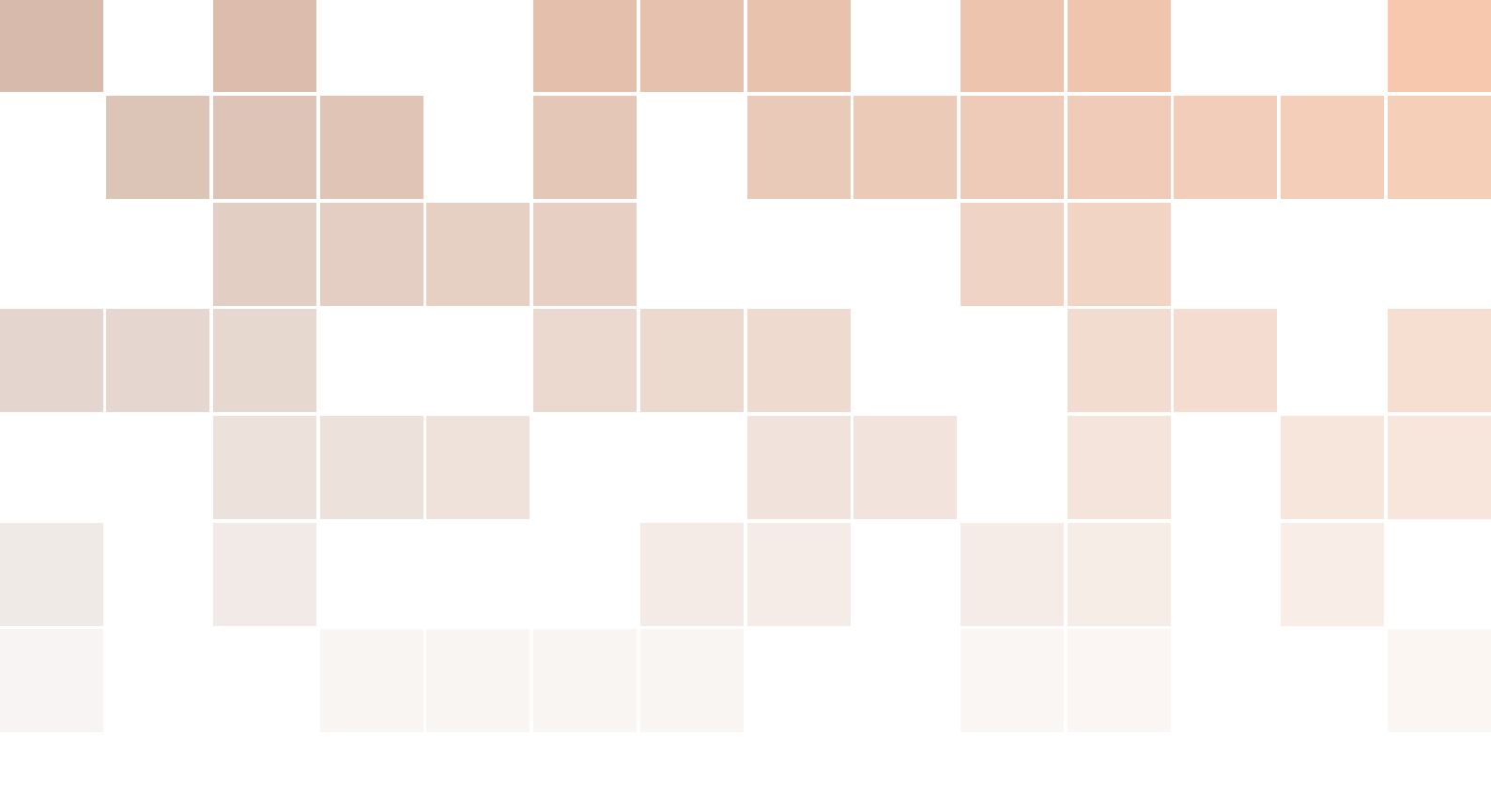
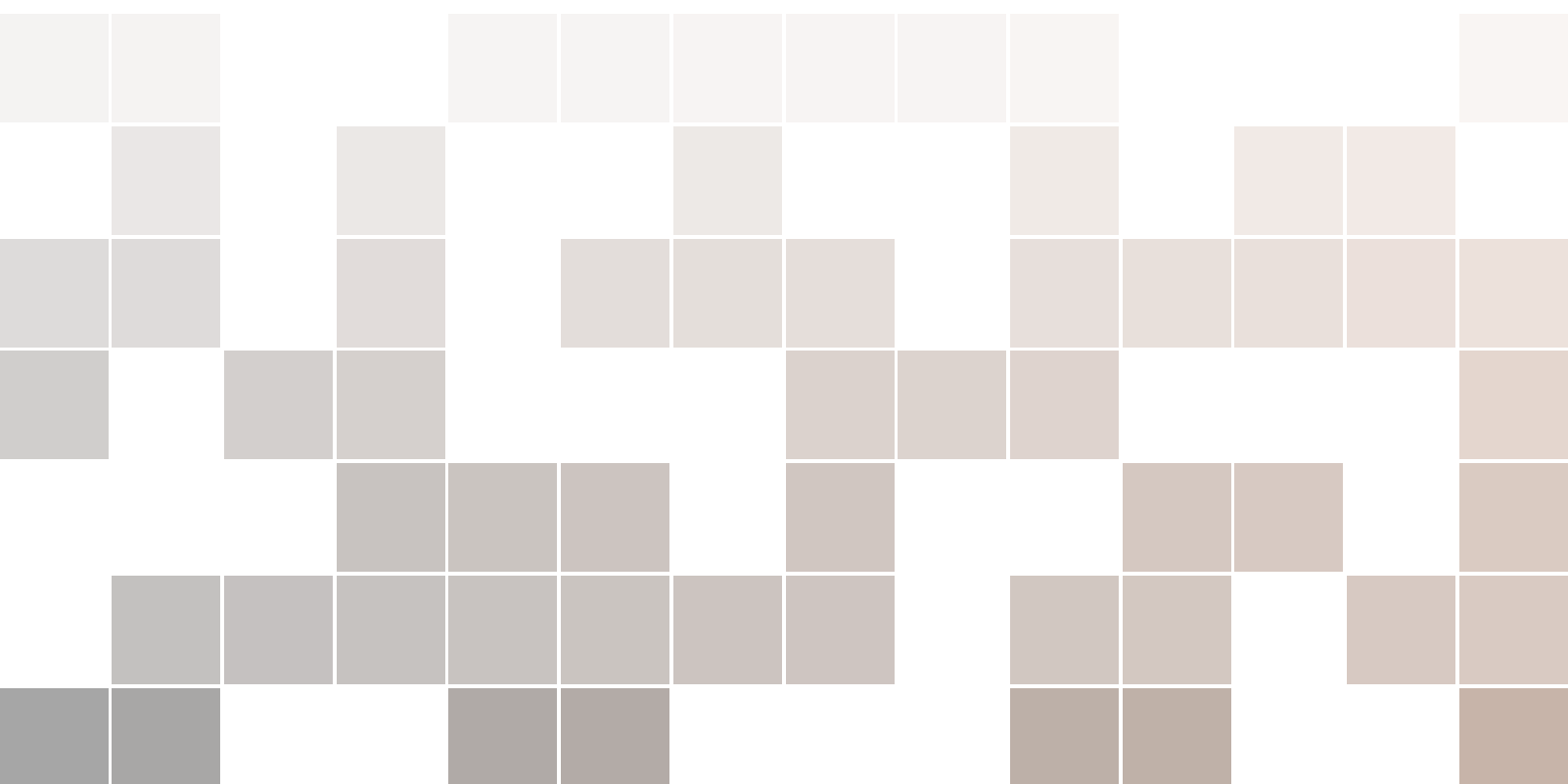




Ciencia y Tecnologías Cuánticas **en España**

Presente, retos y oportunidades



Copyright © 2025 Red de Información y Tecnologías Cuánticas en España

Licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 License (the “License”). You may not use this file except in compliance with the License. You may obtain a copy of the License at <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>. Unless required by applicable law or agreed to in writing, software distributed under the License is distributed on an “AS IS” BASIS, WITHOUT WARRANTIES OR CONDITIONS OF ANY KIND, either express or implied. See the License for the specific language governing permissions and limitations under the License.

Primera versión, Abril 2025



Índice general

I

Introducción

1	Motivación	11
1.1	¿Qué son las tecnologías cuánticas?	11
1.2	¿Qué interés tienen?	11
1.3	¿Cómo puede contribuir España?	12
2	Este documento	13
2.1	Origen y motivación	13
2.2	Estructura	14

II

Pilares

3	Comunicación cuántica	17
3.1	Objetivos	17
3.2	Impacto	17
3.3	Retos y oportunidades	18
4	Sensado y metrología cuánticas	21
4.1	Objetivos	21
4.2	Impacto	21
4.3	Retos y oportunidades	22

5	Computación cuántica	25
5.1	Objetivos	25
5.2	Impacto	25
5.3	Retos y oportunidades	26
6	Simulación cuántica	29
6.1	Objetivos	29
6.2	Impacto	29
6.3	Retos y oportunidades	30

III

Ciencia transversal

7	Información cuántica y algoritmia	35
7.1	Objetivos	35
7.2	Impacto	35
7.3	Retos y oportunidades	36
8	Materiales cuánticos	39
8.1	Objetivos	39
8.2	Impacto	39
8.3	Retos y oportunidades	40
9	Fabricación cuántica	43
9.1	Objetivos	43
9.2	Impacto	44
9.3	Retos y oportunidades	44

IV

Ecosistema

10	Formación	49
10.1	Objetivos	49
10.2	Situación actual	49
10.3	Retos y oportunidades	50

11	Infraestructuras	53
11.1	Objetivos	53
11.2	Impacto	53
11.3	Retos y oportunidades	54
	Appendices	59
A	Grupos de investigación	59



Índice de cuadros

3.1	Comunicación cuántica en España	20
4.1	Sensado cuántico en España	23
5.1	Fabricación de ordenadores cuánticos en España	28
6.1	Simulación cuántica en España	31
8.1	Materiales cuánticos en España	41
9.1	Fabricación cuántica en España	45
10.1	Programas formativos de posgrado	51
11.1	Infraestructuras de fabricación y testado	56
11.2	Infraestructuras de computación cuántica	57
A.1	Grupos de investigación y centros tecnológicos de España.	59



Introducción

1	Motivación	11
1.1	¿Qué son las tecnologías cuánticas?	11
1.2	¿Qué interés tienen?	11
1.3	¿Cómo puede contribuir España?	12
2	Este documento	13
2.1	Origen y motivación	13
2.2	Estructura	14



1. Motivación

1.1 ¿Qué son las tecnologías cuánticas?

Por tecnologías cuánticas nos referimos a aquellas que utilizan los estados cuánticos de la materia para adquirir, comunicar y procesar información. Frente a otras tecnologías, como los semiconductores o el láser, que usan los fenómenos cuánticos para controlar la dinámica de los electrones o la producción de la luz, las tecnologías cuánticas explotan realmente la naturaleza cuántica, a través de propiedades como la superposición cuántica, el entrelazamiento o la no-contextualidad.

A lo largo de estos años, la investigación en física atómica, molecular, óptica y en materia condensada, sumada al desarrollo de la teoría de la información cuántica y a continuos avances en tecnologías de fabricación, nos han permitido controlar la materia a escalas cada vez más pequeñas y con precisiones cada vez más altas. Las tecnologías cuánticas—que tienen más de 40 años de antigüedad y encuentran su origen en las propuestas de Feynman para crear simuladores cuánticos (ver página 29) o el protocolo BB84 para la distribución cuántica de claves privadas (ver página 17)—surgen de la convergencia entre este progreso y la necesidad de herramientas computacionales, de medida y de comunicación cada vez más potentes.

1.2 ¿Qué interés tienen?

Alcanzar el régimen cuántico es un paso natural en la evolución de las tecnologías actuales. En la carrera por crear ordenadores más potentes y más eficientes, llegamos a fabricar chips con cables de tamaño nanométrico, cercanos a un límite donde la electrónica exhibe fenómenos cuánticos, como túnel cuántico y superposición. Igualmente, en la búsqueda de comunicación con señales de potencia cada vez menor, o la creación de sensores más eficientes, encontramos en el fotón, una partícula cuántica, el límite último de eficiencia energética y cantidad de información transferible.

