

De bits a cúbits: RADIOGRAFÍA DE LA INNOVACIÓN CUÁNTICA



 **Fundación
General CSIC**



 Fondos Europeos



Proyecto **envalor**

Red de Entidades de Enlace de la CM

COPYRIGHT FUNDACIÓN GENERAL CSIC, 2025. TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS



Cofinanciado por
la Unión Europea



Comunidad
de Madrid

ENTIDADES DE ENLACE DE LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA DE LA COMUNIDAD DE MADRID

Actividad del Proyecto «Actuaciones de colaboración público-privada» de Ref.: OI2022-FGCSIC, concedido en la Convocatoria 2022 de ayudas para potenciar la innovación tecnológica e impulsar la transferencia de tecnología al sector productivo comprendido en las prioridades de la Estrategia Regional de Especialización Inteligente (S3) de la Comunidad de Madrid a través de entidades de enlace de la innovación tecnológica, cofinanciado en un 30 % por la Comunidad de Madrid y en otro 20 % por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional en el marco del Programa Operativo FEDER 2021-2027

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. RESUMEN EJECUTIVO	4
2. INTRODUCCIÓN	7
3. CONTEXTO GLOBAL DE LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS	29
4. RADIOGRAFÍA DE LA CAPACIDAD DE I+i EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS	69
5. ANÁLISIS DE PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS	80
6. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN MÁS RELEVANTES	88
7. ANÁLISIS DEL ENTORNO EMPRESARIAL INNOVADOR	94
8. PROSPECTIVA EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: CONSULTA A EXPERTOS	114
9. ANEXO: OTRAS EMPRESAS RELEVANTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS	132
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146



1. RESUMEN EJECUTIVO

2. INTRODUCCIÓN
3. CONTEXTO GLOBAL DE LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
4. RADIOGRAFÍA DE LA CAPACIDAD DE I+D EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
5. ANÁLISIS DE PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
6. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN MÁS RELEVANTES
7. ANÁLISIS DEL ENTORNO EMPRESARIAL INNOVADOR
8. PROSPECTIVA EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: CONSULTA A EXPERTOS
9. ANEXO: OTRAS EMPRESAS RELEVANTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Resumen ejecutivo

Este año 2025 es, según la ONU, el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuántica. La conmemoración coincide con el centenario de una teoría que ha transformado la comprensión de la realidad y ha permitido avances fundamentales en múltiples disciplinas que forman parte de nuestra realidad cotidiana. A día de hoy, la física cuántica sigue impulsando nuevos e inesperados desarrollos que prometen descubrimientos aún más sorprendentes.

La relevancia de esta disciplina ya se ha hecho patente, tanto desde el punto de vista del creciente compromiso institucional con estos desarrollos científicos como tras la popularización de unos términos casi incomprensibles. En diciembre de 2023, impulsado por la Presidencia española del Consejo de la Unión Europea y respaldado por once Estados miembros, se presentó el Pacto Cuántico. Su objetivo es promover el liderazgo científico europeo en aplicaciones con alto impacto económico mediante la inversión en computación cuántica, comunicaciones seguras, sensores y metrología. En este contexto, España ha desarrollado una Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas y ha invertido en la creación de Quantum Spain, una infraestructura de computación cuántica basada en la colaboración público-privada.

Solo un año antes, en 2022, Alain Aspect, John Clauser y Anton Zeilinger fueron galardonados con el Premio Nobel de Física (PNF) por sus experimentos sobre el entrelazamiento cuántico, un fenómeno que desafía las leyes de la física clásica al permitir que dos partículas separadas por grandes distancias actúen como una única entidad. Este trabajo se inscribe en la historia más amplia de la mecánica cuántica, que desde principios del siglo xx ha cambiado radicalmente la manera en que entendemos conceptos como la dualidad onda-partícula, la incertidumbre y la superposición. Durante décadas, el entrelazamiento fue considerado una rareza teórica sin aplicaciones prácticas, una paradoja dentro de una teoría ya de por sí difícil de asimilar. Sin embargo, sus fundamentos han sido confirmados en todos los experimentos, hasta convertirse en una herramienta tecnológica con aplicaciones concretas, como veremos. En 2025, un equipo de la Universidad de Oxford llevó esta idea aún más lejos al demostrar que dos procesadores cuánticos independientes, sin conexión física entre ellos, podían cooperar mediante entrelazamiento para resolver un problema de manera más eficiente que un sistema clásico.



Las tecnologías cuánticas pueden entenderse como la aplicación industrial de los principios de la mecánica cuántica. Muchos de los avances que han definido el mundo moderno, desde los láseres y los microprocesadores digitales hasta las resonancias magnéticas, las tomografías por emisión de positrones, los televisores led, las células solares y los superconductores, se basan en fenómenos cuánticos. Aunque su origen pase desapercibido para la mayoría, la física cuántica ha tenido un impacto inmenso en nuestra vida cotidiana. Hoy emergen nuevas tecnologías que operan con principios aún más alejados de la intuición clásica, pero que también derivan de la física subatómica. En la actualidad, se identifican cuatro áreas clave en este campo: la computación cuántica, la criptografía cuántica, los sensores y la metrología cuánticos, y la simulación cuántica. Aún es difícil prever el alcance total de estos avances, pero su potencial es innegable. Tal vez la revolución no sea inmediata, pero la forma en que procesamos la información, protegemos los datos y exploramos la naturaleza podría transformarse radicalmente en un futuro próximo. Lo que antes parecía confinado a la teoría y a los experimentos de laboratorio está comenzando a integrarse en la tecnología y la economía, con implicaciones que apenas empezamos a comprender. Este informe ofrece una introducción a este campo emergente y se centrará en el ecosistema de la Comunidad de Madrid (CAM), con el objetivo de destacar las innovaciones que están ocurriendo en este contexto y su papel en la construcción del futuro cuántico.

