

ESTRATEGIA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

CSIC 2025-2030



PLANES CIENTÍFICOS, 1

ESTRATEGIA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

© Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2026.

Este es un libro de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0). Más información sobre esta licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, solo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado: <https://cpage.mpr.gob.es>

EDITORIAL CSIC: <http://editorial.csic.es> (correo: editorialcsic@csic.es)

Agradecimientos:

A la presidenta del CSIC, Eloísa del Pino, por su visión estratégica y su apoyo continuo en el diseño y la puesta en marcha de esta Estrategia, cuya realización no habría sido posible sin su impulso.

A los miembros del Comité de Dirección y del Comité Científico Asesor del CSIC, por sus valiosas aportaciones, revisiones y comentarios, que han contribuido a que esta Estrategia combine ambición y viabilidad.

Al equipo de la Vicepresidencia de Investigación Científica y Técnica (VICYT), Elena Cartea, Jaime Carvajal, M.^a Jesús García, Sonia Martínez, Sonia Rodríguez y Carmen Elena Gabino, por su dedicación. Su implicación y compromiso han sido esenciales para materializar esta Estrategia y garantizar su calidad y coherencia.

Por último, a los miembros de la PTI QTEP y a la Fundación General CSIC, por sus valiosas aportaciones y sugerencias, que han enriquecido y mejorado los resultados finales de esta Estrategia.

NIPO: 155-26-041-7

e-NIPO: 155-26-042-2

Depósito legal: M-8296-2026

Edición no venal



Coordinadores:

JOSÉ MARÍA MARTELL, vicepresidente de Investigación Científica y Técnica del CSIC

PETER KLATT, asesor del vicepresidente de Investigación Científica y Técnica del CSIC

Colaboradores:

JUAN JOSÉ RIPOLL, coordinador de la Plataforma Temática Interdisciplinar en Tecnologías Cuánticas (PTI QTEP) del CSIC

VERÓNICA FERNÁNDEZ, coordinadora adjunta de la Plataforma Temática Interdisciplinar en Tecnologías Cuánticas (PTI QTEP) del CSIC

M.^a JOSÉ CALDERÓN, coordinadora adjunta del Área de Ciencia y Tecnologías Físicas, Matemáticas, Robótica y Computación del CSIC

ANTONIO CHICA, coordinador del Área Global de Materia del CSIC

Impreso en España. *Printed in Spain*

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.



Distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.

En la preparación de este documento se ha empleado asistencia puntual de herramientas de inteligencia artificial generativa para tareas de apoyo en la redacción y estructuración del contenido, sometiendo todas las secciones resultantes a revisión y validación humana.



MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



RESUMEN EJECUTIVO

Este documento presenta las líneas estratégicas clave de la **Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)** en ciencia y tecnologías cuánticas para el periodo **2025-2030**. La estrategia central se basa en la **creación de un Centro de Ciencia y Tecnologías Cuánticas (CCTC)**, una respuesta a la necesidad de dotar al ecosistema cuántico español de un centro de referencia nacional dedicado exclusivamente a este ámbito.

La puesta en marcha de un **CCTC-CSIC** requerirá el impulso del **Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades** y del **Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública**. Este proyecto se enmarca en los ejes estratégicos del **Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2024-2027**,¹ específicamente en las áreas de **Tecnologías Cuánticas** y **Criptografía Cuántica y Postcuántica**. Además, el CCTC-CSIC buscará liderar el despliegue de la **Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas**,² con el objetivo de posicionar a España como referente internacional, fomentando la investigación de excelencia, la transferencia tecnológica, la atracción de talento y el aprendizaje a nivel avanzado y especialista en este campo estratégico.

Este informe se fundamenta en el análisis desarrollado por la **Plataforma Temática Interdisciplinar (PTI) del CSIC en Tecnologías Cuánticas**³ (QTEP), coordinado por los investigadores Juan José García Ripoll (IFF)⁴ y Verónica Fernández Mármol (ITEFI) y recogido en un estudio propio del CSIC «CSIC Analysis on Quantum Technologies». Este análisis describe la trayectoria del CSIC en el desarrollo de tecnologías cuánticas y está dividido en dos partes. La primera aborda una **introducción pedagógica** a estas tecnologías y un análisis del **contexto internacional**, con énfasis en aplicaciones avanzadas y estrategias de referencia para evaluar el potencial del CSIC. La segunda parte detalla los **logros históricos**, las capacidades actuales y las actividades futuras, destacando el papel de la PTI QTEP como motor de impacto científico, educativo e industrial.

Además, el informe se complementa con el estudio de **vigilancia estratégica** elaborado por la Fundación General CSIC (FGCSIC) bajo el título «De bits a cúbits: radiografía de la innovación cuántica»,⁵ así como los informes internos «Quantum Technology Scouting» e «Informe de Prospectiva: Tecnologías Cuánticas – Prioridades y Recomendaciones para el CSIC», que ofrecen una **visión integral** de las tecnologías cuánticas, incluyendo su desarrollo en Europa, estrategias nacionales en España, aplicaciones comerciales, sectores involucrados, el progreso tecnológico global y el ecosistema de startups e inversiones. Asimismo, identifica tendencias y oportunidades clave en el mercado cuántico mundial, subrayando el potencial estratégico para España en este campo emergente.

¹ Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2024-2027; <https://www.ciencia.gob.es/InfoGeneralPortal/documento/6e566243-bcb5-45d8-ab77-5cfe533060f2>

² Estrategia de Tecnologías Cuánticas de España; <https://digital.gob.es/content/dam/portal-mtdfp/carruselhome/Estrategia%20Tecnologias%20Cuanticas.pdf>

³ Plataforma Temática Interdisciplinar en Tecnologías Cuánticas (PTI QTEP); <https://qtep.csic.es/>

⁴ Nota: los centros e institutos del CSIC referidos en este documento se presentan bajo sus respectivas siglas. Al final del mismo se incluye un glosario con su denominación completa.

⁵ Informe «De bits a cúbits: radiografía de la innovación cuántica»; https://fgcsic.es/wp-content/uploads/2025/04/FGCSIC_Informe_VT_Tecnologias_Cuanticas.pdf

PRÓLOGO



La formulación de una estrategia nacional en ciencia y tecnologías cuánticas exige una visión clara, una planificación rigurosa y una articulación precisa entre capacidades científicas, infraestructuras tecnológicas y objetivos institucionales. Este documento, elaborado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), representa el resultado de un proceso colectivo de reflexión estratégica, fundamentado en el análisis detallado de las capacidades internas del CSIC, el contexto internacional y las oportunidades emergentes en el ecosistema cuántico global.

La propuesta de creación de un Centro de Ciencia y Tecnologías Cuánticas (CCTC-CSIC) se sustenta en la experiencia acumulada por la Plataforma Temática Interdisciplinar en Tecnologías Cuánticas (PTI QTEP), que desde 2018 ha vertebrado la investigación cuántica en el CSIC, consolidando una red de excelencia distribuida en 21 institutos y 36 grupos de investigación. Esta estrategia no solo recoge los logros científicos alcanzados, sino que plantea una arquitectura organizativa orientada a maximizar el impacto científico, tecnológico y formativo del CSIC en este campo emergente.

El documento ha sido posible gracias a la colaboración activa de numerosos investigadores e investigadoras del CSIC, así como de expertos externos que han contribuido con sus conocimientos, análisis prospectivos y recomendaciones estratégicas. En particular, se reconoce el trabajo de coordinación de Juan José García Ripoll (IFF) y Verónica Fernández Mármol (ITEFI), así como las aportaciones de los equipos de la PTI QTEP, la Fundación General CSIC (FGCSIC), y los autores de los informes «CSIC Analysis on Quantum Technologies», «Quantum Technology Scouting» y «De bits a cúbits: radiografía de la innovación cuántica».

Asimismo, se agradece la participación de representantes de universidades, centros tecnológicos, empresas y organismos públicos que han colaborado en la definición de prioridades, en la identificación de sinergias y en la validación de los objetivos estratégicos del CCTC-CSIC. Su implicación ha sido esencial para garantizar que esta estrategia responda a las necesidades reales del ecosistema cuántico español y se alinee con las iniciativas europeas más avanzadas, como el Quantum Flagship, EuroQCI y EuroHPC.

Este documento aspira a ser una herramienta de planificación científica y tecnológica de largo alcance, que permita al CSIC consolidar su liderazgo en tecnologías cuánticas, atraer talento, optimizar infraestructuras y fortalecer su proyección internacional. La creación del CCTC-CSIC no es solo una reorganización institucional, sino una apuesta estratégica por el futuro de la investigación cuántica en España.

Eloísa del Pino Matute

Presidenta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas



ÍNDICE

1 LA CIENCIA Y LAS
TECNOLOGÍAS
CUÁNTICAS
EN EL CSIC **08**

2 LA INVESTIGACIÓN EN
CIENCIA Y TECNOLOGÍAS
CUÁNTICAS EN
EL CONTEXTO
INTERNACIONAL
Y EN ESPAÑA **16**

3 POTENCIAL DEL
DESARROLLO DE LA
INVESTIGACIÓN DE LA
CIENCIA Y TECNOLOGÍAS
CUÁNTICAS EN EL CSIC **21**

4 PROPUESTA DE
CREACIÓN DE UN
CENTRO DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍAS
CUÁNTICAS EN EL
CSIC (CCTC-CSIC) **28**

5 ADECUACIÓN AL
PLAN ESTRATÉGICO
DEL CSIC **54**

A futuristic, glowing orange and yellow structure resembling a quantum device or a stylized letter 'I'. The structure is composed of many thin, wavy lines that converge towards a central point, creating a sense of depth and movement. It is set against a dark background with blurred red and blue lights, suggesting a high-tech or scientific environment. The structure is partially obscured by a white, angular shape on the right side.

LA CIENCIA Y LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN EL CSIC

El CSIC, con 3 centros nacionales y 121 institutos de investigación, es la mayor institución nacional de investigación y uno de los mayores referentes europeos en I+D+i. En al menos 21 de estos institutos, trabajan más de una treintena de grupos de investigación del ámbito de la ciencia y las tecnologías cuánticas, cuyas áreas de especialización y principales capacidades incluyen las siguientes:



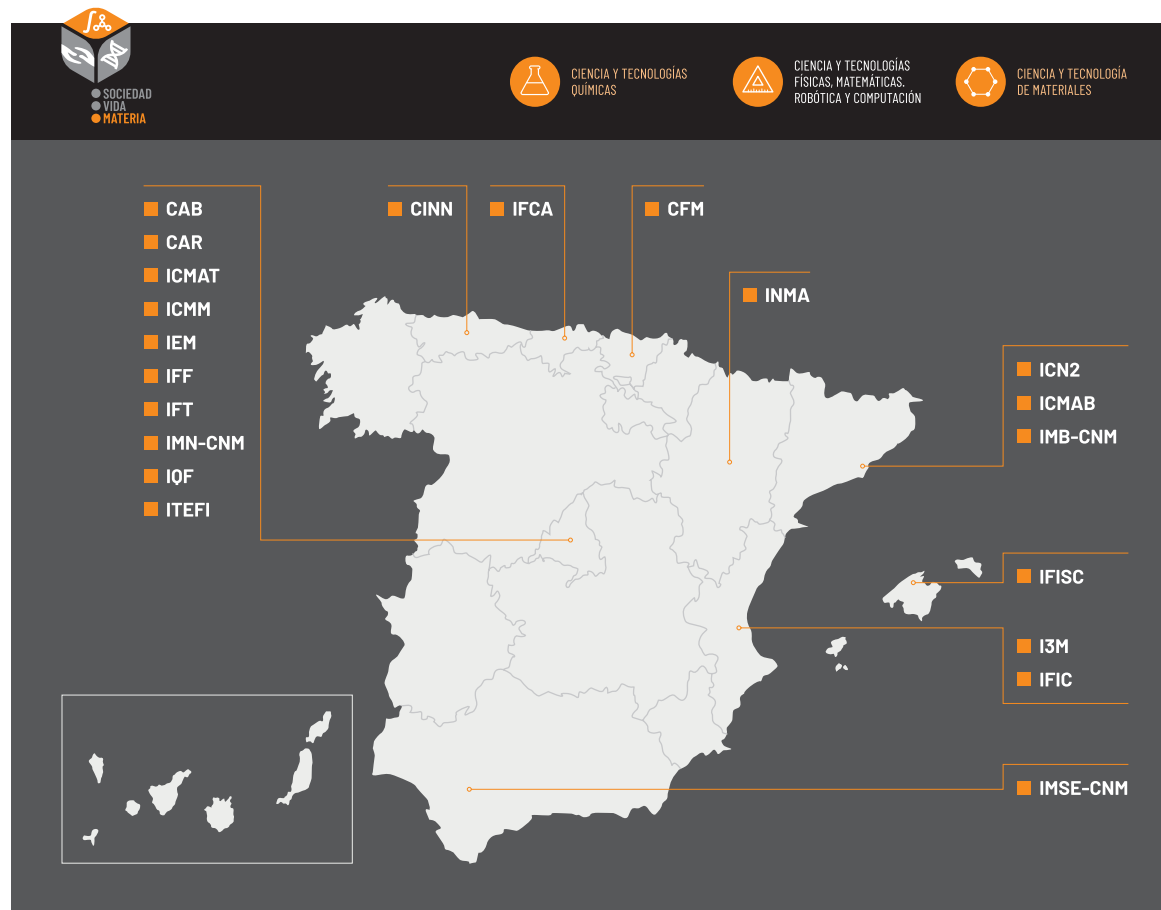
- **Comunicaciones seguras aéreas, terrestres y espaciales:** Laboratorio de Comunicaciones Cuánticas, coordinado por el ITEFI y formando parte del «The Madrid SDN Quantum Network» y de la European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI).⁶ Participación en el Plan Complementario de Comunicaciones Cuánticas.⁷ Colaboraciones con entidades públicas y privadas líderes en este campo (Universidad Politécnica de Madrid [UPM], Universidad de Vigo [UVigo], Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Instituto Astrofísico de Canarias [IAC], Telefónica, GMV, CIPHERBIT y Airbus Crisa).
- **Computación, simulación e información cuántica:** desarrollo experimental de procesadores cuánticos moleculares híbridos (INMA) y teoría de bits cuánticos basados en superconductores y semiconductores (ICMM) en colaboraciones con grupos experimentales de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), ICN2 y QuTech Delft, entre otros. Construcción de un computador cuántico de átomos de Rydberg en el CINN. Desarrollo de algoritmos cuánticos (IFF, IFT), métodos neuromórficos cuánticos (IFISC) y teoría de información cuántica (ICMAT, IFT).
- **Sensórica cuántica:** líneas de trabajo en dispositivos optomecánicos (ICMM); sensores con aplicaciones a la biomedicina (CFM). Detectores superconductores de inductancia cinética, con aplicaciones en astrofísica, detección de materia oscura y comunicación cuántica (CAB). Sensores superconductores (INMA) y nueva generación de fotodetectores (IFCA, ICMAB, IMB-CNM, INMA).
- **Fotónica:** imbricado con un amplio espectro de capacidades del CSIC en fotónica para, entre otros, el uso de fotones individuales de alta eficiencia para la distribución cuántica de claves (Quantum Key Distribution, QKD), las fuentes de fotones entrelazados de alta calidad y miniaturización fotónica e integración de componentes que se desarrollan en centros como el CFM (Laboratorio de Nanofotónica Cuántica y Grupo de Teoría de Nanofotónica), el CINN (Grupo de Tecnologías Cuánticas y Nanomateriales), el ITEFI (Grupo de Criptología y Seguridad de la Información), el IQF (Grupo de Nanofotónica Teórica) y el IFF (Grupo de Información Cuántica).

⁶ Infraestructura europea de comunicación cuántica; <https://euroqci-spain.eu/>

⁷ Plan Complementario de Comunicaciones Cuánticas; <https://www.quantumcommunicationsspain.eu/>

- **Materiales cuánticos y sistemas topológicos:** diversos grupos (CFM, ICMA B, ICMM, ICN2, IEM) investigan el potencial de nuevos materiales y heteroestructuras para explorar fenómenos fundamentales de la física cuántica con potencial para el desarrollo de sensores, memorias y procesadores cuánticos.
- **Fabricación de tecnologías cuánticas:** instalaciones singulares como, por ejemplo, Salas Blancas del IMB-CNM, Sala Limpia en el INMA, laboratorio MBE (epitaxia por haces moleculares o *molecular beam epitaxy*) del ICMM, servicios de micro y nano fabricación en el IMN-CNM, líneas piloto sobre chips integrados de QKD en el IMB-CNM y el ITEFI.

Desde 2018, los principales grupos y recursos científicos del CSIC dedicados a tecnologías cuánticas se han integrado en la PTI QTEP. Las PTI del CSIC son herramientas estratégicas diseñadas para abordar desafíos interdisciplinares de alto impacto científico, económico y social, promoviendo la colaboración, innovación y transferencia.



Centros del CSIC con presencia en la PTI QTEP.

La **PTI QTEP** reúne a **36 grupos de investigación** de **21 institutos del CSIC**, distribuidos en **9 Comunidades Autónomas**, consolidándose como un núcleo clave en este ámbito. A través de una estrategia científica bien definida, ha coordinado y potenciado las capacidades de estos grupos, con financiación proveniente tanto de recursos propios del CSIC como de iniciativas nacionales de gran envergadura, como el Plan Complementario de Comunicaciones Cuánticas y la iniciativa Quantum Spain,⁸ fortaleciendo su papel como referente en el desarrollo de tecnologías cuánticas. Tras cinco años de funcionamiento, se puede afirmar que la PTI QTEP ha cumplido con estas expectativas alcanzando logros científicos muy relevantes en su esfuerzo por impulsar la ciencia y las tecnologías cuánticas en España.

La PTI QTEP se organiza en torno a los tres pilares fundamentales del campo: las tareas de **adquisición (sensado y metrología), comunicación y procesamiento de información cuántica (computación y simulación)**. De forma transversal, incluye las tecnologías facilitadoras (**ingeniería, control y fabricación**) y capacidades habilitadoras necesarias (**transferencia del conocimiento y formación**).

El análisis de la distribución de las áreas de investigación dentro de los grupos de tecnología cuántica del CSIC, recogido en el informe «Quantum Technology Scouting», muestra que la **computación e información cuántica** (21,4%) destaca como el campo dominante, impulsado por los esfuerzos en algoritmos cuánticos, corrección de errores y arquitecturas de qubits. Los **materiales cuánticos y sistemas topológicos** (17,3%) reflejan la importancia de los superconductores, aislantes topológicos y materiales exóticos en el desarrollo de hardware cuántico de próxima generación. La **sensórica cuántica y metrología** (16,3%) es otra área de investigación clave, centrada en mediciones de alta precisión, magnetometría y detección cuántica mejorada. La **interacción luz-materia y nanofotónica** (12,2%), desempeña un papel clave en la comunicación cuántica y la computación **fotónica**, utilizando plataformas ópticas para la transmisión segura de datos y la manipulación del estado cuántico. Las **tecnologías superconductoras** (11,2%) también tienen una participación significativa centrándose en qubits superconductores, resonadores y detectores. Estas tendencias de investigación sugieren que la estrategia del CSIC se alinea con las prioridades globales en ciencia y tecnología cuánticas.