Podemos por tanto afirmar que la ciencia cuántica es un ingrediente necesario de todo desarrollo tecnológico en el futuro cercano. Pero ocurre además que el uso del régimen cuántico proporciona ventajas demostrables en áreas como la seguridad de las

comunicaciones (página 17), la detección de propiedades físicas en nuevos regímenes y con eficiencias incomparables (página 21), o la resolución de problemas computacionalmente duros en investigación e industria (secciones 5 y 6).

1.3 ¿Cómo puede contribuir España?

Aprovechar las oportunidades que ofrece este nuevo campo científico y tecnológico requiere de un esfuerzo coordinado entre investigación fundamental, investigación aplicada e industria, con una participación activa de los diversos sectores donde estas tecnologías pueden tener un impacto en el corto, medio y largo plazo.

Sin embargo, este documento, de origen en el mundo académico y de la investigación, se centra en aquellos aspectos que conciernen a las tres áreas en las que este mundo contribuye: (i) la investigación para descubrir y consolidar esta tecnología, así como sus aplicaciones, (ii) la creación y apoyo a infraestructuras transversales, comunes a investigación e industria, y (iii) la formación de personal investigador y técnico.

Las siguientes páginas describen con detalle cada área de trabajo, introduciendo los objetivos que se persiguen en cada una, el impacto científico-técnico y social que pueden tener, y los retos científicos y oportunidades que podemos aprovechar con el talento investigador en España.

Esta descripción asume también que el esfuerzo por avanzar en tecnologías cuánticas es global y que requiere de colaboración internacional. España debe ser por tanto un actor relevante en iniciativas europeas como el Flagship de Tecnologías Cuánticas y los proyectos de investigación (Acciones FPA, proyectos RIA, proyectos Quanter de colaboración internacional) y de infraestructuras (EuroQCI, EuroHPC, Quantum Chips Act) coordinados por la Comisión Europea.

Sin embargo, al mismo tiempo reconocemos el interés y la necesidad de poner en valor el ecosistema nacional, promoviendo acciones como la creación de programas formativos, la atracción de talento en distintos niveles de la carrera científica, la consolidación de líneas de investigación en cuántica, la creación de infraestructuras y recursos nacionales, la transferencia de conocimiento al sector productivo y la creación de startups de base tecnológica, así como la coordinación entre iniciativas regionales y nacionales para crear un ecosistema sólido, integrado y sinérgico.



2. Este documento

2.1 Origen y motivación

La Red de Información y Tecnologías Cuánticas en España (RITCE) es un grupo de trabajo que engloba a una representación significativa de la comunidad investigadora en tecnologías cuánticas. Activa desde 2010, fecha en la que realizó su primer congreso nacional, se constituye en 2025 como una red estratégica financiada por la Agencia Estatal de Investigación para "elaborar estrategias, hojas de ruta o propuestas de interés estratégico que permitan asesorar a las autoridades políticas"¹. Este documento ha sido redactado con esta finalidad, a través de la colaboración entre miembros de la red y representantes del Grupo Especializado de Información y Tecnologías Cuánticas de la Real Sociedad Española de Física, con contribuciones de investigadores del ecosistema nacional.

Dentro del objetivo global de asesoramiento, perseguimos que este documento cumpla funciones muy concretas:

1. Ofrecer una descripción científicamente rigurosa del campo, cubriendo tanto los pilares de las tecnologías cuánticas como la necesaria contribución de otros segmentos de la investigación y la academia.
2. Representar adecuadamente el esfuerzo y el potencial de investigación, innovación y transferencia tecnológica de la comunidad científica española en todas las áreas.
3. Poner el foco sobre las oportunidades y áreas de inversión prioritarias en la generación del conocimiento, la formación y la creación de un ecosistema sólido.
4. Servir de apoyo y complemento a las políticas y estrategias nacionales y autonómicas, como documento de referencia que informe y que permita a la sociedad comprender la utilidad de esas inversiones.

No es competencia de este documento, por otro lado, dictar los instrumentos o áreas de inversión elegidos por comunidades autónomas o ministerios, ni opinar sobre las necesidades de financiación de sectores como defensa, comunicación o industria. Tampoco pretendemos adoptar una postura de definición sobre los intereses y capacidades de la

¹Redes de Investigación 2024, <https://www.aei.gob.es/convocatorias/buscador-convocatorias/redes-investigacion-2024>

industria española, más allá de ofrecer una visión del potencial de transferencia tecnológica de nuestros grupos de investigación o discutir el número e impacto de las startups que han surgido de ellos.

2.2 Estructura

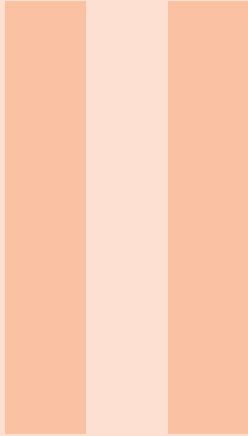
Más allá de esta introducción, este documento se divide en tres partes:

- La primera parte introduce los cuatro pilares tecnológicos (comunicación, sensado / metrología, computación y simulación) reconocidos en los documentos europeos (página 17).
- La segunda parte introduce áreas de investigación *esenciales* para la implementación de esos pilares, como son la teoría de la información cuántica y la algoritmia, la física de materiales y tecnologías de fabricación (página 35).
- La tercera parte discute aspectos relacionados con el ecosistema, como son las acciones de formación de investigadores y técnicos y de divulgación a la sociedad, y las infraestructuras necesarias para el funcionamiento de los distintos pilares (página 49).

El foco de este documento es ofrecer una visión sencilla, con argumentos directos y rigurosos, pero necesariamente simplificados. La lectura de este documento debe completarse con otros informes de decisión como la Strategic Research and Industry Agenda en sus ediciones original y completa de 2030², el conocido Quantum Manifesto, el informe España Cuántica creado por AMETIC en diferentes ediciones, etc.

Se trata en cualquier caso de un documento vivo, editado por RITCE pero *creado por una amplia comunidad científica* y abierto a la sociedad para *contribuciones, precisiones, correcciones y mejoras* que incorporen el progreso en nuestra comprensión de las tecnologías cuánticas y las direcciones que se decidan explorar a nivel autonómico, nacional y europeo.

²<https://qt.eu/publications>



Pilares

3	Comunicación cuántica	17
3.1	Objetivos	17
3.2	Impacto	17
3.3	Retos y oportunidades	18
4	Sensado y metrología cuánticas	21
4.1	Objetivos	21
4.2	Impacto	21
4.3	Retos y oportunidades	22
5	Computación cuántica	25
5.1	Objetivos	25
5.2	Impacto	25
5.3	Retos y oportunidades	26
6	Simulación cuántica	29
6.1	Objetivos	29
6.2	Impacto	29
6.3	Retos y oportunidades	30



3. Comunicación cuántica

3.1 Objetivos

La investigación en comunicación cuántica persigue el diseño de hardware, herramientas y protocolos para **transmitir información codificada en estados cuánticos**, típicamente estados de luz, pero también microondas, fonones y otros medios. El intercambio de estados cuánticos tiene utilidades diferentes en el corto y largo plazo.

En el corto plazo, la transmisión de estados cuánticos permite la **distribución de claves generadas mediante protocolos cuánticos**, lo que en inglés se conoce como *quantum key distribution* o QKD. Mediante fotones individuales, estados entrelazados, o estados coherentes, usando fibra óptica, satélites o espacio libre, es posible conectar dos estaciones para que generen números aleatorios perfectamente correlacionados, a la vez que detectan posibles intrusiones y errores del canal. Los números generados sirven de clave privada y semilla para algoritmos de comunicación segura por otros medios convencionales, como internet, reforzando y complementando otras estrategias y herramientas de seguridad.

En el largo plazo, será posible intercambio robusto de información cuántica entre dispositivos cuánticos. Bien en infraestructuras consolidadas, como el **internet cuántico**, o bien en conexiones punto a punto, será posible tanto conectar ordenadores cuánticos entre sí, como integrar sensores, memorias y repetidores en arquitecturas cuánticas distribuidas, con nuevas posibilidades para captar información, almacenarla y procesarla.

3.2 Impacto

La distribución de clave generada cuánticamente es una tecnología muy atractiva, con demostraciones espectaculares tanto en grandes **infraestructuras de comunicación terrestre** como en enlaces a grandes distancias a través del espacio. En el ámbito terrestre, China cuenta ya con una extensa red nacional de QKD que conecta y da servicio a sus principales ciudades. También resulta especialmente notable la primera demostración de QKD realizada sobre infraestructura comercial —no en fibra oscura, sino en redes de telecomunicaciones estándar—. Este experimento, llevado a cabo en el anillo cuántico de Madrid gracias a la colaboración entre la Universidad Politécnica, Telefónica y Huawei,

muestra el potencial de la comunicación asegurada mediante tecnologías cuánticas para aplicaciones comerciales a gran escala, como la protección de comunicaciones en banca, sanidad, defensa y redes de telecomunicaciones.

También destacan las **aplicaciones en el segmento espacial**. En este ámbito, la transición de comunicaciones por radiofrecuencia a enlaces ópticos punto a punto hace especialmente natural la adopción de tecnologías cuánticas. De este modo, es posible integrar QKD en las comunicaciones entre constelaciones de satélites o desarrollar infraestructuras espaciales que distribuyan clave cuántica hacia la Tierra, reforzando así la seguridad de las comunicaciones terrestres. Aunque China fue pionera en la distribución de clave a distancias planetarias mediante el satélite Micius, Europa ha incorporado QKD como tecnología estratégica dentro de la iniciativa EuroQCI, ahora integrada en el programa IRIS².

A largo plazo, la comunicación cuántica irá mucho más allá de la generación de claves clásicas y permitirá el intercambio de qubits. Estos enlaces puramente cuánticos posibilitarán la **conexión entre ordenadores cuánticos**, facilitando el envío de datos y programas, la computación cuántica distribuida e incluso la computación ciega, en la que un ordenador cuántico ejecuta un programa cifrado cuánticamente por el usuario. Estas y otras aplicaciones —como redes de sensores cuánticos distribuidos— requerirán avances significativos en la transmisión de estados cuánticos a larga distancia, tecnologías aún en desarrollo y que se discuten a continuación.

3.3 Retos y oportunidades

Aunque la distribución de clave cuántica es una de las tecnologías cuánticas más consolidadas, la **integración de QKD en grandes redes de comunicación** —metropolitanas o internacionales, públicas y comerciales— sigue siendo un reto tanto ingenieril como tecnológico. Empresas consolidadas (Toshiba, Huawei, idQuantique) y startups —entre ellas la española LuxQuanta— han desarrollado dispositivos operativos sobre fibra que ya han demostrado su utilidad en prototipos de infraestructuras terrestres de QKD. El siguiente paso consiste en escalar e integrar esta tecnología en entornos seguros de mayor tamaño, empezando por redes dedicadas y prototipos financiados por EuroQCI, que permitan perfeccionar las soluciones actuales, identificar las necesidades industriales y avanzar hacia su estandarización, antes de su adopción comercial.

Un segundo desafío importante es la **comunicación de estados cuánticos a cientos o miles de kilómetros**, distancias mucho mayores que las que un fotón puede recorrer en fibra óptica sin ser absorbido. Una posible solución a este problema es el uso de **satélites y estaciones ópticas terrenas** para transmitir estados cuánticos y distribuir claves a gran escala, con menores pérdidas y distorsión, aunque con un coste tecnológico y económico significativo. Europa, a través de las iniciativas EuroQCI e IRIS² y proyectos como Eagle-1/2 y SAGA, ofrece oportunidades muy prometedoras para explorar enlaces cuánticos entre el espacio y la Tierra, así como entre satélites, ámbitos en los que los grupos de investigación y las empresas españolas pueden aportar contribuciones relevantes.

Otra solución al problema de la distancia es la creación de **repetidores cuánticos**: dispositivos que permiten extender el alcance de transmisión utilizando **memorias cuánticas** y avanzados algoritmos de corrección de errores. La incorporación de repetidores posibilitará transmitir cualquier estado cuántico de la luz, no sólo habilitar QKD a larga

distancia, sino también interconectar dispositivos cuánticos de distinta naturaleza. En el caso de los ordenadores cuánticos (pp. 5), estas conexiones requerirán **transductores cuánticos**, capaces de convertir la información almacenada en átomos, superconductores o puntos cuánticos en señales ópticas o de microondas que puedan distribuirse entre procesadores cuánticos remotos. Tanto esta transmisión como la recepción deberán apoyarse en diseños y protocolos especializados, distintos de los de las redes clásicas, que incorporen sincronización, corrección de errores y otras funciones esenciales para avanzar hacia lo que hoy denominamos el **internet cuántico**.