Como adelanto, este informe pone de manifiesto que las tecnologías cuánticas están avanzando rápidamente. Aunque la computación cuántica aún enfrenta desafíos técnicos significativos en términos de corrección de errores y escalabilidad (entre otros), su impacto potencial en sectores como la optimización, la simulación de materiales y la ciberseguridad es innegable. España ha dado pasos importantes con la creación de su programa Quantum Spain y su Estrategia Nacional de Tecnologías Cuánticas, posicionándose como actor clave



en el ecosistema europeo, donde la apuesta por la cooperación transnacional contrasta con los enfoques más centralizados de EE. UU. y China. La CAM tiene los mimbres necesarios para consolidarse como un nodo clave en innovación cuántica gracias al rico ecosistema existente entre universidades, centros de investigación, grandes compañías y *startups*, pero necesita enfatizar en las estrategias de colaboración entre todos estos actores para reforzar un ecosistema en crecimiento.

A medida que la computación cuántica evoluciona, su integración con la inteligencia artificial se perfila como una de las grandes tendencias disruptivas, con aplicaciones en biomedicina, logística y ciberseguridad. La transición de la tecnología cuántica del laboratorio a la industria avanza de forma progresiva y, aunque aún queda mucho camino por recorrer, su validación comercial se está acelerando con inversiones estratégicas, tanto públicas como privadas, marcando el inicio de una nueva era en el desarrollo tecnológico.



1. RESUMEN EJECUTIVO

2. INTRODUCCIÓN

3. CONTEXTO GLOBAL DE LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
4. RADIOGRAFÍA DE LA CAPACIDAD DE I+i EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
5. ANÁLISIS DE PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
6. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN MÁS RELEVANTES
7. ANÁLISIS DEL ENTORNO EMPRESARIAL INNOVADOR
8. PROSPECTIVA EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: CONSULTA A EXPERTOS
9. ANEXO: OTRAS EMPRESAS RELEVANTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2. Introducción

Comprender la física cuántica no es solo un reto intelectual, sino también una prueba de humildad para la ciencia. A lo largo del siglo xx, algunos de los físicos más brillantes de la historia se han enfrentado a sus paradojas, sus límites y su extraordinario poder explicativo, reconociendo que, en muchos casos, ni siquiera ellos lograban entenderla por completo.

Richard Feynman (EE. UU., 1918-1988, PNF en 1965 por sus contribuciones a la electrodinámica cuántica) es considerado uno de los científicos más brillantes de la historia. Incluso siendo un genio especializado en física cuántica, en su obra *El carácter de la ley física* escribió:

«Creo que puedo decir con toda tranquilidad que nadie entiende la mecánica cuántica».

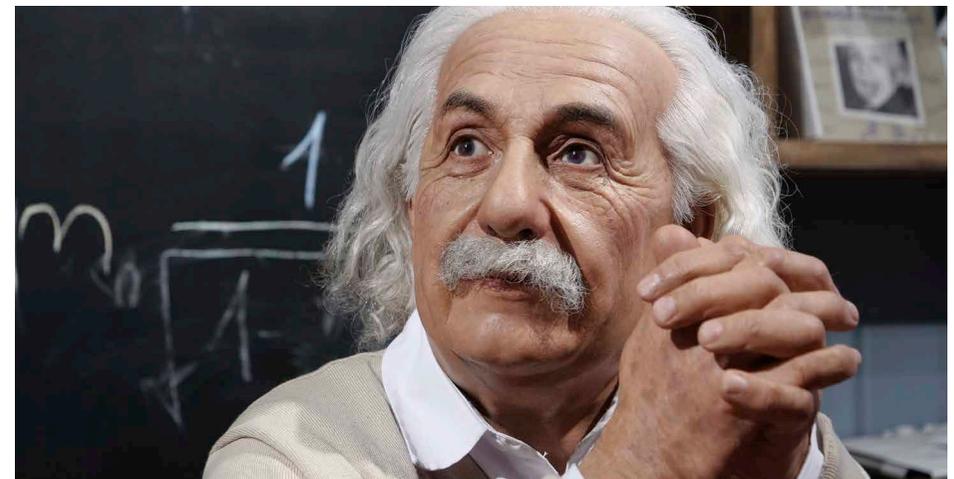
Esta afirmación sugiere que, incluso para los expertos, los principios que rigen esta teoría siguen siendo profundamente enigmáticos. Ni siquiera Feynman, con su impresionante intelecto, podía comprenderla por completo, y de hecho negaba que otros pudieran hacerlo.

Pero, entonces..., ¿cómo puede nacer una teoría física si nadie comprende sus principios? ¿Para qué sirve? Vayamos al origen.

Max Planck (Alemania, 1858-1947, PNF en 1918) es considerado el fundador de la teoría cuántica, pero en realidad, como explicaremos más adelante, no era consciente de las profundas implicaciones de sus propios argumentos. Planck era un físico de mentalidad clásica, quizá revolucionario en contra de su

voluntad, que posiblemente hubiera preferido no tener que asumir conceptos tan antiintuitivos como los de la teoría que ayudó a construir.

Einstein (Alemania, 1879-1955) recibió el PNF en 1921 por su explicación del efecto fotoeléctrico y por sus numerosas contribuciones a la física teórica, aunque curiosamente no por su teoría de la relatividad. Einstein creía que la teoría cuántica era únicamente una herramienta útil para describir la naturaleza a nivel atómico, pero dudaba de que pudiera constituir «una base sólida para toda la física». Era como si pensase: «Vale, es cierto, sus resultados son correctos, pero los principios que la fundamentan no tienen sentido». Para él, la descripción de la realidad debía basarse en predicciones precisas respaldadas por observaciones directas y los físicos cuánticos tenían que trabajar con probabilidades



para predecir eventos. Esta falta de certidumbre le llevó a expresar su célebre frase: «Dios no juega a los dados», con la que, lejos de afirmar la existencia de Dios, pretendía más bien negar la «razonabilidad» de los argumentos probabilísticos típicos de la mecánica cuántica.

Niels Bohr (Dinamarca, 1885-1962, PNF en 1922 por sus contribuciones al modelo atómico, que incluía una visión de las energías cuantizadas) dijo: «No hay un mundo cuántico. Solo hay una descripción cuántica abstracta física. Sería equivocado decir que la labor de la física es descubrir lo que es la naturaleza. La física se ocupa de lo que podemos decir sobre la naturaleza».

