comercialización, el desconocimiento de los usos y aplicaciones de estas tecnologías por parte de una demanda aún incipiente, los elevados costes iniciales y las dificultades para acceder a financiación, tanto bancaria como alternativa, en las distintas fases de crecimiento.

Específicamente, con relación a la creación de patentes, existe un problema generalizado. Si bien la Unión Europea registra un nivel de desarrollo de patentes similar al de Estados Unidos y China, solo un tercio de las patentes registradas⁶⁴ por universidades europeas son explotadas comercialmente. Sin embargo, **las startups que han registrado patentes o marcas comerciales⁶⁵ tienen hasta diez veces más probabilidades de obtener financiación** en etapas tempranas, y una probabilidad hasta dos veces mayor de convertirse en empresas

⁶³ Comisión Europea. *Commission recommendation on critical technology areas for the EU's economic security for further risk assessment with Member States* (2023). Disponible en: https://defence-industry-space.ec.europa.eu/commission-recommendation-03-october-2023-critical-technology-areas-eus-economic-security-further_en

⁶⁴ Comisión Europea. *The Draghi report: In-depth analysis and recommendations (Part B. Pag. 244)* (2024). Disponible: https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en

⁶⁵ Comisión Europea. *Informe anual sobre el mercado único y la competitividad* (2025). Disponible en: https://spain.representation.ec.europa.eu/noticias-eventos/noticias-0/el-informe-de-2025-sobre-el-mercado-unico-y-la-competitividad-de-2025-destaca-los-retos-y-2025-01-29_es



rentables. En materia de patentes cuánticas⁶⁶, Estados Unidos y China lideran en patentes de tecnología cuántica, mientras que Europa ocupa el tercer lugar en todos los segmentos de tecnologías cuánticas. A pesar del crecimiento en patentes cuánticas en Europa, la comercialización de los resultados de la investigación es insuficiente, ya que gran parte del conocimiento generado en las instituciones de investigación no se explota comercialmente.

En materia de acceso a financiación, los mercados de capital y el ecosistema de capital riesgo no están lo suficientemente desarrollados en la UE, ya que, por ejemplo aunque existen fondos de capital riesgo, el número de fondos por encima de los 1.000 millones de euros es muy inferior al de Estados Unidos. Específicamente en tecnologías cuánticas, el nivel de inversión directa en este tipo de empresas en la UE está muy por detrás del de Estados Unidos⁶⁷.

Por último, Europa tiene un 25 % de todas las pymes cuánticas existentes en el mundo, que es un porcentaje similar al de Estados Unidos⁶⁸. Este dato denota las **posibilidades reales de liderazgo global europeo** y, en definitiva, español, en el mercado mundial.

Por todo esto, el **papel del sector público debe ser activo**, estimulando la creación de mercado con el **apoyo al emprendimiento y al crecimiento de empresas cuánticas**, mediante el impulso a la innovación y la compartición del riesgo asociado a las inversiones. Ya se han realizado esfuerzos transversales en este sentido, por ejemplo, con la aprobación de la Ley de *Startups*⁶⁹, que permite agilizar la creación de una empresa emergente, así como mejorar las condiciones fiscales

⁶⁶ EuroQuIC. *A Portrait of the Global Patent Landscape in Quantum Technologies* (2025). Disponible en: <https://www.euroquic.org/wp-content/uploads/2024/03/QuIC-White-Paper-IPT-January-2024.pdf>

⁶⁷ McKinsey & Company. *Quantum technology monitor* (2024). Disponible en: https://www.mckinsey.com/~/_media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/steady%20progress%20in%20approaching%20the%20quantum%20advantage/quantum-technology-monitor-april-2024.pdf

⁶⁸ Invertia. *Europa se adentra en la inminente revolución cuántica con Madrid como epicentro. Declaraciones de Thomas Skordas, director general adjunto de la Dirección General de Redes de Comunicaciones, Contenido y Tecnologías de la Comisión Europea: "el 25% de las empresas cuánticas están ubicadas en esta región [Europa]"* (2023). Disponible en: https://www.elespanol.com/invertia/disruptores-innovadores/politica-digital/europa/20231125/europa-adentra-inminente-revolucion-cuantica-madrid-epicentro/811919224_0.html

⁶⁹ Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial. *Ley de fomento del ecosistema de las empresas emergentes (Ley de Startups)* (2021). Disponible en: https://portal.mineco.gob.es/ca-es/comunicacion/Pagines/211210_agenda.aspx

para la inversión. Del mismo modo, interesa fomentar la **protección de soluciones cuánticas innovadoras mediante patentes**, promoviendo actividades de colaboración con organismos especializados, como la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM), de cara a fomentar la innovación, proteger los derechos de los creadores y contribuir al desarrollo económico del país.

En este sentido, la función de asesor, garante y, en última instancia, partícipe del Estado en las soluciones cuánticas, permitirá no sólo favorecer la investigación en estas tecnologías, sino romper con las barreras de carácter económico e informacional que impiden al resultado de dichas investigaciones convertirse en soluciones empresariales de futuro. Por esta razón, es importante promover un diálogo constructivo entre investigadores y empresas, facilitando la transferencia de conocimiento y tecnología, así como facilitar el acceso a financiación a las distintas iniciativas empresariales cuánticas.



Por último, esta prioridad no solo busca la **creación de un mercado**, sino también el **fortalecimiento de la industrialización en la economía española**, impulsando el desarrollo de un tejido empresarial competitivo, integrado en las cadenas de valor europeas e internacionales.

Iniciativa 1.1: Casos de uso de innovación industrial aplicada

Para la creación de un mercado cuántico, es importante el fomento de la oferta, pero también el de la demanda. Por ello, se incentivará el **desarrollo de casos de uso de innovación industrial aplicada**, entendiendo estos como soluciones con aplicación directa o cuasi directa al mercado. Estos casos de uso tendrán como objetivo demostrar la aplicabilidad de las tecnologías cuánticas a necesidades existentes, favoreciendo la interrelación entre investigadores y el sector privado e incentivando la demanda.

Estos casos de uso cubrirán todo el conjunto de tecnologías cuánticas, priorizando aquellas con mayor madurez tecnológica y aplicabilidad comercial, optimizando así el impacto de la inversión.

Iniciativa 1.2: Incubadoras y bancos de prueba en red para fomentar las *spin-offs* cuánticas españolas

Esta iniciativa persigue identificar desafíos y potenciar tres aspectos esenciales para desplegar el ecosistema empresarial cuántico: incentivar el emprendimiento, extender la cultura empresarial en el ecosistema emprendedor cuántico y garantizar la protección de innovaciones cuánticas.

Se propone la **creación de una red de centros de incubación de *spin-offs* cuánticas** por el territorio nacional, que estarán acompañadas de bancos de experimentación y testeo (*testbeds*). Estas incubadoras tendrán equipos de identificación de *spin-offs* de toda la geografía española y seleccionarán aquellas soluciones cuánticas que tengan más potencial de convertirse en *startups*⁷⁰.

⁷⁰ Todos los productos y servicios nacionales desarrollados estarán sujetos a lo establecido en Real Decreto 679/2014, de 1 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento de control del comercio exterior de material de defensa, de otro material y de productos y tecnologías de doble uso.



Las incubadoras prestarán servicios de mentoría, asesoramiento y asistencia a los investigadores-emprendedores por varias vías. Por un lado, permitirán el acceso a entornos de experimentación y testeo (*testbeds*) para la prueba de dispositivos *hardware* y *software* destinados a soluciones basadas en tecnologías cuánticas, y por otro lado, se prestará asistencia personalizada y transversal en materia de emprendimiento, desde la compartición de nociones esenciales de gestión empresarial hasta los mejores mecanismos de financiación en cada fase (pre-semilla y semilla tanto nacionales como europeos), modelo de negocio y asesoramiento experto sobre patentado.

Iniciativa 1.3: Incremento de las inversiones de capital riesgo en *startups* y *scaleups* cuánticas españolas

A través de las facilidades financieras incluidas en el programa del PER-TE Chip y del Next Tech, así como de los fondos INNVIERTE de CDTI, se inyectará **financiación de capital riesgo**, en coordinación con inversores privados, en *startups* y *scaleups* cuánticas españolas de forma directa, o bien, indirecta mediante fondos de capital riesgo o corporativos. Esta iniciativa busca fortalecer el ecosistema cuántico apoyando el **crecimiento de empresas ya creadas** en el sector. Además, se pretende atraer a fondos especializados en inversiones de alto riesgo y *hardware* a España, reconociendo que las inversiones en *hardware* tienen un riesgo mayor y requieren de mayores cantidades de capital. Para ello, también se organizarán *roadshows* en toda la geografía española, promocionando las oportunidades de financiación de la Sociedad Española para la Transformación Tecnológica (SETT).

Además, se aprovecharán los **centros de incubación** y otras entidades para identificar *startups* y *scaleups* con alto potencial. En el caso de las incubadoras, expertos en emprendimiento y crecimiento empresarial podrán apoyar a investigadores-emprendedores para presentar sus proyectos a inversores públicos y privados, facilitando su acceso a rondas de financiación de Serie A y Serie B en un marco de coinversión público-privada.

Iniciativa 1.4: Apoyo al crecimiento internacional: Born Global y Campeones Europeos

El objetivo de esta iniciativa es favorecer la **internacionalización de la empresa cuántica española**, haciendo uso de las oportunidades únicas que ofrece su denominación europea como tecnología crítica e impulsando su posicionamiento en las diferentes iniciativas de financiación europeas y nacionales como las lideradas por el ICEX.

Los expertos de la red de centros de incubación realizarán un ejercicio de “preparación para STEP (Strategic Technologies for Europe Platform)”. Esto es, favorecerán el planteamiento de proyectos que puedan surgir en materia de cuántica y que puedan actuar como palanca en favor de la soberanía digital europea. En este sentido, ayudarán en lo posible a estos proyectos, ya sean de carácter nacional o incluso transnacional, en la consecución del **sello de soberanía europea** (Sovereignty Seal) que ofrece la plataforma STEP. Con la obtención de dicho sello, los proyectos que demuestren un alto valor estratégico para la autonomía tecnológica de Europa obtendrán una visibilidad prioritaria ante inversores públicos y privados, así como acceso a financiación complementaria a través de distintos instrumentos europeos.

Por otro lado, la red de centros de incubación acompañará a aquellas *spin-offs* potencialmente adecuadas para el EIC Accelerator⁷¹, facilitando una situación de *born global*⁷². En el caso de empresas en etapas más maduras, se impulsarán sus candidaturas a otras iniciativas europeas como el STEP Scale-Up⁷³.

Por último, aquellas empresas líderes en su sector se verían apoyadas en la presentación de su proyecto para obtener financiación mediante la iniciativa European Tech Champions Initiative⁷⁴ (ETCI) del Fondo Europeo de Inversiones a través del Instituto de Crédito Oficial (ICO).

⁷¹ European Innovation Council. *EIC Accelerator*. European Commission. Disponible en: https://eic.ec.europa.eu/eic-funding-opportunities/eic-accelerator_en

⁷² ICEX. *Born global: el fenómeno de las nuevas startups que nacen internacionales* (2023). Disponible en: <https://www.icex.es/es/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/como-internacionalizar-empresa/born-global>

⁷³ European Innovation Council. *STEP: Scale-up initiative*. European Commission. Disponible en: https://eic.ec.europa.eu/eic-funding-opportunities/step-scale_en

⁷⁴ European Investment Bank. *European Tech Champions Initiative* (2023). Disponible en: <https://www.eib.org/en/events/european-tech-champions-initiative>

CASO DE USO

Optimización de cadenas de suministro (Supply chain optimization)

Las cadenas de suministro enfrentan constantes desafíos en la gestión de inventarios, transporte y costos logísticos. La computación cuántica permite analizar múltiples factores simultáneamente para **mejorar la planificación, reducir tiempos de entrega y minimizar interrupciones**. Su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real hace que las cadenas de suministro sean más resilientes y eficientes en mercados dinámicos.

Iniciativa 1.5: Hacia una política industrial tecnológica, incluyendo las tecnologías cuánticas

En el contexto actual, las tecnologías cuánticas presentan un carácter estratégico y crítico para nuestra seguridad económica. Este enfoque reforzaría el liderazgo de España en el **desarrollo de capacidades cuánticas propias**, alineándose con los intereses estratégicos europeos.

El escenario presente exige evitar dependencias tecnológicas, en la medida de lo posible, para consolidar la soberanía tecnológica europea. Por ello, se propone sentar las bases de una **política industrial sobre tecnologías** con impacto directo en la producción, escalado y comercialización del sector cuántico. Esta línea de trabajo incorporará no solo las tecnologías cuánticas, sino también otras tecnologías clave para el futuro, como la IA, las neurotecnologías y la biotecnología, fortaleciendo la autonomía tecnológica de España y Europa.

Otro aspecto clave de cara a favorecer el posicionamiento de España en el mercado global de la cuántica, reside en el **estudio de la normativa interna en los controles a la exportación, especialmente en el caso de los productos de uso dual**. Así, siguiendo el principio de la no proliferación, España se compromete a mantener actualizada la normativa referente a dichos controles, permitiendo así que las relaciones con terceros países se hagan de forma segura, ágil y flexible.

2

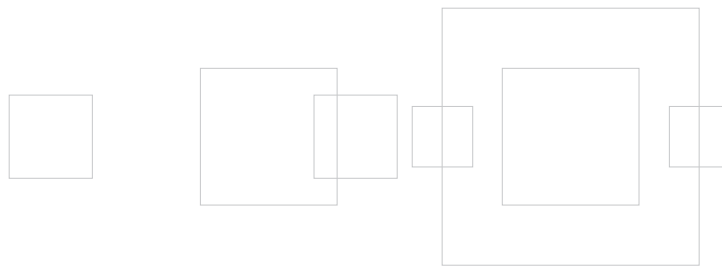
Prioridad 2: Algoritmia y convergencia tecnológica entre la IA y la Cuántica

La convergencia entre la Inteligencia Artificial (IA) y la computación cuántica⁷⁵ está redefiniendo el panorama tecnológico, impulsando avances en algoritmos y procesamiento de datos. La **algoritmia cuántica** se fundamenta en principios de la mecánica cuántica, ofreciendo nuevas estrategias computacionales con un potencial transformador. La ejecución de estos algoritmos en computadoras cuánticas permitirá, en un futuro con ordenadores cuánticos tolerantes a fallos, abordar problemas actualmente inaccesibles para los sistemas clásicos, como la factorización de números grandes o la simulación de grandes moléculas y materiales, con una eficiencia exponencialmente superior, o problemas la optimización en entornos de datos no estructurados o de simulación de modelos financieros.