Entre las acciones de formación impulsadas por el CSIC destaca la PTI QTEP en la coordinación de dos programas formativos clave: el **Máster en Tecnologías e Ingeniería Cuánticas** Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)-CSIC y el **Máster Interuniversitario en Tecnologías Cuánticas** Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP)-CSIC, este último con la participación de siete universidades (Universidad de La Laguna, Universidad de Murcia, Universidad de Zaragoza, Universidad Internacional Menéndez Pelayo, Universidad Politécnica de Cartagena, Universidad Politécnica de

⁸ Quantum Spain; <https://quantumspain-project.es/>

Madrid y Universitat de València). En sus dos primeras ediciones, cuando era un título propio, el máster interuniversitario contó con una matrícula de 10 estudiantes por año. En el curso actual, ya como máster oficial, el número de matriculados ha crecido notablemente hasta alcanzar los 40 estudiantes, reflejando el creciente interés y reconocimiento de esta iniciativa formativa.

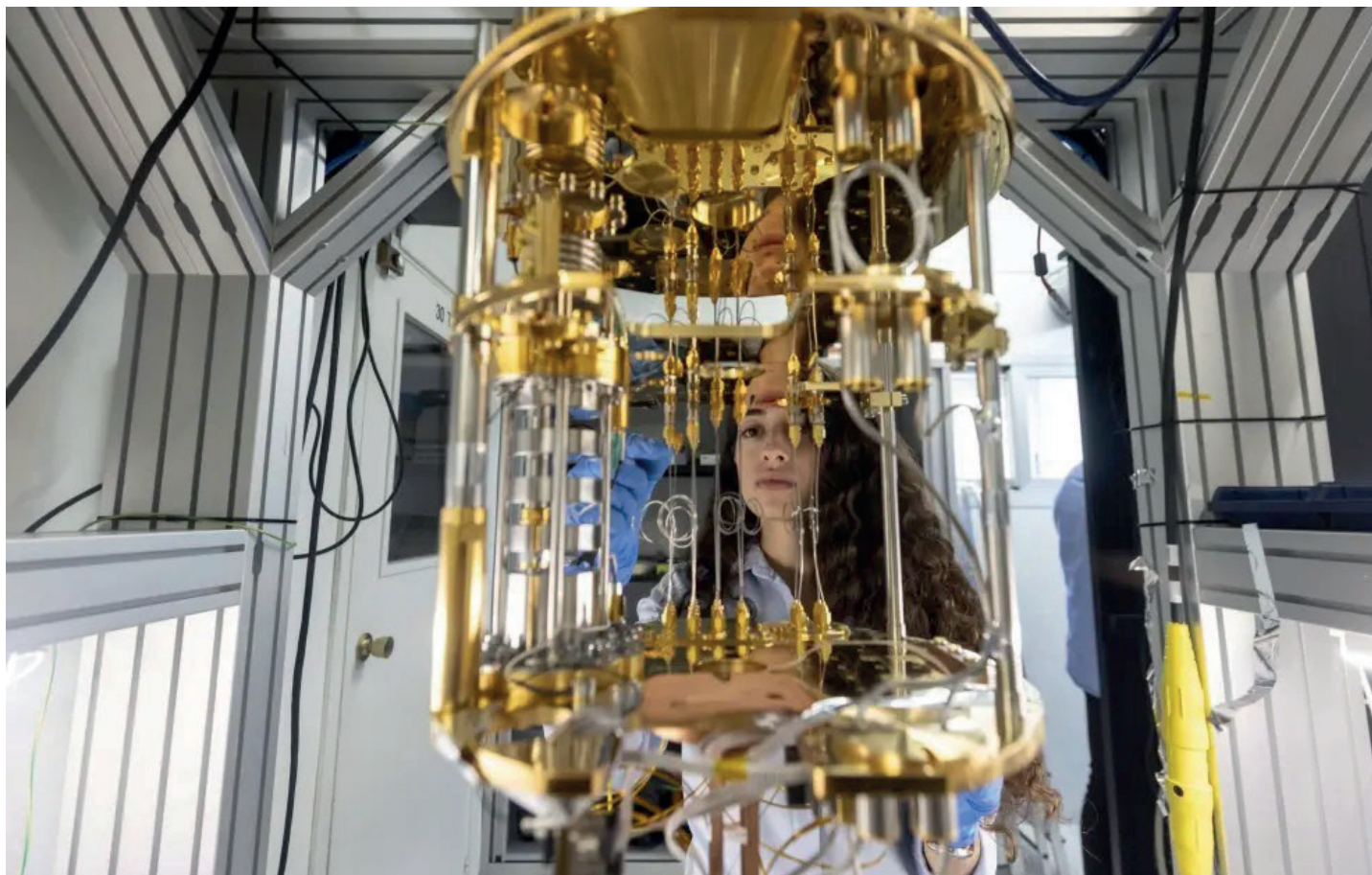
La PTI QTEP mantiene una **producción científica** media anual de más de 340 trabajos, compuesta principalmente por artículos de investigación que han pasado por un riguroso proceso de revisión por pares. De estos artículos, un 40% han sido publicados en revistas del primer decil (D1) y un 80% en el primer cuartil (Q1), reflejando la alta calidad y excelencia de su producción científica.

Las citas anuales de los trabajos de la PTI QTEP se sitúan consistentemente por encima del impacto promedio tanto a nivel global como dentro del CSIC. En particular, las publicaciones de 2018 alcanzaron un promedio de 27 citas por artículo, mientras que el promedio de los últimos cinco años es de 17 citas por trabajo, superando los factores de impacto de algunas de las mejores revistas del campo, como *Physical Review Letters*, *Physical Review X* o *PRX Quantum*. Asimismo, estas métricas de citación superan el promedio del propio CSIC, lo cual es especialmente destacable dado que la institución alberga numerosos institutos con promedios estructuralmente elevados.

El estudio cuantitativo realizado destaca adicionalmente un índice H de 69, un logro sobresaliente en solo cinco años. Además, el impacto normalizado promedio es de 1.66, indicando que los trabajos de la PTI QTEP reciben un 66% más de citas que el promedio del campo, superando el impacto normalizado del CSIC (1.44). Un 24% de las publicaciones se encuentran entre las 10% más citadas en el ámbito. En cuanto al alcance internacional, las principales citas provienen de países como China (29%), Estados Unidos (21%), Alemania (14%), Italia (10%), Reino Unido (9%) y Francia (6%), reflejando su relevancia global. Este impacto está respaldado por un alto grado de internacionalización, con el 70% de los trabajos realizados en colaboración con instituciones extranjeras.

El CSIC, a través de la PTI QTEP, se posiciona como un referente internacional en diversas líneas de investigación en tecnologías cuánticas. Lidera en España el desarrollo de **ordenadores cuánticos basados en átomos de Rydberg**, un proyecto encabezado por Daniel Barredo (CINN), reconocido internacionalmente y co-creador de los procesadores cuánticos de Pasqal. Este trabajo ha recibido una financiación de 7 millones de euros por parte de la Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial, Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública (SEDIA). Además, el CSIC es pionero en la creación de **procesadores cuánticos híbridos** basados en circuitos superconductores y moléculas magnéticas, con contribuciones del ICMAB, IFF, INMA y CAB, y avalado por el proyecto europeo FET-Open FATMOLS, en colaboración con instituciones como Oxford y socios industriales como IBM-Zurich. Otros proyectos relevantes del área son, por ejemplo, el proyecto EuroQCI-Spain, donde el CSIC contribuye con enlaces de espacio abierto para una **red de criptografía cuántica metropolitana**; la ERC Starting Grant QFaST, en la que se exploran las aplicaciones de **magnetismo cuántico** a tecnologías cuánticas; SuperQULAN, donde el CSIC ha

contribuido al diseño de **redes superconductoras** para ordenadores cuánticos. Además, destaca el proyecto Quantum Bits with Kitaev Transmons (QuKiT), con participación del ICMM en la parte teórica, financiado por la EIC Pathfinder Challenge, que propone un innovador **qubit híbrido** (Kitmon) basado en heteroestructuras semiconductor-superconductor con la colaboración de QuTech Delft y otros socios internacionales.



Refrigerador de dilución con muestras del procesador cuántico híbrido de superconductor con moléculas magnéticas desarrollado en el INMA.

EL CSIC también es referente en **comunicación cuántica por aire en zonas metropolitanas**, integrando esta tecnología en proyectos nacionales y europeos con colaboraciones entre el IMB-CNM y Telefónica. En el ámbito de la computación, los grupos MATHQI (ICMAT) y QUINFOG (IFF) desarrollan **algoritmos de inspiración cuántica** basados en redes tensoriales, utilizados para simular circuitos cuánticos clásicos, como en experimentos destacados de Google e IBM, con aplicaciones comerciales desarrolladas a través de la spin-off Inspiration-Q.

En el campo de la **sensórica cuántica**, investigadores como Daniel Ramos (ICMM) y Gabriel Molina (CFM) trabajan en nuevos usos de centros de color en diamantes, en colaboración con Tecnia, Tekniker y Lockheed-Martin. Por último, la PTI impulsa la **fabricación cuántica** mediante una infraestructura distribuida que incluye dispositivos avanzados, como circuitos nanofotónicos y optomecánicos, combinando las capacidades del IMB-CNM y el ICMM para alcanzar el **límite cuántico a temperatura ambiente**.

El conjunto de estas iniciativas consolida al CSIC y a la PTI QTEP como líderes en la investigación y desarrollo de tecnologías cuánticas a nivel global. Su investigación destaca, además, por un enfoque que combina el interés científico fundamental y el potencial de transferencia tecnológica. Los grupos de la PTI QTEP han impulsado la creación de cuatro **spin-offs tecnológicas**: g2-Zero (IMN-CNM) y Q-Dynamics (ITEFI), centradas en componentes y dispositivos para comunicación cuántica; Nanological (ICMM), que aplica sensado optomecánico en medicina; e Inspiration-Q (IFF), que transfiere algoritmos de inspiración cuántica desarrollados en el IFF hacia el sector productivo, especialmente en finanzas. Además, QTEP ha generado un **número significativo de patentes y propiedad intelectual licenciada**. A esto se suman **excelentes relaciones con la industria**, evidenciadas en proyectos colaborativos como Misión Caramuel y el proyecto AgrarIA, así como en contratos estratégicos, como el de larga duración entre BBVA e IFF para el desarrollo de algoritmos cuánticos, fortaleciendo la conexión entre la investigación y el tejido empresarial.

La PTI QTEP actúa como un **agente de implantación nacional**, articulando acciones de investigación, comunicación y formación en colaboración con una amplia red de universidades y entidades. Entre sus iniciativas destaca la coordinación de la Red Española de Información y Tecnologías Cuánticas (RITCE),⁹ creada en 2016 y responsable de las conferencias ICE (tecnologías cuánticas) y QTYR (jóvenes investigadores). Asimismo, la PTI ha colaborado con el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y la Comisión Europea en la definición de la participación española en EuroQCI y en el desarrollo del Plan de Comunicación Cuántica. Además, coordina el desarrollo de algoritmos cuánticos en un proyecto colaborativo con 21 grupos de investigación, y en 2025 lidera la organización del **Año Internacional de la Cuántica**, con actividades promovidas a través del portal www.cuantica2025.es, en colaboración con entidades como el Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS), el Programa TalentQ,¹⁰ RITCE y la Asociación de Parques Científicos y Tecnológicos de España (APTE).

En el ámbito de la **divulgación**, la PTI QTEP ha colaborado con la APTE (2019-2023) en jornadas de difusión tecnológica y organizó reuniones con empresas como Telefónica, GMV y Airbus entre

⁹ Red de Información y Tecnologías Cuánticas en España; <https://www.ritce2020.hbar.es/>

¹⁰ Programa <https://www.talentq.es/>

2018 y 2020, retomando contactos en 2022 con entidades como Navantia. También ha participado en el ciclo de conferencias Quantum Matter, promoviendo la interacción con líderes globales, y en 2022 colaboró en un workshop del Plan Complementario de Comunicación Cuántica en Madrid, fomentando la visibilidad de proyectos y resultados para generar nuevas colaboraciones.



En términos de financiación, la PTI QTEP ha demostrado una destacada **capacidad para captar recursos**, participando en proyectos de investigación competitivos que han generado más de 54 millones de euros, de los cuales 23 millones han sido gestionados por el CSIC.

Adicionalmente, mediante convenios, contratos y otras fórmulas, se han obtenido más de 74 millones de euros, de los cuales 29 millones han sido asignados al CSIC. Una parte importante de estos fondos proviene del Plan Complementario de Comunicación Cuántica, con un presupuesto total de 75 millones de euros, de los cuales 18 millones han sido dirigidos al CSIC, consolidando su liderazgo en el desarrollo de tecnologías cuánticas en España.

El CSIC ha realizado un esfuerzo significativo en la **atracción y consolidación de talento** en el campo de las tecnologías cuánticas, abarcando diversas etapas de la carrera investigadora. Este esfuerzo incluye la contratación de alrededor de 35 investigadores postdoctorales a través de contratos Juan de la Cierva y Marie Skłodowska-Curie, así como la captación de talento mediante convocatorias como las ayudas para contratos Ramón y Cajal y programas autonómicos de consolidación, con un total de 6 investigadores incorporados.

En cuanto al personal científico funcionario, se han **perfilado** varias **plazas** específicamente dedicadas a este ámbito estratégico en los últimos años, sumando un total de nueve plazas de Científico Titular y una de Investigador Científico. Además, en la Oferta de Empleo Público (OEP) de 2023 se definieron cinco nuevas plazas: dos de Científicos Titulares con perfil en «Tecnologías Cuánticas Experimentales», dos en «Teoría de las Tecnologías Cuánticas» y una de Investigador Científico en «Escalado de fotónica cuántica en criogenia». En la misma línea, para la OEP 2024-2025 se han incluido un total de diez plazas entre las distintas categorías que reforzarían nuestras capacidades en tecnologías cuánticas del CSIC.

Estas iniciativas reflejan el firme compromiso del CSIC con el **fortalecimiento y liderazgo** en el desarrollo de tecnologías cuánticas, consolidando su capacidad para competir a nivel global en este campo estratégico.

The background is a complex, abstract image featuring a circuit board with glowing lines and a large, white, stylized number '2' that dominates the right side. The circuitry is rendered in shades of blue, purple, and orange, with some elements appearing to be illuminated or glowing. The overall aesthetic is high-tech and futuristic.

LA INVESTIGACIÓN EN CIENCIA
Y TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
EN EL CONTEXTO
INTERNACIONAL Y
EN ESPAÑA, Y LOS
ESPACIOS QUE
SON NECESARIOS
REFORZAR

Europa tuvo un papel predominante en los comienzos de la **Segunda Revolución Cuántica**, liderada por los primeros experimentos capaces de controlar materia y luz a nivel cuántico para adquirir, comunicar y procesar información. Inicialmente, esta revolución se percibió como un paradigma científico fundamental, sin un potencial económico relevante. Durante el periodo 2000-2015, la investigación en tecnologías cuánticas en Europa se apoyó en fondos europeos que consolidaron las bases experimentales y teóricas en computación, comunicación y sensado cuántico. Mientras tanto, **EE. UU.** dominaba en metrología gracias al trabajo del National Institute of Standards and Technology (NIST) y centros como JILA. Sin embargo, Europa no supo capitalizar su posición de liderazgo inicial.

La década de 2010 evidenció una falta de ambición del marco estratégico para impulsar proyectos europeos, una disminución de la financiación y una limitada transferencia al sector productivo, restando competitividad tecnológica a Europa. En contraste, **EE. UU.** y **China** emergieron como líderes globales. EE. UU. destacó con un protagonismo empresarial en computación cuántica y una inversión de 770 millones de euros para el periodo 2019-2023, mientras que China invirtió 8,5 billones de euros desde 2017, liderando en comunicación cuántica terrestre y espacial y expandiendo su influencia a otras áreas tecnológicas.

La respuesta europea a esta pérdida de competitividad fue la creación del **Quantum Flagship**¹¹ en 2018, una iniciativa ambiciosa de la **Comisión Europea** bajo Horizonte 2020 con una inversión de **1.000 millones de euros** en diez años. Este programa abarca **computación, comunicación, sensado, simulación y metrología cuánticas**, combinando investigación básica, desarrollo de infraestructuras y proyectos tecnológicos. En su primera fase (2018-2022), financió 20 proyectos con 132 millones de euros. En la siguiente convocatoria (2021-2024) Quantum Flagship ha financiado 32 proyectos con 207 millones de euros. Complementariamente, el programa **QuantERA** apoyó 24 proyectos adicionales con una inversión de 34 millones de euros, alineando estrategias nacionales con los objetivos europeos. La **Red de la Comunidad Cuántica (QCN)** conecta a miembros de **32 países**, fortaleciendo la coordinación entre estrategias nacionales y europeas.