Comunicación cuántica en España

A nivel nacional, destacamos la creación del Plan Complementario de Comunicación Cuántica, que agrupa proyectos de comunicación cuántica y QKD en diversas entidades de Madrid, Cataluña, Galicia, País Vasco, Castilla y León y Valencia.

El PCC ha servido de núcleo para articular la participación española en el programa EuroQCI, a través del **proyecto EuroQCI-Spain**, que persigue la extensión del **anillo cuántico metropolitano de Madrid** (el mayor del mundo, con 600km de extensión) y la creación de un segundo anillo en Barcelona.

Estas iniciativas terrestres se complementan con la creación de otros anillos, como el liderado por la Universidad de Vigo, y con proyectos destinados a conectar el anillo metropolitano de Madrid mediante estaciones ópticas terrenas —que actuarán como enlace con el satélite de distribución de clave cuántica Eagle-1— o a través de enlaces ópticos aéreos metropolitanos con el Laboratorio de Comunicación Cuántica del CSIC.

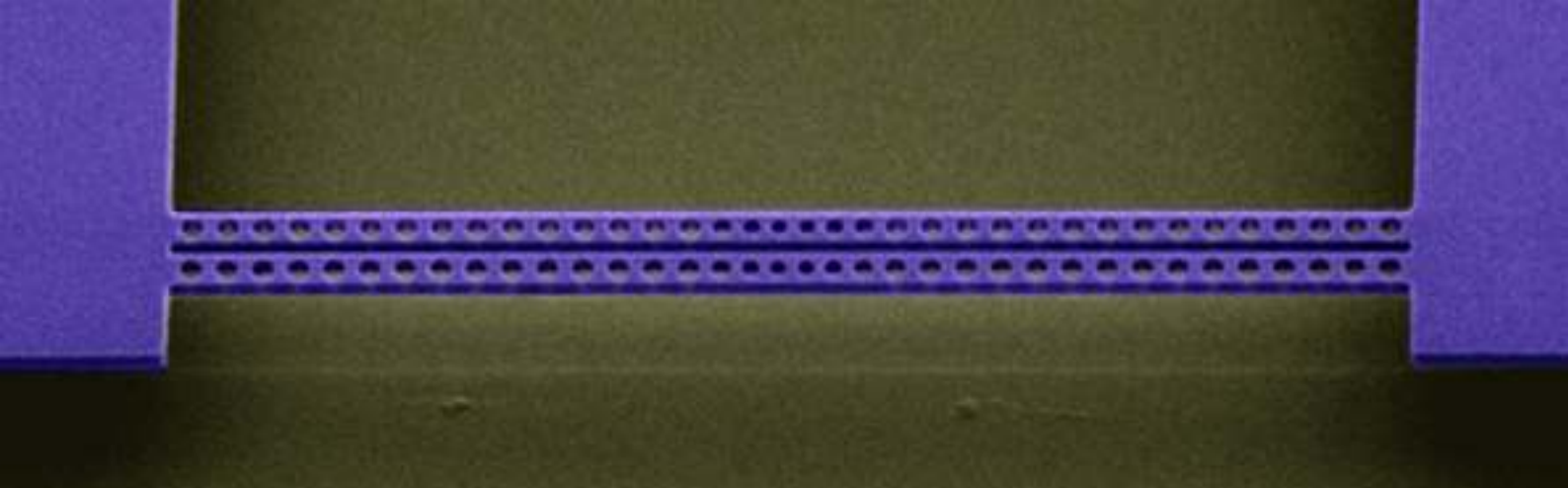
En el segmento espacial, España ha licitado recientemente el desarrollo de dos prototipos de cargas útiles satelitales para la distribución de clave cuántica entre el espacio y la Tierra. Estas cargas están diseñadas para operar en satélites de órbita baja (LEO) y en satélites geoestacionarios.

En España el ICFO lidera la investigación en memorias cuánticas. El grupo del Prof. Riedmatten ha demostrado la **distribución de entrelazamiento entre una memoria cuántica y un enlace óptico a decenas de kilómetros**, en un experimento precursor de lo que en el futuro serán los repetidores cuánticos.

En el ámbito de las memorias cuánticas, el ICFO lidera la investigación nacional. El grupo del Prof. Riedmatten ha demostrado la **distribución de entrelazamiento entre una memoria cuántica y un enlace óptico a decenas de kilómetros**, un experimento precursor de los futuros repetidores cuánticos.

En una línea más exploratoria, el CSIC ha colaborado con grupos del ETHZ y del Walther-Meissner Institut en el diseño de redes cuánticas y en protocolos de computación cuántica distribuida entre ordenadores cuánticos superconductores, en el marco del proyecto **SuperQuLAN**, que ha demostrado recientemente un enlace cuántico de 30 metros en Zúrich.

Cuadro 3.1: Comunicación cuántica en España



4. Sensado y metrología cuánticas

4.1 Objetivos

El sensado y la metrología cuánticas constituyen un campo en rápida expansión que busca aprovechar los principios de la mecánica cuántica para realizar mediciones con una precisión, exactitud y sensibilidad sin precedentes. A diferencia de los sensores clásicos, limitados por el ruido y las incertidumbres propias de la física convencional, los sensores cuánticos pueden explotar fenómenos como la **superposición y el entrelazamiento** para superar estas restricciones y alcanzar niveles de **precisión y eficiencia energética** cercanos a los límites fundamentales impuestos por la física.

La sensórica cuántica también permite medir propiedades físicas en ámbitos hasta hace poco inalcanzables, como espines individuales, efectos magnéticos a nanoescala o campos electromagnéticos en el interior de células. Además, el uso de dispositivos cuánticos abre la puerta al desarrollo de instrumentos más simples o que no requieren calibraciones periódicas, como los gravímetros basados en átomos ultrafríos, cuya precisión deriva directamente de constantes físicas bien conocidas.

El desarrollo de la sensórica cuántica está estrechamente vinculado a la **metrología cuántica** y al establecimiento de **estándares de medición** más precisos y fiables. Aunque los patrones actuales —como el segundo o el metro— ya se basan en constantes físicas fundamentales, las tecnologías cuánticas permiten realizaciones aún más estables y exactas, con precisiones antes impensables, del orden de una parte en 10^{18} segundos. Esto resulta crucial para garantizar la uniformidad y comparabilidad de las mediciones a escala global, un requisito esencial para el comercio, la industria y la investigación científica.

4.2 Impacto

La sensórica y la metrología cuánticas abarcan un amplio abanico de productos y aplicaciones, cada uno con distintos niveles de madurez tecnológica (TRL) y grados de comercialización. Por ello, las oportunidades que ofrece la detección y la metrología cuánticas son muy amplias y alcanzan múltiples sectores con gran impacto social y económico.

En el futuro inmediato, la detección cuántica está llamada a refinar y mejorar las capacidades de las tecnologías de sensado actuales. Estos avances a corto plazo permiten realizar mediciones más precisas y exactas en ámbitos como los **diagnósticos médicos**—donde técnicas de resonancia magnética mejoradas y la detección precisa de biomarcadores empiezan a ser posibles— y los **sistemas de navegación**, donde los relojes cuánticos y los sensores inerciales ofrecen niveles de precisión y fiabilidad sin precedentes.

A medida que las tecnologías de sensado cuántico maduren, se espera que den lugar a **nuevas modalidades de detección**, con capacidades que son fundamentalmente inalcanzables para los sensores clásicos. Un ejemplo destacado es la detección a nanoescala: sensores cuánticos como los centros de vacante de nitrógeno (NV) en diamante permiten obtener imágenes y caracterizar materiales y sistemas biológicos con resolución cercana a la escala atómica. Este nivel de detalle abre posibilidades en campos como la ciencia de materiales, la nanotecnología o el descubrimiento de fármacos. Además, los sensores cuánticos podrían desempeñar un papel esencial en el avance de nuestra comprensión de la física fundamental, al permitir mediciones extremadamente precisas de campos gravitacionales, electromagnéticos y otras cantidades físicas.

A más largo plazo, la detección cuántica está bien posicionada para convertirse en una tecnología transformadora con **aplicaciones generalizadas en numerosas industrias y sectores**. El desarrollo de sensores cuánticos robustos, escalables y asequibles impulsará su integración en dispositivos y sistemas cotidianos, dando lugar a innovaciones antes inimaginables. Esto incluye técnicas de imagen mejoradas cuánticamente para diagnósticos médicos y vehículos autónomos, sistemas de navegación basados en principios cuánticos capaces de ofrecer una precisión sin precedentes, y sensores cuánticos avanzados para la monitorización ambiental y la gestión de recursos.

4.3 Retos y oportunidades

A pesar de su enorme potencial, el sensado y la metrología cuánticas todavía afrontan desafíos significativos. Uno de los principales es el desarrollo de sensores cuánticos que sean lo suficientemente **robustos y prácticos** para funcionar en entornos reales. Muchos de los sensores cuánticos más sensibles requieren condiciones de laboratorio altamente controladas—como temperaturas extremadamente bajas o altos niveles de vacío—, lo que dificulta su implementación fuera de estos entornos especializados.

Aunque existen excepciones a esta fragilidad, como los centros de color en diamante, silicio y otros dispositivos de estado sólido, incluso estas plataformas se enfrentan a retos importantes en lo relativo al control, la detección y la integración en aplicaciones concretas. Este aspecto está estrechamente relacionado con un desafío transversal a todas las tecnologías cuánticas: la fabricación, que se aborda más adelante (ver p. 43).

Otro desafío relevante es la necesidad de desarrollar métodos eficientes para controlar y manipular los estados cuánticos que sustentan la detección cuántica. La manipulación precisa de estos estados es esencial para garantizar la exactitud y la fiabilidad de las mediciones, pero sigue siendo una tarea compleja y costosa. En particular, la mayoría de los sensores actuales aún no aprovecha plenamente **el potencial del entrelazamiento y de los estados cuánticos colectivos** que podría obtenerse mediante la combinación coherente de múltiples sensores.

A pesar de la multiplicidad de retos derivados de la gran diversidad de plataformas

Sensado cuántico en España

En España, uno de los centros con mayor trayectoria en sensado cuántico es el ICFO, donde, bajo el liderazgo del Prof. Mitchell, se han desarrollado —entre otras líneas— sensores de campo magnético basados en celdas de vapor atómico, con aplicaciones de interés en ámbitos como la medicina.

Otra área de investigación destacada es la de los dispositivos optomecánicos. En este campo, el grupo del Dr. Ramos en el IMN y el ICMM ha logrado récords de sensibilidad en la detección de fuerza y temperatura, transfiriendo posteriormente esta tecnología a la *spin-off* Nanological para el desarrollo de herramientas de detección de patógenos (como la sepsis). También es relevante el trabajo del Dr. Molina Terriza en el CFM (San Sebastián), centrado en el desarrollo de acelerómetros para navegación inercial sin GNSS.

Entre los sistemas de sensado más estudiados se encuentran los centros de color en diamante, debido a su funcionamiento a temperatura ambiente y sus propiedades de biocompatibilidad. Este tipo de sensores se investiga en diversos centros españoles, entre ellos la Universidad de Murcia, la Universidad Carlos III de Madrid y Arquimea Research.

En el País Vasco, y en particular en Bizkaia, se ha creado un polo de sensórica cuántica vinculado a los nuevos laboratorios de “Sensórica Cuántica Aplicada” del EHU Quantum Center y de “Sensórica Cuántica basada en Centros de Nitrógeno” de TECNALIA —donde ya se están produciendo los primeros diamantes para el desarrollo de sensores—. Ambos laboratorios compartirán próximamente espacio en el Edificio María Goyri del campus de la UPV/EHU en Leioa. Este polo está además conectado con la actividad de diversas *spin-offs* y empresas privadas que ya están desarrollando productos basados en sensores cuánticos. Cabe destacar asimismo la intensa actividad en sensórica cuántica en San Sebastián, especialmente en el CFM.

Cuadro 4.1: Sensado cuántico en España

—centros de color, optomecánica, superconductores, fotodetectores, entre otras— y de aplicaciones —biomedicina, navegación, imagen y radar, gravimetría...—, el sensado y la metrología cuánticas ofrecen mejoras significativas en **tamaño, peso y potencia**, junto con niveles de precisión que hasta hace poco resultaban inalcanzables.