En la misma línea de pensamiento, Heisenberg (Alemania, 1901-1976, Premio Nobel en 1932, y padre del principio de indeterminación) dijo: «Tenemos que recordar que lo que observamos no es la naturaleza en sí misma, sino la naturaleza expuesta a nuestro método de interrogación».

¿Es entonces la física cuántica solo un artefacto matemático capaz de ajustarse a la realidad mediante la aplicación de parámetros *ad hoc*, o es —aunque

se escape a nuestra comprensión— una auténtica explicación de los fenómenos subatómicos?

El método científico exige que una teoría no solo explique fenómenos observados, sino que también haga predicciones comprobables mediante experimentos. En este sentido, la mecánica cuántica ha demostrado su validez al describir y anticipar con éxito numerosos fenómenos como la dualidad onda-partícula, la cuantización de los niveles de energía, la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico, el espín del electrón, el efecto túnel, el entrelazamiento cuántico, el principio de incertidumbre, el colapso de la función de onda y los condensados de Bose-Einstein, entre otros.

Por tanto, se hace difícil pensar que la mecánica cuántica sea simplemente un artefacto matemático capaz de justificar todos los fenómenos observados; es mucho más: es también una nueva forma de comprender (o, en ocasiones, de aceptar que no comprendemos del todo) el mundo que nos rodea, especialmente a escala atómica.

Dada la complejidad de la disciplina, este documento pretende ofrecer una visión acerca de cómo los principios de esta disciplina pueden dar lugar a nuevas ideas y tecnologías revolucionarias, impulsando la creación de industrias y mercados emergentes.

Si bien se tendrá en cuenta el contexto internacional, el enfoque principal estará en la Comunidad de Madrid, analizando sus capacidades, investigaciones y avances en el ámbito de la física cuántica y sus aplicaciones tecnológicas. Se estudiará el papel de los centros de investigación, universidades y empresas que lideran la innovación en este campo, así como las oportunidades y desafíos que enfrenta la región para consolidarse como un referente en el ecosistema cuántico global.



2.1. EL ORIGEN DE LA FÍSICA CUÁNTICA

Esta sección explica varios conceptos básicos que marcaron el nacimiento y desarrollo de la física cuántica, desde sus primeros indicios teóricos hasta las ideas que desafiaron la física clásica y sentaron las bases de una nueva manera de entender el mundo subatómico.

En los Agradecimientos de *Historia del tiempo*, Stephen W. Hawking (Inglaterra, 1942-2018) afirmaba que había oído decir que, cada vez que se usase una fórmula matemática en un libro, la mitad de sus lectores desaparecerían. Quizá sea cierto, así que intentaremos evitarlas a toda costa.

Como inciso, quizá sea bueno reflexionar sobre el porqué de que Stephen Hawking, uno de los físicos teóricos más revolucionarios e influyentes de nuestra era, nunca haya recibido el PNF. A pesar de sus contribuciones revolucionarias a la física teórica y a la cosmología, el Nobel solo se otorga a descubrimientos que puedan ser confirmados experimentalmente, y muchas de las teorías de Hawking aún no han sido verificadas de manera concluyente. Sin embargo, como hemos visto en la introducción, la mecánica cuántica está «llena» de Premios Nobel porque las

predicciones que conlleva asumirla se demuestran en cada nuevo experimento que se realiza. Desde las más osadas hasta las más incomprensibles: todas ellas se cumplen. A veces se han necesitado décadas para poder realizar los experimentos adecuados, pero se cumplen.

LA RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO Y LA «CATÁSTROFE ULTRAVIOLETA»

Las estrellas brillan en la noche. Dicho de una manera más prosaica, emiten luz. Si nos preguntasen por qué, la mayor parte de nosotros diríamos que la razón debe ser que están muy calientes. De hecho, las estrellas más calientes son «azules», mientras que las más frías son «rojas», así que la luz que emiten depende claramente de su temperatura.

Siguiendo esa lógica, dos físicos del siglo XIX habían llegado a establecer, a partir de principios de la física clásica, que la cantidad de energía emitida debía ser proporcional a un múltiplo de su temperatura (de hecho, a su temperatura elevada a 4). Y esta ley se cumplía perfectamente para las estrellas. En 1900, lord Rayleigh identificó por primera vez la dependencia de la longitud de onda con la cuarta potencia. Posteriormente, en 1905, Rayleigh y sir James Jeans





desarrollaron una formulación más completa, incluyendo una constante de proporcionalidad y ajustándola con mediciones experimentales para distintas longitudes de onda. Sin embargo, esta teoría predecía una emisión de energía que tendía al infinito a medida que la longitud de onda disminuía, lo que contradecía los resultados experimentales. Este error se conoció como la catástrofe del ultravioleta.

A temperaturas más bajas sucede algo parecido: aunque no lo percibamos a simple vista, todos los cuerpos –incluidos nosotros– emiten radiación térmica. Dicho de otra manera, no emitimos luz, pero emitimos «calor» y por eso las cámaras térmicas pueden detectar personas y objetos en la oscuridad. Para poder medir con precisión esta radiación, era necesario eliminar el efecto de la luz que todos los objetos reflejan de modo natural. Para ello, los físicos idearon un «truco» para poder medir la radiación natural de un cuerpo a baja temperatura. A ese objeto se le denomina «cuerpo negro» (no emite luz).

Al estudiar este fenómeno, Wilhelm Wien formuló la ley de desplazamiento de Wien, que permite predecir cuál era la energía que debería emitir un cuerpo negro a cualquier temperatura según las distintas frecuencias. Pero, aunque servía para ciertas condiciones, seguía siendo incompleta. Una teoría explicaba bien lo que ocurría a bajas frecuencias, otra a altas, pero ninguna servía para todo el rango. Resolver esa contradicción mantuvo ocupados a los físicos durante años. Fue así como Planck, tratando de encontrar una manera de explicar los hechos observados, propuso una solución revolucionaria: planteó que la energía se emite y absorbe únicamente en múltiplos de una cierta cantidad (cuantos). En concreto, expresado matemáticamente, su principio decía que la energía (E) se emite y absorbe en múltiplos de la frecuencia de la radiación multiplicada por un número (h o constante de Planck).