Según lo indicado en el mencionado informe «Quantum Technology Scouting», la Unión Europea ha invertido más de 1200 millones de euros entre 2021 y 2024 para impulsar las tecnologías cuánticas a través de programas clave como Horizonte Europa, el Programa Europa Digital, el Consejo Europeo de Innovación (EIC) y el Mecanismo Conectar Europa. Estas iniciativas apoyan proyectos desde la investigación básica hasta la comercialización, con el objetivo de posicionar a Europa como líder mundial en este campo estratégico. Más en concreto, el programa Horizonte Europa ha asignado 509 millones de euros a proyectos cuánticos, incluyendo áreas clave como la **computación, la comunicación y la detección cuánticas**. Por otro lado, el Programa Europa

¹¹ Quantum Flagship; <https://qt.eu/>

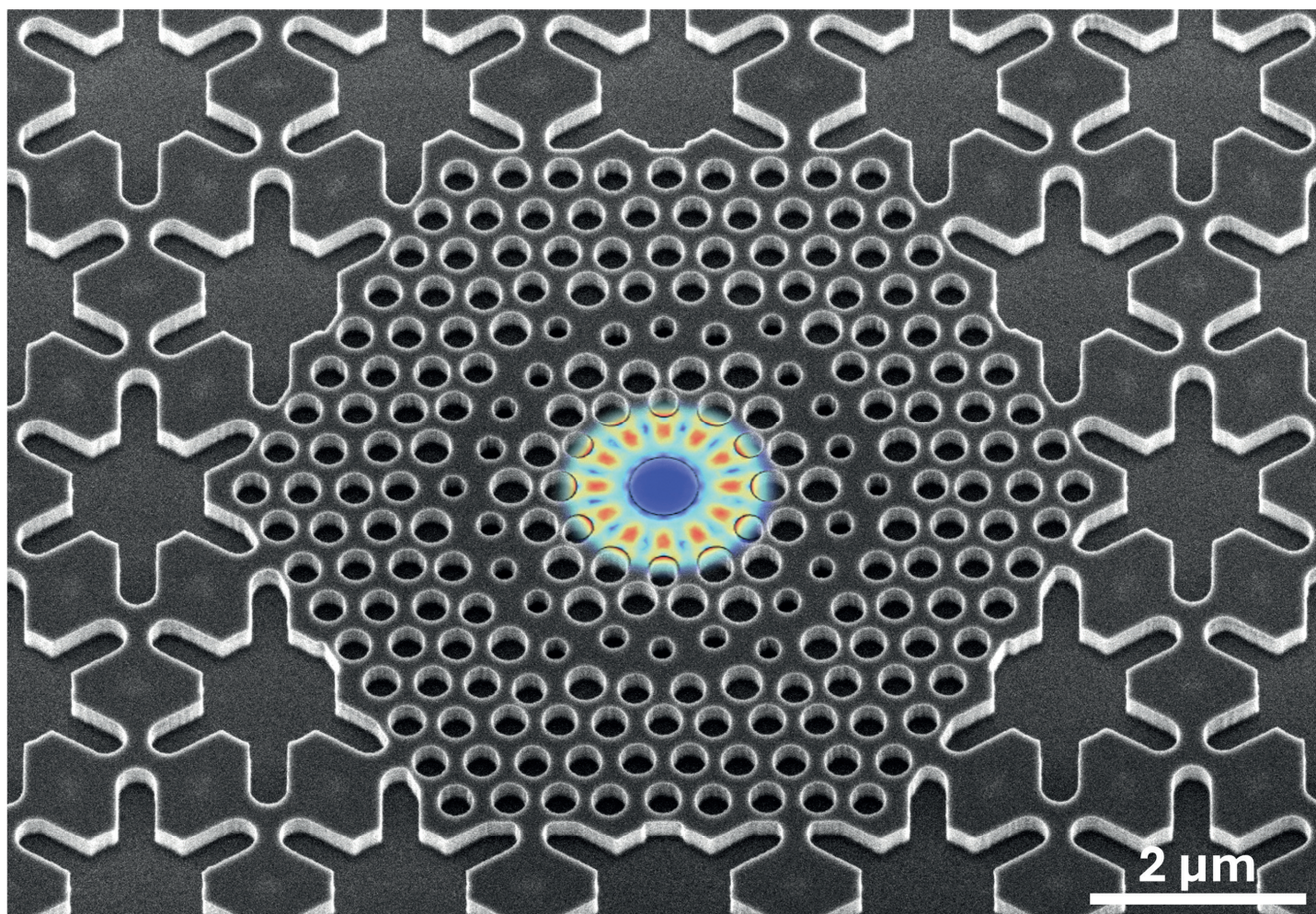
Digital ha destinado 190 millones de euros para **integrar tecnologías cuánticas en la industria europea y desarrollar infraestructuras clave**. A esto se suma el EIC, que ha invertido 570 millones de euros para apoyar **la transición de innovaciones cuánticas hacia el mercado**, especialmente en startups y pymes. Finalmente, el Mecanismo Conectar Europa, lanzado en 2024, ha comenzado a financiar proyectos de **infraestructura de comunicación cuántica** (EuroQCI), clave para garantizar la **soberanía de los datos y fortalecer la ciberseguridad europea**. Estos datos ponen de relieve el compromiso de Europa con las tecnologías cuánticas.

España, a través de programas como **Quantum Spain** y el **Plan Complementario de Comunicación Cuántica**, con un presupuesto conjunto de 95 millones de euros, busca posicionarse en este campo estratégico. Considerando los proyectos financiados en el período 2018-2024 por el programa Quantum Flagship y los proyectos de la convocatoria 2023-2027 del programa QuantERA, **España destacó con 34 proyectos**, una de las participaciones más altas en Europa, pero recibió solo **12 millones de euros**, una cifra significativamente inferior a la de otros países con menos proyectos. Esto sugiere un **papel colaborativo más que de liderazgo** en iniciativas de gran escala y alto presupuesto. La posición de España refleja su **amplia red de investigación** y su activa participación en iniciativas cuánticas europeas, contribuyendo a menudo como socio clave en proyectos multinacionales.

En un análisis de la financiación obtenida por diferentes instituciones españolas en su participación en Quantum Flagship y QuantERA de 2021 a 2024, presentado en el informe de la FGCSIC, España ha asegurado 15,5 millones de euros de financiación. Las principales entidades beneficiarias incluyen Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) (33%), CSIC (12,5%), UAM (10,4%), Universidad del País Vasco (7,5%) y la spin-off del ICFO, Quside (5,6%), reflejando la diversidad de la participación española en la investigación cuántica. Esta distribución destaca el papel activo de España en la innovación cuántica a través de instituciones públicas y privadas.

Aunque enfrenta retos significativos, España tiene oportunidades estratégicas para fortalecer su posición, especialmente en áreas de impacto inmediato como la **sensórica cuántica**, que promete avances en imagen médica, diagnóstico por fluidos y prospección geológica. Europa lidera en sensores de color en diamante, mientras que España destaca con grupos relevantes en **optomecánica** y **levitodinámica** del CSIC, áreas que requieren políticas ágiles de inversión y transferencia tecnológica.

En **comunicación cuántica**, España tiene una ventaja científica significativa. Vicente Martín-Ayuso (UPM) y Telefónica demostraron la viabilidad de la criptografía cuántica en redes comerciales, mientras que Verónica Fernández Mármol, del CSIC, estableció la ratio de transmisión de clave cuántica más rápida en entornos metropolitanos. Por su parte, el ICFO exploró el potencial de la comunicación cuántica mediante nanosatélites, abriendo posibilidades para redes globales seguras. A pesar de estos logros, es crítico crear un mercado mediante la estandarización de la criptografía cuántica y post-cuántica en comunicaciones gubernamentales y sectores estratégicos como banca y defensa.



Cristal fotónico de diamante. Mediante una adecuada fabricación de una lámina de diamante, se pueden crear dispositivos optomecánicos que, a través de la interacción entre la luz y las vibraciones del material, actúan como potentes sensores cuánticos (Imagen cortesía de Daniel Ramos, ICMM).

En **computación cuántica**, Europa enfrenta una dura competencia frente a las multimillonarias inversiones de empresas como Google, IBM o Microsoft, que cuentan con infraestructuras avanzadas y equipos especializados. En este contexto, Europa tiene una oportunidad de reorganizar sus proyectos adoptando estrategias más eficientes, separando diseño, fabricación e ingeniería, y explorando enfoques innovadores. España, con una limitada tradición en computación cuántica, tiene un nicho estratégico al abordar **preguntas científicas fundamentales** sobre qubits, materiales y métodos de control, ofreciendo oportunidades para avances disruptivos a medio y largo plazo.

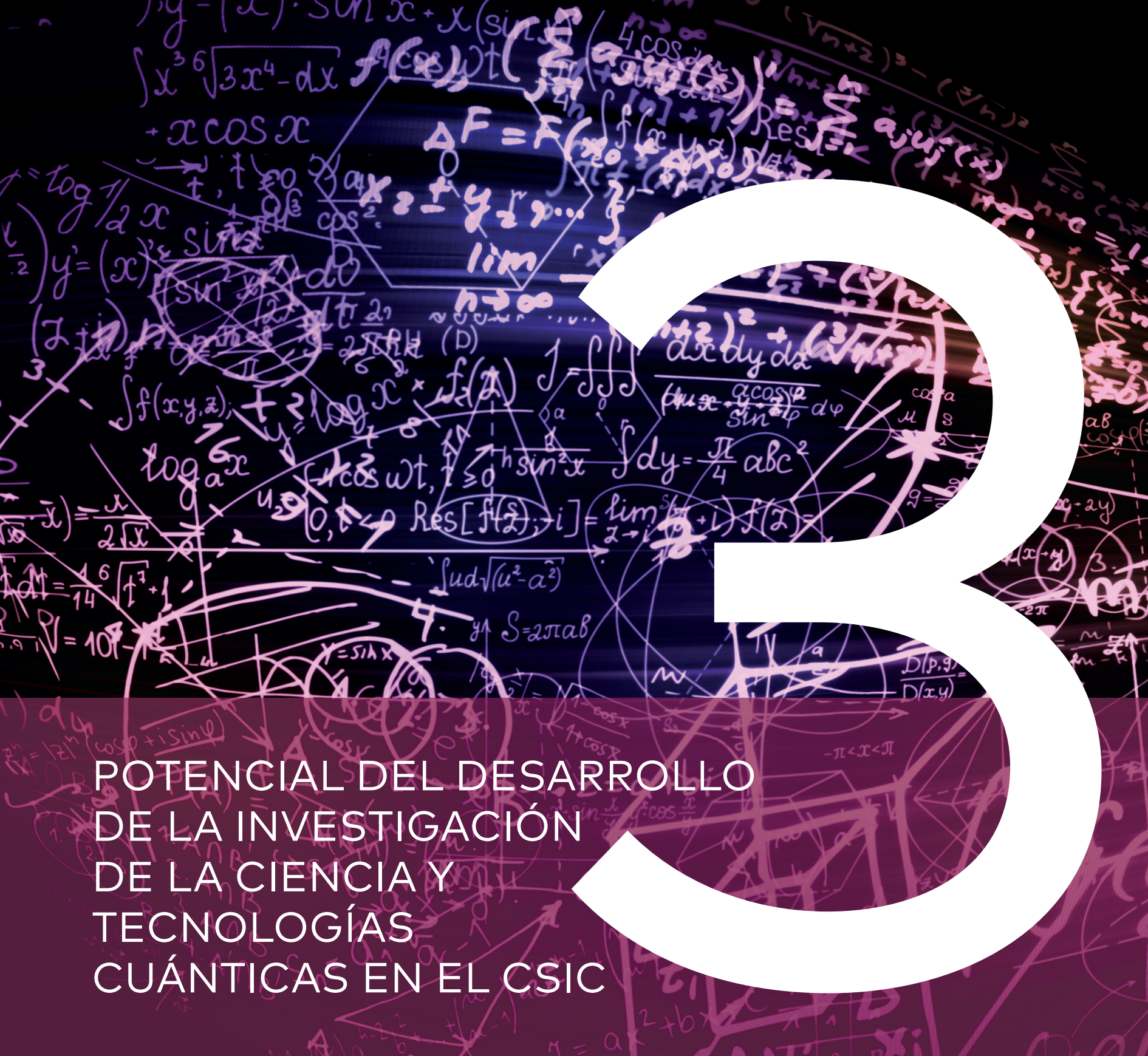
El **esfuerzo global** en ciencia y tecnologías cuánticas está experimentando un rápido crecimiento, con **inversiones actuales que superan los 40.000 millones de euros**. Esto refleja el reconocimiento

creciente del **potencial transformador** de las tecnologías cuánticas en diversos sectores. De cara al futuro, se proyecta que el **mercado global** de tecnologías cuánticas alcance los **97.520 millones de euros** para 2040, destacando su significativo impacto económico y social. En lugar de ser una carrera competitiva, el desarrollo de las tecnologías cuánticas está evolucionando hacia un **ecosistema global colaborativo**. Naciones y organizaciones de todo el mundo están liderando importantes programas para **investigar, innovar y comercializar** en el ámbito cuántico, asegurando que sus beneficios impacten en todos los aspectos de la sociedad.

El panorama de **patentes en tecnologías cuánticas** refleja un aumento significativo en solicitudes durante la última década, especialmente en sensado cuántico, comunicación y criptografía cuántica y computación cuántica. Esto pone de manifiesto el interés creciente en traducir la investigación cuántica en aplicaciones tecnológicas con potencial de mercado. **China lidera el sector**, representando el 52,3% de las patentes registradas entre 2000 y 2022, gracias a políticas gubernamentales sólidas que impulsan la I+D. **Japón y la Unión Europea** comparten el segundo lugar con un **13,8% cada uno**, mientras que **Estados Unidos** registra el **10%**. Estas cifras subrayan la creciente influencia global de China y el papel histórico de Japón en el sector, así como la importancia de las patentes para consolidar el liderazgo tecnológico en este dinámico ámbito.

Tal y como se detalla en el informe elaborado por la FGCSIC, en **España el número de patentes** en tecnologías cuánticas ha mostrado un **crecimiento constante** a lo largo de los años, con un pico entre 2012 y 2015 y un renovado interés en los últimos años. La mayoría de las patentes son en **sensado cuántico, seguido de comunicación y criptografía cuántica y computación cuántica**. En cuanto a las instituciones solicitantes, el **CSIC lidera** este ranking, seguido de universidades entre las que destacan la Universidad Politécnica de Valencia, la Universidad de Santiago de Compostela y la Universidad de Valladolid.

El documento preparado por la FGCSIC, mencionado anteriormente, contabiliza un total de 33 **empresas españolas en el sector de las tecnologías cuánticas**, distribuidas geográficamente de la siguiente manera: 11 en Madrid (35%), 8 en el País Vasco (27%), 6 en Cataluña, 3 en Valencia y 1 en cada una de las siguientes regiones: Galicia, Cantabria, Asturias y Canarias. En cuanto a los tipos de empresas, el 46% son pymes, definidas como aquellas con hasta 300 empleados, mientras que el 30% son startups, principalmente spin-offs de centros de investigación o universidades, fundadas después de 2017 y/o con menos de 150 empleados. Dentro de las 13 empresas españolas que desarrollan software o aplicaciones, más del 50% enfocan su actividad en el sector FinTech. Además, casi todas las empresas orientadas al software, salvo una, son pymes o startups. En contraste, de las 7 empresas españolas dedicadas al desarrollo de hardware, 4 son grandes empresas, reflejando una tendencia diferente en la estructura empresarial según el área de especialización.

The background is a dense collage of various mathematical equations and symbols in white and light purple, including integrals, trigonometric functions, and limits. A large, white, stylized number '3' is prominently displayed on the right side of the image, partially overlapping the text.

POTENCIAL DEL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN EL CSIC



El desarrollo de las tecnologías cuánticas representa un área de crecimiento estratégico tanto a nivel nacional como internacional, con un impacto potencial en múltiples sectores. En este contexto, el CSIC ha desempeñado un papel fundamental en la consolidación de una red de investigación en este ámbito, articulada en torno a la PTI QTEP, que ha permitido fortalecer la producción científica, la formación y la transferencia de tecnologías cuánticas. Sin embargo, la evolución del ecosistema cuántico y la creciente competitividad internacional exigen un modelo más estructurado que garantice el liderazgo del CSIC y refuerce su capacidad de impacto a largo plazo.

OPORTUNIDADES

- **Lanzamiento de estrategias nacionales y europeas:** iniciativas como la Ley Europea de Chips y el PERTE Chip en España refuerzan la necesidad de consolidar la investigación cuántica en el país, creando oportunidades para financiar proyectos de gran impacto socioeconómico.
- **Interés creciente de la industria:** la demanda de soluciones científicas y tecnológicas para abordar problemas urgentes posiciona al sector público de I+D+i como un actor clave en la aplicación de tecnologías cuánticas.
- **Convocatorias europeas:** programas como el Quantum Flagship y Chips JU ofrecen oportunidades significativas para fortalecer las capacidades experimentales y fomentar el desarrollo tecnológico en el ámbito cuántico.
- **2025 Año Internacional de la Cuántica:** la proclamación por parte de las Naciones Unidas aporta una plataforma de gran visibilidad para promover actuaciones e inversiones estratégicas en tecnologías cuánticas.
- **Atracción de talento:** existe un creciente interés por parte de investigadores, tanto jóvenes como consolidados, en colaborar con el CSIC y formar parte de la institución en áreas estratégicas como las tecnologías cuánticas. Este interés refleja el reconocimiento del CSIC como un referente en el ámbito cuántico, respaldado por su crecimiento continuo en el número de investigadores, lo que fortalece su capacidad científica y su proyección internacional.

FORTALEZAS



- **Organización estratégica en tecnologías cuánticas:** investigación estructurada a través de la PTI QTPE, que integra a 36 grupos de 21 institutos en 9 Comunidades Autónomas, consolidando una red nacional de excelencia. Producción científica de alta calidad con más de 340 trabajos anuales, de los cuales un 40 % están en revistas del primer decil (D1) y un 80 % en el primer cuartil (Q1), con un índice H de 69 y un impacto normalizado un 66 % superior al promedio del campo, reflejando su relevancia internacional.
- **Liderazgo internacional en proyectos clave:** desarrollo de ordenadores cuánticos basados en átomos de Rydberg, procesadores híbridos superconductores, y algoritmos de inspiración cuántica, en colaboración con instituciones como IBM-Zurich y Oxford. Referente en comunicación cuántica por aire, sensorica cuántica, y fabricación avanzada, integrando tecnologías como circuitos nanofotónicos y optomecánicos para alcanzar el límite cuántico a temperatura ambiente.
- **Referente en formación avanzada:** coordinación de programas clave como el máster UC3M-CSIC y el máster interuniversitario oficial UIMP-CSIC, consolidándose como un referente en la formación en tecnologías cuánticas. Liderazgo de la RITCE, que organiza conferencias como ICE y QTYR, fomentando la formación de jóvenes investigadores y fortaleciendo la colaboración nacional.
- **Capacidades de transferencia tecnológica:** creación de cuatro spin-offs (g2-Zero, Q-Dynamics, Nanological e Inspiration-Q), desarrollo de patentes (CSIC es la primera institución en solicitud de patentes en tecnologías cuánticas en España) y alianzas estratégicas con la industria, incluyendo los proyectos Caramuel y AgrarIA, así como contratos destacados como el de BBVA-IFF para algoritmos cuánticos.
- **Catalizador de la investigación nacional:** participación en proyectos competitivos, convenios y contratos, con una financiación total hasta 2024 que supera los 128 millones de euros, de los cuales más de 51 millones han sido gestionados por el CSIC, incluyendo 18 millones del Plan Complementario de Comunicación Cuántica (Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia). Liderazgo, junto al Donostia International Physics Center, en el desarrollo de algoritmos cuánticos en colaboración con 21 grupos de investigación de universidades y OPIs, fomentando la colaboración internacional a través de jornadas y conferencias como Quantum Matter. Además, coordinación del Año Internacional de la Cuántica 2025, con actividades estratégicas gestionadas desde el portal www.cuantica2025.es.
- **Atracción y consolidación de talento:** el CSIC cuenta con una destacada capacidad para incorporar y estabilizar a jóvenes investigadores en áreas estratégicas como la fotónica integrada, el diseño

de hardware cuántico y la sensórica cuántica. Las ofertas de empleo público, tanto pasadas como futuras, han permitido y permitirán el perfilado de plazas específicas en temáticas clave, fortaleciendo la competitividad nacional y consolidando el liderazgo del CSIC en tecnologías cuánticas.