Los sensores cuánticos constituyen además una de las áreas con mayor **potencial de transferencia tecnológica** dentro del conjunto de tecnologías cuánticas. Son, en general, los dispositivos de hardware cuántico con menores **costes de fabricación** y de despliegue, además de ofrecer una amplia variedad de mercados potenciales. Esta situación crea oportunidades muy atractivas para la colaboración público–privada, la creación de startups y la generación de propiedad intelectual en el entorno académico, oportunidades que aún no han sido plenamente aprovechadas en España ni en el resto del mundo.



5. Computación cuántica

5.1 Objetivos

La computación cuántica persigue la creación de **ordenadores cuánticos de propósito general** capaces de procesar información codificada en “qubits” o **bits cuánticos**. Mediante operaciones elementales (puertas cuánticas), combinadas en algoritmos que explotan fenómenos como la superposición, el entrelazamiento y la interferencia cuántica, estos ordenadores pueden resolver determinados problemas computacionalmente complejos con **ventajas cuánticas** —a veces exponenciales— respecto a los mejores superordenadores y algoritmos clásicos basados en bits y lógica booleana.

Se distinguen dos grandes tipos de ordenadores cuánticos. Por un lado, las máquinas actuales, dispositivos imperfectos que operan con escalas intermedias de hasta centenares de qubits —conocidos como *Near-Term Intermediate-Scale Quantum* (NISQ)—. Por otro lado, los ordenadores cuánticos de propósito general tolerantes a fallos (*Fault-Tolerant Quantum Computers*, FTQC), cuya complejidad es todavía tan alta que no han podido construirse. Los ordenadores NISQ ya existen en diversos laboratorios y empresas, pero únicamente permiten realizar cálculos limitados antes de que la decoherencia afecte a las operaciones y degrade los estados cuánticos empleados.

A largo plazo, el objetivo es desarrollar métodos de corrección de errores que permitan codificar la información y **ejecutar operaciones de forma robusta** frente a la decoherencia y los fallos. Los ordenadores cuánticos tolerantes a fallos serán dispositivos de propósito general capaces de ejecutar algoritmos que ofrecerán ventajas cuánticas en tareas como la factorización de grandes números, la resolución de problemas físicos y químicos basados en mecánica cuántica, o la implementación de nuevos algoritmos para problemas de optimización, análisis, simulación y búsquedas eficientes en grandes bases de datos no estructuradas.

5.2 Impacto

El algoritmo cuántico más conocido es el propuesto por Peter Shor en 1994, que permite factorizar números de tamaño arbitrario en un ordenador cuántico de propósito general. Este algoritmo constituye una auténtica revolución, ya que posibilitaría romper los sistemas

de encriptación asimétrica basados en RSA, que hoy utilizamos para comunicarnos de forma aparentemente segura por internet.

Más allá de la factorización, en las últimas tres décadas se han descubierto varias decenas de algoritmos cuánticos¹ centrados en la resolución de **problemas computacionalmente duros** de interés académico, científico e industrial. Estos algoritmos pueden agruparse en tres grandes familias: (i) algoritmos con ventaja exponencial, (ii) algoritmos con ventaja polinomial o algebraica y (iii) algoritmos heurísticos.

En la primera categoría se encuentran las aplicaciones relacionadas con la **simulación de sistemas genuinamente cuánticos**—desde moléculas y nuevos materiales hasta procesos fotoeléctricos o reacciones químicas—, cuya descripción completa no puede realizarse de forma eficiente en un supercomputador clásico. En este ámbito, un ordenador cuántico tolerante a fallos podría imitar la evolución de estos sistemas y acelerar significativamente procesos de investigación fundamental y aplicada en áreas como la catálisis, la farmacia o el diseño de células fotoeléctricas.

Las segundas y terceras categorías incluyen **algoritmos de interés industrial**, que van desde problemas de optimización combinatoria—como el problema del viajante o la optimización logística— hasta la simulación de ecuaciones diferenciales o distribuciones de probabilidad relevantes en finanzas y análisis de riesgo. Las propuestas abarcan tanto algoritmos diseñados para ordenadores FTQC, con ventajas polinomiales o superpolinomiales, como métodos variacionales y de aprendizaje automático desarrollados para hardware NISQ. Estos últimos son heurísticos, por lo que su eficiencia real resulta difícil de caracterizar.

La computación cuántica tiene, a largo plazo, un impacto potencial muy transversal, con posibles aplicaciones en investigación fundamental y aplicada, química, farmacia, energía, finanzas e ingeniería, entre otros ámbitos con **problemas complejos que no requieren grandes cantidades de datos**. Sin embargo, este impacto dependerá de la identificación de algoritmos con ventajas verdaderamente superpolinomiales que compensen los importantes sobrecostes asociados al uso de hardware cuántico altamente propenso a errores.

5.3 Retos y oportunidades

El principal reto del campo en el corto plazo es la demostración de **ventajas cuánticas** en problemas de utilidad general. Esto implica resolver un problema de forma mucho más eficiente que cualquier ordenador convencional, asegurando que dicho problema no es de naturaleza académica, sino que tiene un interés científico o tecnológico reconocido. Este reto es particularmente difícil, tanto por el tamaño y calidad limitado de los ordenadores NISQ existentes, como porque nuestro conocimiento de la computación cuántica ha contribuido mejoras sustanciales en los algoritmos clásicos de inspiración cuántica.

El principal reto del campo en el largo plazo es crear **procesadores cuánticos tolerantes a fallos**, incorporando códigos de corrección de errores que permitan, mediante la operación sobre “qubits lógicos” protegidos, realizar computaciones de tamaño arbitrario por tiempos ilimitados, sin pérdida de decoherencia o errores. Este reto implica otros en hardware, como son la búsqueda y fabricación de mejores qubits, mejoras en las operaciones y medidas cuánticas, el escalado de los procesadores cuánticos a miles o millones

¹“Quantum Algorithm Zoo”, <https://quantumalgorithmzoo.org>

de qubits. También implica obvios retos en software, como son el desarrollo de códigos cuánticos de corrección error más eficientes y un firmware para la operación de estos códigos en los niveles de errores que podemos alcanzar en el medio plazo.

Estos dos retos de alto nivel, así como el desarrollo de hardware de computación cuántica en general, se suelen descontar como tareas hercúleas, sólo al alcance de grandes corporaciones (Google, IBM) o proyectos internacionales. Es cierto que la creación de grandes supercomputadores cuánticos es una tarea que se beneficiaría de esfuerzos colaborativos mejor organizados, como el CERN, combinando grandes equipos de ingenieros, expertos en fabricación, con físicos, matemáticos y expertos en computación.

Sin embargo, existen **oportunidades** en el corto y medio plazo, laboratorios individuales pueden de forma competitiva abordar la fabricación de ordenadores con decenas y centenares de qubits y contribuir en estos esfuerzos colaborativos, tanto a la creación de mejores qubits, como a mejoras en la arquitectura y el firmware de los dispositivos. Estas oportunidades mejorarán en el corto plazo con el desarrollo de nuevas *foundries* y líneas pilotos europeas, que permitirán, tanto a laboratorios como a startups (p.ej. Qilimanjaro y Quantum Motion Spain), externalizar la fabricación de nuevos diseños, reduciendo costes y acelerando la búsqueda de nuevas arquitecturas de procesador, más escalables y robustas.

Es igualmente relevante incidir en que no existe aún una plataforma dominante en computación cuántica. Las plataformas de física atómica, por ejemplo, son altamente escalables y controlables, pero son más lentas y pueden perder sus qubits (átomos). Los procesadores cuánticos superconductores, por otro lado, necesitan múltiples líneas de control por cada qubit, lo que dificulta su escalabilidad en términos de dinero, espacio y ruido, pero a la vez ofrecen rápidas velocidades de ejecución. Los qubits de espín en semiconductores son altamente escalables porque utilizan las técnicas de manufactura de la industria de la microelectrónica, pero su desarrollo necesita de esa participación industrial para producir su fabricación a gran escala. Por todo esto es relevante aún **explorar nuevas plataformas** de computación cuántica y diseños alternativos de qubits. Estas propuestas abarcan desde impurezas en materiales de estado sólido, hasta moléculas magnéticas diseñadas químicamente, pasando por qubits de espín en circuitos superconductores y los celebrados qubits topológicos de Majorana. Estas dos últimas plataformas se fundamentan en materiales cuánticos híbridos semiconductor-superconductor, que combinan las ventajas de ambos sistemas para mejorar el rendimiento y la estabilidad de los dispositivos cuánticos.

Fabricación de ordenadores cuánticos en España

España ha puesto en marcha varias iniciativas de gran envergadura en hardware para computación y simulación cuánticas. La primera, en el marco de la iniciativa *Quantum Spain*, contempla la construcción de un ordenador cuántico superconductor en el BSC, fabricado e instalado por una unión temporal de empresas (UTE) formada por la startup Qilimanjaro Quantum Tech y la multinacional GMV. Esta UTE emplea proveedores europeos de componentes cuánticos, entre ellos QuantWare, IQM, QBlox o Leiden Cryogenics.

Además de esta infraestructura, la Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial ha financiado la construcción en Oviedo (CINN-CSIC) de un ordenador cuántico digital basado en átomos de Rydberg. Este procesador contará con más de 200 qubits y una arquitectura reconfigurable.

Por último, dentro de la iniciativa EuroHPC Quantum Computation and Simulation, España alojará un optimizador cuántico o *quantum annealer* basado en qubits superconductores. Este dispositivo de simulación y optimización será fabricado por otra UTE formada por Qilimanjaro Quantum Tech y DoITNow!. De nuevo, contará con componentes 100 % europeos y estará disponible desde el BSC para usuarios de toda la Unión Europea.

Además de estos esfuerzos de fabricación e integración, en España se investiga activamente en el diseño de qubits superconductores, tanto a nivel experimental (IFAE, Qilimanjaro) como teórico (IFF, NQuire). También se desarrollan qubits de espín basados en tecnología industrial de semiconductores (CIC nanoGUNE, Quantum Motion Spain) y se exploran nuevas arquitecturas para computación cuántica.

En este contexto, pueden destacarse algunos logros recientes, como las demostraciones basadas en moléculas magnéticas acopladas a circuitos superconductores (laboratorios del Prof. Fernando Luis y la Dra. Pepa Martínez en el INMA e ICMAB), así como avances en materiales cuánticos híbridos. Entre estos últimos figura la reciente demostración experimental de un qubit híbrido semiconductor-superconductor de tipo transmon en régimen de acoplo fuerte (Laboratorio de Transporte Cuántico, Unidad Asociada IFIMAC-UAM/ICMM-CSIC; Prof. Eduardo Lee y Prof. Ramón Aguado).

Cuadro 5.1: Fabricación de ordenadores cuánticos en España

6. Simulación cuántica

6.1 Objetivos

La simulación cuántica es la determinación de propiedades físicas de sistemas cuánticos, tales como moléculas y materiales, o de modelos cuánticos generados por la física teórica, como teorías de campos *gauge*, a través de su estudio en **sistemas cuánticos experimentales diseñados** para que experimenten una dinámica similar. El simulador cuántico aborda de forma natural el principal obstáculo para el estudio de sistemas cuánticos complejos: el enorme tamaño del espacio de estados y la imposibilidad de tratarlos eficientemente en ordenadores clásicos cuando el número de partículas supera unas pocas decenas (20–30).

Existen dos estrategias principales de simulación cuántica. La **simulación digital** utiliza un ordenador cuántico y algoritmos basados en puertas para emular el sistema de interés, pero su aplicación práctica resulta limitada en ausencia de ordenadores cuánticos tolerantes a fallos. La **simulación analógica**, más sencilla, persigue el co-diseño del simulador, adaptando experimentos existentes o nuevos, mediante controles adaptados que “convencen” a la máquina cuántica para que imite al sistema o problema físico deseado.

El paradigma de la simulación analógica contrasta con la digital por no *requerir* de tareas como la corrección de errores y permitir reutilizar múltiples plataformas—p.ej. átomos ultrafríos, iones atrapados, circuitos superconductores—en condiciones menos restrictivas de fabricación y operación. Sin embargo, al mismo tiempo, la simulación digital tiene retos propios, como demostrar o **verificar** que el simulador realmente imita la dinámica deseada, o que se pueden **preparar** los estados que deseamos y medir sus propiedades físicas.