Actualmente, dado que la computación tolerante a fallos es un reto de medio y largo plazo, es igualmente prioritario **demostrar ventajas cuánticas** en los procesadores cuánticos de tamaño intermedio y susceptibles a errores (NISQ, por sus siglas en inglés). En este terreno, los algoritmos híbridos cuántico-clásicos ofrecen oportunidades de utilidad en problemas tanto de naturaleza científica (simulación de modelos físicos y químicos complejos) como generalista (optimización cuántica, simulación de distribuciones de probabilidad compleja, etc.). Por ello, estos retos de vanguardia tecnológica ya están recibiendo financiación desde la Unión Europea.

Sin embargo, la escalera de adopción de la computación cuántica en el sector industrial no comienza con los procesadores anteriormente descritos, ya que la industria necesita ya soluciones con retorno de inversión y puesta en producción en el muy corto plazo. En este contexto, la **computación inspirada en la cuántica** o *quantum inspired* surge como un nuevo paradigma en la algoritmia para que a través de los principios y las técnicas de la mecánica cuántica se resuelvan problemas complejos sin necesidad de utilizar un ordenador cuántico real en diversos campos —simulación, finanzas, riesgo, etc.—. Los procedimientos y *pipelines* adoptados pueden más adelante migrar a soluciones puramente cuánticas.

⁷⁵ Quantum Flagship. *Artificial intelligence and quantum computing white paper* (2025). Disponible en: https://qt.eu/media/pdf/Artificial_Intelligence_and_Quantum_Computing_white_paper.pdf



Además, el impacto de la convergencia entre la IA y la computación cuántica se podría extender a múltiples sectores estratégicos. Por ejemplo, en la **industria farmacéutica**, la computación cuántica permitirá simulaciones moleculares más precisas, reduciendo costos y tiempos en el desarrollo de nuevos fármacos; en **finanzas**, la simulación cuántica y la inspiración cuántica ofrecen optimización avanzada de carteras y modelado de riesgos; mientras que, en **logística y energía**, posibilita soluciones más eficientes. También se puede utilizar los métodos de inspiración cuántica para compactar modelos de IA. Asimismo, tiene la posibilidad de reducir significativamente el consumo energético en un futuro en el entrenamiento y la operación de modelos de IA, en línea con los objetivos de la transición verde.

En este contexto, el **Quantum Machine Learning (QML)** surge como una posible disciplina dentro de esta convergencia con la idea de integrar la computación cuántica con el aprendizaje automático. Aunque todavía en fase de desarrollo, el QML ya ha sido objeto de numerosos estudios académicos⁷⁶ que analizan sus fundamentos y proyecciones desde enfoques tanto cuánticos como clásicos, consolidando su papel como un posible pilar fundamental en el futuro de la computación híbrida. Adicionalmente, entre otros beneficios, la computación cuántica también podría llegar a ayudar a acortar las fases de entrenamiento e hiperparametrización de los modelos de inteligencia artificial (IA)⁷⁷. Igualmente importante, es la aplicación de la IA a la creación y operación de tecnologías cuánticas, donde el ML es importante en tareas como el diseño de controles y operaciones, la implementación de códigos de corrección de error, esenciales para el escalado de estas tecnologías.

⁷⁶ Benedetti, Garcia-Pintos, Perdomo, Leyton-Ortega, Nam & Perdomo-Ortiz. *Quantum Machine Learning: A Classical Perspective*. ACM. DOI (2021). Disponible en: <https://doi.org/10.1145/3412451.3428500>

⁷⁷ IEEE. Razzouki, Charroud, Allali, Chetouani, & Aslimani. *A survey of advanced gradient methods in machine learning*. 2024 7th International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), 1–7 (2024). Disponible en: <https://doi.org/10.1109/CommNet63022.2024.10793249>

Además, el **Quantum Cloud Computing**⁷⁸ democratizará el acceso a capacidades cuánticas sin la necesidad de disponer de *hardware* propio, permitiendo a las industrias y centros de investigación experimentar con algoritmos cuánticos en entornos remotos. Sin embargo, no todas las tareas computacionales serán más eficientes en un ordenador cuántico, lo que hace imprescindible un enfoque híbrido. De hecho, las iniciativas basadas en el EuroHPC ya están integrando ordenadores cuánticos con supercomputadoras clásicas para maximizar el rendimiento de ambas tecnologías. En definitiva, como menciona la OCDE en su informe *Quantum technologies policy primer*⁷⁹, las soluciones híbridas seguirán siendo esenciales para aprovechar al máximo la computación cuántica y preparar su integración en la infraestructura digital global.

Iniciativa 2.1: Garantizar el acceso a las capacidades de computación cuántica

La computación cuántica es clave en el ámbito de la algoritmia cuántica y de inspiración cuántica, entre otros. Por eso, el Gobierno de España ya puso en marcha su primer programa nacional en 2022 con la creación del **consorcio Quantum Spain**, que agrupa a 27 instituciones de investigación de 14 Comunidades Autónomas, incluyendo el CSIC, BSC-CNS y 15 universidades públicas. El proyecto ha alcanzado logros significativos con la puesta en marcha del primer ordenador cuántico 100 % con tecnología europea y el desarrollo de tres emuladores cuánticos, cumpliendo con uno de los hitos de la Década Digital 2030 de la UE. Quantum Spain ha desarrollado 20 proyectos de investigación sobre algoritmos cuánticos, que ya han dado lugar a más de 60 publicaciones internacionales. También ha puesto en marcha la **plataforma TalentQ** para formación y generación de talento a través de seminarios, talleres y una infraestructura de apoyo con tutoriales.

⁷⁸ Nguyen, Krishnan, Krishnaswamy, Usman & Buyya (2024). *Quantum cloud computing: A review, open problems, and future directions*. arXiv. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2404.11420>

⁷⁹ OCDE. *A Quantum Technologies Policy Primer*. *OECD Digital Economy Papers* (2025). Disponible en: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/01/a-quantum-technologies-policy-primer_bdac5544/fd1153c3-en.pdf

Estos resultados han generado y fortalecido un ecosistema nacional de I+D en computación cuántica, que merece tener continuidad. A este efecto, se estudiará el desarrollo de un proyecto STEP con el objetivo de continuar con estas actividades en el periodo 2026–2029. Esta continuidad incluirá la extensión del *roadmap* de instalaciones de computación cuántica, en consonancia con el nuevo Plan Estratégico de la RES y aprovechando las oportunidades del plan de infraestructuras de HPC y computación cuántica de la EuroHPC Joint Undertaking.

Esto permitirá facilitar el acceso a las capacidades de computación cuántica al ecosistema investigador, empresas españolas, tanto pymes como grandes empresas y organismos públicos de investigación para seguir desarrollando casos de uso relevantes para sectores estratégicos y en el ámbito de la investigación.

Iniciativa 2.2: Casos de uso en algoritmia y en convergencia entre IA y cuántica

En paralelo al desarrollo de casos de uso descritos en la prioridad 1, se financiarán aquellos que impulsen la convergencia entre la IA y las tecnologías cuánticas para demostrar la usabilidad de esta convergencia.

Estos casos de uso también se podrán dirigir a la **creación de modelos de IA más precisos y eficientes** a través del procesamiento de grandes volúmenes de datos y de la optimización de cálculos en paralelo o para la especialización de los modelos, así como la compresión de estos. Los casos de uso también se podrán poner en marcha para **aplicaciones de investigación industrial** en ámbitos como la ciberseguridad, la modelización de materiales avanzados, la optimización logística o en aplicaciones del sector salud, como el descubrimiento de fármacos.

Además, teniendo en cuenta los avances en pruebas de concepto y algoritmia cuántica y de inspiración cuántica, persiste la necesidad de encontrar y demostrar ventajas cuánticas en aplicaciones tanto de la computación cuántica como de otras alternativas *quantum inspired*. Estas ventajas tienen que ser incontrovertibles, demostrando casos de uso que impulsen aplicaciones cercanas al mercado con alto impacto en sectores estratégicos y que no puedan ser mejoradas por otras alternativas convencionales, incluyendo desarrollos basados puramente en aprendizaje automático.

Por último, también se fomentará el **desarrollo de algoritmos cuánticos**, siguiendo la línea abierta en Quantum Spain, optimizando su adaptación a diferentes plataformas de *hardware*, fortalecimiento de *software* cuántico con bibliotecas, entornos de trabajo y compiladores más eficientes para mejorar su ejecución y aplicación a diferentes sectores.

La adopción industrial de las tecnologías cuánticas requiere de soluciones con retorno de inversión y puesta en producción en el corto plazo.



Prioridad 3: Hacer de España un referente en comunicaciones cuánticas

Las comunicaciones cuánticas representan un avance disruptivo en la **seguridad para la transmisión de datos**, permitiendo la creación de redes de comunicación con niveles de protección sin precedentes.

España ya cuenta con un ecosistema de excelencia en este ámbito, respaldado por instituciones de referencia como el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO), el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) o el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), que han desarrollado avances significativos en fotónica, criptografía cuántica y en distribución cuántica de claves (QKD, por sus siglas en inglés). Además, se cuenta con proyectos estratégicos a nivel nacional, tales como el **Plan Complementario de Comunicación Cuántica (PCCC)**⁸⁰, en el que participa el CSIC y múltiples entidades académicas provenientes de seis Comunidades Autónomas. Asimismo, el país interviene en iniciativas a nivel europeo como EuroQuantum Communication Infrastructure (EuroQCI-SPAIN), Quantum Secure Networks Partnership (QSNP) y Quantum Internet Alliance (QIA), derivadas del Quantum Flagship y financiadas por la Comisión Europea, que buscan consolidar una **infraestructura robusta y segura para las comunicaciones cuánticas** en Europa. La RedIRIS permite, además, disponer de una infraestructura de apoyo al desarrollo y experimentación de estas tecnologías.

El desarrollo de las comunicaciones cuánticas⁸¹ se apoya en dos tecnologías fundamentales:

- La **fotónica cuántica** permite la generación y la manipulación de fotones individuales o entrelazados, que son la base para codificar y transmitir información cuántica mediante un control preciso de la coherencia cuántica frente al ruido del canal de propagación. También posibilita el uso de detectores de fotones avanzados, que pueden leer estados cuánticos sin alterarlos, garantizando la recepción de la señal. Además, los componentes ópticos permiten preservar la integridad de la información durante la transmisión.

⁸⁰ Plan Complementario de Comunicación Cuántica. Disponible en: <https://www.quantumcommunicationsspain.eu/>

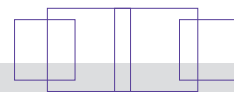
⁸¹ Comisión Europea. *Quantum Technologies Flagship – Final Report (Phase 2018–2022)* (2023). Disponible en: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/eus-quantum-technologies-flagship>

- La **fotónica integrada** facilita la miniaturización y escalabilidad de los sistemas de comunicación cuántica, permitiendo su despliegue en infraestructuras complejas. También se utilizan generadores cuánticos de números aleatorios (QRNG, por sus siglas en inglés) para mejorar la seguridad.

A pesar de su enorme potencial, el desarrollo de las comunicaciones cuánticas enfrenta desafíos clave. En primer lugar, se requiere una mayor **inversión en infraestructuras cuánticas nacionales** para garantizar la integración con redes europeas y potenciar la interoperabilidad, lo que también exige definir **estándares abiertos** y desarrollar **marcos regulatorios** que aseguren la seguridad de las transmisiones cuánticas. Segundo, aunque existen múltiples iniciativas en marcha, se necesita un **plan unificado que optimice recursos y esfuerzos** y cree sinergias, en línea con los estándares internacionales definidos en los foros de estandarización. En tercer lugar, será fundamental reforzar la **transferencia de conocimiento al sector empresarial** para acelerar la adopción de las comunicaciones cuánticas y facilitar la interoperabilidad con infraestructuras tradicionales.

Asimismo, el desarrollo de las comunicaciones cuánticas requiere también el **establecimiento de estándares y normativas internacionales**. La interoperabilidad es clave para la integración de redes QKD en infraestructuras existentes, lo que implica definir estándares abiertos que permitan una conexión fluida y segura.

Superar estos desafíos acerca nuestras sociedades al desarrollo de la **Internet Cuántica**, una red para la interconexión de dispositivos cuánticos. Estas redes cuánticas facilitarán la expansión de la criptografía cuántica a mayores distancias, consolidando un ecosistema global de comunicaciones ultra seguras. En el futuro, también permitirán la implementación de modelos de computación cuántica distribuida y segura, integrando dispositivos cuánticos y supercomputadores clásicos y extendiendo el alcance de otros dispositivos como sensores cuánticos.



CASO DE USO

Optimización de redes inteligentes (Smart grids operation)

El **equilibrio y la distribución eficiente de la energía** en redes eléctricas inteligentes son desafíos que la computación cuántica puede abordar con eficacia.

Mediante técnicas como el Quantum Annealing, analiza grandes volúmenes de datos para predecir la demanda y optimizar el uso de recursos, facilitando la **integración de energías renovables y reduciendo el desperdicio**.

En un contexto de transición energética, esta tecnología permite sistemas más flexibles y eficientes, **maximizando infraestructuras existentes y reduciendo costes operativos** a largo plazo.