DEBILIDADES

- **Dispersión geográfica y fragmentación:** la distribución de los grupos de investigación en 21 institutos, donde las actividades no siempre están centradas exclusivamente en tecnologías cuánticas, limita la eficiencia, el impacto de las inversiones y la visibilidad de los logros alcanzados.
- **Falta de gobernanza unificada:** los mecanismos de planificación y gobernanza de los institutos participantes dificultan la implementación de una estrategia científica común a largo plazo, lo que genera desequilibrios temáticos, como la infrarrepresentación en áreas clave (p. ej., detección cuántica) y sobrerrepresentación en otras (p. ej., tecnologías instrumentales).
- **Naturaleza de las PTI:** diseñadas para abordar retos emergentes, restringe su capacidad de actuar como vertebradoras de largo plazo en un área estratégica como las tecnologías cuánticas, que requiere una estructura estable para maximizar su madurez y masa crítica.

AMENAZAS

- **Competencia de grandes centros europeos:** la financiación europea para tecnologías cuánticas tiende a favorecer centros temáticos con masa crítica y capacidades amplias, como el Vienna Center for Quantum Science and Technology (creado en 2016), el Munich Center for Quantum Science and Technology (2019) o el European Center for Quantum Sciences en Francia (2022). España carece de una estructura comparable a nivel nacional.
- **Desventaja frente a centros regionales:** La ausencia de un centro estatal dedicado específicamente a las tecnologías cuánticas coloca al CSIC y a la Administración General del Estado en una posición de desventaja frente a actores como BasQ en el País Vasco y el ICFO en Cataluña. El ICFO, en particular, ha logrado una fuerte interlocución con la Comisión Europea y los principales lobbies del sector, combinando su papel como representante nacional con el de principal beneficiario de

financiación en convocatorias europeas. Esta situación genera un desequilibrio en el ecosistema cuántico español, limitando la capacidad del CSIC y otros actores nacionales para acceder a financiación, atraer talento y establecer colaboraciones estratégicas.

- **Fuga de talento:** Investigadores jóvenes y técnicos cualificados podrían migrar hacia empresas internacionales o instituciones con mejores condiciones salariales o recursos.

Este análisis pone de manifiesto que en el CSIC existen algunos factores que pueden coadyuvar al aprovechamiento de las oportunidad que ofrece el entorno para construir, sobre los logros alcanzados por la PTI QTEP, una estructura estable de centro de referencia estatal, dedicado exclusivamente a la ciencia y tecnologías cuánticas, con la masa crítica y recursos necesarios para impulsar el crecimiento, liderazgo y visibilidad del ecosistema cuántico español de manera eficiente, bajo un único paraguas de gobernanza y planificación estratégica con una visión a largo plazo. No obstante, también es necesario neutralizar algunas de las debilidades que el CSIC presenta y clarificar la capacidad de las instituciones para afrontar las amenazas.



CONTRIBUCIÓN DEL CCTC-CSIC AL LOGRO DE LOS ODS



ODS 4 — Educación de calidad

El CCTC-CSIC fomentará la formación avanzada en tecnologías cuánticas mediante programas de doctorado, postdoctorado y formación continua, asegurando la capacitación de investigadores en un campo de alta especialización. De esta forma, contribuirá al fortalecimiento de la excelencia científica y técnica en el sistema de I+D español.



ODS 5 — Igualdad de género

El CCTC-CSIC promoverá la igualdad de género en tecnologías cuánticas mediante una estrategia integral que combine programas de formación inclusiva, mentorías especializadas y políticas de reclutamiento equitativas. Se fomentará la generación de vocaciones científicas y la participación activa de mujeres y personas subrepresentadas en todas las etapas del desarrollo científico y tecnológico, promoviendo entornos colaborativos libres de sesgos y con igualdad de oportunidades. Además, se establecerán alianzas con instituciones educativas y redes profesionales para garantizar una representación diversa y sostenible en el campo cuántico.



ODS 8 — Trabajo decente y crecimiento económico

La creación del CCTC-CSIC impulsará la generación de empleo cualificado y la atracción de talento nacional e internacional en un ámbito tecnológico emergente. Además, favorecerá la transferencia de conocimiento y la creación de empresas derivadas (spin-offs), fortaleciendo la economía del conocimiento y la competitividad del tejido productivo.



ODS 9 — Industria, innovación e infraestructuras

El CCTC-CSIC promoverá la consolidación de infraestructuras científicas de vanguardia, optimizando el uso de laboratorios, equipamientos y plataformas tecnológicas vinculadas a la investigación cuántica. Estas capacidades favorecerán la innovación interdisciplinar, la transferencia tecnológica y el desarrollo industrial de alto valor añadido.



ODS 17 — Alianzas para lograr los objetivos

El CCTC-CSIC fomentará la cooperación científica nacional e internacional, integrándose en redes estratégicas europeas y globales de tecnologías cuánticas. Estas alianzas permitirán el intercambio de conocimiento, la ejecución de proyectos conjuntos y la proyección internacional del CSIC como referente en ciencia cuántica.

ODS 3 — Salud y bienestar

La investigación en sensórica cuántica abre nuevas fronteras en el diagnóstico médico, que abarcan desde mejoras en la eficiencia de imagen médica y resonancia magnética nuclear, hasta la identificación de bacterias en sistemas de microfluidos. El CCTC-CSIC trabajará en la transferencia de estas tecnologías al sector productivo para mejorar la calidad de todos los ciudadanos.

ODS 6 — Agua limpia y saneamiento

El desarrollo de sensores y gravímetros cuánticos permitirá el monitoreo preciso de acuíferos, la detección temprana de contaminantes y la optimización del uso de recursos hídricos. Estas tecnologías favorecerán una gestión sostenible del agua tanto en entornos agrícolas como urbanos.

ODS 7 — Energía asequible y no contaminante

Las simulaciones y la computación cuántica contribuirán al diseño de nuevos materiales para almacenamiento energético, catalizadores para energías limpias y sistemas de optimización de redes eléctricas. Estas aplicaciones acelerarán la transición hacia un modelo energético más sostenible y eficiente.

ODS 11 — Ciudades y comunidades sostenibles

El CCTC-CSIC impulsará la aplicación de la computación cuántica y las herramientas de inspiración cuántica a la planificación urbana, la gestión del tráfico y la eficiencia de recursos. Además, la investigación en nuevos materiales cuánticos permitirá el desarrollo de infraestructuras más resilientes, sostenibles y adaptadas a las necesidades de las ciudades del futuro.

ODS 13 — Acción por el clima

Las tecnologías cuánticas ofrecerán herramientas avanzadas para modelizar y predecir fenómenos climáticos, optimizar el uso energético y diseñar estrategias de descarbonización. Estas capacidades contribuirán al desarrollo de políticas climáticas basadas en evidencia y a la transición hacia una economía baja en carbono.

3 SALUD
Y BIENESTAR



6 AGUA LIMPIA
Y SANEAMIENTO



7 ENERGÍA ASEQUIBLE
Y NO CONTAMINANTE



11 CIUDADES Y
COMUNIDADES
SOSTENIBLES



13 ACCIÓN
POR EL CLIMA



The background features a glowing sphere with a bright yellow center and orange-red magnetic field lines. This sphere is set against a dark blue background with a white grid of lines that recede into the distance, creating a sense of depth and technology. A large white number '4' is positioned on the right side of the image.

PROPUESTA DE
CREACIÓN DE UN
CENTRO DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
EN EL CSIC (CCTC-CSIC)

El CSIC ha consolidado un papel destacado en el ámbito de la ciencia y las tecnologías cuánticas, estructurando una comunidad científica de referencia a través de la PTI QTEP. Desde su creación en 2018, la PTI QTEP ha permitido coordinar el trabajo de 36 grupos de investigación distribuidos en 21 institutos del CSIC, promoviendo la colaboración interdisciplinar, la optimización de infraestructuras y la conexión con iniciativas nacionales e internacionales. Gracias a esta estructura, el CSIC ha alcanzado un alto impacto científico, liderando avances en computación, comunicación y sensado cuántico, participando en proyectos estratégicos europeos y promoviendo la transferencia tecnológica a través de spin-offs y patentes.



Sin embargo, el desarrollo de la cuántica a nivel global está avanzando rápidamente, con inversiones estratégicas en Europa, EE. UU., China y Japón que están configurando un ecosistema altamente competitivo. A pesar del liderazgo del CSIC en ciencia y tecnologías cuánticas, España aún enfrenta desafíos clave para consolidar su posición en este ámbito. La dispersión geográfica de los grupos de investigación, la falta de una gobernanza unificada, la fragmentación de recursos y la necesidad de mayor proyección internacional hacen necesario un nuevo modelo organizativo que permita articular una estrategia a largo plazo y fortalecer la competitividad del CSIC y del ecosistema cuántico español.

En este contexto, la creación de un **CCTC-CSIC** representa una oportunidad estratégica para consolidar una estructura estable y de referencia estatal dedicada exclusivamente a este ámbito. La evolución de la investigación en tecnologías cuánticas a nivel global, junto con la creciente competitividad y especialización de los centros internacionales, hace recomendable un modelo organizativo que permita optimizar los recursos del CSIC, fortalecer su liderazgo y consolidar el ecosistema cuántico español.

Aunque el **CCTC-CSIC** nace como una iniciativa del CSIC, es conveniente explorar la posibilidad de que adopte una fórmula de gobernanza público-privada, que permita reforzar su impacto, flexibilidad y capacidad de colaboración con distintos agentes del ecosistema cuántico. Esta opción responde al interés estratégico de abrir el centro a una mayor interacción con el sector productivo, industrial y tecnológico, en línea con otras iniciativas internacionales en el ámbito de las tecnologías cuánticas.



4.1. VISIÓN DEL CENTRO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS (CCTC-CSIC)

El **CCTC-CSIC** nace con la **visión** de convertirse en un centro de referencia nacional e instrumento de coordinación del sector público estatal para la I+D+i en ciencia y tecnologías cuánticas.

El centro se creará a partir de los grupos de investigación existentes del CSIC en Madrid, estando abierto a la incorporación de investigadores de otras partes del territorio nacional del propio CSIC que tienen una dedicación completa a las temáticas del área computación cuántica, información cuántica o sensado cuántico, entre otros. Así mismo, el CSIC realizará una previsión de captación del talento externo a la institución. El centro tendrá los siguientes **objetivos**:

- Consolidar y potenciar las líneas de investigación fundamental y aplicada en tecnologías cuánticas en España.
- Identificar y crear nuevas líneas de investigación sobre la premisa de atracción de talento joven y promoción de la excelencia.
- Coordinar a la comunidad de tecnologías cuánticas de España, colaborando con las instituciones en el diseño e implantación de estrategias y proyectos nacionales.
- Desarrollar una estrategia de transferencia tecnológica hacia el sector productivo en colaboración con el tejido industrial y las empresas de base tecnológica del CSIC.
- Actuar como entidad nacional de referencia en tecnologías cuánticas, apoyando en la definición de prioridades para la implantación armonizada de las tecnologías cuánticas en España.
- Promover el crecimiento de las tecnologías cuánticas a través de colaboraciones con otros actores del ecosistema cuántico español y europeo.

En cuanto a su **modelo organizacional**, el **CCTC-CSIC** se inspira en las 3 iniciativas pioneras en Europa:

- El **Vienna Center for Quantum Science and Technology** (VCQ), creado en 2016, es un centro interdisciplinario que integra a más de 30 grupos de investigación de la Universidad de Viena, la Universidad Técnica de Viena y el Instituto de Óptica Cuántica e Información Cuántica (IQOQI) de la Academia Austríaca de Ciencias, fomentando sinergias entre física, química, informática y

matemáticas. Se centra en la investigación fundamental en áreas como información cuántica, óptica cuántica y fenómenos cuánticos macroscópicos, impulsando avances tecnológicos y científicos. Además, prioriza la formación avanzada de estudiantes y jóvenes investigadores mediante programas de doctorado, talleres y conferencias internacionales. También trabaja activamente en la transferencia de resultados al sector industrial, colaborando con empresas y startups para aplicar tecnologías cuánticas. El VCQ mantiene una red global de colaboración con centros internacionales, participa en iniciativas como el programa Quantum Flagship de la Unión Europea y optimiza sus recursos mediante una infraestructura compartida entre las instituciones afiliadas, consolidándose como un referente en investigación cuántica a nivel global.

- En Alemania, el **Munich Center for Quantum Science and Technology** (MCQST), establecido en 2019 como una red de excelencia estatal en Alemania, integra a más de 60 grupos de investigación que trabajan en disciplinas relacionadas con la ciencia y tecnologías cuánticas, incluyendo física, matemáticas, informática e ingeniería. Su núcleo principal se concentra en Múnich, con instituciones destacadas como la Universidad Ludwig-Maximilians de Múnich (LMU), la Universidad Técnica de Múnich (TUM) y el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica (MPQ), aunque mantiene una red de colaboración con entidades en todo el territorio alemán. Con un enfoque altamente interdisciplinario, el MCQST abarca áreas como la información y computación cuántica, la óptica cuántica, los materiales cuánticos, la física fundamental y las tecnologías cuánticas aplicadas. Este centro se distingue por su compromiso con la investigación de vanguardia, la formación de talento a través de programas de doctorado, talleres y conferencias internacionales, y la transferencia de tecnología mediante alianzas estratégicas con empresas y startups. Su participación en redes globales de colaboración, iniciativas europeas como el Quantum Flagship y proyectos innovadores lo consolidan como un referente mundial en ciencia y tecnologías cuánticas.
- El **European Center for Quantum Sciences** (CESQ) es una iniciativa conjunta de la Universidad de Estrasburgo y el CNRS, homólogo del CSIC en Francia, que reúne a 30 grupos de investigación dedicados a diversas áreas como la física cuántica, la química, la ciencia de materiales, la fotónica y la informática. Inaugurado en 2022, el CESQ cuenta con un edificio propio que actúa como núcleo para la colaboración interdisciplinaria y la integración de investigadores de distintas disciplinas. Este centro se centra en la investigación de vanguardia y la formación de talento a través de programas especializados, talleres y conferencias internacionales. Además, fomenta la transferencia de tecnología mediante colaboraciones con la industria y la creación de alianzas estratégicas con empresas emergentes. Con un fuerte componente internacional, el CESQ participa en redes globales de colaboración y en proyectos europeos como el Quantum Flagship, consolidándose como un referente en el ámbito de la ciencia y tecnologías cuánticas en Europa.



La creación de un **Centro de Ciencia y Tecnologías Cuánticas (CCTC)** en Madrid se inspira en los tres modelos anteriores, integrando sus elementos clave para desarrollar una estructura eficiente y colaborativa adaptada al contexto español. Estos tres centros representan diferentes enfoques organizativos: un único centro físico (CESQ en Francia), un clúster de centros en una sola ciudad (VCQ en Austria) y un clúster central complementado con entidades distribuidas en todo el territorio (MCQST en Alemania).

El **CCTC-CSIC** se basa en la red existente de la PTI QTEP, cuyo centro de gravedad está en la Comunidad Autónoma de Madrid, agrupando 10 institutos y 13 grupos de investigación del CSIC. Inspirándose en el modelo del MCQST, el **CCTC-CSIC** adoptará un **enfoque interdisciplinario** que reúna investigadores de áreas como física, informática, matemáticas, ingeniería y química, integrando instituciones en una red colaborativa con una sede principal y conexiones estratégicas con centros en toda España, maximizando su impacto. Del CESQ, se tomará la idea de una **sede física central**, que funcionará como núcleo para la interacción diaria, la investigación y la formación, promoviendo una identidad cohesionada. Del VCQ, se adoptará su estrategia de **colaboración internacional** y su enfoque en proyectos interdisciplinarios, fomentando avances en áreas clave como la computación, la **óptica** y los materiales cuánticos. El éxito de los tres en la creación de redes internacionales y en la transferencia tecnológica servirá de guía para posicionar al **CCTC-CSIC** como un actor global destacado en tecnologías cuánticas.

El **CCTC-CSIC** contará con una sede física en Madrid, mientras que los grupos de investigación de otros territorios no formarán parte estructural del centro, pero mantendrán estrechas colaboraciones articuladas a través de la PTI QTEP, que ya opera como un puente para la cooperación científica, tecnológica y estratégica. Este modelo busca maximizar la **coordinación y la complementariedad**, respetando la autonomía de los centros colaboradores y potenciando su contribución al desarrollo de las tecnologías cuánticas.

El diseño del **CCTC-CSIC** se basa en los tres pilares fundamentales de las tecnologías cuánticas: las tareas de **adquisición** (sensado y metrología), **comunicación y procesamiento** de información cuántica (computación y simulación). Estas áreas están sostenidas por tecnologías facilitadoras esenciales, como la ingeniería, el control y la fabricación, que garantizan la viabilidad técnica y operativa de los desarrollos cuánticos. Estas áreas, organizadas bajo una estructura inspirada en los mejores modelos internacionales, posicionarán al **CCTC-CSIC** como un referente en ciencia y tecnologías cuánticas, consolidando a España como líder en este campo emergente.

Esta estructura refleja la imagen presentada en el **Quantum Manifesto**, aunque simplificada para destacar las sinergias entre subáreas. Por ejemplo, **simulación y computación** son enfoques analógicos y digitales de un mismo objetivo, tal como coexistían computadores analógicos y digitales en plataformas comunes durante los años 50. De manera similar, **sensado y metrología**

son conceptos complementarios: el sensado depende de estándares metrológicos, mientras que la metrología se apoya en sensores y patrones cuánticos. No obstante, surge la pregunta de si podrían implementarse simplificaciones adicionales, como centrarse en una sola área (por ejemplo, un centro de excelencia en computación cuántica) o evaluar la necesidad de las tecnologías facilitadoras. Al respecto, es fundamental reconocer que todos los proyectos cuánticos requieren una base sólida en **control, materiales, fabricación y electrónica**. La ausencia de estas infraestructuras puede comprometer el éxito de los desarrollos. Los centros de tecnologías cuánticas más prestigiosos, como el ETH Zurich, el IQOQI/Innsbruck y el MPQ/LMU Munich, han desarrollado y adquirido sus propias *foundries*, talleres y centros de electrónica especializada, o los han integrado dentro de sus universidades. Este enfoque asegura control total sobre la fabricación y el desarrollo de dispositivos cuánticos avanzados, garantizando su competitividad global.

Por lo tanto, la estructura del **CCTC-CSIC** no solo abarca las áreas fundamentales de las tecnologías cuánticas, sino que también reconoce la **importancia crítica de las tecnologías facilitadoras**, como la ingeniería, el control y la fabricación, estableciendo una base sólida para la innovación y el liderazgo en este campo. Esta estructura simplificada refleja las sinergias entre subáreas, como la interdependencia entre sensado y metrología, o la relación entre simulación y computación. Además, subraya la necesidad de una infraestructura robusta que permita al **CCTC-CSIC** competir a nivel global y evite la dependencia de *foundries* externas, siguiendo el ejemplo de centros internacionales de referencia que cuentan con instalaciones especializadas. Este enfoque estratégico posicionará al **CCTC-CSIC** como un líder en ciencia y tecnologías cuánticas, consolidando el papel de España en este campo.