Aunque el propio Planck creía que este razonamiento era un puro formalismo, explicaba perfectamente la radiación del cuerpo negro, y la catástrofe ultravioleta desaparecía. Aun así, enfrentado a su propia hipótesis, a la que no encontraba una «razón de fondo», dijo:

«No creo estar yendo demasiado lejos si expreso la opinión de que, con esta hipótesis, se sientan las bases para la construcción de una teoría que, algún día, estará destinada a iluminar con una nueva luz los rápidos y delicados eventos del mundo molecular».

Planck es considerado el padre de la física cuántica, aunque, a la luz de los historiadores de física, esto podría deberse simplemente a una reconstrucción histórica de los hechos. <https://physicsworld.com/a/max-planck-the-reluctant-revolutionary/>.



LOS ÁTOMOS CUÁNTICOS

En 1904 sir Joseph John Thomson (Inglaterra, 1856-1940) descubrió los electrones, partículas cargadas negativamente, y propuso un modelo de átomo, conocido como el «modelo de las pasas», que suponía que los átomos eran como un pastel, con los electrones incrustados dentro a modo de «pasas». Además, fue capaz de medir la carga de esos electrones. Obtuvo el PNF dos años después, en 1906, por sus contribuciones al estudio de la conductividad eléctrica en los gases.

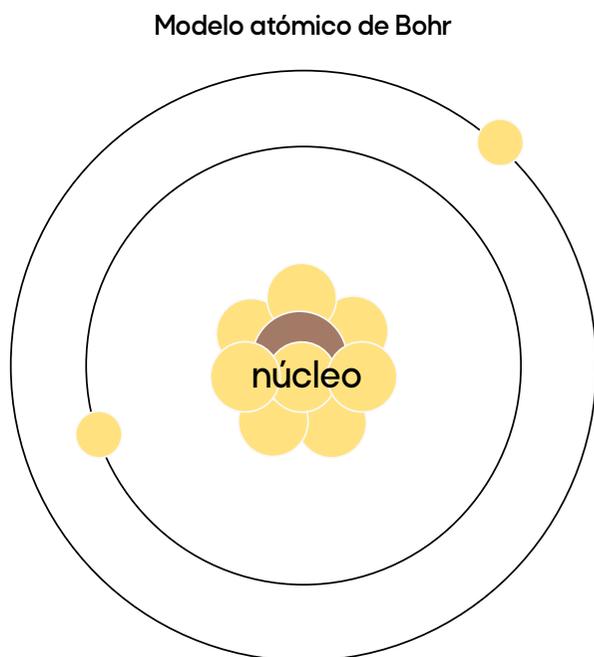


Fig. 2.1. Representación esquemática del modelo atómico de Bohr.

Rutherford (Nueva Zelanda, 1871-1937) propuso que los electrones se encontraban dando vueltas alrededor del núcleo, casi de manera aleatoria, pero no podía explicar por qué no caían en espiral hacia el núcleo. Nunca obtuvo el PNF, pero sí el de Química en 1908 por sus descubrimientos sobre la desintegración de los elementos y la química de las sustancias radiactivas. También descubrió el protón, y propuso que los átomos tienen un núcleo cargado positivamente.

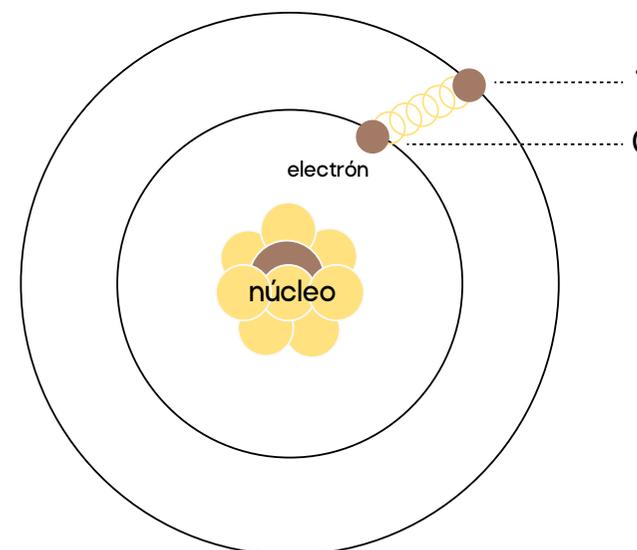


Fig. 2.2. Átomo con dos orbitales simulando el comportamiento de un cúbit.

Rutherford invitó en 1912 a Niels Bohr a unirse a su laboratorio y entre los dos elaboraron un modelo atómico en el que los átomos tienen un núcleo con carga positiva con electrones girando alrededor del núcleo. Este modelo es denominado de Rutherford-Bohr y permite órbitas estables para los electrones, como los planetas alrededor del Sol. Sin embargo, no justificaba fenómenos como los espectros de emisión atómicos.



Bohr continuó depurando este modelo, y propuso un refinamiento en el que se establecía que solo ciertas órbitas son estables. En cierto modo, este es el primer modelo «cuántico», ya que los únicos saltos posibles de los electrones son de una de esas órbitas permitidas a otras, y no pueden adoptar valores intermedios. Cuando un electrón pasa de una órbita inferior a una superior, debe adquirir la energía necesaria para dar ese salto, del mismo modo que si hace el camino inverso tendrá por fuerza que emitir exactamente esa energía. Por tanto, el modelo de Bohr incluía la «cuantización de las órbitas» y permitía explicar los espectros de emisión al mismo tiempo que aportaba una explicación matemática para los niveles de energía.

LA DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO

Louis de Broglie (Francia, 1892-1987), séptimo duque de Broglie, propuso en su tesis doctoral en 1924 que las partículas, como los electrones, tenían propiedades tanto de partículas como de ondas. En realidad, su propuesta implicaba que todo cuerpo con masa lleva asociada una onda.

Además, existía una correlación precisa entre la longitud de onda, la masa y la velocidad de esas partículas. Multiplicando la masa por la velocidad, y dividiendo luego este valor por la longitud de onda, se obtiene la constante de Planck. Esto implica que cuanto mayor es la masa de un cuerpo, menor es su longitud de onda, y viceversa. Sus teorías fueron confirmadas experimentalmente en 1927, y recibió el PNF en 1929. ¡El Nobel por una tesis doctoral!