España tiene una **posición privilegiada⁸² en el desarrollo de comunicaciones cuánticas**, con experiencia consolidada en fotónica cuántica. Sin embargo, para aprovechar completamente esta ventaja, es necesario establecer una estructura de gobernanza que facilite la colaboración y acelere la implementación de infraestructuras clave, además de fomentar la transición hacia un entorno de criptografía cuántica.

Iniciativa 3.1: Colaboración de entidades de excelencia en comunicaciones cuánticas

Para abordar estos desafíos y consolidar a España como un referente en comunicaciones cuánticas, se propone la **creación de un Hub de Comunicaciones Cuánticas**. Este centro de excelencia reunirá a las principales instituciones científicas y tecnológicas del país, facilitando la investigación aplicada y su transferencia al sector industrial.

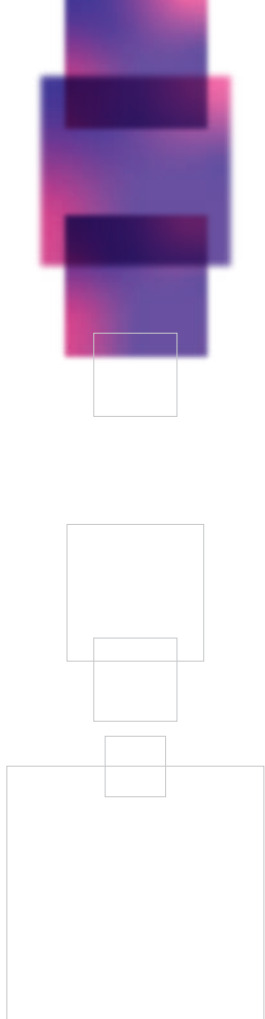
⁸² Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial. *España liderará el impulso de las tecnologías cuánticas en la UE* (2023). Disponible en: https://avance.digital.gob.es/es-es/notasprensa/Paginas/espana_lider_tecnologias_cuanticas_ue.aspx

El *Hub* de Comunicaciones Cuánticas se estructurará en torno a tres líneas principales de acción:

- **Casos de uso en comunicaciones cuánticas.** Se incluirán dos casos clave: el despliegue de estaciones ópticas terrestres (OGS) en Madrid, Barcelona y Galicia para la conexión con la misión satelital, las cuales completarán a la existentes en el Observatorio del Teide (IAC), y el desarrollo de enlaces terrestres de QKD entre Madrid y Barcelona, junto con la creación de nuevos nodos estratégicos en España como, por ejemplo, enlaces entre el CESGA y la Universidad de Vigo o la ampliación del anillo cuántico MadQCI a las instalaciones del INTA.
- **I+D en fotónica para comunicación cuántica** para conseguir avances en tecnología de detección, procesamiento y transmisión de información cuántica a través de protocolos de seguridad cuántica, memorias y repetidores cuánticos, sistemas espaciales de comunicación cuántica, circuitos fotónicos integrados y la integración de redes cuánticas con infraestructuras clásicas, incluyendo la combinación de protocolos criptográficos cuánticos y postcuánticos.
- **Formación y divulgación.** Programas de capacitación para investigadores y profesionales, además de iniciativas para la sensibilización del ecosistema empresarial (p.ej. seminarios para la industria, formación en laboratorios especializados o el apoyo al emprendimiento).

Iniciativa 3.2: Desarrollo de misiones satelitales para distribución cuántica de claves

Desde el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, en colaboración con el CDTI, y en el ámbito del PERTE Aeroespacial, se han puesto en marcha dos acciones para el **desarrollo de prototipos satelitales** para comunicaciones cuánticas seguras. La primera iniciativa contempla el diseño, la integración y la validación en tierra de un sistema de carga útil y su segmento terreno asociado para la distribución cuántica de claves (QKD) desde una órbita geoestacionaria (GEO). La segunda acción se centra en el desarrollo y la validación en tierra de un sistema análogo desde una órbita baja (LEO).



Cabe destacar que la misión en órbita geoestacionaria representa un hito a nivel mundial, al tratarse de la primera iniciativa de estas características, lo que refuerza la posición de liderazgo de España en el ámbito de las comunicaciones cuánticas seguras y la ciberseguridad espacial. Este proyecto está plenamente alineado con la **iniciativa EuroQCI**, impulsada por la Comisión Europea, que tiene como objetivo establecer una infraestructura cuántica paneuropea para comunicaciones ultra seguras.

También en línea con estas iniciativas europeas, el ICFO colabora en el **proyecto Quango** (Quantum Communications with NanoSatellites and 5G protocols) para el desarrollo de una constelación de nanosatélites con capacidad de comunicación 5G.

De forma complementaria, desde múltiples instituciones incluyendo INTA, CSIC, ICFO, IAC, UPM y Universidad de Vigo, se continúa impulsando el desarrollo de estas tecnologías innovadoras de distribución de claves con sistemas espaciales con varias líneas de actividad. Entre ellas destaca la promoción de la participación española en las iniciativas europeas de QKD en espacio (tanto en el ámbito del sistema IRIS2 como del proyecto SAGA) impulsando la finalización de las misiones españolas ya iniciadas, explorando su integración en estos programas, así como fomentar la innovación tecnológica en misiones espaciales de QKD de bajo coste, incluyendo nano y micro-satélites.

Específicamente, desde el INTA se impulsan, con la participación de las diferentes instituciones comentadas anteriormente, estos desarrollos desde un enfoque dual, trabajando en sistemas espaciales de comunicaciones cuánticas con la perspectiva de su aplicación al ámbito de la defensa y la seguridad. Con este enfoque, se están realizando las siguientes iniciativas:

- Identificación de las **tecnologías fotónicas cuánticas** críticas para sistemas espaciales de comunicaciones cuánticas, desarrollando y realizando planes de validación y calificación espacial de estas tecnologías, aumentando así su madurez tecnológica (Technology Readiness Level, TRL). De esta forma, alcanzarán, al menos, el

nivel mínimo TRL5 que los estándares de la European Cooperation for Space Standardization (ECSS), adoptados por la industria y las diversas agencias espaciales europeas.

- La **misión Q-ANSER**, cuyo lanzamiento está previsto para inicios de 2029, destacando como demostrador en órbita de un enlace de distribución cuántica de claves entre satélites de bajo coste.
- Desarrollo de un **sistema de QKD** en configuración *uplink* que supone un importante reto por sus mayores pérdidas y menores tasas de clave que la configuración estándar *downlink*, pero posibilita reducir sustancialmente el precio por clave, abriendo un nicho de comercialización.

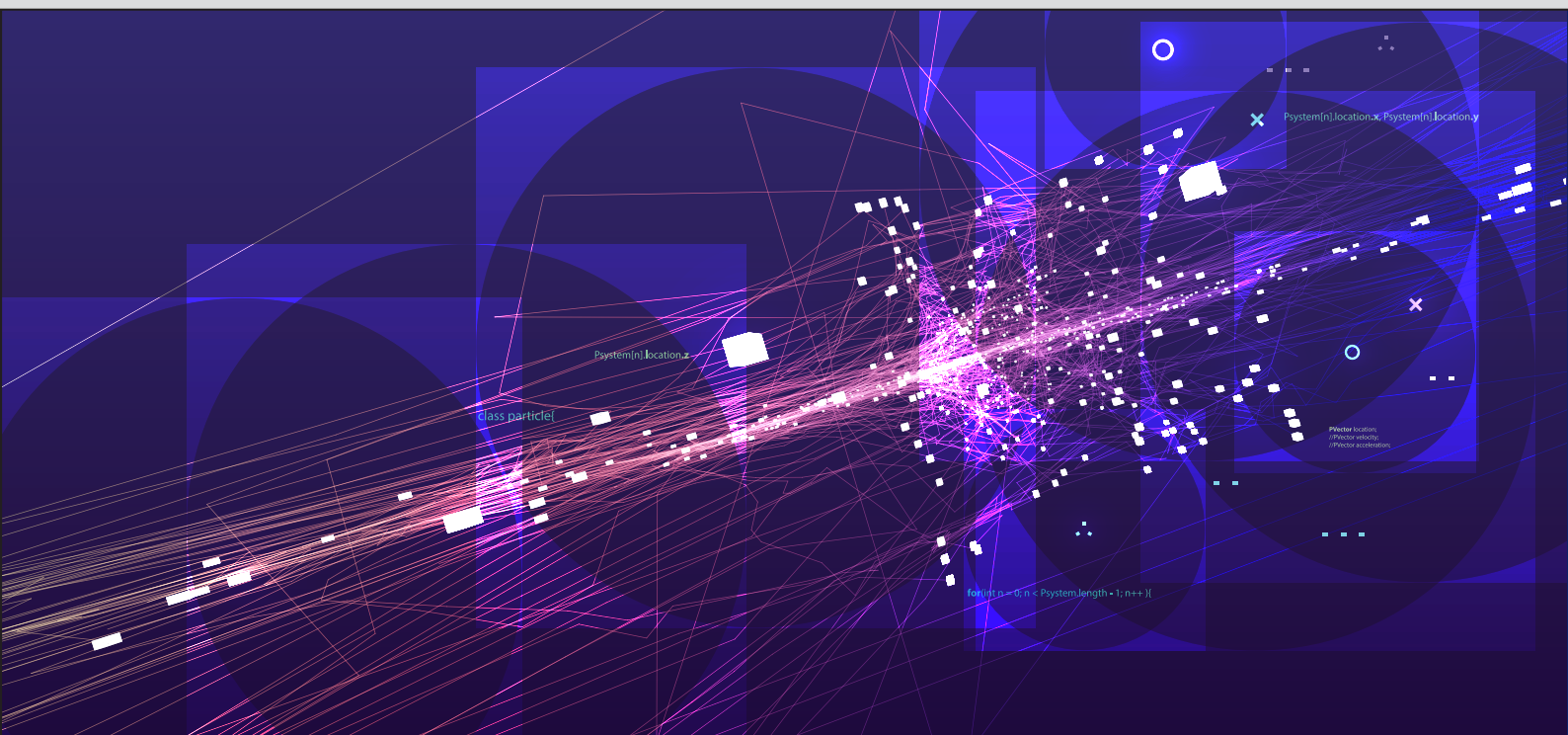


CASO DE USO

Optimización de procesos de manufacturación (*Manufacturing process optimization*)

Los procesos de producción industrial requieren una optimización constante para **mejorar eficiencia y reducir costes**.

La computación cuántica permite analizar simultáneamente múltiples combinaciones de recursos y tiempos, **minimizando interrupciones y desperdicios**. Esto resulta clave en la manufactura a gran escala, acelerando la transición hacia **modelos de producción más sostenibles y eficientes**.



Iniciativa 3.3: Abordando retos de las comunicaciones cuánticas y ópticas

Más allá de distribución de clave, la comunicación cuántica se enfrenta a importantes **retos de escalabilidad y aplicación** a múltiples entornos no controlados. Por ejemplo, la transmisión atmosférica en presencia de turbulencia, tanto en espacio como en entornos metropolitanos y la optimización de la detección de fotones entrelazados. Con el objetivo de resolver estos retos, se continuará impulsando al Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y otras entidades.

Como ejemplo de acciones relevantes, el IAC ha puesto en marcha la **infraestructura IAClink**, en el marco del Plan Estratégico de los Observatorios de Canarias (2025-2028)⁸³ para desarrollar cargas útiles para satélites, crear sistemas de fotónica integrada para la compensación de turbulencias atmosféricas y estaciones terrestres, fijas o transportables para la recepción cuántica de claves en orbitas GEO y LEO, mencionadas en la iniciativa anterior. En el contexto de la generación de números aleatorios, se continuará con el **experimento CMB-Bell**, liderado por el IAC y la Universidad de Viena, que busca poner a prueba los límites del entrelazamiento cuántico y la no localidad, utilizando la Radiación Cósmica de Fondo (CMB, por sus siglas en inglés).



⁸³ Instituto de Astrofísica de Canarias. *Plan de actuación 2025* (2023). Disponible en: <https://www.iac.es/es/documentos/plan-de-actuacion-2023-0>



Prioridad 4: Demostrar el impacto de la sensórica y la metrología cuánticas

Los sensores cuánticos tienen la capacidad de medir magnitudes físicas con una precisión y una sensibilidad muy elevada, mayor que los sensores tradicionales y con menores necesidades de potencia, llegando incluso al límite de un sólo fotón. En algunas áreas de aplicación, el desarrollo de los sensores cuánticos se encuentra ya en una fase pre-comercial que permitirá no solo optimizar los procesos actuales, sino también poner en marcha nuevas aplicaciones que antes eran inviables. No obstante, es necesario aún mucho trabajo de investigación e innovación para explotar completamente el **potencial de la sensórica cuántica** en áreas como la biología, la imagen médica, la navegación y la defensa, entre otros.

Uno de los campos más prometedores para la implementación de la medición cuántica es el uso de los **centros de nitrógeno-vacante en diamante (NV)**⁸⁴. Estos defectos cristalinos presentan largos tiempos de coherencia cuántica y una extraordinaria sensibilidad a los campos magnéticos, lo que los convierte en una plataforma ideal para mediciones de alta precisión. Debido a su biocompatibilidad, su estabilidad a temperatura ambiente y su capacidad para operar en condiciones extremas, los magnetómetros de estado sólido basados en NV están siendo explorados, entre otros campos, para su uso en **imágenes bio-médicas** no invasivas, ya que utilizan técnicas tanto *in vitro* como *in vivo*, lo que podría permitir, por ejemplo, la detección temprana de enfermedades neurológicas y cardiovasculares⁸⁵. Además, se podría usar para reconstruir mapas completos de campos magnéticos vectoriales terrestres para una mejor navegación y georreferenciación basadas en mapas de anomalías magnéticas.

Otros tipos de sensórica de interés industrial incluyen los **gravimétricos cuánticos**, útiles en la detección de yacimientos de combustibles fósiles y depósitos de agua y regiones de cavitación que comprometan a estructuras civiles, o los sensores cuánticos optomecánicos funcionalizados, capaces de detectar compuestos a nivel de pocas moléculas.