La sede del **CCTC-CSIC** en Madrid aprovechará **espacios e infraestructuras existentes** mediante una **reorganización de institutos del CSIC**. En concreto, se prevé la reubicación de grupos de investigación con un enfoque en tecnologías cuánticas, actualmente distribuidos en cuatro institutos del CSIC situados en la calle Serrano (IFF, ITEFI, IEM, IQF) y de otros centros madrileños (IFT, IMN-CNM, ICMM). Este proceso permitirá crear una **sede física propia** para el **CCTC-CSIC**, que ofrezca condiciones óptimas para la interacción y la colaboración entre investigadores, promoviendo un entorno que favorezca el trabajo interdisciplinario.

Para articular sus líneas de investigación, el **CCTC-CSIC** se nutrirá inicialmente de la **concentración de grupos de investigación en Madrid** que ya trabajan en las áreas clave del programa científico: **computación, comunicación y sensado cuánticos**. Estos grupos, identificados como candidatos destacados para formar el núcleo fundador del **CCTC-CSIC**, aportan una sólida experiencia y resultados relevantes que servirán como base para el desarrollo inicial del centro.

Sin embargo, es fundamental destacar que la creación de un **CCTC-CSIC** no debe limitarse a una simple reorganización de recursos existentes. Para garantizar que el **CCTC-CSIC** sea verdaderamente

estratégico y competitivo, es imprescindible realizar una apuesta decidida por la incorporación de **nuevos investigadores** y por la apertura de **líneas de investigación punteras**. Esto incluye la **creación de nuevas plazas** diseñadas específicamente para fortalecer áreas en las que España y el CSIC tengan potencial de alcanzar un liderazgo internacional. Estas nuevas plazas deberán asignarse con un enfoque estratégico, priorizando tanto las áreas donde ya existan fortalezas significativas para consolidarlas, como aquellas con alto potencial de impacto futuro, permitiendo al **CCTC-CSIC** especializarse en campos clave de las tecnologías cuánticas. Este enfoque garantizará que el **CCTC-CSIC** no sea percibido como una mera reorganización de recursos existentes, sino como una institución competitiva a nivel global, capaz de **atraer talento internacional** y liderar proyectos de **alto impacto**. En particular, una primera apuesta podría realizarse mediante las ofertas de empleo público comprometidas en el Contrato de Gestión del CSIC,¹² enfocándose en la captación de **investigadores excelentes** en áreas estratégicas como:

- **Computación cuántica con átomos ultrafríos**, para generar un laboratorio en sinergia con el del **CINN**, fomentando un crecimiento estratégico.
- **Circuitos superconductores**, centrados en la exploración y desarrollo de nuevos qubits y materiales para la construcción de ordenadores cuánticos.
- **Información cuántica teórica**, una línea estratégica que requiere ser potenciada en el CSIC para poder generar masa crítica de personal propio.
- **Sensado cuántico**, especialmente en tecnologías basadas en centros de color en diamante o silicio, con aplicaciones relevantes en biomedicina y comunicación cuántica.

Este planteamiento asegura un desarrollo equilibrado y especializado del **CCTC-CSIC**, posicionándolo como un **referente en tecnologías cuánticas**. La combinación de grupos consolidados con nuevos investigadores seleccionados estratégicamente será esencial para que el **CCTC-CSIC** se convierta en un **referente internacional** en tecnologías cuánticas. Este enfoque permitirá que el **CCTC-CSIC** trascienda su contexto inicial y se posicione como un **líder global**, con la capacidad de responder a los retos de este campo emergente de manera eficaz y sostenible.

Este núcleo de grupos de investigación en el **CCTC-CSIC**, junto con sus asociaciones con otros laboratorios en Madrid, se complementará con la red de colaboración ya existente del CSIC en otras Comunidades Autónomas, construida a través de la PTI QTEP, que ha articulado una infraestructura

¹² Orden PCM/829/2023, de 20 de julio, por la que se aprueba el Contrato de Gestión del CSIC para el periodo 2023-2026; https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-16872

distribuida y especializada en tecnologías cuánticas desde hace años. Esta red cubre campos específicos como la **computación de alto rendimiento y computación cuántica** en el Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA), la **computación y simulación cuántica con átomos ultrafríos y moléculas magnéticas** en el CINN y el INMA, el **sensado cuántico con impurezas en diamante** en el CFM, y las **tecnologías cuánticas semiconductoras y fotónica cuántica integrada** en el IMB-CNM y el IMSE-CNM. Además, como ya se ha mencionado, el CSIC coordina desde 2016 la RITCE que agrupa a la totalidad del ecosistema investigador nacional en este ámbito. A través de estas estructuras, se promueve la detección de oportunidades, la redacción de hojas de ruta, la organización de congresos y escuelas especializadas, y la coordinación de programas de formación y másteres. De esta manera, el **CCTC-CSIC** actuará como **centro de referencia y agente vertebrador** de una red colaborativa de **calado estatal, autonómico y local**, con capacidad para **impulsar el avance científico, tecnológico y formativo** en tecnologías cuánticas a todos los niveles.

El **CCTC-CSIC** nace con una **fuerte vocación de cooperación nacional e internacional** en todos los ámbitos de las tecnologías cuánticas y tiene como misión en su primera etapa consolidar las colaboraciones nacionales e internacionales sobre las que se sustenta su liderazgo internacional en computación, comunicación y sensado cuántico, y que completan las capacidades del centro. Por ejemplo, como miembro del Centro de Excelencia para Computación Cuántica (QEC4QEA) financiado por EuroHPC¹³ en colaboración con entidades de referencia internacionales como FZ Jülich o CINECA, y los centros nacionales BSC-CNS e ICFO, los investigadores del **CCTC-CSIC** trabajarán en la creación de una capa de software y soluciones cuánticas para problemas reales que se integrará en todos los ordenadores y simuladores cuánticos de EuroHPC/QCS.¹⁴ Este software también servirá en otras iniciativas, como el ordenador cuántico de átomos de Rydberg del CINN, en colaboración con el **CCTC-CSIC**, u otros servicios como el ordenador cuántico superconductor puesto a disposición de los investigadores por CESGA.

En el ámbito de las **comunicaciones cuánticas**, las iniciativas del **CCTC-CSIC** se integrarán en las acciones **EuroQCI** y **EuroQCI-Spain**, colaborando con centros nacionales (ICFO, UVigo, UPM, IAC) e internacionales (ARTES-ESA,¹⁵ Politécnico de Turín) así como entidades y empresas no-EU (National Institute of Information and Communications Technology en Japón o la Universidad de York en Reino Unido) y empresas (Telefónica, SpeQtral) en despliegues de infraestructura tanto en tierra como tierra-espacio. En este mismo ámbito, pero integrando computación cuántica, el **CCTC-CSIC** consolidará su posición como **líder en el diseño de enlaces cuánticos para ordenadores**

¹³ Empresa Común Europea de Computación de Alto Rendimiento; <https://eurohpc-ju.europa.eu/>

¹⁴ Computadora de alto rendimiento – Simulador cuántico híbrido; <https://hpcqs.eu/>

¹⁵ Investigación Avanzada en Sistemas de Telecomunicaciones de la Agencia Espacial Europea; <https://connectivity.esa.int/artes-40>

cuánticos, en colaboración con las principales plataformas experimentales (ETH Zurich y Walther-Meißner-Institute) y desarrolladores de chips cuánticos para redes (IQOQI). Estos ejemplos se verán suplementados con otros acuerdos y colaboraciones en temas como el **sensado cuántico**, la **creación de fuentes de luz** para aplicaciones de tecnologías cuánticas o el **software de inspiración cuántica**, donde el **CCTC-CSIC** también lidera **aplicaciones y transferencia tecnológica** nacional e internacionalmente.

El reciente informe de prospectiva de la FGCSIC en el que se han recabado opiniones de expertos en tecnologías cuánticas, con el objetivo de ofrecer recomendaciones al CSIC para los próximos años, subraya la importancia de enfocar los esfuerzos estratégicos en áreas específicas con alto potencial de impacto como una oportunidad propicia para que España, y el CSIC en particular, fortalezcan su posición como líderes en el ámbito europeo. Dentro de las recomendaciones clave proponen:

- **Priorización de líneas de I+D cuánticas con alto potencial**, destacando como las más prometedoras: sensores y metrología cuántica, computación cuántica escalable, comunicaciones cuánticas seguras y algoritmos/cuántica aplicada a problemas industriales.
- **Creación de un centro especializado en tecnologías cuánticas dentro del CSIC** que, actuando como nodo central, cuente con instalaciones propias de vanguardia, atraiga talento internacional y coordine iniciativas cuánticas dispersas en otros centros.
- **Impulso de Alianzas Público-Privadas y Consorcios de Innovación**, desarrollando una estrategia decidida de colaboración con la industria.
- **Aumento de la financiación** en I+D cuántica y de la **participación en programas competitivos específicos** (Horizonte Europa, EuroHPC JU, etc.).
- **Desarrollo de talento y capital humano cuántico**, mediante la formación, la atracción y la retención de talento especializado.

En este marco, el **CCTC-CSIC** nace con el propósito de:

- **Superar la fragmentación** y establecer una gobernanza clara que coordine de forma eficiente la investigación, la formación y la transferencia de tecnología.
- **Reforzar la competitividad internacional del CSIC**, asegurando su papel central en programas como Quantum Flagship, Chips JU y otras convocatorias europeas e internacionales.

- **Optimizar las infraestructuras científicas**, garantizando su acceso y uso coordinado para maximizar su impacto.
- **Atraer talento y financiación externa**, posicionando al **CCTC-CSIC** como un actor clave en la captación de recursos nacionales e internacionales en tecnologías cuánticas.
- **Consolidar el ecosistema cuántico español**, promoviendo sinergias entre grupos de investigación, universidades, empresas y centros tecnológicos.



La creación de un **CCTC-CSIC** supone un paso decisivo para dotar al CSIC de una estructura estable y especializada que refuerce su papel como referente nacional en tecnologías cuánticas. Al centralizar capacidades actualmente dispersas y mejorar la coordinación científica, el centro contribuirá a **fortalecer la competitividad del ecosistema cuántico español** y a **facilitar el acceso a financiación internacional**. Asimismo, reforzará la proyección global del CSIC y su capacidad para atraer talento y colaborar en grandes programas europeos.

El CSIC cuenta con capacidades científicas, tecnológicas y de formación de primer nivel, además de una red de colaboración internacional consolidada a través de sus proyectos y asociaciones estratégicas. No obstante, el rápido crecimiento del sector cuántico y la competencia global hacen imprescindible una estructura estable y de largo plazo que garantice el desarrollo continuo y la visibilidad internacional del CSIC en este ámbito.

4.2. ESTRUCTURA DEL CENTRO

El **CCTC-CSIC**, de acuerdo con la norma reguladora de los institutos de investigación y demás estructuras organizativas del CSIC, contará con un director científico que ejercerá la representación del **CCTC-CSIC** y dirigirá su actividad científica y gestión ordinaria; dos vicedirectores científicos como apoyo funcional y asistencia a la dirección del centro, con uno de ellos responsable de la coordinación de la sede del **CCTC-CSIC** en Madrid y la coordinación con laboratorios y grupos de investigación asociados en otros centros; un vicedirector técnico como responsable de las infraestructuras, servicios técnicos y unidades de apoyo del centro; y una junta del centro como órgano colegiado de coordinación interna para la dirección del instituto, así como instrumento de apoyo, asesoramiento y control a la dirección. La gerencia del centro será responsable de su gestión económica y administrativa.

El claustro científico actuará como órgano colegiado de asesoramiento de carácter interno del centro. Asimismo, el centro contará con un comité externo de asesoramiento científico como órgano colegiado de asesoramiento de carácter externo cuya función es orientar y evaluar la estrategia y actividad científica del centro y prestar asesoramiento a requerimiento de la dirección y de los órganos pendientes de la presidencia del CSIC.

En línea con su estrategia científica (apartado 4.3.), el **CCTC-CSIC** se organizará por tanto en torno a tres **programas científicos**:

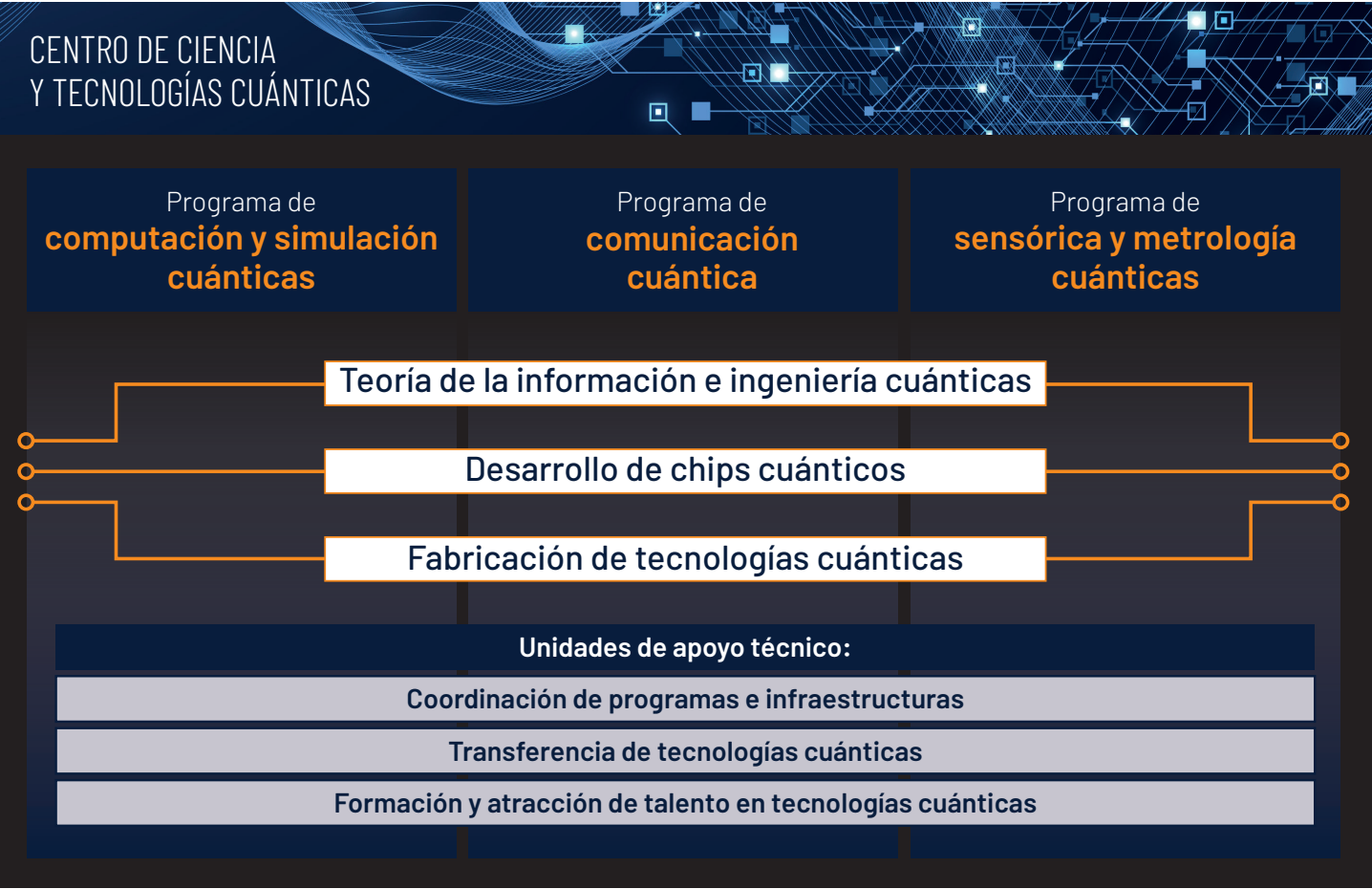
- Computación y simulación cuánticas.
- Comunicación cuántica.
- Sensórica y metrología cuánticas.

Estos tres programas verticales se imbricarán con tres **programas tecnológicos** transversales:

- Teoría de la información e ingeniería cuánticas.
- Desarrollo de chips cuánticos.
- Fabricación de tecnologías cuánticas.

Los programas de I+D+i del **CCTC-CSIC** se apoyarán sobre tres **unidades de apoyo técnico**:

- Coordinación de programas e infraestructuras (incluida la coordinación del **CCTC-CSIC** con laboratorios y grupos de investigación asociados en otros centros).
- Transferencia de tecnologías cuánticas.
- Formación y atracción de talento en tecnologías cuánticas.



Estructura del CCTC-CSIC.

4.3. ESTRATEGIA CIENTÍFICA

Como ya se ha mencionado, el diseño del **CCTC-CSIC** se organiza en torno a los tres pilares fundamentales de las tecnologías cuánticas: **adquisición (sensado y metrología), comunicación y procesamiento de información (computación y simulación)**. Estas áreas están respaldadas por **tecnologías facilitadoras**, como la **ingeniería**, el **control** y la **fabricación**, que son esenciales para garantizar el éxito técnico y operativo de los desarrollos cuánticos.

Esta estructura simplificada refleja las sinergias entre subáreas, como la interdependencia entre sensado y metrología, o la relación entre simulación y computación. Además, subraya la necesidad de una **infraestructura robusta** que permita al **CCTC-CSIC** competir a nivel global y evite los desafíos observados en otras iniciativas, siguiendo el ejemplo de centros internacionales de referencia que cuentan con instalaciones especializadas. Este enfoque estratégico posicionará al **CCTC-CSIC** como un **líder en ciencia y tecnologías cuánticas**, consolidando el papel de España en este campo.

Cabe plantearse por qué no centrarse en una sola disciplina para crear un centro más especializado. Existen diversas razones. En primer lugar, el CSIC ya cuenta con una **masa crítica excelente** en los tres pilares principales: computación y simulación, comunicación, y sensado y metrología. Algunos ejemplos incluyen el diseño de ordenadores cuánticos y algoritmos en el IFF y el IFT, la fabricación de simuladores cuánticos en el CINN, la criptografía cuántica en espacio abierto liderada por el ITEFI, y grupos destacados en sensado cuántico en Madrid, Barcelona y País Vasco.

En segundo lugar, aislar una disciplina ignoraría las sinergias entre tecnologías. Por ejemplo, los simuladores de átomos de Rydberg en Oviedo requieren colaboración teórica para el control de qubits y podrían servir como memorias cuánticas para comunicación a larga distancia, interactuando con el ITEFI. De forma similar, sensado y metrología comparten protocolos, sistemas físicos y metodologías con computación y comunicación.

Además, una estrategia amplia y diversificada es esencial para una institución de la magnitud del CSIC. Centrarse en un único tema limitaría el impacto transversal, la atracción de talento y la transferencia de conocimiento. Por el contrario, una estrategia diversificada permite maximizar el retorno social y económico, equilibrando riesgos entre tecnologías de impacto inmediato, como los sensores, y aquellas con horizontes más largos, como la computación cuántica.