6.2 Impacto

La simulación cuántica tiene su origen en la **investigación fundamental**, en particular en la propuesta de Richard Feynman (1981) de utilizar sistemas cuánticos experimentales para simular problemas complejos, como campos y partículas cuánticas. Una de sus principales aplicaciones sigue siendo el estudio de sistemas cuánticos de gran complejidad—desde **moléculas y materiales cuánticos** avanzados hasta modelos de la **física teórica** y

de **materia condensada**—. En este contexto, los simuladores cuánticos se han convertido en herramientas indispensables para mejorar nuestra comprensión de la naturaleza y avanzar en la investigación de frontera en fenómenos como la superconductividad de alta temperatura o los vidrios de espín.

Sin embargo, algunos tipos de simuladores cuánticos presentan también **aplicaciones de interés industrial**. En particular, aquellos diseñados para emular modelos de magnetismo cuántico o redes de espines interactuantes pueden emplearse para resolver problemas sofisticados de optimización combinatoria. En el paradigma conocido como *quantum annealing*, el problema a optimizar —por ejemplo, un modelo 3-SAT, MaxCut o un problema QUBO— se codifica como un conjunto de interacciones entre grados de libertad cuánticos, y se diseña un proceso dinámico que prepara un estado cuántico cuya configuración final representa la solución óptima. Este tipo de aplicaciones compite en relevancia con los algoritmos de optimización desarrollados para ordenadores cuánticos universales.

6.3 Retos y oportunidades

Los simuladores cuánticos constituyen una de las tecnologías cuánticas modernas más avanzadas. Existen simuladores especialmente potentes en todo el mundo —y, en particular, en Europa— basados en tres plataformas fundamentales: átomos ultrafríos y átomos de Rydberg, iones atrapados y qubits superconductores. El principal reto de esta tecnología es ir más allá de su aplicación tradicional al estudio de problemas de ciencia básica y acercarse a problemas de interés industrial. Para que un simulador cuántico resulte científicamente relevante, debe ser capaz de abordar sistemas con decenas o incluso centenares de objetos cuánticos o “qubits”, un objetivo que no todas las plataformas experimentales pueden alcanzar hoy en día.

Los simuladores cuánticos también plantean desafíos científicos importantes en lo relativo al control, la medición y el mantenimiento de la coherencia en sistemas cuánticos complejos. Para que un simulador tenga éxito, debe reproducir el sistema físico de interés con la mayor fidelidad posible. Sin embargo, aún no se comprende completamente cómo afectan los errores de control o la acumulación de procesos incoherentes a medida que los experimentos aumentan en tamaño y complejidad.

Finalmente, al igual que ocurre en la computación cuántica, uno de los retos cruciales en el corto plazo es demostrar de forma inequívoca una **ventaja cuántica** en problemas de relevancia científica o tecnológica. Aunque ya existen indicios de ventaja y utilidad en estudios de termalización y dinámica fuera del equilibrio, es necesario profundizar en estos resultados para convertirlos en demostraciones concluyentes. Esto introduce retos importantes como son la **verificación de los modelos** y de las **dinámicas** simuladas, que deben ser abordados teórica y experimentalmente.

Simulación cuántica en España

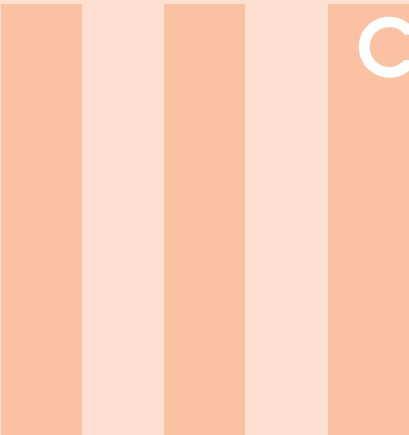
En España, el ICFO ha sido pionero en la simulación cuántica con átomos ultrafríos. La Dra. Tarruell lidera este ámbito de investigación mediante experimentos singulares con átomos neutros, en los que explora tanto la física de gotas cuánticas como fenómenos topológicos.

El grupo del Dr. Forn-Díaz en el IFAE ha encabezado el único proyecto europeo de *quantum annealing*, en el que IFAE, el CSIC y Qilimanjaro desarrollaron qubits superconductores para simular modelos de espín y abordar problemas de optimización cuántica. Actualmente, la *startup* Qilimanjaro continúa esta línea de trabajo y es responsable de la fabricación de un *annealer* para el BSC, cofinanciado por EuroHPC-QCS. Asimismo, el grupo del Dr. Daniel Barredo en el CINN (CSIC, Universidad de Oviedo) desarrolla experimentos de simulación cuántica con átomos de Rydberg.

En el Donostia International Physics Center (DIPC), en el País Vasco, el grupo de la Prof. Francesca Ferlino lleva a cabo simulación cuántica con átomos ultrafríos, en particular gases cuánticos dipolares. La actividad en este campo se está ampliando con la incorporación del Dr. Antonio Rubio Abadal, quien está iniciando un nuevo grupo de átomos ultrafríos en la Universidad de Barcelona. También existen otros experimentos relevantes, como los realizados en el ICFO (por ejemplo, el grupo de Morgan Mitchell) y con trampas de iones en la Universidad de Granada (grupo del Dr. Daniel Rodríguez), aunque estos últimos están más orientados hacia la metrología cuántica. En Santiago de Compostela, el IGFAE está instalando dos laboratorios dedicados a la simulación con iones atrapados y átomos fríos dipolares (liderados por César Cabrera).

Finalmente, España cuenta con un sólido ecosistema teórico de investigadores que han contribuido al desarrollo de los fundamentos de la simulación cuántica, con propuestas de impacto internacional aplicadas a problemas de materia condensada, física molecular y teoría cuántica de campos, entre otros ámbitos.

Cuadro 6.1: Simulación cuántica en España



Ciencia transversal

7 Información cuántica y algoritmia

35

7.1	Objetivos	35
7.2	Impacto	35
7.3	Retos y oportunidades	36

8 Materiales cuánticos 39

8.1	Objetivos	39
8.2	Impacto	39
8.3	Retos y oportunidades	40

9 Fabricación cuántica 43

9.1	Objetivos	43
9.2	Impacto	44
9.3	Retos y oportunidades	44



7. Información cuántica y algoritmia

7.1 Objetivos

En las últimas cuatro décadas, la ciencia cuántica ha avanzado enormemente en la comprensión del mundo cuántico, tanto desde el punto de vista de los estados cuánticos, las superposiciones, el entrelazamiento y las correlaciones cuánticas, como de las oportunidades que éstos ofrecen en la medida, intercambio y procesamiento de la información.

El gran motor de este progreso ha sido la **teoría de la información cuántica**, el marco de trabajo interdisciplinar que, combinando herramientas matemáticas, físicas y de ciencias de la computación, nos permite entender la estructura de los estados cuánticos y las operaciones cuánticas, así como abordar grandes preguntas, como la **capacidad de información** de un dispositivo o canal cuántico, los **límites de precisión** en la medida de propiedades físicas, o las **ventajas computacionales** de ordenadores cuánticos y simuladores cuánticos frente a ordenadores convencionales y algoritmos clásicos.

Estos grandes objetivos persisten en la actualidad, pero se combinan con otras necesidades en el corto plazo, que involucran necesidades inmediatas en el entorno de las aplicaciones cuánticas, como son el desarrollo de **algoritmos cuánticos** que aprovechen las ventajas de las tecnologías actuales y futuras, o la creación de **códigos de corrección de error** y **computación tolerante a fallos** que nos permitan escalar la tecnología a tamaños de mayor utilidad práctica.

7.2 Impacto

La mecánica cuántica, concebida inicialmente para explicar la naturaleza de lo muy pequeño, ha demostrado una sorprendente capacidad para describir fenómenos en sistemas de casi cualquier tamaño: desde el espín de un electrón hasta los huecos y portadores de carga en semiconductores, pasando por átomos, moléculas, fotones o núcleos. Sin embargo, este enorme avance científico se desarrolló durante décadas dejando en segundo plano algunos de los aspectos más exóticos y profundamente no clásicos de la teoría, como la superposición y el entrelazamiento.

Las tecnologías cuánticas buscan precisamente recuperar ese enfoque, situando el

entrelazamiento, la superposición y las operaciones cuánticas en el centro como recursos tecnológicos de gran valor. En este contexto, la teoría de la información cuántica surge como un marco que integra los principios de la mecánica cuántica con herramientas matemáticas, físicas y de ciencias de la computación para describir y comprender estos fenómenos.

Gracias a la teoría de la información cuántica disponemos de un **lenguaje matemático preciso** para caracterizar la información contenida en un sistema cuántico, entender la estructura de sus correlaciones y del entrelazamiento, demostrar por qué estas correlaciones no pueden reproducirse mediante procedimientos clásicos y determinar qué recursos son necesarios para escribir, transformar y leer dicha información.

Sobre estas bases se construye la ciencia de la **computación y la algoritmia cuántica**, que interpreta la computación como la transformación de estados cuánticos. La teoría de la información cuántica ha permitido identificar las operaciones elementales que pueden combinarse para realizar cualquier cálculo y comprender cómo dichas operaciones aparecen en la naturaleza. La colaboración entre esta teoría y las ciencias de la computación ha posibilitado el descubrimiento de los primeros **algoritmos cuánticos útiles**, así como la demostración de que presentan **ventajas computacionales** frente a cualquier enfoque clásico. Esta misma colaboración es, además, la base de la **teoría de la corrección de errores cuánticos**, una herramienta imprescindible para escalar las tecnologías cuánticas hasta tamaños que resulten realmente útiles en la práctica.

7.3 Retos y oportunidades

El estudio de la estructura de los estados entrelazados y la naturaleza de sus correlaciones ha tenido un impacto profundo en la **investigación fundamental**. Ha aportado nuevas perspectivas sobre nuestra comprensión de los estados de la materia, las transiciones de fase cuánticas, la influencia de la topología y, más recientemente, incluso sobre la estructura del espacio-tiempo y los agujeros negros. Estas líneas de investigación representan hoy la frontera del conocimiento en materia condensada, física teórica y otras áreas.

La teoría de la información cuántica no solo se ha convertido en la *lingua franca* de numerosas disciplinas, sino que el estudio del entrelazamiento y de las correlaciones ha permitido descubrir nuevos algoritmos clásicos para la simulación de estados cuánticos. Entre ellos destacan las **redes de tensores**, que constituyen la base de una nueva generación de métodos clásicos con ventajas prácticas en simulación, análisis numérico y optimización —lo que se conoce como **computación de inspiración cuántica**. Se espera que, en un futuro cercano, estas herramientas encuentren aplicación en ámbitos tan diversos como la ingeniería, el análisis de riesgos o las finanzas.

No obstante, es importante subrayar que la computación de inspiración cuántica no podrá superar a un ordenador cuántico en todas las tareas que este puede realizar. Sabemos que los ordenadores cuánticos pertenecen a una clase de complejidad distinta y pueden abordar ciertos problemas —como la simulación de sistemas cuánticos en química o física de materiales, o la factorización de grandes números— con una eficiencia exponencialmente mayor. Por ello, sigue siendo fundamental **descubrir nuevos algoritmos cuánticos** que amplíen el ámbito de utilidad de estos dispositivos, demostrando ventajas en áreas de interés práctico y avanzando hacia una auténtica programación cuántica, un paradigma aún en construcción.

Finalmente, tal como se ha comentado anteriormente, la creación de ordenadores cuánticos escalables o de dispositivos cuánticos genéricos de gran tamaño exige progresar en la **corrección cuántica de errores** y en el desarrollo de métodos de **computación tolerante a fallos**. Este es un campo que avanza lentamente, pero donde son necesarias nuevas ideas y técnicas que abarquen desde la codificación de la información y la implementación de operaciones cuánticas universales hasta algoritmos sofisticados de detección y corrección de errores en tiempo real.



8. Materiales cuánticos

8.1 Objetivos

Los materiales cuánticos se caracterizan por la gran variedad de fenómenos cuánticos emergentes que presentan y que pueden dar lugar a tecnologías disruptivas en computación y comunicación cuántica, almacenamiento de la información, metrología, sensores, reducción de consumo energético o medicina. La familia de materiales cuánticos es muy extensa, incluyendo materiales topológicos, materiales cuyas propiedades dependen de efectos de interacción fuerte entre electrones y materiales de baja dimensionalidad entre otros.