Tratando de dilucidar si los electrones se comportaban como partículas o como ondas, se retomó un experimento anterior que había demostrado la naturaleza ondulatoria de la luz: el de la doble rendija.

El experimento de la doble rendija, creado por Thomas Young (Reino Unido, 1773-1829) en 1801, demostró la naturaleza ondulatoria de la luz. Sin embargo,

fue reinterpretado en el siglo xx dentro de la mecánica cuántica, y con él se ha podido demostrar la dualidad onda-partícula de la luz y la materia. Consiste en hacer pasar un haz de electrones o fotones a través de una barrera con dos rendijas y observar cómo impactan en una pantalla situada detrás. Cuando no se realiza ninguna medición sobre el trayecto de las partículas, aparece un patrón de interferencia característico de las ondas, como si cada partícula atravesara ambas rendijas a la vez. Sin embargo, si se coloca un detector para observar por qué rendija pasa cada partícula, el patrón de interferencia desaparece y el resultado es el esperado para partículas clásicas, que se acumulan en dos bandas alineadas con las rendijas. Este experimento plantea la paradoja de que la luz y la materia pueden comportarse igualmente como ondas y como partículas, dependiendo de si son observadas o no. La medición misma parece alterar el estado del sistema cuántico, lo que desafía la intuición clásica y es uno de los principios fundamentales de la mecánica cuántica.

El experimento de la doble rendija

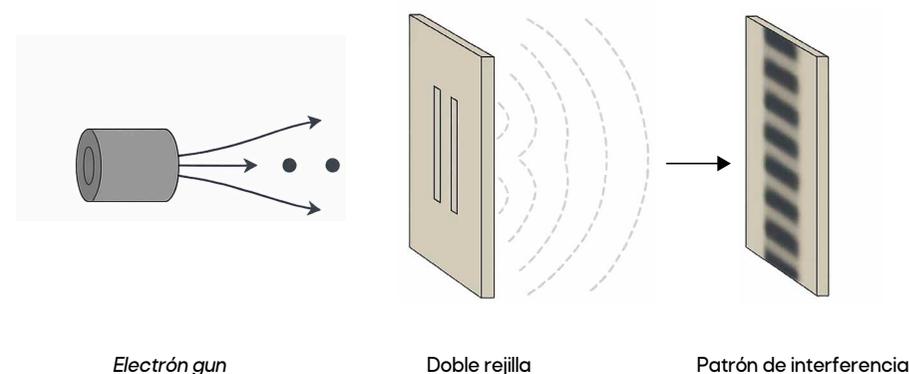


Fig. 2.3. Esquema simplificado del experimento de la doble rendija realizado por Thomas Young.



Buscando una formulación matemática que explicara esta dualidad, Erwin Schrödinger (Austria, 1887-1961, PNF 1933) propuso una ecuación de onda que describiera el movimiento de las partículas. Esta ecuación debía ser consistente con lo predicho por De Broglie y cumplir el principio de conservación de la energía. Su solución –de nuevo con la constante de Planck en el centro de la fórmula– dio lugar a la famosa ecuación de Schrödinger, que describe las órbitas de los electrones como una nube de probabilidad. A partir de ese momento, los sistemas físicos se pueden describir como una ecuación de ondas, lo que representa que, en realidad, para describir el estado de un sistema físico debe usarse una combinación de funciones de onda. Cada función de onda representa un estado posible, y la evolución de un sistema depende de todos ellos.

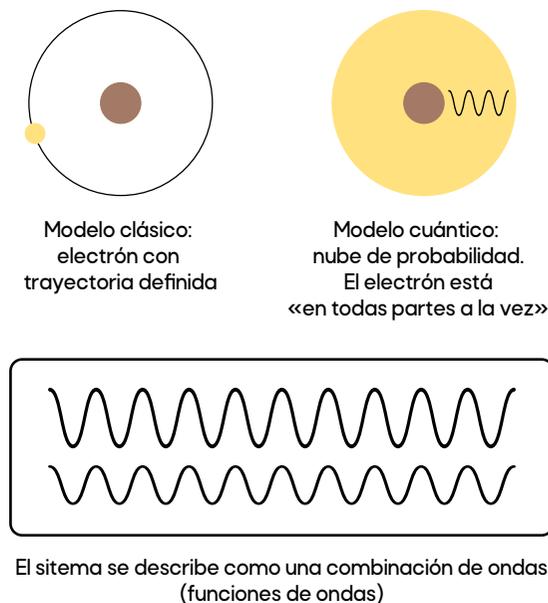


Fig. 2.4. Representación esquemática de la ecuación de Schrödinger.

EL GATO DE SCHRÖDINGER

Existe un famoso ejercicio mental que ha pasado a la historia. Fue creado por Schrödinger en 1935, durante el curso de sus discusiones con Albert Einstein. En él, un gato se encuentra dentro de una caja sellada junto a un matraz con veneno y un dispositivo conectado a una partícula radiactiva. Si la partícula se desintegra, el dispositivo activará la rotura del frasco, liberando el veneno y causando la muerte del gato. Pues, según lo que se denomina la «interpretación de Copenhague» de la mecánica cuántica, hasta que se abra la caja y se observe el estado del sistema, el gato existe en una superposición de estados, estando simultáneamente vivo y muerto. Solo cuando abramos la caja el sistema «colapsará» a uno de los dos estados posibles, y el gato, o bien estará vivo, o bien muerto. Pero mientras no la abramos, estará tanto vivo como muerto, ocupando «todos los estados posibles» con alguna probabilidad. Este principio se denomina «superposición cuántica».

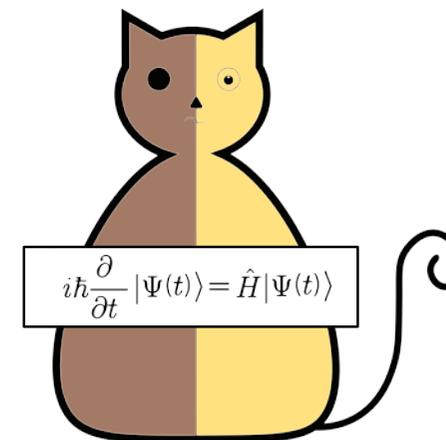


Fig. 2.5. Representación gráfica de la teoría del gato de Schrödinger.