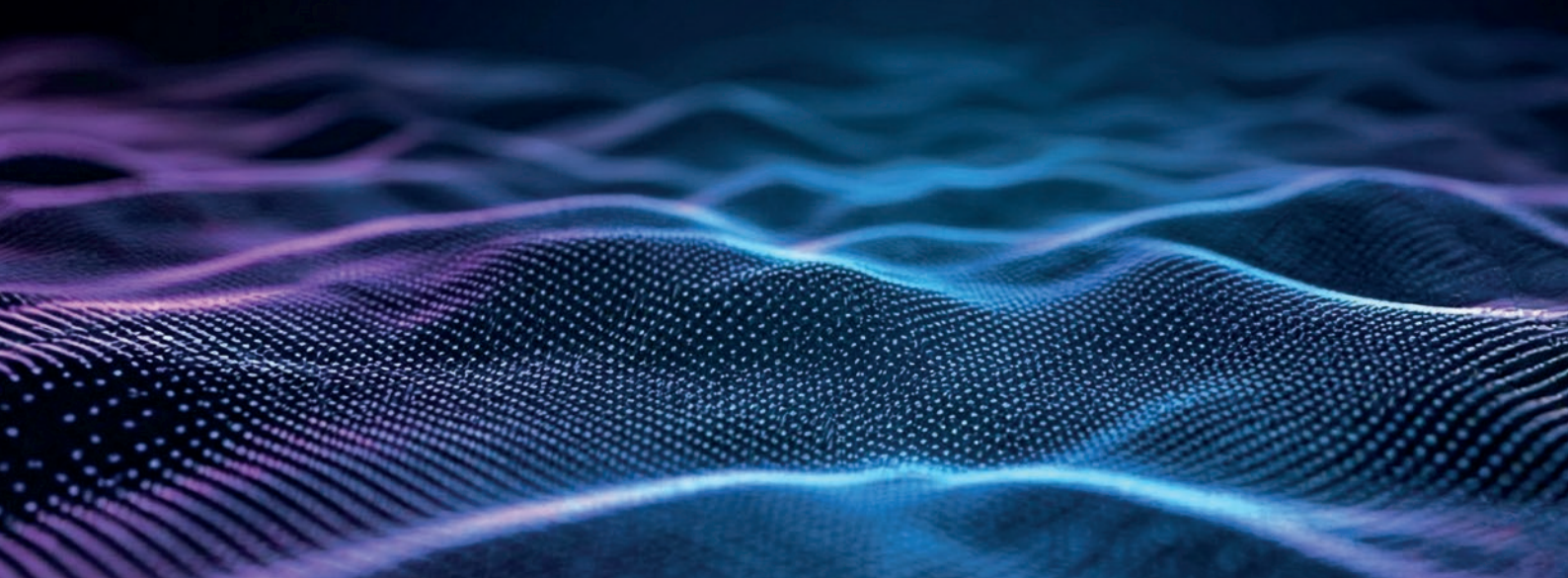
⁸⁴ Achard, Jacques & Tallaie. *CVD diamond single crystals with NV centres: a review of material synthesis and technology for quantum sensing applications* (2019). Disponible en: <https://arxiv.org/abs/1912.09749>

⁸⁵ Agencia Estatal de Investigación. *Investigadores españoles logran introducir nanodiamantes con sensores cuánticos en las células que actúan como 'chivatos' de enfermedades antes de mostrar síntomas* (2024). Disponible en: <https://www.aei.gob.es/noticias/investigadores-espanoles-logran-introducir-nanodiamantes-sensores-cuanticos-celulas-actuan>

Dentro del sector de la defensa y la seguridad, se tiene especial interés en avanzar en el desarrollo de sensores de radiofrecuencia, como los **futuros radares cuánticos**, capaces de mejorar los radares convencionales, así como en sensores optrónicos necesarios para la sensibilidad y la resolución incluso en atmósferas con muy poca visibilidad. También se considera prioritario conseguir una **navegación eficiente sin GNSS** basada en sensores inerciales cuánticos de posicionamiento, navegación y sincronización, detección submarina y cartografía de anomalías, y relojes microatómicos fiables para un posicionamiento preciso. Para ello, es necesario desarrollar unidades compactas multifuncionales de medición inercial para sistemas inerciales cuánticos (o hibridación con acelerómetros y giróscopos clásicos).

Será, por lo tanto, importante madurar la sensórica cuántica para su **operación en entornos reales**, asegurando su resistencia a factores medioambientales como temperatura y aceleraciones para su integración a bordo de plataformas. Adicionalmente, los prometedores relojes atómicos podrían aportar mejoras de órdenes de magnitud en términos de estabilidad de frecuencia y compacidad, en comparación con los diseños estándar.

Por su parte, la **integración de la metrología cuántica** desde los laboratorios a entornos industriales presenta varios desafíos técnicos. Entre ellos se encuentran las condiciones operativas, como bajas temperaturas, ultra alto vacío y la exposición a intensos campos electromagnéticos. Además, la miniaturización y la integración de estas tecnologías en sistemas existentes son retos significativos que deben abordarse de forma sinérgica con otros esfuerzos en fabricación de óptica integrada y microelectrónica.



La sensórica cuántica, como se ha mencionado anteriormente, es, junto con la comunicación cuántica, una de las dos disciplinas con un mayor impacto social en el corto plazo. En España, **la sensórica cuántica es un tema estratégico**, abordado por múltiples entidades públicas y privadas. Entre ellas, destacan el ICFO en áreas como la detección de campos magnéticos con nubes de átomos, el CSIC con el desarrollo de sensores cuánticos optomecánicos, el Centro de Física de Materiales (CFM-UPV/EHU-CSIC) con la creación de sensores inerciales para navegación sin GPS, mediante partículas levitadas y optomecánica y el polo de sensórica cuántica en Bizkaia, asociado a los laboratorios del EHU Quantum Center, del CFM y de Tecnalia. Asimismo, la Universidad de Murcia, la Universidad Carlos III en Madrid y Arquimea Research en Tenerife han realizado importantes estudios en la materia.

Para facilitar una amplia adopción de estas tecnologías, es esencial empezar a probar su integración y divulgar más información sobre sus beneficios para la industria. Esto permitirá considerarlas en sus procesos de producción, aumentando así su competitividad. Es fundamental respaldar esta integración con ensayos de validación y certificación que sigan normas reconocidas y aseguren la **trazabilidad metrológica** de las mediciones.

Iniciativa 4.1: Impulso al desarrollo de patrones cuánticos en el Centro Español de Metrología

El desarrollo de un entorno de experimentación en sensórica y metrología cuántica tendrá un impacto positivo en la economía española, y por eso se propone que el Centro Español de Metrología (CEM) trabaje en el desarrollo de un **reloj cuántico de frecuencia óptica basado en trampas de iones**, un avance que posicionará a España en la vanguardia de la metrología de alta precisión, sentando las bases para una nueva generación de estándares de tiempo y frecuencia.

Además, el desarrollo de patrones cuánticos eléctricos y de presión innovadores, permitirá alinearse con los estándares internacionales en metrología avanzada. La inversión en infraestructura para fotónica y

optomecánica cuántica reforzará la capacidad del CEM para desarrollar soluciones de vanguardia, esenciales para el progreso de las tecnologías emergentes y su integración en aplicaciones y calibración industriales y comerciales.

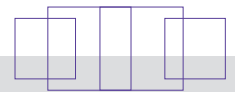
Iniciativa 4.2: Impulso a la utilización del reloj cuántico del ROA

Se propone que el Real Instituto y el Observatorio de la Armada (ROA) trabajen en la construcción e implementación de un **reloj cuántico de red óptica basado en átomos neutros de estroncio**. Este reloj, que se encuentra en investigación y desarrollo, representa también la vanguardia en la medición del tiempo, ofreciendo exactitudes sin precedentes del orden de 10⁻¹⁸ segundos que superan en dos órdenes de magnitud a los mejores relojes atómicos basados en cesio. Esto significa que se tardaría miles de millones de años en perder un segundo utilizando tecnologías con esta precisión.

Esta iniciativa de impulso al uso del reloj cuántico del ROA está compuesta por dos mecanismos. Por una parte, incluye la **conexión con el reloj cuántico del CEM**, necesaria para su sincronización, utilizando redes de comunicaciones por fibra óptica en el marco de la Red Académica y de Investigación Española (RedIRIS), gestionada por la entidad pública empresarial Red.es, capaces de propagar con precisión las señales de tiempo y frecuencia (T/F); y por otra parte, se incluye el **desarrollo de casos de uso duales** para su testeo en el sector de defensa y, de forma adicional, en aplicaciones civiles a través del ROA, con especial atención a los sectores, entre otros, de emergencias, logística y transporte. El desarrollo de los casos de uso duales se enmarca en la tendencia europea de reforzar sus capacidades de defensa y aumentar su autonomía tecnológica.

Este reloj cuántico también tendrá aplicaciones en la navegación por satélite, donde la ultraprecisión de los relojes cuánticos puede mejorar la **exactitud del posicionamiento global (GNSS)**, contribuyendo a completar la cadena de suministro de la infraestructura de GNSS europeo-Galileo, reforzando su autonomía estratégica, y beneficiando a todas sus aplicaciones en la economía real, desde la logística a los vehículos autónomos. En las telecomunicaciones, estos relojes permiten la

sincronización precisa de redes de fibra óptica y de sistemas de transmisión de datos de alta velocidad. Además, en el ámbito científico, los relojes cuánticos han expandido las posibilidades en la geofísica al medir con gran sensibilidad las variaciones en el campo gravitacional terrestre, permitiendo detectar fluctuaciones en la altitud con aplicaciones en la monitorización del nivel del mar, la predicción de terremotos y la exploración de recursos geológicos.



CASO DE USO

Nuevos materiales para defensa mediante IA y simulaciones cuánticas
(*New defense materials through AI and quantum simulations*)

El desarrollo de materiales avanzados en el sector de la defensa ha encontrado en la computación cuántica una herramienta revolucionaria. Gracias a su capacidad para modelar estructuras moleculares con precisión sin precedentes, es posible diseñar **compuestos más ligeros, resistentes y con propiedades avanzadas**, como mayor protección térmica o electromagnética.

Estos avances también tienen aplicaciones en la industria aeroespacial y la construcción de infraestructuras de alta seguridad, **reduciendo tiempos de desarrollo y mejorando la eficiencia en la producción**.

La sensórica cuántica representa una oportunidad para el sector de la defensa y la seguridad y será importante avanzar su operación en entornos reales.



Iniciativa 4.3: Casos de uso de sensórica y metrología cuánticas para sectores estratégicos

En paralelo con el desarrollo de casos de uso descritos en la prioridad 1 y en la iniciativa anterior, esta iniciativa fomentará el desarrollo experimental de **casos de uso prácticos de metrología y sensórica cuánticas** aplicados a las industrias de, entre otras, salud, fabricación, logística, energía, seguridad de la información, medio ambiente, etc. orientados a demostrar la utilidad de la ultraprecisión. Estas aplicaciones tendrán un impacto relevante en áreas tan diversas como la imagen médica (diagnósticos con menores requisitos energéticos o menos invasivos), la detección de componentes y patógenos a nivel molecular (con utilidad en biomedicina y defensa), o la navegación inercial sin posicionamiento GNSS. Con estos casos de uso, se pretende ayudar a superar algunos de los retos identificados en esta prioridad, como la integración a bordo de plataformas, la miniaturización o el testeo de la ejecución de estas tecnologías en las debidas condiciones operativas.

Se propone abordar la exploración de casos de uso mediante el desarrollo de aplicaciones en TRLs intermedios en estas y otras áreas, fomentando la transferencia tecnológica de estos sensores a la industria, a través de proyectos de prueba de concepto y cooperación público-privada, en línea con las estrategias europeas en este campo. Se espera poder demostrar soluciones basadas en estas tecnologías para ampliar la demanda del mercado. Todo ello, sentará las bases para el **desarrollo de hubs empresariales y startups** con modelos de negocio sólidos, generando centros de alto valor añadido en diferentes regiones de España.





Prioridad 5: Reforzar la privacidad y la confidencialidad de la información en el mundo postcuántico

La computación cuántica supone un desafío para la privacidad y la protección de nuestros datos personales y para la seguridad de la información en general, ya que podrá comprometer la criptografía actual. De hecho, los algoritmos de cifrado asimétrico serán los más afectados, ya que perderán su eficacia, facilitando ataques a comunicaciones y sistemas de información sensibles en Internet. Esto representa un riesgo grave, especialmente para infraestructuras críticas, la seguridad nacional e incluso la soberanía digital. Es decir, no es solo un riesgo nacional, sino también internacional.

El enfoque de la **innovación responsable** no implica solo la regulación, sino entender si la revolución cuántica requerirá también una **revisión profunda de los marcos regulatorios** para asegurar la protección continua de la privacidad y los datos personales, los secretos comerciales y otros derechos sobre los datos. El Gobierno de España ya publicó la primera **Carta de Derechos Digitales** en 2021⁸⁶, como directriz en el proceso de transformación digital del país. Sin embargo, esta no contempla de manera clara el impacto de las tecnologías cuánticas en los derechos digitales.

Para mitigar el riesgo de la amenaza cuántica y garantizar la seguridad y la privacidad de la información, también es necesario financiar y desarrollar **sistemas resistentes a la computación cuántica** (QR, por sus siglas en inglés) implementando principalmente soluciones híbridas basadas en **criptografía postcuántica (PQC)**. Estos últimos comprenden algoritmos clásicos diseñados específicamente para resistir ataques de ordenadores cuánticos, los cuales podrían comprometer los sistemas de cifrado actuales, basados en problemas matemáticos como la factorización de enteros o el logaritmo discreto.