El CSIC ya ha demostrado su capacidad de **liderazgo en este ámbito**. La creación de la PTI QTEP fue el primer esfuerzo colectivo en tecnologías cuánticas, aportando beneficios como mayor visibilidad, liderazgo en proyectos europeos (EuroQCI, Quantum Flagship) y nacionales (Quantum Spain), y la

creación de másteres como el UIMP-CSIC y el UC3M-CSIC. Sin embargo, la PTI también ha mostrado limitaciones: su carácter de red temporal dificulta la atracción de investigadores de prestigio y la consolidación de nuevas líneas estratégicas.



Un **centro estable y dedicado** resolvería estas limitaciones, proporcionando un **horizonte claro** para el desarrollo de tecnologías cuánticas en el CSIC. Este proyecto no solo se sustenta en la **masa crítica** y la **diversidad** existentes, sino también en la capacidad del CSIC para **colaborar** con universidades, empresas y otras instituciones, consolidando a España como un **referente internacional** en este campo emergente.

Programas científicos del CCTC-CSIC

- I. **Computación y simulación cuánticas.** Varios grupos teóricos del CSIC trabajan en el diseño de hardware para computación y simulación cuánticas. En particular, el grupo QUINFOG liderado por Juan José Ripoll (IFF), desarrolla dispositivos basados en circuitos superconductores y redes fotónicas y sistemas atómicos. En el IFT, Alejandro Bermúdez desarrolla propuestas para computación con iones atrapados y simulaciones de altas energías. En el IQF, Alejandro Manjavacas contribuye al diseño de fuentes de fotones individuales altamente direccionales y varios grupos del ICMM exploran bits cuánticos semiconductores e híbridos semiconductores/superconductores para fines de simulación y computación cuánticas.

En el frente del diseño de software cuántico, el grupo QUINFOG desarrolla algoritmos cuánticos y de inspiración cuántica de optimización y *machine learning*, algunos con aplicaciones prácticas y colaboraciones con la industria. El grupo de Germán Sierra (IFT) centra su investigación en algoritmos cuánticos aplicados a procesos de física de la materia condensada y física de altas energías. El IFISC trabaja en la computación analógica de inspiración neuromórfica, como *reservoir computing* y memorias asociativas.

Una apuesta central en esta línea es la construcción de un computador cuántico de átomos de Rydberg en el grupo de Daniel Barredo (CINN, Oviedo). Este dispositivo contará inicialmente con 100+ qubits en una primera iteración y será capaz tanto de simular modelos de espín con utilidad en optimización cuántica. Desarrollos posteriores permitirán implementar computación cuántica universal basada en puertas lógicas. El **CCTC-CSIC** potenciará esta iniciativa pionera creando un laboratorio satélite al del CINN con grupos emergentes.

Asimismo, el **CCTC-CSIC** vertebrará colaboraciones con otros centros que puedan aportar tecnologías fotónicas disruptivas para la simulación y computación cuántica, tanto con grupos del CSIC que cubren prácticamente todo el espectro de la fotónica como con otros actores

destacados en esta área, sirviendo como nodo, junto al ICFO, de un futuro *hub* de fotónica. Este nexo fortalecería el eje de colaboración ya existente entre el CSIC y el ICFO en fotónica cuántica (p. ej., la participación del CSIC, a través del IMB-CNM, en el consorcio PIXEurope, coordinado por el ICFO, para liderar la línea piloto europea sobre Circuitos Fotónicos Integrados Avanzados¹⁶ en el marco de la iniciativa *Chips Joint Undertaking*).

Esta actuación se complementa con la única plataforma de computación cuántica híbrida que combina moléculas magnéticas con circuitos cuánticos superconductores, liderada por Fernando Luis Vitalla (INMA, Zaragoza) y que permite explorar nuevos paradigmas de computación basados en el diseño químico de qubits y su control con microondas.

En paralelo a estas líneas de trabajo, el **CCTC-CSIC** explorará la puesta en marcha de dos nuevas líneas de investigación en computación cuántica con superconductores y semiconductores, a través de la creación de dos posiciones de *Junior Group Leader* para investigadores en consolidación que creen laboratorios en estas dos temáticas.

- II. Comunicación cuántica.** Esta línea de investigación se articula en torno al Laboratorio de Comunicación Cuántica, recientemente creado en el ITEFI por Verónica Fernández Mármol. Su objetivo es tanto desarrollar dispositivos de criptografía cuántica en fotónica cuántica integrada en colaboración con el IMB-CNM como potenciar la creación de nuevas tecnologías de QKD en espacio (tanto en satélite, como entre plataformas móviles como drones, aviones, etc.). Esta investigación se alinea con la estrategia nacional y europea en comunicación cuántica, dentro del programa antes llamado EuroQCI y ahora la Infraestructura para la Resiliencia, la Interconectividad y la Seguridad por Satélite (IRIS²).¹⁷

Para consolidar esta investigación, es necesario que el **CCTC-CSIC** promueva dos nuevas líneas de investigación en el CSIC, como son (i) la creación de memorias cuánticas o repetidores cuánticos que permitan extender el alcance de las comunicaciones y (ii) un grupo de investigación en criptografía postcuántica para desarrollar y validar los algoritmos de criptografía clásica que utilizarán, tanto el Laboratorio de Comunicación Cuántica, como el IMSE-CNM (Andalucía) o la spin-off del CSIC (Q-Dynamics) que integrarán esta tecnología.

¹⁶ IMB-CNM. Noticia; <https://www.imb-cnm.csic.es/es/noticias-divulgacion/noticias/la-comision-europea-y-la-empresa-comun-chips-chips-ju-seleccionan-al>

¹⁷ Infraestructura para la Resiliencia, la Interconectividad y la Seguridad por Satélite; https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space/iris2-secure-connectivity_en

III. Sensórica y metrología cuánticas. La sensórica y la metrología cuánticas son dos de las áreas con un mayor impacto social en el corto plazo, gracias a su utilidad en temáticas tan dispares como imagen médica o navegación sin GPS. En el **CCTC-CSIC** esta línea se construye sobre las aportaciones de dos grupos de investigación en la actual PTI QTEP, liderados por Daniel Ramos (ICMM) y Gabriel Molina Terriza (CFM). Ambos investigadores colaboran en el desarrollo de sensores cuánticos mediante aproximaciones complementarias (optomecánica, levitación, impurezas en diamante, etc.).

La estrategia de crecimiento y consolidación del centro pasa por un lado por establecer alianzas estratégicas con el Centro Español de Metrología, el cual ya colabora con el CSIC en los estándares de luz (IO), para promover la investigación en otros estándares de tiempo y campo electromagnético. Por otro lado, se perseguirá la atracción de talento joven en el ámbito de la sensórica, a través de una prospectiva asistida por el Comité Científico Asesor del **CCTC-CSIC**.

El **CCTC-CSIC** nace con el propósito de consolidar y estructurar un núcleo de investigación en tecnologías cuánticas dentro del CSIC, aprovechando la concentración de grupos de excelencia en Madrid y su papel dentro del ecosistema cuántico nacional e internacional. Sin embargo, para garantizar su competitividad y singularidad, el **CCTC-CSIC** debe articular un plan de crecimiento estratégico que refuerce su apuesta científica y lo diferencie en un entorno altamente competitivo. Es importante señalar que no existen direcciones de crecimiento en este campo que sean completamente exclusivas de un solo centro. Europa ha sido la cuna de la mayor parte de las tecnologías cuánticas actuales y en los últimos cuarenta años se han explorado líneas de investigación en todas las áreas clave. Además, este campo está en constante expansión, con desarrollos emergentes tanto en el ámbito internacional como en España. Por ello, la estrategia del **CCTC-CSIC** debe centrarse en identificar aquellas áreas donde su crecimiento resulte especialmente relevante en función de tres criterios fundamentales:

- (a) Líneas de investigación ausentes en España,** cuyo desarrollo permitiría ampliar la capacidad científica del país en tecnologías cuánticas.
- (b) Líneas con un impacto significativo en el corto y medio plazo,** que refuercen la relevancia del CCTC-CSIC en el ecosistema cuántico global.
- (c) Líneas que establezcan sinergias con las capacidades ya existentes en el CSIC,** potenciando la colaboración interdisciplinar y optimizando los recursos disponibles.

En línea con los criterios de crecimiento previamente establecidos y con los tres programas científicos del **CCTC-CSIC**, se plantea la expansión en **áreas clave** que refuercen su estructura científica y abran nuevas oportunidades de colaboración internacional. El **CCTC-CSIC** tiene como objetivo estratégico

atraer, en el corto y medio plazo, tanto a investigadores jóvenes en proceso de consolidación, que puedan liderar nuevas líneas de investigación, como a investigadores ya consolidados, con una trayectoria reconocida en el ecosistema cuántico global. Estas incorporaciones permitirán fortalecer las capacidades del centro en áreas de vanguardia, ampliando su impacto y diferenciación dentro del ecosistema cuántico español e internacional. Las áreas prioritarias de crecimiento serían las siguientes:

- **Laboratorio de qubits de estado sólido y diseño de ordenadores cuánticos.** Aunque la investigación en ordenadores cuánticos está dominada por empresas como Google e IBM, estas compañías no están destinando suficientes recursos a la exploración de nuevas generaciones de hardware cuántico. En los próximos años, será necesario desarrollar qubits con mayor coherencia, mayor rapidez de operación y materiales más robustos. En este contexto, el CSIC posee un liderazgo internacional en el diseño teórico de circuitos cuánticos superconductores y de bits cuánticos basados en semiconductores y en híbridos superconductores/semiconductores. El **CCTC-CSIC** aprovechará esta posición para establecer un laboratorio de qubits de estado sólido que explore estas líneas experimentales con un alto potencial de transferencia tecnológica. La atracción de talento en esta línea permitirá ampliar la capacidad científica del país en tecnologías cuánticas, respondiendo a los criterios (a) y (c), y facilitando una mejor integración con esfuerzos europeos como el Quantum Flagship e incluso con iniciativas de Google.
- **Laboratorio de átomos ultrafríos.** El **CCTC-CSIC** plantea la creación de un laboratorio satélite del existente en el CINN, donde Daniel Barredo está desarrollando un computador cuántico basado en átomos de Rydberg. Este nuevo laboratorio abordará aspectos complementarios, que el CINN no podrá cubrir en su laboratorio actual, innovando en cuestiones críticas como la reducción de errores en sistemas cuánticos, el desarrollo de trampas atómicas de nueva generación, la exploración de nuevas especies atómicas más adecuadas para su uso en computación y metrología cuántica, la investigación en memorias cuánticas y sensores avanzados. Esta spin-off se beneficiará del entorno académico de Madrid en física atómica, óptica cuántica y tecnologías cuánticas (IFF, IEM, IQF e IFT). Esta línea responde a los criterios (a) y (c), con sinergias en sensórica y comunicación cuántica, dependiendo del perfil de los investigadores incorporados.
- **Información cuántica.** El avance actual en tecnologías cuánticas sería impensable sin el desarrollo de la teoría de la información cuántica, un nuevo lenguaje matemático, construido sobre mecánica cuántica, que permite comprender cómo adquirir, comunicar y procesar información con sistemas físicos. Esta disciplina es esencial para traducir los avances experimentales en aplicaciones funcionales en sensado, comunicación, computación y simulación cuántica. Por ello, se propone la creación de un grupo de información cuántica teórica, con un equipo de proyección internacional, que refuerce la capacidad del **CCTC-CSIC** en la investigación fundamental y aplicada en este

campo. Esta línea responde a los criterios (b) y (c), ya que su impacto a medio plazo es clave para el desarrollo de la computación y la comunicación cuánticas.

- **Comunicaciones cuánticas y sensórica avanzada.** El **CCTC-CSIC** también buscará consolidar su crecimiento en comunicación cuántica y sensórica avanzada, áreas con gran potencial para la transferencia tecnológica. Para ello, se plantea la atracción de investigadores internacionales con experiencia en memorias cuánticas o sensores basados en centros de color en diamante o silicio, que permitan expandir las líneas de investigación ya establecidas en el ITEFI y el ICMM. Además, se explorarán otras tecnologías de sensado y metrología, tales como los relojes atómicos, estableciendo sinergias con el Centro Español de Metrología; los gravímetros cuánticos o los materiales cuánticos para sensores de precisión. Estas líneas permitirán al **CCTC-CSIC** ampliar su impacto en la industria de la metrología y la comunicación cuántica, consolidando su posición como centro de referencia en estos campos emergentes y respondiendo a los criterios (a), (b) y (c).



Fotografía de la estación óptica terrenal (Optical Ground Station, OGS) para criptografía cuántica con satélites, en proceso de instalación y montaje en el ITEFI.

Además de sus líneas nucleares de trabajo, el **CCTC-CSIC** incluirá un espacio para el desarrollo de **áreas exploratorias en tecnologías emergentes** con alto potencial de transformación científica y tecnológica, anticipando y abordando nuevas fronteras del conocimiento en el ámbito de las tecnologías cuánticas. En este contexto, se prestará especial atención a las sinergias entre tecnologías cuánticas e inteligencia artificial, un campo en rápida evolución que podría ofrecer algoritmos más potentes, técnicas de optimización avanzadas y nuevos modelos de aprendizaje cuando se desarrollen en hardware cuántico. Asimismo, se explorarán posibles conexiones con la robótica, en particular en relación con sensores cuánticos de alta precisión y sistemas de comunicación cuántica segura aplicables en plataformas móviles como drones, aeronaves o satélites. Estas líneas presentan un especial interés en áreas estratégicas como la defensa y la medicina, donde el sensado cuántico puede habilitar avances disruptivos en bioimagen, diagnóstico o navegación autónoma en entornos complejos. Aunque estas intersecciones se encuentran aún en una fase temprana de desarrollo, representan oportunidades estratégicas para posicionar al **CCTC-CSIC** como un nodo pionero en la integración de tecnologías emergentes con alto potencial transformador.

Programas tecnológicos transversales del CCTC-CSIC

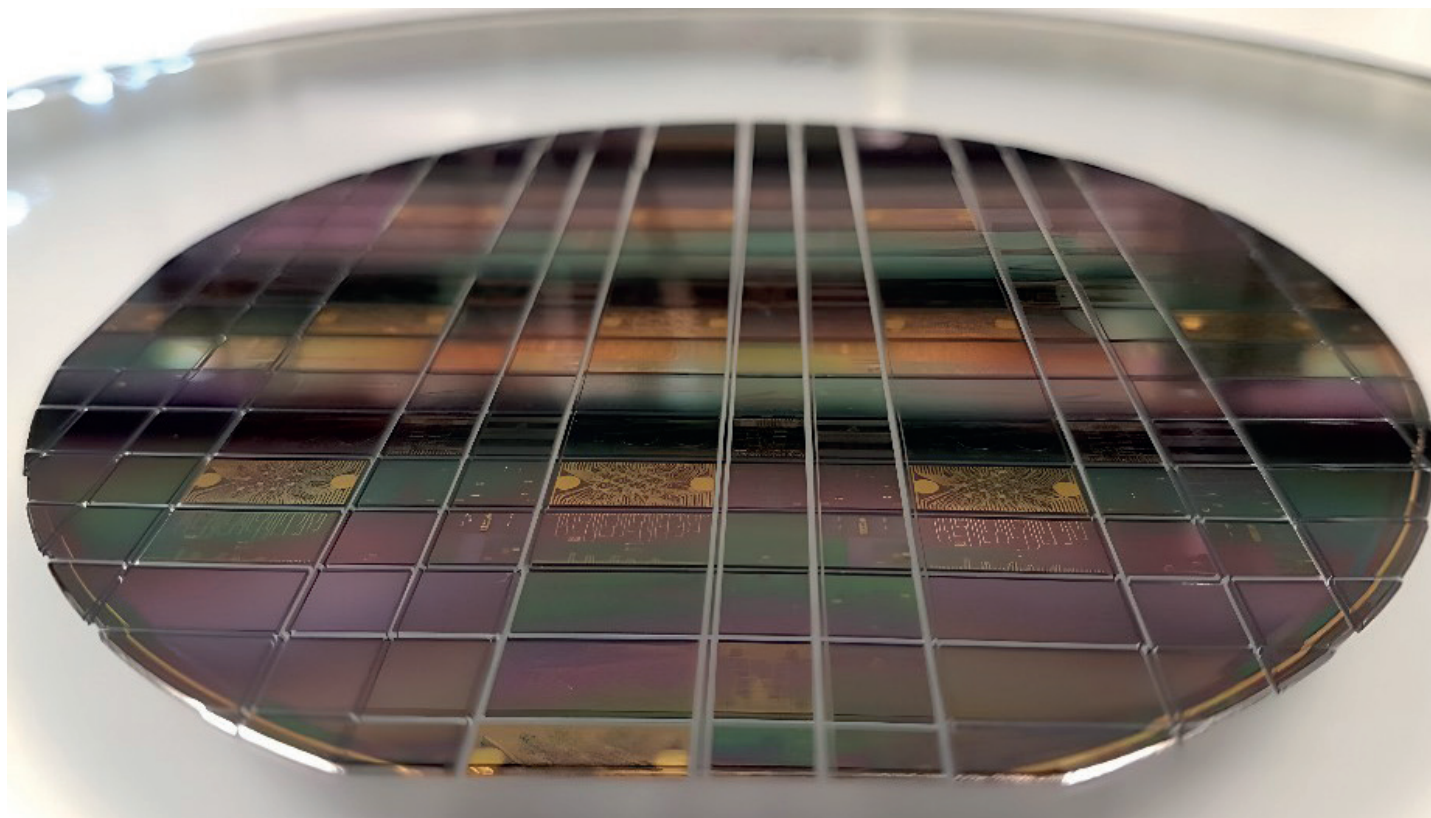
- I. **Teoría de la información e ingeniería cuánticas.** Estas son las dos líneas de investigación que articulan los desarrollos teóricos fundamentales (p. ej., estudio de la distribución de entrelazamiento, nuevos algoritmos cuánticos) y aplicados (diseño y caracterización de hardware, estudio de materiales para dispositivos cuánticos, etc.). Sin esta investigación teórica no es posible avanzar en la creación de ordenadores cuánticos, en descubrir problemas donde estos presenten ventajas significativas, o en mejorar la calidad de los qubits y las operaciones que se aplican sobre ellos, por mencionar ejemplos significativos.

Existe un núcleo teórico fuerte en el ámbito de Madrid que cubre un amplio espectro de todas estas temáticas (ICMAT, ICMM, IFF e IFT). El **CCTC-CSIC** permitirá reunir todas estas temáticas bajo un paraguas conjunto que promueva las colaboraciones teóricas y con los grupos experimentales. También permitirá reforzar áreas que no tienen representación, como la teoría de corrección de errores en dispositivos cuánticos, o la termodinámica cuántica.