Ya hemos dejado toda lógica atrás. La física cuántica está llena de este tipo de paradojas, que parecen absurdas. Feynman nos había avisado sobre la imposibilidad de entender, pero no olvidemos que todos aquellos fenómenos que predice ocurren inexorablemente.

EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

Como si la superposición no fuera ya suficientemente desconcertante, la mecánica cuántica nos plantea otra limitación fundamental: el principio de incertidumbre, formulado por Werner Heisenberg, según el cual no se puede conocer simultáneamente la velocidad de una partícula y su posición. O, más bien, no se pueden conocer «exactamente». Cuanta mayor precisión tengamos en la determinación de una de las dos (digamos la velocidad), menor será nuestra precisión en la otra (digamos la posición).

El error, la incertidumbre asociada a estas dos medidas de posición y velocidad, se comporta de nuevo de una manera completamente antiintuitiva. Si multiplicamos el error de ambas, el resultado de esta multiplicación será siempre mayor que la mitad de la constante de Planck. De nuevo aparece esa constante. Matemáticamente, esto se expresa mediante una desigualdad:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

(p es el momento lineal, igual a la masa por la velocidad)

donde Δx es la incertidumbre en la posición, Δp es el momento (masa por velocidad), y \hbar es la constante de Planck reducida. Existe una versión equivalente para la energía y el tiempo:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

Estas expresiones matemáticas son en realidad algo que se conoce como inecuaciones (no contienen un signo «igual», sino un «mayor o igual»). Lo importante aquí: la incertidumbre en las medidas es independiente de la configuración experimental y es una consecuencia ineludible de la naturaleza ondulatoria de la materia. No lo entendemos, o no lo entendemos del todo, pero es imposible saltarse esta norma. No se puede, hagamos lo que hagamos, medir estas variables asociadas con una precisión mayor de la que predice el principio de incertidumbre. No es que no sepamos hacerlo, es que es imposible.

2.2. ALGUNAS IMPLICACIONES PRÁCTICAS DE LA FÍSICA CUÁNTICA

Hasta ahora hemos repasado los conceptos fundamentales que definen la mecánica cuántica, desde su nacimiento a comienzos del siglo xx hasta las ideas que desafiaron el sentido común y derribaron las bases de la física clásica.

En esta sección exploraremos tres fenómenos clave que ilustran el poder predictivo –y la extrañeza– de la física cuántica: el efecto túnel, que permite a las partículas atravesar barreras aparentemente infranqueables; el entrelazamiento cuántico, una conexión instantánea entre partículas separadas por grandes distancias; y el vacío cuántico, que, lejos de ser una nada absoluta, está lleno de actividad invisible y fluctuaciones efímeras.

Estos tres fenómenos no solo nos obligan a replantear cómo funciona el universo en sus escalas más pequeñas, sino que también tienen aplicaciones concretas en tecnologías emergentes.



EL EFECTO TÚNEL

Desde el punto de vista de la física clásica, para que un objeto supere un obstáculo, tiene que saltarlo o atravesarlo. Si tiramos una pelota de tenis contra una pared de ladrillos, siempre rebotará y volverá hacia nosotros. Dicho con lenguaje científico: para que una partícula cruce una barrera de energía, su energía cinética debe ser mayor o igual a la altura de la barrera.

Sin embargo, en la mecánica cuántica, las partículas se describen mediante funciones de onda, las cuales no están limitadas a posiciones fijas, sino que tienen cierta probabilidad de extenderse más allá de la barrera.

Cómo puede una partícula atravesar barreras

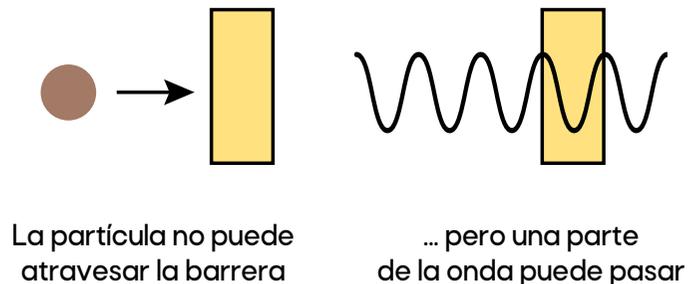


Fig. 2.6. Representación gráfica del efecto túnel en física cuántica.

El efecto túnel ocurre porque la función de onda de la partícula no desaparece completamente al encontrarse con la barrera, sino que se atenúa dentro de ella y puede «reaparecer» al otro lado. Esto significa que la partícula puede cruzar la barrera sin necesidad de tener la energía suficiente para superarla directamente. Por tanto, la probabilidad de que la pelota de tenis «atravesase» la pared de ladrillos no es cero. Es muy pequeña, pero no es cero.



La mayor parte de nosotros pensaríamos que todo esto es imposible, pero hay evidencias múltiples que lo respaldan: el efecto túnel explica cómo las partículas alfa escapan de los núcleos atómicos en los fenómenos radiactivos, o cómo puede tener lugar la fusión nuclear en el interior de las estrellas pese a la repulsión entre núcleos cargados positivamente.

Pero, además, hay muchos dispositivos que usan este principio y sin su existencia no funcionarían: la microscopía de efecto túnel (que permite obtener imágenes a escala atómica), los diodos túnel y, también, ciertos procesos clave de computación cuántica, donde el paso de partículas a través de barreras energéticas permite operaciones imposibles en la computación clásica. Aunque cueste creerlo, en física de partículas, el hecho de que los electrones atraviesen barreras en teoría infranqueables es un fenómeno que no solo ha sido ampliamente demostrado, sino que es una herramienta fundamental utilizada frecuentemente.



ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO

El entrelazamiento cuántico es un fenómeno fundamental de la mecánica cuántica, predicho en 1935 por Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen en su formulación de la paradoja EPR (Einstein, Podolsky, Rosen). El término «entrelazamiento» fue acuñado ese mismo año por Schrödinger, quien lo describió como una de las propiedades más peculiares de la teoría cuántica, aunque en aquel momento su significado físico no se comprendía del todo.