Entre las propiedades de estos materiales se encuentran nuevos tipos de superconductividad, líquidos cuánticos de espín, efectos cuánticos fraccionarios, estados magnéticos novedosos o múltiples aspectos de entrelazamiento cuánticos entre partículas. Las propiedades de los materiales cuánticos son extremadamente sensibles a pequeños cambios, lo que permite modificarlas mediante campos eléctricos o magnéticos o la aplicación de tensiones. De esta forma se pueden generar corrientes de carga o de espín transmitiendo información, crear bits cuánticos topológicos, cambiar la fase cuántica de una manera controlada o utilizar esta sensibilidad en múltiples detectores.

Conocer la naturaleza y el origen de estas propiedades, así como desarrollar técnicas de preparación de estos materiales, son aspectos fundamentales para poder diseñar materiales con las características más adecuadas a cada aplicación.

8.2 Impacto

Los materiales cuánticos ya han demostrado un potencial disruptivo importante y una capacidad de mejorar las características de dispositivos como los transistores de efecto campo, las memorias no volátiles, los detectores o emisores fotónicos, hasta la emisión del fotón único, o la capacidad de los superconductores de detectar pequeños campos magnéticos o de transmitir altas corriente sin disipación o limitarlas. No obstante, el gran impacto que pueden tener los materiales cuánticos en las tecnologías actuales y futuras está aún por desarrollar.

Muchos materiales modifican sus propiedades al reducir su espesor a una o varias

monocapas. Además, se pueden fabricar “ad infinitum” nuevos materiales apilando de forma selectiva diferentes materiales bidimensionales (magnéticos, superconductores, semiconductores, metales) con propiedades emergentes ausentes en las capas individuales. En 2018 se demostró que al hacer una rotación relativa de 1.1° (ángulo mágico) en la bicapa de grafeno sus propiedades cambian de forma radical. Este descubrimiento demostró que es posible diseñar materiales seleccionando cómo se apilan las capas, y ha generado un nuevo campo de investigación, la twistrónica y los materiales moiré, que avanza muy rápidamente. En pocos años se ha extendido a otros materiales como los dicalcogenuros de metales de transición, materiales magnéticos, y más recientemente a óxidos. Esto ha permitido descubrir estados cuánticos nuevos, algunos predichos hace años y no observados anteriormente en ningún material y otros que ni siquiera se habían propuesto, y ya han surgido desarrollos tecnológicos como el microscopio rotador cuántico, QTM por sus siglas en inglés, que ha permitido observar efectos que no se habían podido medir con otras técnicas experimentales.

Los materiales topológicos también abren nuevas vías para las tecnologías cuánticas. Como ejemplo, los aislantes topológicos poseen estados en la superficie que transmiten la corriente sin disipación. Los semimetales de Weyl tienen prometedoras aplicaciones en conducción de baja disipación, detección de campos magnéticos o termoelectricidad. Los superconductores topológicos, de carácter intrínseco o creados combinando varios materiales, son la base en la que se desarrollan los bits cuánticos topológicos, con protección topológica frente a la decoherencia.

La importancia de las fuertes correlaciones en los óxidos, los superconductores de hierro, materiales con tierras raras o algunos materiales orgánicos, entre otros, les confiere propiedades cuánticas no convencionales, de gran interés y complejidad, con múltiples aplicaciones. Nuevas familias de superconductores, como los óxidos de níquel, siguen descubriéndose. Además, el avance en la última década en superconductores basados en hidrógeno, podría ayudar a encontrar un superconductor a alta temperatura y presión ambiente, incluso dentro de la familia de los superconductores convencionales.

A un nivel más general, los materiales cuánticos permiten explotar diferentes grados de libertad del sistema en sus variantes de espintrónica, valleytrónica, magnónica o fonónica, entre otras, para controlar o medir la respuesta de dispositivos.

Junto a los desarrollos tecnológicos, el impacto científico del descubrimiento de nuevos materiales cuánticos es innegable y fomenta el desarrollo de nuevas técnicas experimentales y la investigación teórica y computacional más allá de las fronteras del conocimiento, con avances tanto conceptuales como metodológicos.

8.3 Retos y oportunidades

La aplicabilidad de los materiales cuánticos estará en gran medida determinada por la capacidad de fabricarlos, integrarlos en los dispositivos y modificar su respuesta in-situ, y por la disponibilidad, coste y sostenibilidad de sus componentes. En la preparación de los materiales, uno de los retos consiste en la fabricación controlada y escalable de materiales cuánticos funcionales, cuyas propiedades sean resilientes a pequeñas variaciones de la estructura cristalina, y en algunos casos incluso a efectos de temperatura y decoherencia cuántica. La fabricación por deposición química de vapor ha permitido el crecimiento de obleas de grafeno que varias empresas en Europa están llevando al mercado. También

Materiales cuánticos en España

El ecosistema español tiene una actividad científica importante en el ámbito de los materiales cuánticos, tanto a nivel experimental como teórico y computacional. Los centros con competencias específicas se encuentran fundamentalmente en la Comunidad de Madrid (ICMM-CSIC, IFIMAC, IMDEA-nanociencia, UCM), el País Vasco (DIPC, CFM-CSIC, CIC-Nanogune, UPV-EHU) y Catalunya (ICN2, ICFO, ICMAB-CSIC, UAB). También hay grupos activos en la Comunidad Valenciana (ICMOL, UPV), Aragón (INMA-CSIC-UZ), Castilla y León (USAL) o Galicia (USC). Entre las grandes infraestructuras científicas destacan el sincrotrón ALBA y el BSC con su supercomputador Marenosturm y en el ámbito del software el Bilbao Crystallographic Server.

Graphenea en el País Vasco es una de las empresas más avanzadas en crecimiento y comercialización de obleas de grafeno de alta calidad y de grafeno incorporado en dispositivos funcionales, por ejemplo, para la fotónica. Durante la “Graphene Flagship” surgieron varias spin-off tales como Inbrain Neuroelectronics o QURV.

La Comisión Europea está actualmente definiendo las futuras líneas de financiación en materiales avanzados innovadores, que incluye materiales cuánticos, a través del programa IAM4EU (www.iam-i.eu) y en torno al cual se está agrupando la comunidad científica española. Otras acciones dentro del “Chip act” y PERTE de Microelectrónica y Semiconductores persiguen desarrollar nuevas infraestructuras y avanzar hacia una industria de chips propia con proyectos como Innofab (liderado por ICN2), la iniciativa Microelectrónica UPM y desarrollos en el CNM-CSIC. Una nueva empresa “Apeiron Intelligence” spin-off de ICN2 y ICREA se enfoca en desarrollar una plataforma de software de IA que permite automatizar y acelerar el diseño, simulación e innovación de nuevos materiales, transformando workflows científicos complejos en procesos accesibles, reproducibles y eficientes para ingenieros.

Cuadro 8.1: Materiales cuánticos en España

se están obteniendo buenos resultados en monocapas de dicalcogenuros de metales de transición. En el ámbito de los materiales moiré ha mejorado la calidad de las muestras y se están descubriendo multitud de estados cuánticos novedosos en moirés basados en multicapas de grafeno sin ángulo de rotación, mucho más homogéneos. Asimismo, existen avances en la fabricación de membranas de óxidos y en la síntesis química de diversos materiales cuánticos. Otros materiales más complejos químicamente como los aislantes topológicos o sistemas híbridos para bits cuánticos siguen necesitando esfuerzos y avances en el crecimiento epitaxial.

La complejidad de los materiales cuánticos requiere de avanzadas técnicas de medida de naturaleza diversa y frecuentemente a temperaturas criogénicas. No siempre es posible utilizar algunas de estas técnicas en un determinado material. Nuevos desarrollos en el ámbito de la interacción de la luz con la materia abren la puerta tanto a detectar los estados cuánticos como a modificarlos. El interés científico se está redirigiendo a materiales que combinan dos o más de los pilares que caracterizan a los materiales cuánticos: fuertes correlaciones, topología, superconductividad y baja dimensionalidad. La

geometría cuántica ha emergido recientemente como un concepto más allá de la topología que determina múltiples propiedades del sistema. El uso de la inteligencia artificial y nuevos desarrollos computacionales está facilitando la simulación de propiedades físicas de los materiales cuánticos y el descubrimiento de nuevos materiales.



9. Fabricación cuántica

9.1 Objetivos

La fabricación cuántica abarca los métodos y técnicas necesarios para **producir los componentes fundamentales** de los sistemas cuánticos, muchos de ellos basados en dispositivos de estado sólido. Como estas tecnologías manipulan objetos cuánticos individuales —y, por tanto, estructuras de dimensiones prácticamente atómicas—, la fabricación cuántica exige niveles de precisión que se sitúan en la frontera, o incluso más allá, del estado del arte en micro/nanoelectrónica y fotónica.

Aunque gran parte de los procesos, equipos y metodologías utilizados proceden de las tecnologías desarrolladas durante décadas para los circuitos integrados, su aplicación a dispositivos cuánticos requiere pasos adicionales. Entre ellos se incluyen la incorporación de elementos específicos (por ejemplo, nanohilos o nanotubos), la reducción extrema de las dimensiones críticas (como ocurre en los electrodos de puerta de los qubits de espín en semiconductores) o el control excepcionalmente preciso de las propiedades de los materiales y de sus interfases.

La fabricación cuántica es transversal a los cuatro pilares de las tecnologías cuánticas:

- **Comunicaciones:** basada en fotónica integrada para guiar, manipular y detectar fotones, así como en nanoelectrónica para la realización de fuentes de un solo fotón.
- **Sensado y metrología:** necesita técnicas de micro y nanofabricación, incluyendo tecnologías basadas en MEMS, nanolitografía avanzada y materiales de muy baja pérdida.
- **Computación:** emplea procesos derivados de la fabricación de semiconductores y de tecnologías superconductoras, esenciales para construir qubits y dispositivos auxiliares como magnetómetros SQUID.

Dada la diversidad de requisitos, resulta útil estructurar las actividades de fabricación cuántica según las tecnologías en las que se fundamentan. Por ello se definen diversas **plataformas de fabricación**, siendo las principales las basadas en semiconductores, superconductores, fotónica y diamante. Estas plataformas sirven de referencia para el diseño de plantas piloto en el marco del *Chips Act* y otras iniciativas europeas dirigidas a reforzar la capacidad industrial en tecnologías cuánticas.

9.2 Impacto

El impacto de la fabricación cuántica presenta una doble vertiente: por un lado, proporciona soporte directo a las actividades de investigación y, por otro, posibilita la creación de líneas piloto para la producción de prototipos con potencial industrial.

Dado que las tecnologías cuánticas aún se encuentran en una fase incipiente, la investigación experimental requiere disponer de la capacidad de fabricar dispositivos con rapidez, flexibilidad y un alto grado de personalización. Contar con infraestructura de fabricación permite a los grupos de investigación explorar nuevos conceptos y técnicas con independencia, evitando la dependencia de instituciones externas o de largos ciclos de fabricación en centros internacionales.

En el ámbito industrial, la industria cuántica —impulsada especialmente por jóvenes *startups* surgidas de grupos de investigación de excelencia— constituye el primer paso hacia la soberanía europea en tecnologías cuánticas. Sin embargo, la demostración de un prototipo avanzado está muy lejos de convertirlo en un producto comercial sólido. El éxito de estas *startups* y de las pymes depende en gran medida de su capacidad para transformar prototipos en líneas piloto y, posteriormente, en producción estable.

El pilotaje es una fase crítica que exige tiempo, recursos humanos especializados e inversiones significativas en infraestructura para desarrollar hardware. Estos elevados costes representan una barrera importante para que *startups* y pymes entren en el competitivo mercado de tecnologías cuánticas con la antelación necesaria. Esta situación limita la competitividad industrial y retrasa el tiempo de llegada al mercado de la innovación cuántica.

9.3 Retos y oportunidades

Las tecnologías de fabricación cuántica todavía afrontan desafíos significativos para satisfacer las necesidades de las distintas aplicaciones. Entre los más importantes se encuentran la **precisión y resolución**, dado que el tamaño de los elementos críticos suele ser menor que el alcanzado por el estado del arte; el **escalado**, es decir, la capacidad de fabricar un número suficiente de dispositivos en tiempos razonables; y la **variabilidad**, puesto que incluso dispositivos nominalmente idénticos presentan diferencias en sus propiedades, lo que dificulta la operación de sistemas complejos como los procesadores cuánticos.