Actualmente, nos encontramos en una etapa de **transición hacia la criptografía postcuántica**, pero deberá hacerse de manera estructurada, con especial énfasis en su adopción en administraciones públicas e infraestructuras críticas, y sin sacrificar la estabilidad y la continuidad de los sistemas. Además, se debe reconocer la complejidad de migrar el

⁸⁶ Gobierno de España. *Carta de Derechos Digitales*. España Digital (2021). Disponible en: <https://espanadigital.gob.es/lineas-de-actuacion/carta-de-derechos-digitales>

extenso conjunto de sistemas de información que dependen de criptografía clásica y admitir el esfuerzo que supondrá. La **estandarización de algoritmos postcuánticos confiables** constituye uno de los pilares fundamentales para conseguir llevar a cabo esta transición. Sin embargo, hoy en día existen solo tres estándares de cifrado postcuántico aprobados por el National Institute of Standards and Technology (NIST)⁸⁷. Por último, hay que destacar que para una correcta transición es fundamental **impulsar una transferencia tecnológica efectiva**, desde la investigación en criptografía cuántica y postcuántica hasta su aplicación comercial, asegurando que los avances científicos y tecnológicos se traduzcan en soluciones concretas para el sector industrial.

La Unión Europea, asimismo, está trabajando en una estrategia, que previsiblemente pueda impulsar esta transición en Europa, incluyendo la implementación de criptografía postcuántica en el ámbito de la directiva NIS2⁸⁸ y el resto de las iniciativas legislativas, como el Reglamento de Ciberseguridad y el de Ciber-resiliencia. En ello, existe una oportunidad de potenciar la producción conjunta a nivel de la UE de chips y otros componentes específicos para la criptografía postcuántica.

Iniciativa 5.1: La privacidad postcuántica, un nuevo derecho digital

Para desarrollar la Carta de Derechos Digitales de España, el Gobierno de España ha puesto en marcha el **Programa de Derechos Digitales**, con el objetivo de estudiar las relaciones entre derechos y tecnología y elaborar propuestas para un desarrollo digital, respetuoso con los derechos fundamentales, al servicio de las personas y la sociedad, que mejore la productividad y la competitividad de la economía. En el marco de este Programa:

- Se estudiará las relaciones entre tecnologías cuánticas y su impacto en los derechos fundamentales, y en particular, la privacidad y la protección de datos.

⁸⁷ NIST. *NIST Releases First 3 Finalized Post-Quantum Encryption Standards* (2024). Disponible en: <https://www.nist.gov/news-events/news/2024/08/nist-releases-first-3-finalized-post-quantum-encryption-standards>

⁸⁸ Comisión Europea. *Directiva NIS2 sobre la ciberseguridad de las redes y sistemas de información. Estrategia Digital*. Disponible en: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/policies/nis2-directive>

- Se elaborarán recomendaciones para impulsar el desarrollo de las tecnologías cuánticas y el respeto a los derechos fundamentales a nivel nacional e internacional, especialmente en los ámbitos de la Unión Europea, el Consejo de Europa y la UNESCO.
- Se colaborará en la difusión, divulgación y educación sobre tecnologías cuánticas y sobre sus oportunidades y riesgos, promoviendo un uso seguro y responsable, acercando el debate a la ciudadanía y garantizando la confianza y transparencia en su despliegue.

Iniciativa 5.2: Fomento de la compra pública innovadora

Se llevarán a cabo diferentes medidas para impulsar la transferencia de conocimientos, desde la investigación hacia aplicaciones comerciales para facilitar la adopción de tecnologías de criptografía postcuántica en sectores clave nacionales. Una de las herramientas para fomentar el desarrollo de soluciones avanzadas desde el sector público es la **Compra Pública Innovadora (CPI)**. El Instituto Nacional de Ciberseguridad (INCIBE)⁸⁹, que está utilizando esta herramienta para el desarrollo de soluciones postcuánticas, compartirá lecciones aprendidas y mejores prácticas para que se pueda utilizar por muchas más entidades en el sector público en su transición a la criptografía postcuántica. El desarrollo de las dos misiones satelitales para la distribución cuántica de claves descrita anteriormente en la Iniciativa 3.2, impulsada por el CDTI, también ha sido un programa de compra pública innovadora, bajo el cual se han comprado los dos prototipos satelitales de órbitas LEO y GEO para la distribución cuántica de claves (QKD).



⁸⁹ Instituto Nacional de Ciberseguridad (INCIBE). *Centro de operaciones de ciberseguridad para el ecosistema industrial (CPI)*. Disponible en: <https://www.incibe.es/industria-cpi>

Iniciativa 5.3: Acompañamiento en la transición hacia la criptografía postcuántica

El Centro Criptológico Nacional (CCN), así como INCIBE, jugarán un papel clave en el **acompañamiento en la transición postcuántica** del ecosistema de los sectores público y privado respectivamente, especialmente en el caso de las infraestructuras críticas. Este trabajo se concretará en la elaboración de documentos técnicos y normativos, concretamente guías y marcos de referencia que orienten la adopción de la criptografía postcuántica, en consonancia con las directrices de la UE.

Asimismo, se realizarán campañas de concienciación que expliquen los riesgos cuánticos para la criptografía y la necesidad de adaptación e impulso de programas formativos para personal de empresas que profundicen en la implementación de algoritmos postcuánticos y en la adaptación de sistemas de comunicaciones, respaldos y almacenamiento de datos.

Además, se promoverá el **desarrollo de casos de uso en encriptación postcuántica** a través de programas piloto, bien sean públicos o privados, que puedan identificar las bases de datos e infraestructuras clave a proteger, diseñar un plan de transición e implementarlo.

Por último, el Centro de Operaciones de Ciberseguridad (COCS), dependiente de la Agencia Española de Administración Digital tiene intención de **reforzar la ciberseguridad gubernamental** con un catálogo de servicios. En este contexto, se está evaluando la incorporación de servicios de seguridad gestionados transversales que puedan proporcionar una capa de lo que se denomina '*quantum-safe*' mediante herramientas para la gestión centralizada de claves de cifrado y *proxies* de seguridad cuántica. Asimismo, se está impulsando la Instrucción Técnica de Seguridad (ITS) sobre "Criptología de empleo en el ENS", cuyo propósito es servir como guía y regular los mecanismos criptográficos autorizados y su aplicación en productos y servicios de seguridad.

Iniciativa 5.4: Certificación nacional en ciberseguridad de los productos cuánticos

La **certificación en el ámbito de la ciberseguridad** de los productos cuánticos es esencial para garantizar no sólo su integración segura y efectiva en la infraestructura digital europea, sino también apoyar a las *startups* españolas en la comercialización de estos productos cuánticos innovadores. Para lograrlo, es fundamental alinear esta certificación nacional con las directrices y los estándares establecidos por la Unión Europea.

Al centrarse en estos procesos de certificación y adherirse a las directrices europeas, se facilitará que las *startups* españolas puedan desarrollar productos cuánticos que cumplan con los más altos estándares de seguridad y calidad. Esto promueve su entrada y competitividad en el mercado europeo, contribuyendo también el fortalecimiento de la soberanía tecnológica y la ciberresiliencia nacional en el ámbito de las tecnologías cuánticas. Con este objetivo, desde el CCN, se articularán los criterios, la metodología y los procedimientos de evaluación necesarios para poder validar y certificar la seguridad que proporcionan los productos basados en tecnologías cuánticas.



CASO DE USO

Gestión de contenedores vacíos en puertos marítimos (*Management of empty containers at maritime ports*)

Los puertos enfrentan un problema constante con los movimientos de contenedores vacíos, generando ineficiencias logísticas y altos costos.

La computación cuántica ayuda a gestionar su redistribución mediante algoritmos de optimización combinatoria que identifican **rutas más eficientes y minimizan trayectos innecesarios**. Una asignación dinámica en función de la demanda en tiempo real no solo **reduce gastos operativos**, sino que **también disminuye la huella de carbono** del sector portuario.



Prioridad 6: Reforzar las capacidades: infraestructuras, investigación y talento

Para consolidar a España como un referente en la fabricación y el despliegue de tecnologías cuánticas, es imprescindible reforzar y ampliar las infraestructuras existentes, especialmente de las salas blancas y laboratorios de investigación. Hasta la fecha, se han destinado 17,5 millones de euros dentro del PERTE Chip para fortalecer la red Micronanofabs, garantizando acceso abierto y competitivo a investigadores y empresas. En este marco, es esencial reforzar centros clave como el **Centro Nacional de Microelectrónica** (destacando el IMB-CNM-CSIC en Barcelona, el IMN-CSIC en Madrid y el IMSE-CSIC-US en Sevilla), que trabaja en dispositivos cuánticos superconductores y semiconductores, y en plataformas de fotónica integrada aplicada a la computación cuántica. También destaca el **Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microelectrónica** (ISOM-UPM en Madrid), centrado en sistemas de distribución cuántica de claves (QKD) y *software* de seguridad cuántica, junto con el **Centro de Tecnología Nanofotónica** (NTC-UPV en Valencia), que desarrolla interfaces microondas-óptico para conversión de cúbits y Circuitos Integrados Fotónicos (PIC, por sus siglas en inglés). Esto podría aportar una mayor capacidad para diseñar y fabricar tecnologías cuánticas y habilitadoras por las empresas del sector y también para aumentar el peso del ecosistema español a la hora de presentarse a convocatorias europeas.

Por otro lado, el progreso de los semiconductores tradicionales ha alcanzado límites físicos que ralentizan su evolución, incrementando la necesidad de tecnologías alternativas. Aunque los chips cuánticos no sustituirán completamente a los clásicos, ofrecen ventajas significativas en optimización y simulación. La clave estaría en la **integración de computación cuántica y clásica**, impulsada por inversiones en líneas piloto para chips cuánticos dentro del Chips Act⁹⁰ (Quantum) y el PERTE Chip. En este sentido, España está apostando por diversas tecnologías cuánticas, incluyendo **superconductores y annealing**, empleados en computación cuántica y optimización; **trampas de iones y átomos neutros**, que ofrecen alta fidelidad en cúbits individuales; **fotónica cuántica y centros NV en diamantes**, esenciales para sensores de precisión y comunicaciones seguras; y **semiconductores cuánticos**, que permiten una integración más sencilla con tecnologías convencionales. Para avanzar en este campo, es esencial fomentar la

⁹⁰ Unión Europea. *EU invests €65 million in quantum chips* (2024). Disponible en: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/eu-invests-eu65-million-quantum-chips>

investigación y el desarrollo de soluciones innovadoras, accesibles y escalables, que permitan un crecimiento sostenido y competitivo de las capacidades cuánticas nacionales.

Para consolidar una infraestructura cuántica avanzada, es importante también integrar estas infraestructuras con **centros de supercomputación y fabricación de chips**, reduciendo la dependencia tecnológica de terceros países en la producción de chips críticos. Esto permitirá **acelerar la transferencia tecnológica**, convirtiendo la investigación en productos comerciales, impulsar la innovación en fabricación cuántica y facilitar la **adaptación industrial a nuevas tecnologías**.

Por último, el desarrollo de estas tecnologías requiere **profesionales altamente cualificados**, lo que demanda programas educativos especializados que integren informática, mecánica cuántica y matemáticas en todos los niveles educativos de la formación curricular. La colaboración interdisciplinaria, la formación práctica en entornos reales y los incentivos académicos son claves para atraer y retener talento internacional. Además, es crucial incorporar una perspectiva ética y social en la formación, asegurando un desarrollo responsable y beneficioso de las tecnologías cuánticas.



Para consolidar a España como un referente en la fabricación y el despliegue de tecnologías cuánticas, es imprescindible reforzar y ampliar las infraestructuras existentes.

Iniciativa 6.1: Refuerzo de infraestructuras de salas blancas y laboratorios

Se cofinanciará la creación y la mejora de **salas blancas y laboratorios** especializados en sensórica, metrología cuántica y comunicaciones cuánticas, promoviendo un acceso equitativo para todo el ecosistema español. Esta iniciativa se desarrollará en colaboración con entidades públicas, asegurando que las infraestructuras sean utilizadas de manera eficiente y estratégica. Para ello, se realizará un análisis detallado de las instalaciones existentes y de las necesidades regionales, con el fin de fomentar la creación de clústeres en todo el territorio nacional. Se evaluará la posibilidad de implementar un sistema de seguimiento para monitorizar su desarrollo y optimizar su uso.

Se espera que este impulso en la creación de clústeres industriales especializados fomente un ecosistema innovador que atraiga empresas y profesionales altamente cualificados y disponga de una conexión efectiva con las incubadoras y los *testbeds*, mencionados en la prioridad 1, promoviendo la colaboración entre distintos actores y fortalecer el desarrollo de tecnologías cuánticas en España.

Iniciativa 6.2: Mantenimiento y mejora de las infraestructuras para la investigación fundamental y aplicada

Se mantendrán las capacidades de la Red Española de Supercomputación (RES) para continuar trabajando en **simulación cuántica y codiseño de hardware y software cuántico** integrado con supercomputación clásica. También se fortalecerán las capacidades de los centros integrados en la red Micronanofabs, especialmente el Centro Nacional de Microelectrónica del CSIC en Barcelona (IMB-CNM-CSIC).

Además, se realizará la interconexión de las instalaciones del Instituto de Salud Carlos III (ISCIII) a través de tecnologías cuántica para acelerar los trabajos de simulación de moléculas en el **desarrollo de nuevos fármacos y la mejora de la secuenciación de ADN**.



Iniciativa 6.3: Impulso a las industrias auxiliares y tecnologías habilitadoras

Tras una búsqueda de proveedores españoles de tecnologías habilitadoras y posibles industrias auxiliares, se identificarán las **necesidades en las cadenas de valor** para el diseño, fabricación y despliegue de las tecnologías cuánticas.

Se apoyará la **transición y adaptación de las empresas de tecnologías auxiliares y tecnologías habilitadoras** identificadas, facilitando su integración en consorcios y entidades europeas que trabajen en el fortalecimiento de estas cadenas de valor europeas, avanzando en la senda de la soberanía tecnológica europea.