- II. **Desarrollo de chips cuánticos.** Bajo este amplio paraguas se incorpora todo un conjunto de tecnologías facilitadoras sin las que las tecnologías cuánticas no existirían. Destacamos aquellas presentes en el CSIC y centros colaboradores, como la fotónica cuántica integrada, en la que el IMB-CNM es pionero con herramientas que permitirán el diseño y la fabricación de dispositivos miniaturizados de comunicación cuántica. También es importante mencionar las técnicas de criogenia en el INMA, cruciales en el mundo de los dispositivos superconductores y

semiconductores, así como la creación de emisores cuánticos y fotodetectores de alta calidad, en centros como IMN-CMN, IMSE-CMN y laboratorios colaboradores en la UAM.

III. Fabricación de tecnologías cuánticas. El objetivo principal de este pilar es consolidar y fortalecer el hub de fabricación cuántica, compuesto por varios nodos de la PTI QTEP. Este hub tiene como propósito promover, coordinar y garantizar el acceso a infraestructuras avanzadas de fabricación cuántica, disponibles para todos los grupos de investigación y entidades asociadas. Asimismo, busca fomentar la colaboración con agentes nacionales e internacionales, potenciando la participación en proyectos europeos, redes de investigación y la interacción con la industria. Actualmente, el hub de fabricación cuántica incluye las instalaciones de grandes infraestructuras: la sala blanca integrada para micro/nanofabricación del IMB-CNM, la sala blanca de la ICTS LMA (ELECMI-UZ) accesible para el INMA y la unidad de servicio para micro/nanofabricación del IMN-CNM (MINA). El **CCTC-CSIC** será una pieza clave en este hub, incorporando nuevas infraestructuras que se diseñen y aquellas que se trasladen a su sede.



Wafer multiproyecto en la que se han creado múltiples chips fotónicos integrados. Gracias a las capacidades del IMB-CNM en este terreno, el CSIC puede explorar nuevas líneas como el diseño de chips para criptografía cuántica o nuevos modelos de sensores cuánticos basados en fotónica integrada.



Este enfoque permitirá fortalecer las capacidades nacionales en el desarrollo y producción de tecnologías cuánticas, asegurando un impacto significativo en el ecosistema científico y tecnológico.

En el marco de estos tres **programas tecnológicos** transversales el **CCTC-CSIC** plantea los siguientes objetivos estratégicos:

- Impulsar la **fabricación en fotónica cuántica integrada**, proporcionando recursos para la integración de emisores de luz y fotodetectores, y la fabricación a gran escala.
- Potenciar la línea de **emisores de fotones y detectores de fotones** ya iniciadas en el CSIC, fomentando su integración con las tecnologías del IMB-CNM.
- Consolidar una **línea de fabricación de circuitos cuánticos superconductores**, que permita apoyar y potenciar tanto los computadores cuánticos híbridos como la creación de ordenadores cuánticos puramente superconductores.

Unidades de apoyo técnico del CCTC-CSIC

Para garantizar el funcionamiento eficiente, la coordinación estratégica y el impacto del nuevo centro, resulta imprescindible dotar al **CCTC-CSIC** de **Unidades de Apoyo Técnico** especializadas que aseguren la integración entre los programas científicos, la transferencia de conocimiento y la atracción de talento, pilares fundamentales para su consolidación como referente nacional e internacional.

- I. **Coordinación de programas e infraestructuras.** El éxito del **CCTC-CSIC** requerirá no solo de una investigación de excelencia, sino también de una gestión estratégica eficiente que potencie la coordinación entre sus programas científicos, tecnológicos y su conexión con la comunidad cuántica nacional e internacional. Para ello, se propone la creación de una **Unidad de coordinación de programas e infraestructuras**, que será el nodo central de integración y proyección internacional del **CCTC-CSIC**. Esta unidad desempeñará un papel clave en varias áreas estratégicas:
 - **Coordinación científica interna:** asegurar la integración y alineación de los programas de investigación del **CCTC-CSIC** con los programas tecnológicos transversales, optimizando la colaboración interdisciplinar dentro del centro.

- **Internacionalización y participación en grandes iniciativas:** actuar como punto de contacto del **CCTC-CSIC** en redes y proyectos internacionales, facilitando su integración en programas europeos como Quantum Flagship y promoviendo su papel dentro de consorcios estratégicos globales en tecnologías cuánticas.
- **Coordinación con grupos externos:** aprovechar y consolidar los lazos ya establecidos a través de la PTI QTEP con grupos de investigación en tecnologías cuánticas dentro y fuera de España, fortaleciendo la cooperación, promoviendo proyectos conjuntos y asegurando una integración efectiva del **CCTC-CSIC** en el ecosistema cuántico nacional e internacional, evitando la fragmentación y duplicación de esfuerzos.
- **Optimización y planificación de infraestructuras:** coordinar y fomentar el uso eficiente de las infraestructuras científicas ya establecidas, muchas de ellas desarrolladas con fondos de la PTI QTEP y otros proyectos estratégicos, asegurando su máximo aprovechamiento por la comunidad investigadora. Además, esta unidad desempeñará un papel clave en la planificación de nuevas infraestructuras, identificando necesidades futuras y alineando su desarrollo con la evolución del área de tecnologías cuánticas, garantizando así un crecimiento sostenible y estratégico del **CCTC-CSIC**.
- **Atracción de financiación externa:** convertirse en el punto central para la búsqueda de financiación nacional e internacional, incluyendo la identificación de oportunidades en convocatorias competitivas, la preparación de propuestas para programas europeos (Horizonte Europa, Consejo Europeo de Investigación, Consejo Europeo de Innovación, Europa Digital, entre otros) y el fomento de la colaboración con entidades privadas e industriales.

La **Unidad de coordinación de programas e infraestructuras** será, por tanto, una pieza clave en la proyección internacional del **CCTC-CSIC**, asegurando su participación activa en redes científicas globales y su competitividad en la captación de fondos. A través de esta unidad, el **CCTC-CSIC** no solo reforzará su liderazgo en tecnologías cuánticas, sino que también se consolidará como un actor estratégico en el ecosistema cuántico europeo e internacional, facilitando sinergias, promoviendo la excelencia científica y maximizando su impacto en la comunidad investigadora y el sector productivo.

- II. **Transferencia de tecnologías cuánticas.** Para maximizar el impacto del **CCTC-CSIC** y consolidarlo como un referente en el ecosistema cuántico español, resulta fundamental la creación de una **Unidad de transferencia**, cuya misión será impulsar la colaboración con el sector productivo, gestionar la propiedad intelectual y desarrollar estrategias de comercialización y atracción de inversiones, facilitando la transferencia de conocimiento desde la investigación hacia aplicaciones industriales y comerciales. El **CCTC-CSIC** nace con una vocación clara de establecer colaboraciones público-privadas que aceleren el desarrollo y despliegue de tecnologías cuánticas,



actuando como nexo entre la investigación científica y las necesidades del tejido empresarial. El CSIC ya cuenta con una sólida experiencia en este ámbito a través de la PTI QTEP, que ha demostrado una excelente capacidad de transferencia tecnológica. Ejemplo de ello son los contratos con empresas como BBVA y GMV en computación cuántica y aprendizaje cuántico, así como el Proyecto CUCO. Además, ha impulsado la creación de empresas de base tecnológica en diversas áreas estratégicas, como fuentes de luz cuántica (g2-Zero, TRL-7), sensores para medicina (Nanological, TRL-6), criptografía cuántica (Q-Dynamics, TRL-6) y algoritmos de inspiración cuántica (Inspiration-Q, TRL-7). El **CCTC-CSIC** nace con el objetivo de convertirse en un polo de transferencia de tecnología e innovación en el ámbito cuántico, capitalizando esta experiencia y ampliando su alcance. La unidad de transferencia será un pilar clave en este proceso, asegurando que el **CCTC-CSIC** no solo potencie la investigación de vanguardia, sino que también contribuya activamente al desarrollo tecnológico e industrial de España en este campo emergente. La estrategia de la **Unidad de transferencia tecnológica** del Centro pasa por cuatro líneas de actuación:

- Fomentar un **ecosistema empresarial cuántico**, colaborando con grandes entidades como AMETIC, para fomentar la transferencia de tecnología y asociaciones estratégicas en computación, comunicación, sensado y algoritmos cuánticos.
- **Escalar las empresas de base tecnológica del CSIC**, a través de programas de *co-funding* como Next-Tech, o apoyando la presentación en programas tipo EIC.
- Explorar **verticales industriales estratégicas** para la creación de empresas: logística, finanzas, etc.
- Promover la creación de **nuevas empresas** y la generación de **propiedad intelectual** con un equipo de apoyo dedicado específicamente a la transferencia de tecnologías cuánticas.

En definitiva, el CCTC-CSIC aspira a consolidarse como un referente en transferencia cuántica con base en una colaboración público-privada sólida, estructurada y sostenida en el tiempo.

III. Formación y atracción de talento en tecnologías cuánticas. La captación de talento es un pilar fundamental para abordar las debilidades existentes en la componente experimental de las tecnologías cuánticas en España, un ámbito que presenta limitaciones significativas. Estas carencias dificultan el crecimiento en áreas clave como la computación cuántica, la simulación cuántica y la sensórica, donde, aunque la contribución teórica es relevante, el alcance de los grupos experimentales existentes es limitado. En este contexto, el **CCTC-CSIC** se configura como una oportunidad estratégica para fortalecer estas áreas mediante la atracción de talento, tanto de jóvenes investigadores en proceso de consolidación, que

puedan liderar nuevas líneas de investigación, como de investigadores ya consolidados. Este enfoque permitirá no solo cerrar brechas críticas en capacidades experimentales, sino también posicionar al CSIC y al **CCTC-CSIC** como referentes en el desarrollo de tecnologías cuánticas a nivel nacional e internacional. Para estructurar y ejecutar estas iniciativas de manera eficiente, el **CCTC-CSIC** contará con una **Unidad de formación y atracción de talento**, que servirá como herramienta clave para la planificación y gestión de programas de incorporación y consolidación de investigadores, asegurando el crecimiento sostenible del centro. Desde esta unidad se impulsará un **programa de atracción de talento**, estructurado en varias fases de la carrera científica:



- **Introducción a la investigación:** el estudiantado egresado de los másteres universitarios en tecnologías cuánticas que lideran los grupos de la PTI QTEP es experto en algoritmos cuánticos, teoría cuántica avanzada (óptica cuántica y física de la materia condensada) y aspectos técnicos y experimentales del desarrollo de hardware cuántico. Para aumentar el alcance de estos programas de formación únicos en España, se propone potenciar el programa de becas de introducción a la investigación JAE Intro del CSIC, con ofertas dirigidas específicamente a estudiantes universitarios con interés en iniciar una carrera investigadora en grupos del **CCTC-CSIC**.
- **Doctorado de excelencia:** una prioridad para el CSIC es evitar la fuga de talento que se está formando en estos másteres y captar a los mejores estudiantes. Para ello se propone crear un programa competitivo de financiación de contratos predoctorales en el **CCTC-CSIC**. El instrumento disponible en la actualidad en el CSIC es el programa JAE Pre que permitirá destinar fondos a contrataciones de los mejores estudiantes en el marco de los proyectos más punteros del **CCTC-CSIC**. El instrumento previsto para la ampliación y cofinanciación de este programa será la convocatoria de ayudas COFUND en el marco de las acciones Marie Skłodowska-Curie de la Unión Europea.
- **Investigadores distinguidos (*Junior Group Leader*):** la atracción de personal investigador excelente procedente del exterior del CSIC constituye una prioridad estratégica para el **CCTC-CSIC**. Con este objetivo, el CSIC podría utilizar la figura de investigador distinguido, una modalidad de contratación diseñada para ofrecer condiciones salariales muy competitivas a un número limitado de investigadores con capacidad de liderar grupos emergentes y abrir nuevas líneas de investigación en el centro. Esta contratación, con una duración máxima de tres años y con financiación asociada para el establecimiento de dichas líneas, tiene además como horizonte facilitar el acceso a plazas de personal científico funcionario que el CSIC convocará en su oferta pública de empleo, alineada con las necesidades del **CCTC-CSIC**.



- **JAE Chairs:** el programa JAE Chairs tiene por objeto la atracción de talento científico de máximo nivel e impulso de la excelencia, así como estimular la colaboración e identificación de líneas de investigación emergentes, disruptivas y prometedoras que puedan aportar valor añadido al CSIC. El programa JAE Chairs permitirá otorgar cátedras CSIC que promuevan la colaboración estrecha de un investigador o investigadora de reconocido prestigio internacional (*Chairholder*) con el **CCTC-CSIC**. El o la *Chairholder* realizará estancias de al menos dos meses al año en el **CCTC-CSIC** y, junto con un investigador o investigadora del centro (el Coordinador/a), coliderará un proyecto científico de excelencia en tecnologías cuánticas.
- **Personal investigador permanente:** el CSIC ha puesto en marcha un ambicioso programa de captación de personal para sus escalas científicas, con una prioridad clara en atraer talento externo, tanto nacional como internacional. En los últimos años, se han destinado 13 plazas de Científico Titular y 2 de Investigador Científico específicamente perfiladas en tecnologías cuánticas, abarcando desde investigación fundamental hasta aplicaciones. La próxima OEP 2024-2025 cuenta también con varios perfiles científicos pensados expresamente para captar investigadores/as que aún no forman parte del CSIC, y que puedan fortalecer el ecosistema científico del organismo con nuevas líneas y enfoques. Estas iniciativas, comprometidas en el Contrato de Gestión del CSIC, aseguran la continuidad en la atracción y consolidación de talento en este campo estratégico y refuerzan las capacidades del organismo en investigación e innovación.

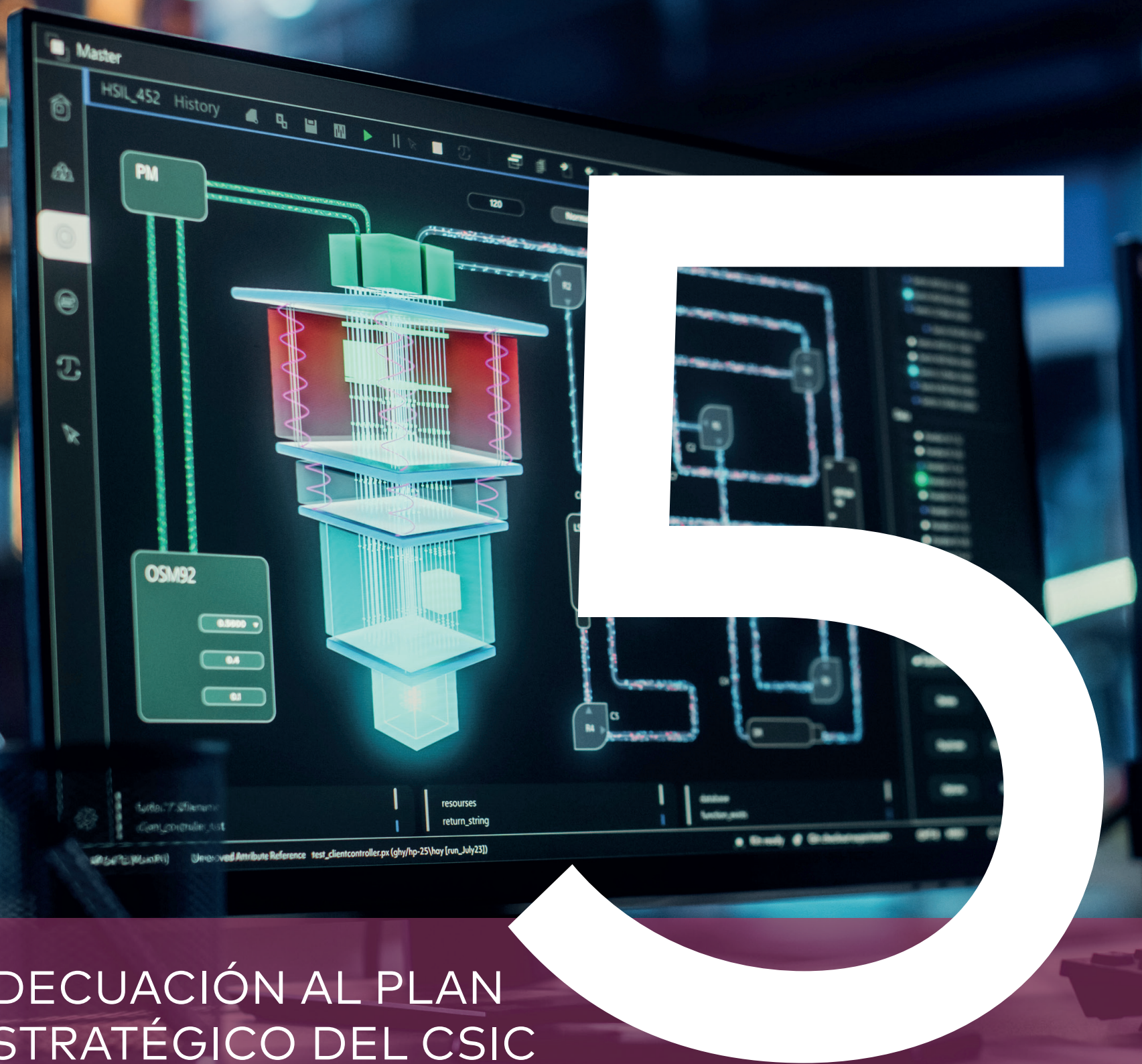
Por otro lado, el CSIC, como organismo de referencia en investigación científica en España, tiene entre sus misiones fundamentales la formación de nuevas generaciones de investigadores y el desarrollo de programas educativos de alto nivel. En este marco, la PTI QTEP ha demostrado una gran capacidad formativa en tecnologías cuánticas, estructurando un programa de formación ambicioso y de gran atractivo en colaboración con nueve universidades españolas. Como parte de este esfuerzo, ha liderado la creación del Máster de Tecnologías Cuánticas UIMP-CSIC, que, tras dos años de experiencia como título propio, se oficializó en 2024 con 41 estudiantes matriculados. Para consolidar y expandir este esfuerzo, el **CCTC-CSIC** contará con la **Unidad de formación y atracción de talento**, que será el eje central para diseñar, coordinar y ejecutar las estrategias de formación. Su papel será clave para garantizar la continuidad y sostenibilidad de los programas educativos y facilitar la conexión entre la academia, la industria y el sector público en la formación de expertos en tecnologías cuánticas.

Desde esta unidad se implementarán las siguientes estrategias:

- **Optimización y consolidación del Máster de Tecnologías Cuánticas UIMP-CSIC**, asegurando su crecimiento y estabilidad.
- **Promoción de sinergias y compartición de recursos con otros programas de máster en España y Europa.**
- **Escalado del máster a un doctorado oficial**, siguiendo modelos de referencia como los de Múnich y Viena, con un programa de becas competitivo.
- **Gestión de la formación anual de 60 estudiantes de máster y 20 de doctorado**, asegurando que un 10% tenga vinculación con el sector productivo mediante doctorados industriales, formación en empresas o cursos abiertos en colaboración con Talent-Q de Quantum Spain.