Vamos a intentar entender las consecuencias del entrelazamiento cuántico con un ejemplo. Supongamos que tenemos un conjunto de objetos a los que se ha puesto «en contacto» de alguna manera para que interactúen. A partir de ese momento, su estado cuántico no puede describirse de manera individual, sino que forma parte de un sistema global con una única función de onda que abarca todas las partículas involucradas. Se dice que el sistema ha sido «entrelazado».

Ahora supongamos que dejamos que las partes de ese sistema se alejen, siguiendo cada una su camino. Como siguen pudiendo ser descritas por esa función de onda, nada ha cambiado, y si medimos la posición de una de ellas, podríamos saber la de la otra, aplicando principios como la conservación de la

energía o la del momento lineal. Pero si la posición del primer objeto es probabilística y puede «aparecer» en múltiples lugares, ¿por qué al determinar la posición del objeto 1 el objeto 2 solo puede aparecer en un sitio? Y si medimos ahora primero el objeto 2... su posición es «una probabilidad», pero una vez medido, el objeto 1 se posicionará unívocamente. Se dice que al determinar la posición del objeto 1 todo el sistema ha «colapsado», y el objeto 2 sabe que tiene que aparecer en una posición concreta (pero no en ninguna otra).

En física, este principio establece por ejemplo que, si dos partículas se preparan en un estado cuántico compartido, como un estado de espín total nulo, la medición del espín de una de ellas determinará automáticamente el espín de la otra, aunque estén separadas por grandes distancias (hablaremos del espín más adelante).

En la física de Einstein, nada puede viajar más rápido que la luz. Sin embargo, la partícula 2 «sabe» que la partícula 1 ha sido medida. Y lo «sabe» de manera instantánea. No tiene que «esperar» a que la información le llegue a la velocidad de la luz.

Estas correlaciones llevaron a Einstein a describir el fenómeno como «una acción fantasmal a distancia».



Inicialmente, Einstein y sus colegas usaron esta idea como una crítica: argumentaban que si la mecánica cuántica predecía estas correlaciones instantáneas, debía estar incompleta. Sin embargo, en los años sesenta, el físico John S. Bell formuló las desigualdades de Bell, que demostraban experimentalmente que el entrelazamiento era un fenómeno real y no una paradoja teórica.

Experimentos posteriores realizados a partir de los años ochenta confirmaron las predicciones cuánticas. En 2022, el PNF fue otorgado a Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger por sus experimentos pioneros con fotones entrelazados, que establecieron la violación de las desigualdades de Bell y sentaron las bases de la ciencia de la información cuántica. Estos experimentos confirmaron que las correlaciones predichas por la teoría cuántica no pueden explicarse mediante teorías de variables ocultas locales, refutando así las ideas propuestas por Einstein, Podolsky y Rosen en 1935. Las contribuciones de Aspect, Clauser y Zeilinger han sido fundamentales para el desarrollo de tecnologías emergentes como la computación y la criptografía cuánticas, que prometen revolucionar diversos campos en el futuro.

En sus primeras décadas de estudio, se pensaba que el entrelazamiento era una propiedad exclusivamente del mundo microscópico. Sin embargo, investigaciones recientes han logrado entrelazamiento en sistemas macroscópicos, como en diamantes milimétricos, expandiendo el alcance de este fenómeno.

Hoy sabemos que el entrelazamiento es un recurso clave en tecnologías emergentes, tales como:

- Computación cuántica, donde permite que los cúbits trabajen de forma correlacionada para realizar cálculos con una capacidad de procesamiento muy superior a la clásica.



- Criptografía cuántica, garantizando comunicaciones ultraseguras mediante claves imposibles de interceptar sin ser detectado.
- Teleportación cuántica, utilizada para transferir información cuántica de un punto a otro sin mover partículas físicamente.

Aunque la mecánica cuántica explica el entrelazamiento con gran precisión, algunos científicos han explorado la posibilidad de que este fenómeno pueda revelar la existencia de principios físicos aún desconocidos. El debate sobre si el entrelazamiento es un efecto cuántico fundamental o una evidencia de fenómenos deterministas no observados sigue abierto en la actualidad.



EL VACÍO CUÁNTICO

En la física clásica, el vacío se entiende como la nada absoluta. Sin embargo, según la mecánica cuántica, se define el vacío como la solución de menor energía a un sistema. Es la ley del mínimo esfuerzo, pero aplicada a la naturaleza.

Una de las consecuencias de las predicciones que hace la mecánica cuántica es que existen lo que se denominan vacíos verdaderos y vacíos falsos, y no se les llama falsos porque no existen, sino porque son inestables y se descomponen rápidamente al verdadero, que es (más o menos) el vacío que todos conocemos. Uno de estos posibles vacíos «falsos» contiene la masa de la luna en un centímetro cúbico. Nuevamente, Feynman nos lo había avisado: no lo íbamos a entender.

Según el principio de incertidumbre, la energía y el tiempo no pueden conocerse con precisión absoluta de forma simultánea. Esta relación, expresada como $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$, implica que, durante tiempos muy cortos, pueden surgir fluctuaciones de energía aparentemente «de la nada». Esto significa que incluso en el vacío más absoluto pueden aparecer partículas y antipartículas de manera espontánea y luego desaparecer en un instante. Son las **partículas virtuales**, y aunque no pueden observarse directamente, sus efectos son medibles. Entre ellos podemos mencionar los siguientes:

- El **vacío cuántico** no está vacío, está lleno de estas fluctuaciones impredecibles. Y lo más sorprendente es que estas efímeras apariciones tienen consecuencias reales. Por ejemplo, en el efecto Casimir: si colocamos dos placas metálicas muy cerca en el vacío, experimentan una fuerza de atracción debido a las fluctuaciones del vacío cuántico.
- Desplazamiento de Lamb: El vacío cuántico modifica los niveles de energía del átomo de hidrógeno, lo que fue observado por Willis Lamb en 1947.

- Radiación Hawking: En el horizonte de sucesos de un agujero negro, las fluctuaciones del vacío generan pares de partículas virtuales, donde una cae en el agujero y la otra escapa como radiación de Hawking.
- Energía del vacío y la expansión del universo: La energía del vacío se asocia con la energía oscura, que está impulsando la expansión acelerada del universo.