La creación de infraestructuras de fabricación cuántica debe apoyarse en la experiencia acumulada en la fabricación de dispositivos clásicos. Casi todos los métodos empleados son comunes a las disciplinas tradicionales, aunque requieren un grado de control más estricto. Por ello, al plantear nuevas instalaciones es necesario considerar no solo los costes económicos, sino también la disponibilidad de personal técnico cualificado. En general, resulta más eficiente **reforzar infraestructuras existentes** que crear instalaciones completamente nuevas.

La fabricación cuántica debe atender dos vertientes complementarias:

1. **Fabricación para grupos de investigación experimental.** Se requieren infraestructuras de acceso abierto, con equipos no excesivamente complejos, procedimientos ágiles y tiempos de respuesta cortos. Estos entornos deben permitir la fabricación rápida de dispositivos prototipo, aunque el número de procesos encadenados deba

Fabricación cuántica en España

Las capacidades de fabricación cuántica en España se encuentran repartidas en diversas infraestructuras, con un papel destacado del CSIC. Destaca la Sala Blanca del Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM, CSIC), nodo de la ICTS MICRONANOFABS, que dispone de un rango completo de equipos y procesos para la fabricación de dispositivos, basados principalmente en silicio y materiales afines. Participa en diversas líneas piloto europeas, en particular en el consorcio SPINs para el desarrollo de una línea piloto europea de dispositivos semiconductores cuánticos, así como en el proyecto europeo Qu-Pilot (www.qu-pilot.eu) cuyo objetivo es establecer líneas de fabricación de componentes cuánticos para pequeñas y medianas empresas. Actualmente, se está remodelando el área de nanolitografía de la sala blanca para acoger un equipo de litografía por haz de electrones de alto voltaje, financiado por el plan de comunicaciones cuánticas. El IMB-CNM produce proyectos multi-objeto para fotónica integrada, con aplicaciones para comunicaciones cuánticas, está estableciendo una línea de fabricación de dispositivos cuánticos basados en procesos de la tecnología CMOS que dispone, y da servicio a otros grupos de investigación para otros tipos de materiales (superconductores). En el Instituto de Micro y Nano Tecnología (CSIC) junto con la spin-off g2-Zero, se dispone de la capacidad de fabricación de fuentes de un solo fotón. En el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM-CSIC) se investiga en el crecimiento de nanohilos de semiconductores III-V. En el Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA) se acaba de instalar un microscopio de iones focalizados de Helio que se va a dedicar, de manera preferente, a la fabricación de componentes cuánticos. Más allá del CSIC, existen capacidades repartidas por toda la geografía. Muchas de ellas están integradas en la red nanolito (nanolito.unizar.es).

Cuadro 9.1: Fabricación cuántica en España

mantenerse limitado para garantizar la estabilidad y repetibilidad de los resultados.

2. **Fabricación para líneas piloto y soporte industrial.** En este caso se necesitan instalaciones capaces de mantener procesos estables y repetitivos, orientados a la fabricación de estructuras completas y al escalado hacia producción. Estas infraestructuras suelen ofrecer *process design kits* (PDK), que permiten diseñar dispositivos compatibles con tecnologías cerradas y altamente controladas.

IV

Ecosistema

10	Formación	49
10.1	Objetivos	49
10.2	Situación actual	49
10.3	Retos y oportunidades	50
11	Infraestructuras	53
11.1	Objetivos	53
11.2	Impacto	53
11.3	Retos y oportunidades	54



10. Formación

10.1 Objetivos

El desarrollo de las tecnologías cuánticas, desde la investigación básica hasta su aplicación industrial, requiere una **fuerza laboral altamente cualificada**. Para atender esta demanda, resulta esencial establecer programas formativos multidisciplinares que abarquen todos los niveles educativos, **desde el pregrado hasta el máster y el doctorado**. Estos programas deben estar diseñados para integrar tanto conocimientos fundamentales como habilidades aplicadas, y estar alineados con las necesidades del tejido productivo.

Simultáneamente, es necesario ampliar la base social de la pirámide educativa mediante estrategias de “**alfabetización cuántica**” dirigidas tanto al sistema educativo secundario como a la población general. El objetivo es crear un ecosistema inclusivo que despierte vocaciones tempranas, fomente la comprensión crítica y promueva una ciudadanía preparada para convivir con tecnologías disruptivas.

Un aspecto clave de esta formación es la **colaboración estrecha entre la academia y la industria**. El sistema público de educación superior, con su compromiso con la investigación, debe liderar la formación técnica y científica. Esta debe complementarse con competencias en gestión, mercadotecnia y emprendimiento, necesarias para transformar el conocimiento en innovación. La participación activa del sector industrial es fundamental para ajustar los contenidos a las demandas reales del mercado y facilitar la inserción laboral del estudiantado.

10.2 Situación actual

La segunda revolución cuántica está generando un aumento sostenido en la demanda de empleo cualificado. Anticiparse a esta transformación es esencial para que España mantenga su competitividad y contribuya de manera activa a la soberanía tecnológica europea. Una formación adecuada permitirá no solo responder a la demanda, sino también liderar avances científicos y tecnológicos en el ámbito cuántico.

Históricamente, la formación en este campo se ha concentrado en el nivel de doctorado, lo cual no es suficiente para cubrir la creciente necesidad de profesionales. En los últimos

años, han surgido iniciativas valiosas como varios programas de máster interuniversitarios (ver Cuadro 10.3), que cuentan con una participación amplia de la comunidad científica cuántica española. Estos programas están respaldados por profesorado consolidado, lo que garantiza el rigor académico necesario para una disciplina en rápida evolución.

También se han impulsado iniciativas de menor escala, como talleres introductorios en computación cuántica, que permiten acercar los conceptos básicos a públicos más amplios. Estas experiencias han demostrado su utilidad para despertar el interés y facilitar el acceso de nuevos perfiles al ecosistema cuántico.

Por otra parte, contamos ya con herramientas estratégicas que permiten fortalecer esta formación: infraestructuras públicas como el ordenador cuántico de Quantum Spain, instalado en el BSC y ya utilizado con fines docentes; la coordinación entre másteres iniciada por la plataforma **TalentQ**, que busca integrar perfiles diversos; y redes de formación como **DigiQ**, que ofrecen recursos digitales accesibles. Además, la comunidad científica española muestra un fuerte compromiso con la divulgación, y participa en programas piloto como la **iniciativa educativa del Quantum Flagship**, que sientan las bases para una enseñanza innovadora y colaborativa a nivel europeo.

10.3 Retos y oportunidades

Para consolidar una formación sólida, inclusiva y sostenible en tecnologías cuánticas, es imprescindible afrontar varios retos:

- **Diversificación de perfiles:** incorporación eficiente de estudiantes provenientes de disciplinas como matemáticas, informática, ingeniería u otras ciencias aplicadas.
- **Formación continua:** creación de microcredenciales y programas flexibles para la capacitación de profesionales en activo, especialmente en consultoría tecnológica y TIC.
- **Compromiso del profesorado de secundaria:** implicación del profesorado preuniversitario para generar **vocaciones tempranas** e introducir la cuántica con rigor y atractivo.
- **Divulgación rigurosa:** promoción de una comunicación científica accesible y veraz que evite expectativas infundadas en la sociedad.
- **Internacionalización:** la apertura e incorporación a iniciativas internacionales de cooperación e intercambio formativo (QTedu, Quantum Science Digital Academy etc.).

A pesar de estos desafíos, las oportunidades son amplias. España dispone de una comunidad científica sólida, involucrada en formación y divulgación, infraestructuras emergentes y una posición activa en las iniciativas europeas. Aprovechar estas fortalezas permitirá construir un modelo de formación competitivo, que no solo forme profesionales excelentes, sino que también promueva una sociedad informada, innovadora y preparada para liderar en el nuevo paradigma cuántico.

Programas formativos de posgrado

Tipo de formación	Titulación	Instituciones participantes
Máster oficial	Master in Quantum Science and Technology	U. País Vasco
Máster oficial	Máster en Ciencia y Tecnologías de Información Cuántica	U. Santiago de Compostela, U. La Coruña, U. Vigo
Máster oficial	Master's Degree in Quantum Technologies	U. Internacional Menéndez Pelayo-CSIC, U. La Laguna, U. Politécnica de Cartagena, U. Politécnica de Madrid, U. Murcia, U. Valencia, U. Zaragoza; U. Granada, U. Sevilla, U. Vigo
Máster oficial	Master in Quantum Science and Technology	U. Barcelona, U. Autónoma de Barcelona, U. Politécnica de Catalunya, ICFO, BSC-CNS, IFAE, ICN2
Máster oficial	Máster Universitario en Tecnologías e Ingeniería Cuánticas	U. Carlos III
Máster oficial	Máster en Computación Cuántica	UNIR
Máster oficial	Máster en Computación Cuántica	U. Nebrija
Máster propio	Master in Quantum Computing Technology	U. Politécnica de Madrid
Máster oficial	Máster en Información Cuántica y Fotónica	U. Politécnica de Valencia
Posgrado	Computación y Tecnologías Cuánticas	U. Málaga
Posgrado	Postgrado en Ingeniería Cuántica	U. Politécnica de Catalunya

Cuadro 10.1: Programas formativos de posgrado



11. Infraestructuras

11.1 Objetivos

Las tecnologías cuánticas, en su transición desde el laboratorio al sistema productivo, requieren de un **ecosistema de infraestructuras** que acompañen en las tareas de fabricación e integración, despliegue, caracterización y uso, elevando el nivel de madurez desde la concepción y el diseño iniciales, a la utilización en entornos realistas.

En esta progresión de niveles tecnológicos distinguimos tres tipos de infraestructuras. El primer conjunto lo forman las **infraestructuras de fabricación**, responsables desde construir componentes—p.ej. emisores de luz, fotodetectores, chips superconductores, cristales de diamante con impurezas cuánticas—hasta dispositivos completos. El segundo conjunto lo forman las **infraestructuras de testado y caracterización**, que incluyen entornos realistas en los que explorar las capacidades y limitaciones de los dispositivos fabricados, así como su adecuación a futuros estándares. El tercer conjunto lo forman las **infraestructuras de despliegue y utilización**, en las que la tecnología se integra ya como servicio completo, disponible para la adopción progresiva por usuarios académicos y comerciales.

Uno de los principales retos actuales es **desarrollar ecosistemas de infraestructuras** que sean completos, competitivos, accesibles e inclusivos, y que satisfagan la demanda tanto de la investigación como de la industria. La consecución de este objetivo a nivel europeo plantea importantes retos, tanto geopolíticos—p.ej. determinar derechos de acceso a determinadas infraestructuras—como económicos—ventajas productivas asociadas al crecimiento de ecosistemas industriales alrededor de estas infraestructuras.

11.2 Impacto

Diferentes infraestructuras cumplen diferentes propósitos y tienen impactos de distinto calado en la cadena de valor de las tecnologías cuánticas. Comenzando por las **infraestructuras de fabricación**, las tecnologías cuánticas dependen de equipamiento de alta precisión (en ocasiones, incluso a nivel de escala nanométrica) en materiales tan variados como silicio, nitruro de silicio, aluminio, niobio o diamante. Sin estas infraestructuras no es posible avanzar en la investigación, pero además, el nivel de **calidad, eficiencia y**

profesionalización (en particular, la existencia de kits de desarrollo y técnicos expertos que permitan el máximo aprovechamiento de las instalaciones) tiene un impacto decisivo tanto en la competitividad de la investigación, como sobre la factibilidad de construir una industria cuántica.

La **infraestructura de testado y caracterización** pueden ser de dos tipos: entornos estandarizados que comprueben las propiedades del dispositivo a nivel fundamental—p.ej. propiedades físicas y respuesta a controles externos—, o entornos de ejecución que demuestren la utilidad de esos dispositivos bajo condiciones realistas. Si bien es posible suplir estas infraestructuras con trabajo adicional en los grupos de investigación y empresas que integran esta tecnología, la existencia de centros de testado y caracterización dedicados es un recurso importante para optimizar y mejorar los procesos de fabricación y asegurar la adecuación a estándares de calidad de los dispositivos generados.

Por último, las **infraestructuras de despliegue y utilización** son esenciales para la creación de mercado en los diferentes ámbitos de las tecnologías cuánticas, trabajando con los *early adopters* en casos de uso de interés práctico. Ejemplos de estas infraestructuras lo constituyen las redes de acceso a ordenadores cuánticos en centros de supercomputación y las redes ópticas (de fibra y satelitales) para el despliegue de criptografía cuántica. En estos y otros casos, la infraestructura cumple una función de creación de mercado a través de la democratización del acceso, la formación de los usuarios y el despliegue de casos de uso realistas. En el caso de infraestructuras de origen público, es importante destacar el papel de la compra pública incentivadora, por la cual los gobiernos actúan de primeros clientes para un mercado aún inmaduro, sosteniendo una industria emergente y demostrando la utilidad de ésta.