Iniciativa 6.4: Líneas piloto de chips cuánticos en el seno de la Chips JU

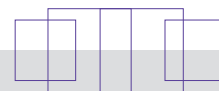
La Chips Joint Undertaking (Chips JU) ha abierto dos convocatorias para poner en marcha líneas piloto con el objetivo de acelerar las tecnologías más maduras de producción de chips cuánticos que estén próximos a procesos de fabricación. Esto es, fotónica, superconductores, semiconductores, diamantes, átomos neutros e iones atrapados. De este modo, se pretende alcanzar un doble objetivo:

- Por un lado, se pretende **impulsar el desarrollo de chips cuánticos** 100 % europeos y, con ello, contribuir a la autonomía estratégica de España en las próximas décadas.
- Por otro lado, se pretende, también, **reforzar el papel de las entidades españolas del sector** que se sitúan a la vanguardia europea en las citadas tecnologías de fabricación de chips cuánticos.

Iniciativa 6.5: Refuerzo con los programas de investigación básica y aplicada

A través del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación (PEICTI), se continuará **financiando proyectos competitivos** en todas las áreas de conocimiento, incluyendo las tecnologías cuánticas, en los diferentes TRL. La Agencia Estatal de Investigación (AEI) continuará con sus **programas de ayudas**, tanto para proyectos de investigación básica, como para proyectos en cooperación público-privada en el ámbito de las tecnologías cuánticas, así como mantendrá las convocatorias específicas para la contratación de recursos humanos, que hasta la fecha han permitido el desarrollo de carreras científicas en el ámbito cuántico.

Por su parte, también en el marco del PEICTI, el CDTI continuará los **programas de ayudas a la innovación**, de manera que se aborde la financiación de iniciativas relacionadas con las tecnologías cuánticas.



CASO DE USO

Optimización de tráfico urbano (Urban traffic optimization)

La congestión vehicular en las ciudades puede aliviarse con el uso de algoritmos cuánticos que **optimizan la circulación** en tiempo real.

Analizando múltiples variables como semáforos, flujos de tráfico y eventos imprevistos, estos sistemas pueden **reducir tiempos de espera, disminuir el consumo de combustible y mejorar la movilidad urbana** de manera más sostenible y eficiente.

Iniciativa 6.6: Estudio de nuevos perfiles en formación profesional y nuevos programas educativos

Se estudiarán las necesidades formativas en la industria cuántica, identificando perfiles y valorando su encaje dentro del sistema de formación profesional. En este marco, se analizará la viabilidad y la necesidad de un perfil específico de **técnicos de laboratorio y/o experimentalistas** para la implementación y desarrollo de tecnologías cuánticas, sobre todo orientado al *hardware*, microelectrónica y mecánica.

Asimismo, se reforzarán las **sinergias entre los programas formativos** especializados de las universidades e instituciones de investigación, integrando áreas como la informática, la física cuántica y las matemáticas. Se estudiará la **colaboración con las empresas** y la formación práctica en entornos reales, considerando el uso de instrumentos como las microcredenciales. Además, se potenciará la **inclusión de contenidos** a lo largo de todo el ciclo educativo para conseguir una comprensión sólida de los impactos sociales y éticos de las tecnologías cuánticas. Por último, se propiciará el **fomento de las vocaciones STEM** (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas), especialmente desde un punto de vista de igualdad de género, con el objetivo de atraer más estudiantes a estas disciplinas y garantizar una fuerza laboral preparada para la transformación digital y la creciente demanda de expertos en este sector.





Prioridad 7: Un ecosistema español cuántico sólido, coordinado y líder en la UE

A nivel europeo, existe cierta descoordinación entre los Estados miembro, poniendo en riesgo la soberanía digital y la seguridad económica de la UE. Sin una estrategia clara para fortalecer la colaboración y el desarrollo de infraestructuras compartidas, Europa podría quedar rezagada frente a otros actores globales que ya están consolidando sus ecosistemas cuánticos. No obstante, se han dado pasos importantes hacia una mayor coordinación, como el **Pacto Europeo por las Tecnologías Cuánticas**⁹¹, que busca fortalecer la cooperación entre países y promover el desarrollo conjunto de capacidades, asegurando la competitividad europea en este ámbito.

El ecosistema cuántico en España está en plena evolución, aunque aún enfrenta desafíos para su consolidación. La fragmentación de este ecosistema dificulta el incremento de la demanda de estas tecnologías, la creación de consorcios, el acceso a financiación europea e internacional y la generación de sinergias entre investigadores, *startups*, empresas grandes e instituciones. Esta falta de integración limita la competitividad y reduce la capacidad de España para convertirse en un referente en estas tecnologías en la UE.

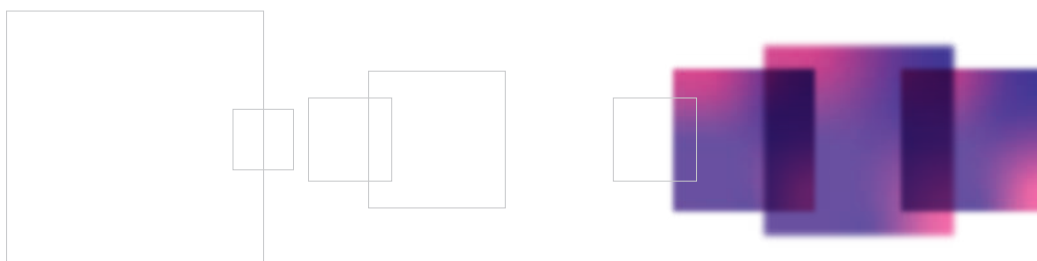
Para aprovechar al máximo las oportunidades que ofrece la cuántica, es esencial construir un **ecosistema sólido y bien coordinado**. Un mayor conocimiento y especialización en este campo facilitarán la identificación de sinergias y la generación de nuevos casos de uso en la economía española. Además, un marco colaborativo que optimice recursos y refuerce la cooperación entre agentes nacionales y europeos permitirá acelerar la transición de la investigación fundamental a su aplicación comercial. La **creación de consorcios estratégicos**, el **acceso a financiación** y el **fortalecimiento de infraestructuras** serán clave para posicionar a España como un actor destacado en la revolución cuántica y garantizar su competitividad en el escenario global.

⁹¹ Portal de Administración Electrónica (PAe). *España refuerza su impulso a las tecnologías cuánticas de la UE con su adhesión al Quantum Pact (2024)*. Disponible en: https://administracionelectronica.gob.es/pae_Home/pae_Actualidad/pae_Noticias/2024/Enero/Noticia-2024-01-05-Espana-impulso-tecnolog-as-cu-nticas-UE-Quantum-Pact.html

Iniciativa 7.1: Una entidad que aglutine a todo el ecosistema cuántico

Se impulsará la creación de un espacio de encuentro, que puede ser una asociación sin ánimo de lucro, que actuará como **socio estratégico del Gobierno de España, Comunidades Autónomas y Entidades Locales**, y contará con la participación activa de grupos de investigación, universidades, centros de investigación, *startups* y empresas. Este espacio podrá ser el punto de referencia del panorama cuántico nacional, publicar informes anuales de progreso en el despliegue de las tecnologías cuánticas en la economía y su impacto sociedad y sobre sus actividades. Además, podrá organizar **eventos y actividades de divulgación**, en coordinación con el Observatorio de Derechos Digitales en lo que respecta a la ciudadanía, y apoyará la distribución de fondos públicos, así como promover y acompañar a las entidades en el acceso a financiación europea o internacional, liderando consorcios o formando parte de ellos.

Este espacio de encuentro también podría tener un **plan internacional** que incluirá, a parte de lo expuesto más arriba, la organización y la participación en procesos de estandarización de tecnologías cuánticas, como por ejemplo en el ETSI en distribución cuántica de claves, el ISO/IEC JTC 1/WG 14 en computación cuántica o la estandarización en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (OIPM) o el Sistema Internacional (SI) de unidades para la sensórica cuántica o el ETSI y EURAMET para metrología cuántica. También deberá participar en **diálogos de gobernanza y regulatorios** a nivel nacional, europeo e internacional. Es importante resaltar que este plan incluirá un rastreo de iniciativas de otros Estados miembro de la UE en tecnologías cuánticas que puedan suponer una oportunidad estratégica, de negocio o de colaboración para investigadores o *startups* españolas, por ejemplo, cerrando huecos en cadenas de valor internacionales.

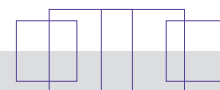


Iniciativa 7.2: Mapeo del ecosistema cuántico

Para fomentar la colaboración y unificar un ecosistema aún fragmentado, se llevará a cabo un **mapeo preliminar del ecosistema cuántico en España**. Esto permitirá identificar a todos los actores involucrados —empresas, universidades y centros tecnológicos—, proyectos en desarrollo e iniciativas cuánticas y monitorear su evolución en el corto y medio plazo.

Las sucesivas actualizaciones del mapeo, así como su disponibilidad al público general e industrial se llevará a cabo por la entidad que aglutine a todo el ecosistema, anteriormente mencionada. De esta manera, el mapa funcionará como un **repositorio centralizado** de información clave sobre la trazabilidad del ecosistema cuántico español, infraestructuras disponibles, proyectos en curso, publicaciones científicas y oportunidades de formación.

Es esencial construir un ecosistema sólido y bien coordinado para posicionar a España como un actor destacado en la revolución cuántica.



CASO DE USO

Optimización del embalaje en contenedores (*Efficient packing in bins*)

La **eficiencia en el empaquetado y almacenamiento** de productos es clave en logística e industria. Modelos híbridos cuántico-clásicos permiten optimizar la disposición de mercancías, analizando variables como dimensiones, peso y compatibilidad entre productos. Esto **reduce desperdicios, minimiza costes operativos y mejora la planificación** en sectores como distribución y comercio electrónico.

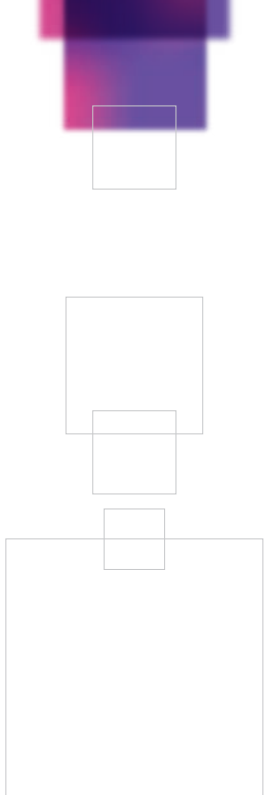
Además, su capacidad para procesar soluciones en tiempo real facilita la respuesta ante cambios en la demanda y optimiza la gestión de inventarios.

Iniciativa 7.3: Creación de un premio a las tecnologías cuánticas en España

Se creará un **premio al progreso español en tecnologías cuánticas**, orientado a investigadores jóvenes o *spin-offs* que hayan logrado hacer avances significativos. Este galardón contará con diferentes categorías como, por ejemplo, un reconocimiento al científico y/o científica que destaque en el campo de las tecnologías cuánticas o a una *spin-off* o *startup* por la transferencia tecnológica de un descubrimiento. También podrá contar con menciones especiales que puedan fomentar la atracción de talento femenino a este campo y permita cerrar la brecha de género. El premio tiene como objetivo reconocer y fomentar el talento joven en las tecnologías cuánticas y apoyar a aquellos que demuestren avances significativos y con potencial de generar impacto en la industria. Podrá explorarse la sinergia con el acceso a la red de centros de incubación, así como al acceso a las capacidades de computación cuántica.

Se explorará la posibilidad de nombrar este premio como “Premio Felisa Martín Bravo”, en honor a la que fuera la primera doctora en física de España. Este premio podría servir para seguir su ejemplo de excelencia e innovación, alentando a nuevas generaciones de científicos y científicas, emprendedores y emprendedoras a trasladar sus descubrimientos del laboratorio a la industria, fortaleciendo a España como líder en investigación cuántica y despliegue de las mismas en la industria.