ADECUACIÓN AL PLAN ESTRATÉGICO DEL CSIC



La creación de un **Centro de Ciencia y Tecnologías Cuánticas (CCTC-CSIC)** se alinea con el **Plan Estratégico del CSIC 2023-2026**, enmarcado en su **Contrato de Gestión**, y responde a varios de los **Retos Globales** definidos en este marco estratégico. La investigación en tecnologías cuánticas es un área prioritaria que combina un fuerte impacto científico con aplicaciones de gran relevancia tecnológica y social. La consolidación del **CCTC-CSIC** permite organizar de manera eficiente las capacidades existentes dentro del CSIC y dotar a esta disciplina de una estructura estable que garantice su desarrollo a largo plazo.

En este sentido, el **CCTC-CSIC** se alinea con el **Reto Global A: Colaborar para encontrar respuestas a desafíos científicos con alta motivación e impacto social**, al impulsar la investigación en tecnologías cuánticas como un área disruptiva que transformará sectores clave como la computación, la ciberseguridad y la metrología. La necesidad de abordar estos desafíos en un marco estratégico lleva al CSIC a la creación de un **CCTC-CSIC** como un centro dedicado exclusivamente a estas tecnologías, permitiendo una mejor gobernanza, coordinación de infraestructuras y planificación científica de largo recorrido.

Asimismo, el **CCTC-CSIC** responde al **Reto Global B: Atraer y retener el mejor talento profesional (científico, técnico y de gestión)**, al configurarse como un polo de atracción de talento nacional e internacional en un ámbito altamente competitivo. La consolidación de capacidades en tecnologías cuánticas exige programas de formación específicos y una estructura que permita la incorporación de investigadores en todas las etapas de su carrera. La **Unidad de formación y atracción de talento** desempeñará un papel fundamental en este proceso, facilitando la creación de programas formativos de excelencia, la captación de investigadores jóvenes y consolidados y la conexión con universidades para potenciar la oferta académica en tecnologías cuánticas. La creación del centro contribuirá así a evitar la dispersión de esfuerzos y a fortalecer el posicionamiento del CSIC como una institución de referencia en la formación de científicos en este campo emergente.

Otro aspecto clave de la creación de un **CCTC-CSIC** es su alineación con el **Reto Global C: Aumentar el impacto científico y técnico en I+D+i, con énfasis en enfoques interdisciplinares**. Las tecnologías cuánticas requieren una combinación de conocimientos en física, ingeniería, matemáticas y ciencias computacionales, lo que hace imprescindible un enfoque multidisciplinar y una estrategia coordinada para maximizar su impacto. La PTI QTEP, que ha integrado a los principales grupos del CSIC en tecnologías cuánticas, ha demostrado la efectividad de este enfoque, fomentando la colaboración entre equipos con distintas especialidades. La existencia de un **CCTC-CSIC** permitirá consolidar y ampliar esta estructura, reforzando la cooperación entre grupos de diferentes institutos del CSIC y promoviendo colaboraciones con otras instituciones nacionales e internacionales para asegurar un crecimiento estructurado del área.

Este reto también hace referencia a la **transferencia de conocimiento y colaboración con el sector productivo**, un ámbito en el que el **CCTC-CSIC** tendrá un papel clave. La investigación en tecnologías cuánticas está en una fase de transición hacia aplicaciones comerciales, y la **Unidad de transferencia** del centro facilitará la colaboración con empresas en ámbitos como la computación cuántica, la criptografía post-cuántica y la metrología de ultra precisión. Asimismo, impulsará la generación de patentes, licencias y la creación de spin-offs, asegurando que el conocimiento generado en el CSIC tenga un impacto real en la industria y en el desarrollo económico.

Además, el **CCTC-CSIC** se inscribe dentro del **Reto Global D: Incrementar la visibilidad internacional del CSIC y contribuir a la política científica global**, al consolidarse como el **centro de referencia en España en ciencia y tecnologías cuánticas**. La creación de un centro de estas características no solo fortalecerá la capacidad de investigación e innovación en tecnologías cuánticas dentro del CSIC, sino que también situará a España en una posición estratégica para liderar la agenda cuántica a nivel europeo. El **CCTC-CSIC** permitirá una mejor coordinación de los grupos de investigación del CSIC y servirá como punto focal para la participación en redes globales, facilitando el acceso a programas de financiación competitiva como el Quantum Flagship, reforzando así la presencia del CSIC y de España en el ecosistema cuántico internacional.

En conclusión, la creación de un **CCTC-CSIC** no solo refuerza la capacidad del CSIC para liderar la investigación en tecnologías cuánticas, sino que también responde de manera directa a los Retos Globales identificados en su Plan Estratégico, garantizando un desarrollo estructurado, sostenible y de alto impacto en este campo emergente.

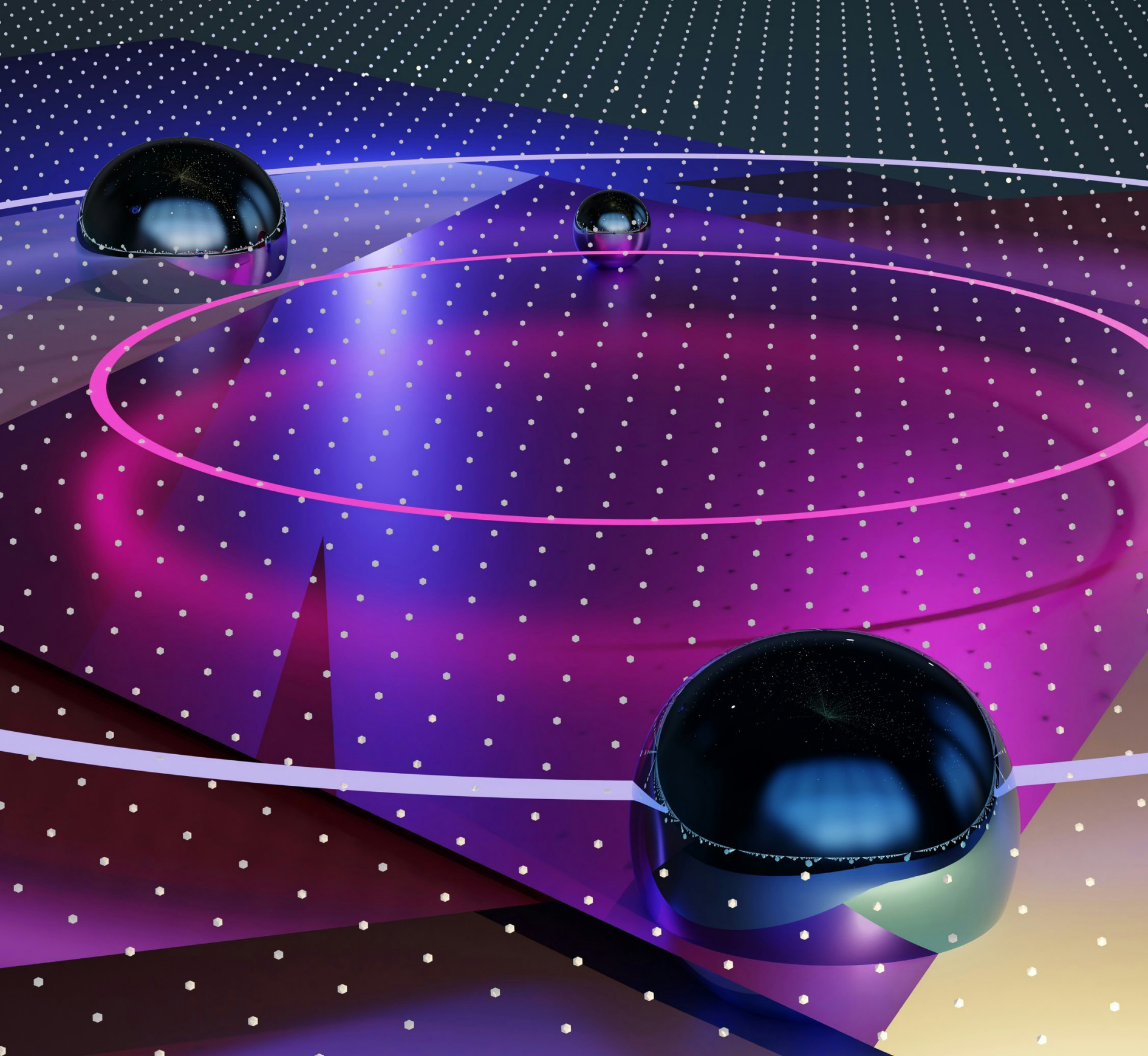
Más allá de los Retos Globales, la creación de un **CCTC-CSIC** se enmarca dentro de los **Planes Estratégicos** del CSIC, que establecen líneas de actuación para reforzar la excelencia científica, la transferencia de tecnología, la captación de talento, la internacionalización y la optimización de infraestructuras científicas. En este sentido, la creación de un **CCTC-CSIC** se alinea con el **Plan IMPACTA-CSIC**, cuyo objetivo es incrementar la relevancia y visibilidad internacional del CSIC en investigación de excelencia. Dentro de este marco, el **CCTC-CSIC** refuerza la estrategia de internacionalización del CSIC, buscando consolidar su presencia en redes científicas internacionales y fomentar la cooperación con instituciones de referencia en el ámbito global. La investigación en tecnologías cuánticas es un área con una fuerte proyección internacional, y la existencia de un centro de referencia permitirá al CSIC acceder de manera más efectiva a financiación competitiva, promover la movilidad de investigadores y fortalecer su participación en iniciativas estratégicas europeas y globales.

Asimismo, el **CCTC-CSIC** tiene como finalidad mejorar la transferencia de conocimiento y fortalecer la colaboración con el sector productivo. La investigación en tecnologías cuánticas está en una fase clave de transición desde la teoría hacia aplicaciones comerciales, y el **CCTC-CSIC** permitirá

consolidar la conexión entre el CSIC y la industria. A través de su **Unidad de transferencia**, el centro facilitará la colaboración con empresas en ámbitos como la computación cuántica, la criptografía post-cuántica y la metrología de ultra precisión. Además, impulsará la generación de patentes, licencias y la creación de spin-offs, asegurando que el conocimiento generado en el CSIC tenga un impacto real en el tejido productivo y en la sociedad. En esta misma línea, el **CCTC-CSIC** responde a los objetivos del **Plan CSIC en Sociedad**, que busca reforzar la conexión entre la ciencia y la ciudadanía incrementando la relevancia social de la institución y sus investigadores. La creación del centro permitirá potenciar la difusión de la investigación en tecnologías cuánticas, acercando su impacto y aplicaciones a un público más amplio. Esto se materializará a través de la organización de eventos, conferencias y acciones educativas que fomenten el interés por esta disciplina y refuercen la imagen del CSIC como un referente en el ámbito cuántico. Además, dentro del **Plan CSIC en Sociedad**, la transferencia de conocimiento juega un papel fundamental en la interacción del CSIC con la sociedad y el tejido productivo. En este contexto, el **CCTC-CSIC** no solo facilitará la transferencia de tecnología hacia la industria mediante su **Unidad de transferencia**, sino que también promoverá la creación de redes de colaboración con empresas e instituciones gubernamentales. Estas acciones permitirán que los avances en tecnologías cuánticas se traduzcan en aplicaciones concretas, favoreciendo la generación de impacto socioeconómico y el posicionamiento del CSIC como un actor clave en la innovación tecnológica.

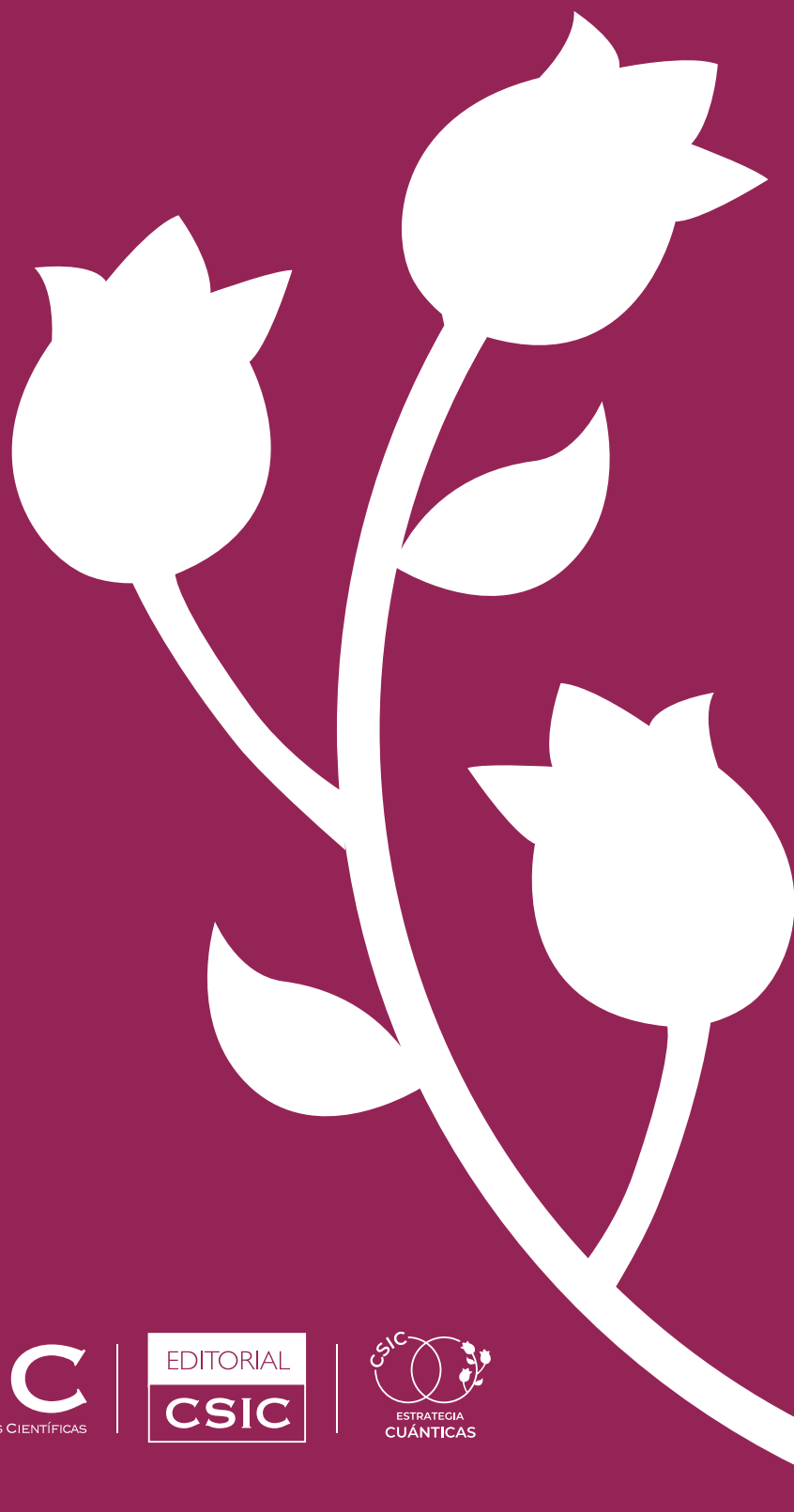
Desde el punto de vista del desarrollo de talento, el **CCTC-CSIC** se inscribe dentro del **Plan DESARROLLA-T CSIC**, cuyo objetivo es atraer, retener y formar investigadores en áreas estratégicas. La creciente demanda de expertos en tecnologías cuánticas a nivel mundial hace que sea esencial consolidar una estructura que garantice la formación de nuevos investigadores en este campo. La **Unidad de formación y atracción de talento** será clave para la creación de programas de doctorado, la formación de investigadores postdoctorales y la coordinación con universidades para potenciar la oferta académica en tecnologías cuánticas. Además, el **CCTC-CSIC** contribuirá a la planificación y optimización de recursos científicos dentro del **Plan de Infraestructuras del CSIC**. La investigación en tecnologías cuánticas requiere equipamientos altamente especializados y una gestión eficiente de los recursos experimentales. La existencia de un **CCTC-CSIC** permitirá centralizar y coordinar el acceso a estas infraestructuras, optimizando su uso y asegurando inversiones estratégicas en laboratorios y plataformas tecnológicas. Esto garantizará que los equipos e instalaciones del CSIC sean utilizados de manera eficiente y alineada con las necesidades de la comunidad científica en este ámbito.

En conclusión, la creación de un **CCTC-CSIC** no solo responde a los **Retos Globales del CSIC**, sino que también se integra plenamente en sus **Planes Estratégicos**, asegurando una planificación coordinada y alineada con los objetivos institucionales. Su puesta en marcha permitirá consolidar el liderazgo del CSIC en tecnologías cuánticas, optimizar la gestión de recursos, fortalecer la transferencia de tecnología, garantizar la formación de investigadores y mejorar la proyección internacional en un área clave para el futuro de la I+D+i.



GLOSARIO DE SIGLAS DE CENTROS E INSTITUTOS CSIC REFERIDOS EN EL DOCUMENTO

SIGLAS	INSTITUTO/CENTRO	SITIO WEB
CAB	Centro de Astrobiología	https://cab.inta-csic.es/
CAR	Centro de Automática y Robótica	https://www.car.upm-csic.es/
CFM	Centro de Física de Materiales	https://cfm.ehu.es/es/
CINN	Centro de Investigación en Nanomateriales y Nanotecnología	https://cinn.es/
I3M	Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular	https://i3m.csic.upv.es/
ICMAB	Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona	https://icmab.es/
ICMAT	Instituto de Ciencias Matemáticas	https://www.icmat.es/
ICMM	Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid	https://www.icmm.csic.es/
ICN2	Institut Català de Nanociència i Nanotecnologia	https://icn2.cat/en/
IEM	Instituto de Estructura de la Materia	https://www.iem.csic.es/
IFCA	Instituto de Física de Cantabria	https://ifca.unican.es/
IFF	Instituto de Física Fundamental	https://www.iff.csic.es/
IFIC	Instituto de Física Corpuscular	https://webific.ific.uv.es/
IFISC	Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos	https://ifisc.uib-csic.es/
IFT	Instituto de Física Teórica	https://www.ift.uam-csic.es/
IMB-CNM	Instituto de Microelectrónica de Barcelona	https://www.imb-cnm.csic.es/
IMN-CNM	Instituto de Micro y Nanotecnología	http://www.imn.cnm.csic.es/
IMSE-CNM	Instituto de Microelectrónica de Sevilla	http://www.imse-cnm.csic.es/
INMA	Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón	https://inma.unizar-csic.es/
IO	Instituto de Óptica «Daza de Valdés»	https://www.io.csic.es/
IQF	Instituto de Química Física «Blas Cabrera»	https://www.iqf.csic.es/es/
ITEFI	Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información «Leonardo Torres Quevedo»	https://www.itefi.csic.es/es



MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

EDITORIAL

CSIC



ESTRATEGIA
CUÁNTICAS