11.3 Retos y oportunidades

Es estratégicamente importante **mantener una capacidad de fabricación de componentes cuánticos en España** que sea a la vez capaz de acelerar el desarrollo de aplicaciones y de adaptarse a cambios tecnológicos en un mercado potencialmente cambiante, donde el peso de la investigación (TRL bajo) y la industria (TRL alto) son igualmente importantes.

La estrategia de la Comisión Europea pasa por crear líneas piloto coordinadas entre estados miembros, que permitan disponer de toda la cadena de valor fabricación-caracterización-test. Estas **líneas piloto profesionalizadas** se especializan según plataforma (semiconductores, superconductores, fotónica, diamante, etc) y aplicación, coordinando **una o más entidades europeas** alrededor de kits de desarrollo y *pipelines* comunes en procesos con un alto rendimiento orientados a desarrollos pre-industriales y comerciales.

De forma paralela a estos esfuerzos orientados a mercado, es crucial mantener una **capacidad de fabricación de prototipos** para grupos de investigación y startups. Debido al carácter exploratorio de estos desarrollos, que no suelen ceñirse a los estrictos parámetros de líneas piloto consolidadas, es estratégico disponer de una **red de salas blancas e infraestructuras de caracterización** donde experimentar nuevos procesos de fabricación y nuevas tecnologías.

Abordar de manera eficiente ambos problemas requiere la elaboración de un **plan de infraestructuras de fabricación** que realice un censo de las capacidades de las ICTS existentes (MICRONANOFABS, ELECMI, Sincrotrón-ALBA, Tecnalia, CIC-Nanogune, etc.) y cómo éstas se pueden combinar o ampliar, para soportar un proceso completo de

fabricación y caracterización en las diferentes plataformas cuánticas. Este plan demostrara a sinergias evidentes entre infraestructuras, revelará carencias que impiden el desarrollo completo de determinadas tecnologías, y la necesidad de recursos (humanos y tecnológicos) para flexibilizar el acceso y aumentar las capacidades de las ICTS existentes.

A **nivel de despliegue**, el mayor reto para la creación de infraestructuras cuánticas de computación y de comunicación cuánticas es el **salto de los laboratorios a los centros de explotación**. Con una tecnología aún en proceso de maduración, no es trivial la construcción de máquinas que puedan ser operadas por personal sin una alta especialización (o no experto experimental). Por otro lado, todavía existe poca experiencia en el despliegue de estos sistemas en entornos fuera del laboratorio, con incógnitas acerca de su estabilidad a largo plazo, los efectos de alteraciones externas (cambios de temperatura, presión y humedad relativa ambiente, vibraciones, campos magnéticos, etc. o de los rayos cósmicos) y el envejecimiento de los componentes.

Pero quizás el reto más relevante es la **creación de demanda** de estas tecnologías. En el ámbito de la comunicación cuántica, la aproximación natural pasa por la creación de **infraestructuras públicas** o gubernamentales que incentiven el desarrollo de la tecnología, su estandarización y, en última instancia, su comoditización. En el ámbito de la computación cuántica, iniciativas como Quantum Spain, Basque Quantum o Biquai, han demostrado que el despliegue de la tecnología debe de ir acompañado con herramientas que generen una demanda real, combinando **iniciativas de formación** con el desarrollo de **casos de uso práctico** e **infraestructuras de acceso de alto nivel** aprovechables por usuarios que no son expertos en la tecnología pero desean explorar aplicaciones de la misma en sus respectivos campos.

Las oportunidades que se presentan son múltiples. Por un lado, el contar con una red propia de computación, comunicaciones, y simulación cuánticas garantiza que nuestros investigadores y empresas puedan acceder a esta tecnología desde sus inicios y puedan así ser partícipes de su desarrollo. Además, se incentiva la creación y expansión de grupos de trabajo y empresas tanto en aplicaciones como en el desarrollo del hardware cuántico. Que España cuente con esta infraestructura, la sitúa en un selecto grupo de países tanto en Europa como en el mundo con esta experiencia, formando parte de la toma de decisiones estratégicas en el campo de las tecnologías cuánticas.

Infraestructuras de fabricación y testado

A nivel Europeo, se ha priorizado la coordinación de infraestructuras de fabricación comunitarias—e.g., salas blancas, *foundries*, RTOs, startups, etc.—en la creación de líneas de fabricación de componentes para pequeñas y medianas empresas. El proyecto europeo del Quantum Flagship, Qu-Pilot^a, ha sido seguido en 2025 por el programa de chips cuánticos^b del CHIPS ACT y CHIPS JU. Este programa reúne a productores y usuarios en 6 macroproyectos colaborativos que tienen como finalidad crear líneas piloto estables y de alta productividad. España participa en los consorcios del CHIPS ACT para las plataformas de semiconductores (IMB-CNM-CSIC, Nanogune, Quantum Motion Spain), diamante (Tecnalia, UPV-EHU, UM), fotónica (ICFO) y átomos neutros (ICFO y CSIC).

Esta participación debe fortalecer vínculos con otras infraestructuras europeas, de mayor envergadura y más evolucionadas. También es una oportunidad para potenciar el establecimiento de líneas piloto en el territorio español que coordinen las capacidades de fabricación del ecosistema de ICTS y salas blancas español, como la red MICRONANOFABS (ver página 45) y suplan importantes carencias de este ecosistema, como las infraestructuras de fabricación de circuitos superconductores. Dado que la tendencia es a integrar la caracterización de bajo nivel en la línea piloto, es importante aprovechar las potentes infraestructuras de microscopía (Sincrotrón-ALBA, ICN2) y de bajas temperaturas (INMA) que ya desarrollan esta labor.

A más alto nivel, la transición hacia caracterización en entornos realistas y la progresión hacia estándares europeos, destacan las infraestructuras creadas en el ámbito de la comunicación cuántica. El anillo cuántico de Madrid, los nuevos despliegues en Barcelona, Galicia y País Vasco, y las futuras estaciones de tierra para QKD satelital (ITEFI-CSIC) conforman un ecosistema singular de interés científico e industrial para el testado de tecnologías de comunicación cuántica.

^a<http://www.qupilot.eu/>

^b<https://www.chips-ju.europa.eu/Chips-2024-QAC-1/>

Cuadro 11.1: Infraestructuras de fabricación y testado

Infraestructuras de computación cuántica

El entorno de la computación cuántica presenta un ecosistema de utilización y servicios más maduro que el resto de tecnologías. A nivel privado, existe una amplia oferta de servicios de computación comerciales por parte de empresas como IBM Quantum, Amazon Braket, IQM Resonance, o Quandela Cloud. La investigación y la industria pueden acceder a estos ordenadores cuánticos en modelos de pago por uso o contratos que aún son relativamente onerosos. Algunas administraciones, han creado programas de innovación que subvencionan estos accesos. La iniciativa BasQ, del Gobierno del País Vasco, por ejemplo, facilita el acceso a la IBM Quantum Network a sus investigadores y ha liderado la adquisición de un ordenador cuántico de 127 qubits recientemente inaugurado^a.

La Red Española de Supercomputación^b (RES) ha apostado por un modelo diferente, incorporado la oferta de ordenadores cuánticos y emuladores de factura europea, que se ofrecen a investigadores de toda España mediante concursos competitivos anuales. En concreto, se ofrece el ordenador cuántico MareNostrum5 Ona (del proyecto Quantum Spain), gestionado por el BSC-CNS, y el ordenador cuántico Qmio, gestionado por el CESGA. En ambos casos son de tecnología cúbits superconductores y cuentan con chips de hasta 35 cúbits. La infraestructura del CESGA se complementará con un segundo computador cuántico superconductor con más cúbits y de mejor calidad durante el segundo semestre de 2026.

Este modelo ha sido reproducido por la iniciativa EuroHPC-Joint Undertaking^c a escala europea. Entre 2025 y 2026, EuroHPC desplegará un total de 9 ordenadores y simuladores cuánticos de manufactura íntegramente europea: dos simuladores basados en átomos neutros, seis ordenadores cuánticos de tecnologías diversas (iones atrapados, superconductores, fotónica y átomos neutros) y dos más basados en semiconductores. Entre estos dispositivos, España alojará un ordenador cuántico analógico ("quantum annealer") basado en tecnología de cúbits superconductores fabricado por la empresa Qilimanjaro Quantum Tech. Este simulador / optimizador cuántico se integrará con el superordenador MareNostrum5 del BSC-CNS y formará parte de la oferta europea de recursos de computación cuántica para la Unión Europea.

^a<https://www.basquequantum.eus/es/ibm>

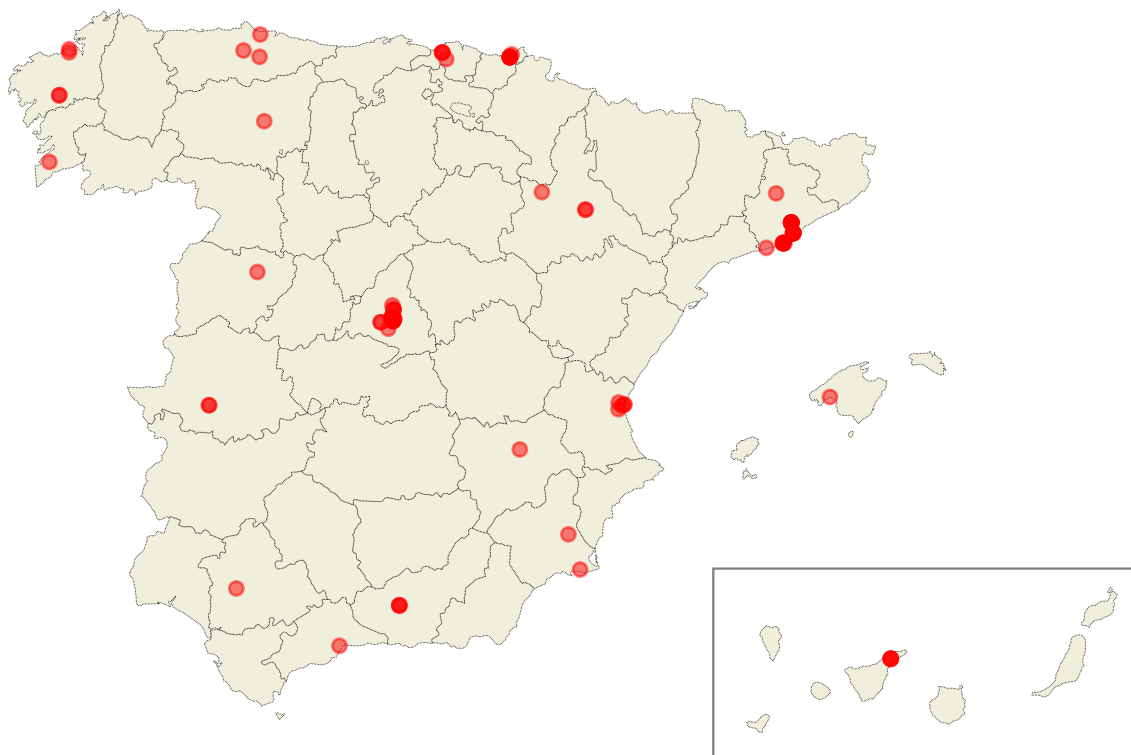
^b<https://www.res.es>

^chttps://www.eurohpc-ju.europa.eu/eurohpc-quantum-computers_en

Cuadro 11.2: Infraestructuras de computación cuántica

A. Grupos de investigación

La Red de Información y Tecnologías Cuánticas ha realizado un censo voluntario de los grupos de investigación y centros tecnológicos con experiencia demostrable de varios años en tecnologías cuánticas. Este censo incluye tanto centros y entidades con una larga historia (CSIC, ICFO, Universidad Complutense, Universidad de Barcelona, etc.) como nuevas incorporaciones de la última década en Tenerife (Arquimea Research), Asturias (CINN, Univ. Oviedo), etc. Este listado está continuamente actualizado en <https://www.cuantica2025.es/investigacion/> y cuenta con 60 entradas.



Cuadro A.1: Grupos de investigación y centros tecnológicos de España.

Fuente: **Cuantica 2025**