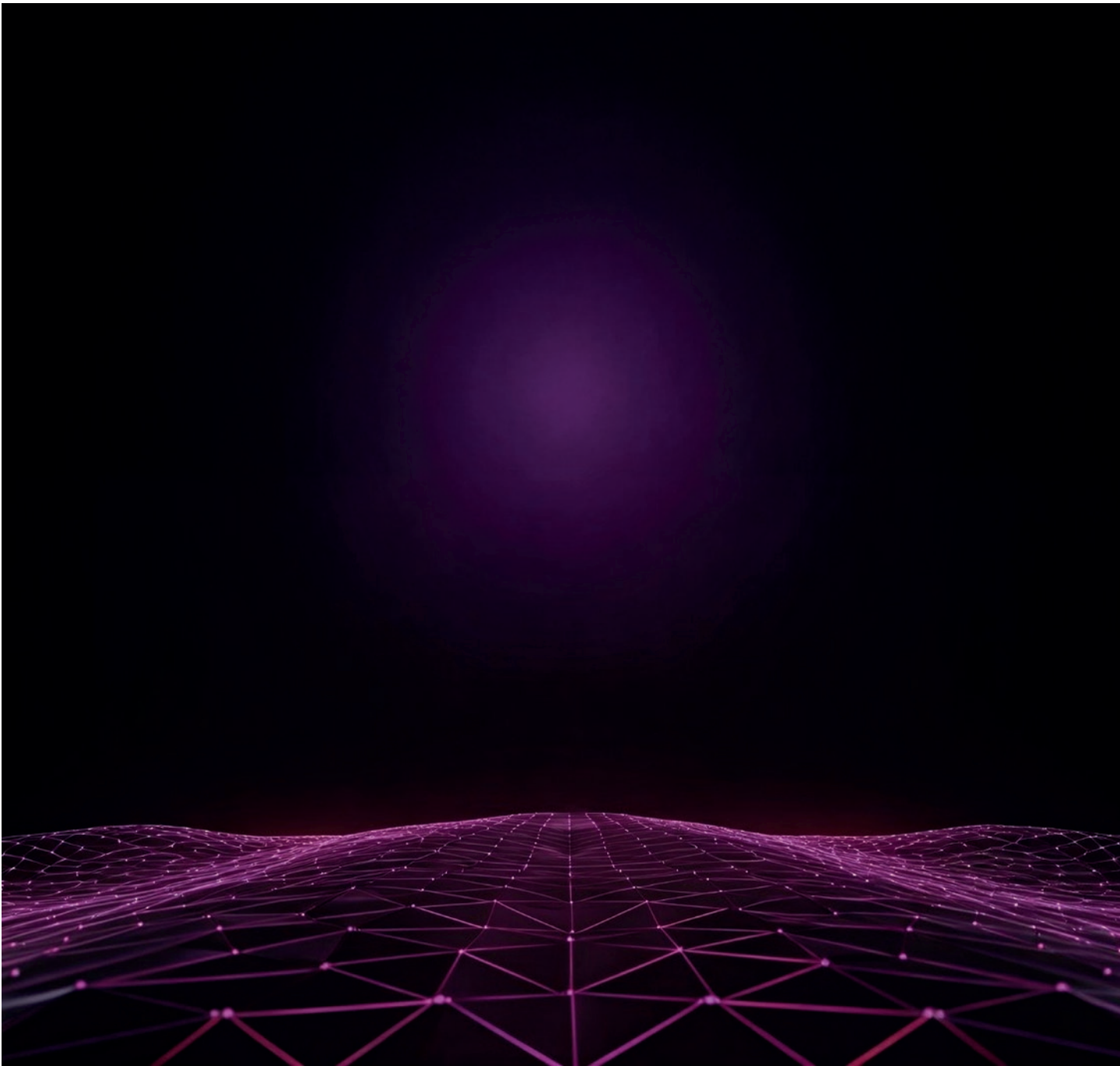


Iniciativa 7.4: Estrategias complementarias y planes

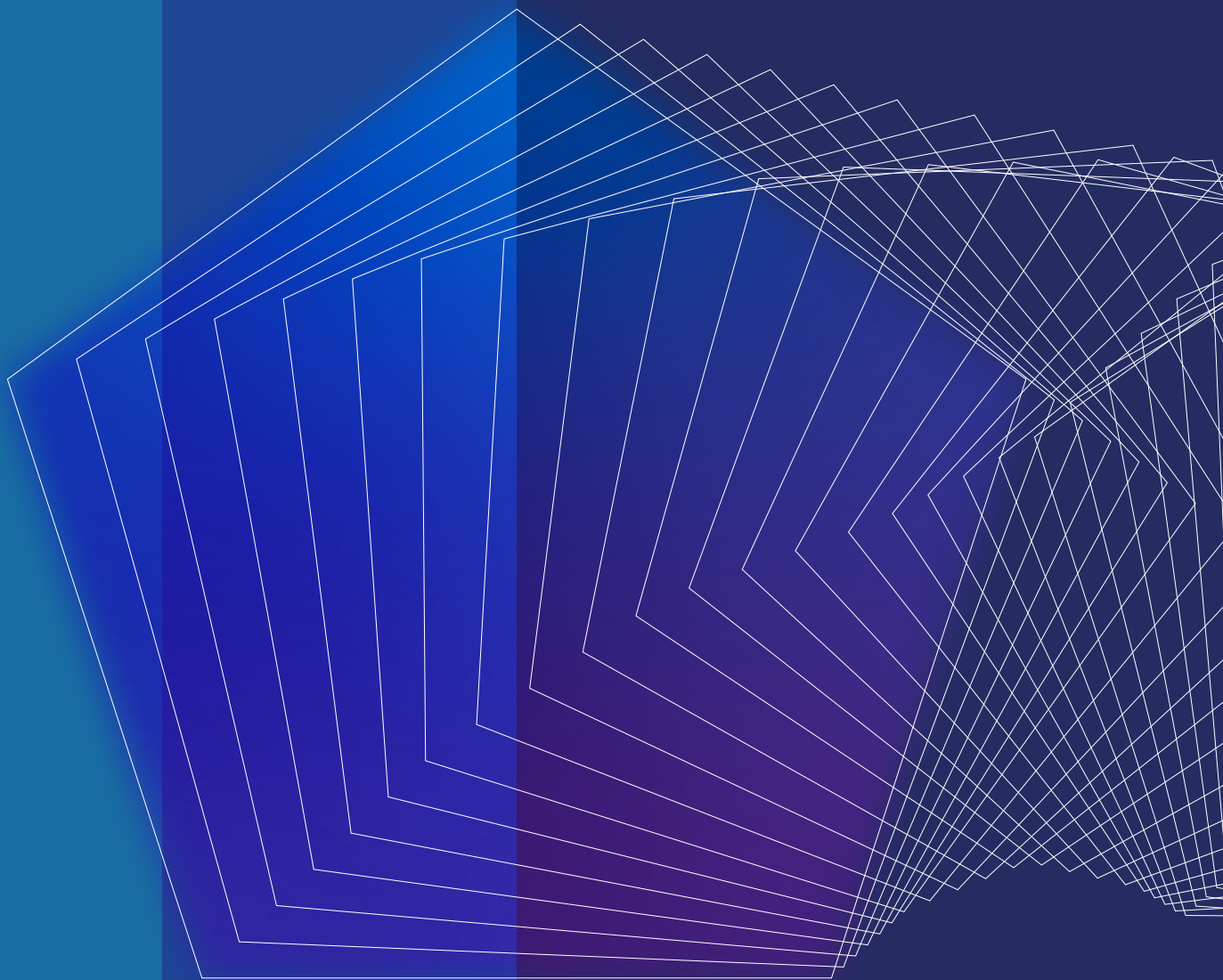
Se potenciará la coordinación, la complementariedad y la creación de sinergias entre las posibles estrategias, planes o políticas públicas en tecnologías cuánticas que puedan poner en marcha los diferentes organismos de la Administración General del Estado, las Comunidades Autónomas o las Entidades Locales. Se tiene constancia de que:

- El Ministerio de Defensa revisará la **Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID)**, en la que va a atribuir una importante relevancia al desarrollo de las tecnologías cuánticas, entre otros sectores, y dirigir las inversiones y la cooperación en I+D+i con fines militares.
- El CSIC está diseñando su **Estrategia de Ciencia y Tecnologías Cuánticas 2025-2030**, con el objetivo de fortalecer la investigación en tecnologías cuánticas en España, consolidando líneas existentes y creando nuevas, con un enfoque en la atracción de talento y la excelencia. Se busca coordinar y catalizar la comunidad cuántica nacional, además de fomentar la transferencia tecnológica hacia el sector productivo. Asimismo, se pretende actuar como entidad de referencia e impulsar un centro de investigación en tecnologías cuánticas para la implantación armonizada de las mismas y promover su crecimiento mediante colaboraciones a nivel nacional y europeo.
- Desde el Comisionado del PERTE para la Salud de Vanguardia, que depende orgánicamente del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, se está trabajando en una **agenda estratégica en salud**, que dé continuidad a la planificación actual que incluye lanzamiento de actuaciones hasta 2025. Dentro de los objetivos estratégicos, seguirán estando la medicina personalizada de precisión, el desarrollo de nuevos medicamentos innovadores y el espacio nacional de datos en salud y su explotación, mediante técnicas de IA, donde las tecnologías cuánticas podrán estar presentes como facilitadoras, tanto por las necesidades en potencia de cálculo sobre grandes cantidades de datos, como de protección de datos de alta sensibilidad.

- El CCN está contribuyendo juntamente con la Comisión Europea y ENISA en la redacción de una **estrategia y política de criptografía postcuántica de la UE**, que trasladará y avanzará en España una vez se publiquen los documentos europeos.



CAPÍTULO VI.



**La financiación:
una área abierta
a la continuidad**

Las tecnologías cuánticas son tecnologías de alto impacto que requieren una **estrategia de inversión sólida y sostenida en el tiempo**. Por ello, desde 2020, el Gobierno de España a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia ha invertido alrededor de 300 millones de euros en estas tecnologías a través de iniciativas de varios Ministerios, pero principalmente el MICIU y el MTDFP.

Esta Estrategia tiene como objetivo **priorizar inversiones en el campo de las tecnologías cuánticas**, poniendo el foco en aquellas áreas que presentan una oportunidad para el país. En particular, se utilizarán dos fuentes principales de financiación, dependiendo de la disponibilidad de los fondos: el Plan de Recuperación Transformación y Resiliencia (PRTR) de los componentes 13, 15 y 16 y el Programa Pluriregional de España 2021-2027 del FEDER (POPE).

Además, se establecerán mecanismos de coordinación entre todos los agentes financiadores públicos, como CDTI e ICO-AXIS, para fomentar la especialización, evitar solapamientos e incidir cada uno en su área de acción con respecto al ciclo de vida de las empresas y el riesgo de la inversión en cada etapa, con el fin de dotar de mayor eficiencia a los recursos destinados.

Se estima un presupuesto aproximado de 808 millones de euros con la distribución por iniciativas que se incluye en el siguiente cuadro, cuya ejecución queda supeditada a las disponibilidades presupuestarias existentes en cada ejercicio, sin que por tanto la aprobación de esta Estrategia suponga un compromiso financiero. El potencial de atraer inversiones públicas y privadas podría elevar la inversión total a unos 1.500 millones de euros.

La Estrategia tiene un presupuesto de

808 M€

con potencial de atraer inversiones hasta los 1.500 M€

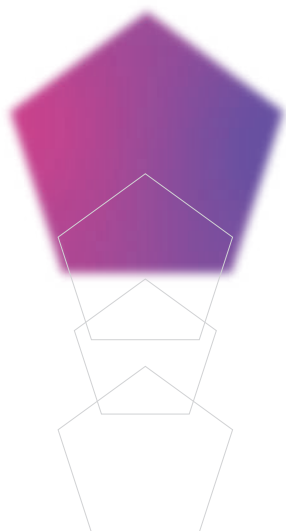
Iniciativas	PRTR ⁹² MTDFP ⁹³	FEDER ⁹⁴ RED.ES (*)	PRTR SETT ⁹⁵ (**)
Convocatorias para casos de uso (iniciativas 1.1, 2.2, 4.3 y 5.3)	10 M€	10 M€	
Incubadoras y bancos de prueba en red para fomentar las <i>spin-offs</i> cuánticas españolas (iniciativa 1.2)		15 M€	
Incremento de las inversiones de capital riesgo en <i>startups</i> y <i>scaleups</i> cuánticas españolas (iniciativa 1.3)			400 M€
Colaboración de entidades de excelencia en comunicaciones cuánticas (iniciativa 3.1)	10 M€		
Desarrollo de misiones satelitales para distribución cuántica de claves (iniciativa 3.2)	125 M€		
Impulso al desarrollo de patrones cuánticos en el Centro Español de Metrología (iniciativa 4.1)	3 M€		
Impulso a la utilización del reloj cuántico del ROA (iniciativa 4.2)		4 M€	
Refuerzo de infraestructuras de salas blancas y laboratorios (iniciativa 6.1)		11 M€	
Industrias auxiliares y tecnologías habilitadoras (iniciativa 6.3)			200 M€
Líneas piloto de chips cuánticos en el seno de la Chips JU (iniciativa 6.4) (***)	20 M€		

⁹² Siglas de "Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia".

⁹³ Siglas de "Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública".

⁹⁴ Siglas de "Fondo Europeo de Desarrollo Regional".

⁹⁵ Siglas de "Sociedad Española para la Transformación Tecnológica".



(*) No obstante, para garantizar una distribución eficiente de los fondos provenientes del Programa FEDER (40 millones de euros), se llevará a cabo una consulta pública con la participación de los diferentes grupos de interés. Esta consulta permitirá recopilar opiniones, identificar necesidades específicas y optimizar la asignación de recursos. Los Fondos FEDER serán gestionados y ejecutados por la entidad pública empresarial Red.es y están expresados en términos de ayudas FEDER.

(**) Se priorizarán hasta 200 millones de euros del Fondo PERTE Chip destinados a empresas auxiliares y habilitadores en la industria de semiconductores para su transición hacia las tecnologías cuánticas o híbridas, al menos 400 millones de euros de los Fondos PERTE Chip y Next Tech para inversiones en empresas cuánticas de manera directas o coinversiones con fondos capital riesgo y corporativos, a través de la Sociedad Española para la Transformación Tecnológica (SETT) del Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública. Es necesario mencionar que esta priorización se considera un importe estimado en base a la potencial capacidad de absorción.

(***) Se priorizarán hasta 20 millones de euros del PERTE Chip para cofinanciar a las entidades españolas seleccionadas en los consorcios ganadores de las convocatorias de la Chips JU, a través de la Secretaría de Estado de Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales del Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública. Esta estimación queda sujeta a la disponibilidad presupuestaria de cada ejercicio en cuestión.





Este presupuesto estimado se actualizará regularmente en función de las oportunidades disponibles y queda sujeto a las disponibilidades presupuestarias del ejercicio correspondiente, ya que cumple un objetivo de plantificación programática estimada. También, se tendrá en cuenta los planes de financiación que surjan de las negociaciones europeas dentro del nuevo marco financiero plurianual 2028-2034, sabiendo que el Informe Draghi recomienda la emisión de deuda común para financiar proyectos que refuercen la competitividad y seguridad de la UE, a través de un mecanismo similar al Plan de Recuperación para impulsar la **autonomía estratégica en sectores críticos** y garantizar una **financiación estable para la transformación digital**.

Esta Estrategia busca crear un ecosistema sólido, coordinado y competitivo para acceder a fuentes de financiación tanto europeas como internacionales. En este contexto, los distintos Ministerios desempeñan un papel clave, no solo en la defensa de los intereses nacionales dentro de los programas de financiación europeos, sino también en la coordinación del ecosistema para maximizar la presentación de candidaturas españolas a las convocatorias disponibles.

Oportunidades de financiación a nivel europeo

Es esencial **diversificar las fuentes de financiación**. Para eso, se presenta la siguiente lista de opciones, que no pretende ser exhaustiva ni centrarse exclusivamente en las tecnologías cuánticas, sino proporcionar una visión general de los programas que pueden aportar valor y oportunidades de inversión a los distintos actores del ecosistema cuántico español.

Programa	Presupuesto	Información adicional
Horizonte Europa 2021-2027	95.500 M€	Principal programa europeo de I+D+i con financiación para tecnologías disruptivas, incluidas las tecnologías cuánticas. En él se debe prestar atención a las siguientes áreas: ◆ Pilar I – Ciencia excelente ◆ Pilar II – Retos globales y competitividad industrial europea ◆ Pilar III – Europa innovadora Financia proyectos en computación cuántica y simulación, integración cuántica en supercomputación, sensórica y metrología cuántica, criptografía y comunicaciones cuánticas.
Programa Europa Digital 2021-2027	8.100 M€	Iniciativa enfocada en el despliegue de tecnologías en Europa. En este programa se debe prestar atención a los siguientes pilares: ◆ Ciberseguridad, de donde se financia la infraestructura de EuroQCI. ◆ European Chips for Europe, de donde se financia la componente de Quantum Chips for Europe a través de la Chips JU. ◆ Supercomputación, de donde se financia la Infraestructura de EuroQCS a través de la EuroHPC JU. ◆ Advanced & Digital Skills, de donde se financian programas de educación en capacidades digitales.

Programa	Presupuesto	Información adicional
Mecanismo para Conectar Europa – Digital 2021-2027	1.500 M€	Este programa está orientado a la conectividad de Europa y financia infraestructuras digitales, conectividad y ciberseguridad, y tiene oportunidades específicas para las tecnologías cuánticas ⁹⁶ .
InvestEU 2021 – 2027	Movilizará inversiones privadas de hasta 372.000 M€, con garantía pública de 26.200 M€	Los fondos se distribuirán en cuatro áreas políticas clave: • Infraestructura sostenible: 9.900 M€. • Investigación, innovación y digitalización: 6.600 M€. • Pequeñas y medianas empresas (PYME): 6.900 M€. • Inversión social y competencias: 2.800 M€.
Fondo de Innovación	Se estima en 40.000 M€ entre 2020 y 2030 ⁹⁷	Su objetivo principal es apoyar tecnologías que contribuyan a la descarbonización y a la neutralidad climática. Las tecnologías cuánticas pueden desempeñar un papel crucial en este ámbito.
Agencia Espacial Europea (ESA)	Inversiones en forma de licitación	Fondos provenientes de las licitaciones a proyectos relacionados con comunicaciones cuánticas.

⁹⁶ Hasta marzo de 2025, estuvo abierta una convocatoria para desarrollar una infraestructura de comunicación cuántica con un presupuesto global de 2021-2027 de 90 millones de euros: <https://hadea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility/>

⁹⁷ El Fondo de Innovación se financia con la monetización de 530 millones de derechos de emisión de CO₂ (ETS) y los fondos no utilizados del programa NER300. Su presupuesto total dependerá del precio del carbono, estimándose en 40.000 millones de euros entre 2020 y 2030, con un precio de referencia de 75 €/tCO₂. https://hadea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility/about/quantum-communication-infrastructure-euroqci_en

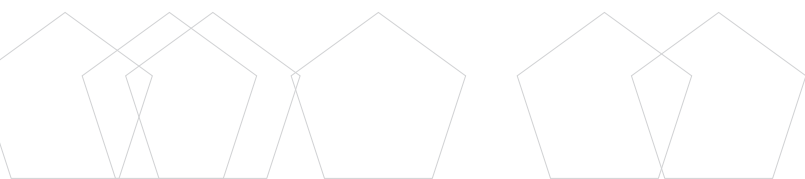


Esta Estrategia busca crear un ecosistema sólido, coordinado y competitivo para acceder a fuentes de financiación tanto europeas como internacionales.

Existen también iniciativas de coordinación, consolidación y refuerzo de todos los programas como, por ejemplo, la **Plataforma de Tecnologías Estratégicas para Europa (STEP)**. Su objetivo principal es canalizar recursos para apoyar la investigación, el desarrollo de infraestructuras y la comercialización de tecnologías críticas, incluyendo las tecnologías cuánticas. La implementación de STEP se basa en los marcos regulatorios de cada programa asociado. Se introduce también el “Sello STEP”, una etiqueta que reconoce proyectos de alta calidad, ayudándoles a obtener financiación adicional y apoyo de inversores públicos y privados. En su primer año, STEP ha movilizado más de 15.000 millones de euros⁹⁸ para impulsar inversiones en Europa, demostrando su eficacia en la promoción de tecnologías estratégicas.

Además, ciertos organismos e instituciones pueden apoyar en diferentes etapas del desarrollo y despliegue de tecnologías cuánticas, sin ánimo de que el listado sea exhaustivo.

⁹⁸Comisión Europea. *STEP moviliza en su primer año más de 15 000 millones de euros para impulsar las inversiones en Europa* (2025). Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_25_665



Entidad	Información adicional
Consejo de Innovación Europeo y Fondo del Consejo de Innovación Europeo	Apoyo a <i>startups</i> y proyectos con capital riesgo y subvenciones. Forma parte del programa Horizonte Europa.
Banco Europeo de Inversiones (BEI)	Financiación específica para proyectos estratégicos en innovación, incluyendo aquellos con tecnologías cuánticas.
Agencia Europea para el Programa Espacial (EUSPA)	Se estructura en cinco grandes áreas: CO-PERNICUS, EGNOS, GALILEO, Secure SAT-COM y SSA. En la evolución tecnológica de cada uno de ellos se están integrando, progresivamente, las tecnologías cuánticas.



Específicamente, en el **ámbito de la defensa** se encuentran las siguientes fuentes de financiación, tanto programas como organizaciones europeas e internacionales, sin ánimo de que el listado sea exhaustivo.

Fondo	Presupuesto	Información adicional
Fondo Europeo de Defensa 2021-2027	7.300 M€	Financia anualmente proyectos colaborativos en defensa, incluyendo tecnologías cuánticas (sensores PNT, óptica, RF y criptografía segura), así como iniciativas para pymes y tecnologías disruptivas, con participación de entidades españolas.
Agencia Europea de Defensa	N/A	Facilita el lanzamiento de actuaciones de I+D en tecnologías de interés para la defensa, entre ellas, las cuánticas.
Iniciativa DIANA (OTAN)	N/A	Acelera soluciones basadas en tecnologías disruptivas y emergentes, especialmente aquellas desarrolladas para el sector comercial con aplicaciones en seguridad y defensa, aprovechando la infraestructura de aceleradoras y centros de ensayo de las naciones OTAN.
Fondo de Innovación de la OTAN (NIF)	Más de 1.000 M€	Fondo de capital riesgo independiente para invertir en empresas emergentes de deep tech (donde se incluyen las tecnologías cuánticas), reforzando la defensa, la seguridad y la resiliencia de las naciones participantes.

CAPÍTULO VII:



Gobernanza de la Estrategia de Tecnologías Cuánticas de España

Para garantizar la implementación efectiva y la consecución de los objetivos estratégicos de la Estrategia de Tecnologías Cuánticas de España, es fundamental establecer un **modelo de gobernanza estructurado y coordinado** que permita articular esfuerzos entre los distintos niveles de la Administración y el ecosistema cuántico en su conjunto.

El modelo de gobernanza que se propone se basará en la creación de un **Grupo de Trabajo Interministerial de Tecnologías Cuánticas**, enmarcado dentro de la **Comisión Interministerial** para la coordinación y el seguimiento de las medidas a favor de la conectividad y la digitalización de la economía y la sociedad en el ámbito de la Administración General del Estado del Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública. Estará presidido por este último, juntamente con el Ministerio de Ciencia, Innovación e Universidades. Este Grupo permitirá una coordinación efectiva entre los distintos ministerios implicados en el desarrollo y la ejecución de esta Estrategia y garantizará su despliegue con un enfoque coordinado, transversal y eficiente en el uso de los recursos disponibles.

Por último, se destaca que, además del seguimiento continuo de la Estrategia Nacional, se procurará aspirar a contribuir a los indicadores clave de rendimiento recientemente publicados por la Quantum Flagship⁹⁹, ambiciosos para seguir el progreso hacia 2030. Esta intención de alinearse con los estándares europeos no solo refuerza el compromiso con las mejores prácticas, sino que también permite evaluar el progreso de manera más objetiva y comparativa a nivel nacional y europeo.

⁹⁹ Quantum Flagship. *Key Performance Indicators for Quantum Technologies in Europe* (2025). Disponible en: https://qt.eu/media/pdf/KPI_booklet_2025.pdf?m=1744347631&

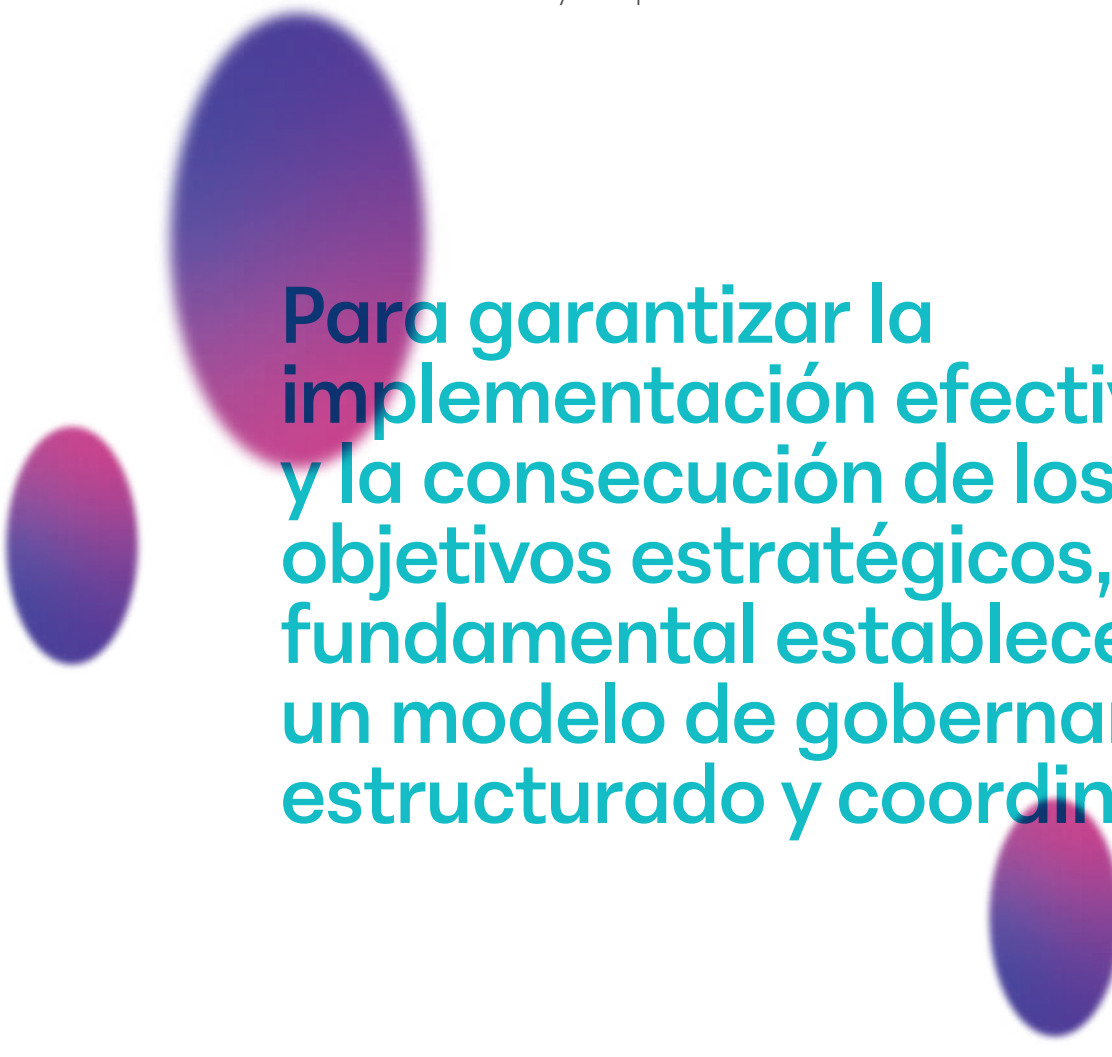
A nivel autonómico, se establecerá un **Subgrupo de Trabajo de IA** dentro de la **Conferencia Sectorial**, conjuntamente entre el Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública y, al que se invitará al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Este Subgrupo reforzará la coordinación con las Comunidades Autónomas y facilitará la integración de los planes autonómicos dentro de la Estrategia nacional, evitando duplicidades y promoviendo sinergias en el desarrollo de infraestructuras, formación de talento, financiación de proyectos y apoyo al sector empresarial cuántico en cada territorio.

Además, con el fin de asegurar una implementación efectiva en el ámbito local, se promoverá la **participación de Entidades Locales** que ya cuenten con iniciativas o estrategias en tecnologías cuánticas. La inclusión de estas entidades permitirá alinear proyectos municipales y regionales con la Estrategia nacional, optimizar el impacto de las inversiones y garantizar que las ciudades y las regiones con potencial cuántico puedan actuar como polos de innovación y experimentación.



Para agilizar la interlocución entre el sector público y el ecosistema cuántico español, la entidad definida en la prioridad 7 actuará como el **principal interlocutor con todos los socios gubernamentales**, trasladando de manera ágil y eficiente las necesidades, oportunidades y retos del sector privado e investigador. Su función será clave para facilitar la toma de decisiones estratégicas, mejorar la asignación de recursos y asegurar que las inversiones público-privadas se orienten a maximizar el impacto en la competitividad de España.

El modelo de gobernanza también contemplará la creación de **mecanismos de seguimiento de cumplimiento de iniciativas y evaluación** que permitan revisar el progreso de la Estrategia y adaptar sus líneas de acción cada dos años, incluyendo un informe de progreso de implementación coordinado por el Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública, en función de los avances tecnológicos, el contexto económico y las oportunidades de financiación disponibles a nivel nacional y europeo.



Para garantizar la implementación efectiva y la consecución de los objetivos estratégicos, es fundamental establecer un modelo de gobernanza estructurado y coordinado.