El vacío cuántico tiene un papel clave en la computación cuántica. Por ejemplo, empresas como IBM y Google ajustan cuidadosamente las frecuencias de resonancia de sus cúbits –unidad básica de información cuántica, que puede estar en superposición de 0 o 1– para minimizar la interferencia de las fluctuaciones del vacío. Si no lo hicieran, sus ordenadores cuánticos serían mucho menos eficientes y más propensos a errores.



2.3. LOS PRINCIPIOS DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

VISLUMBRAR EL POTENCIAL CUÁNTICO

Este apartado pretende que el lector pueda «vislumbrar» la potencialidad asociada a la computación cuántica, sin profundizar en la complejidad técnica de su funcionamiento.

Un ordenador clásico realiza todas las operaciones usando bits de información. El bit (*binary digit*) es la unidad de información más pequeña en la computación y representa exactamente dos estados: 1 (encendido/verdadero) y 0 (apagado/falso). Los ordenadores utilizan los bits para procesar información y comunicarse, realizando operaciones matemáticas basadas en combinaciones de estos valores.

Un bit puede valer 0 o 1. Dos bits pueden tomar cuatro valores: 00, 01, 10 y 11.

Un ordenador clásico ejecuta todas sus operaciones mediante la manipulación de unos y ceros aplicando reglas matemáticas simples. Aunque el resultado pueda parecer extremadamente complejo —como el movimiento de un personaje en un videojuego de última generación, la ejecución de órdenes por un robot o una conversación con un chatbot de inteligencia artificial—, todo se reduce a operaciones con bits.

En cambio, los ordenadores cuánticos —o, más correctamente, «unidades de procesamiento cuántico» o QPU por sus iniciales en inglés— realizan sus operaciones usando estados cuánticos llamados *quantum bits* o cúbits. Un cúbit no representa un 0 o un 1, sino una superposición de ambos estados a la vez. Como

en todo sistema cuántico, su estado se representa siempre como una combinación probabilística de todos sus estados, hasta que se mide.

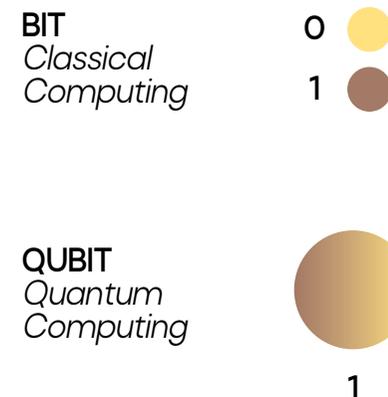


Fig. 2.7. Representación gráfica de la diferencia esquemática entre un bit y un cúbit.

¿Qué podemos usar como cúbit? A estas alturas no debería sorprendernos la respuesta: un fotón, un electrón, un núcleo atómico... Por ejemplo, algunos investigadores usan el electrón de la capa exterior del átomo de fósforo como un cúbit.

Tomemos el caso del electrón: tiene una propiedad cuántica conocida como **espín**, que puede representarse como «hacia arriba» (\uparrow) o «hacia abajo» (\downarrow), algo que recuerda (de forma muy simplificada) a la rotación de un planeta sobre su eje. Este espín puede usarse para almacenar información cuántica. Y mientras no lo midamos, ese electrón puede estar en una superposición de \uparrow y \downarrow , con cierta probabilidad para cada uno.

Aquí es donde la diferencia con los bits clásicos se vuelve explosiva. Con dos bits clásicos, solo hay cuatro combinaciones posibles y basta con saber el valor



de cada bit. Pero con dos cúbits, el sistema puede estar en superposición de las cuatro combinaciones a la vez:

$$\text{Estado del sistema} = A(\uparrow\uparrow) + B(\downarrow\downarrow) + C(\uparrow\downarrow) + D(\downarrow\uparrow)$$

Definir ese estado requiere cuatro números (A, B, C, D), que representan las probabilidades asociadas a cada combinación. Para tres cúbits hacen falta ocho números. Para N cúbits, harán falta 2^N números distintos.

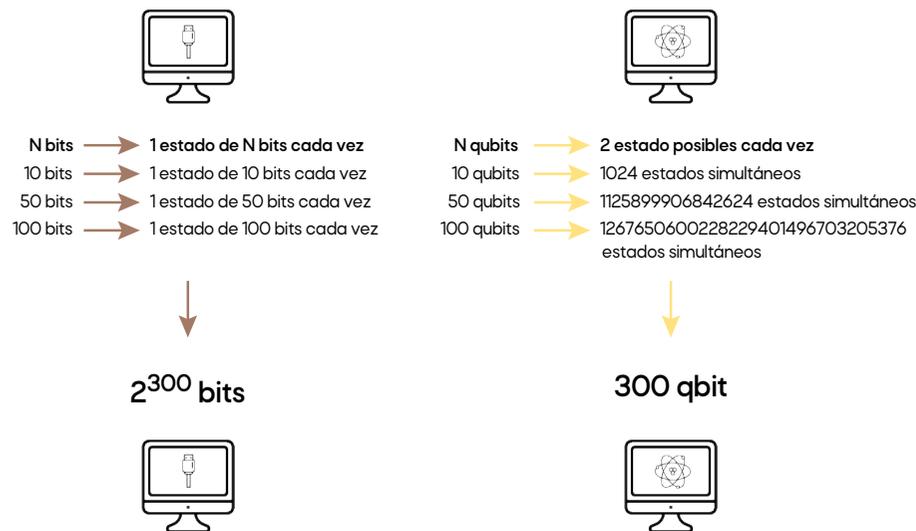


Fig. 2.8. Representación gráfica de la dimensionalidad comparativa entre bit y un cúbit.

Este crecimiento exponencial de la información es lo que convierte a los cúbits en una herramienta potencialmente revolucionaria. Por ejemplo, describir completamente el estado de un sistema de 300 cúbits requeriría 2^{300} números.

Eso es aproximadamente la cantidad de partículas estimadas en todo el universo observable. Es decir, un ordenador cuántico con 300 cúbits podría manejar más información de la que sería físicamente posible almacenar en todo el cosmos con tecnología clásica.

Esta diferencia es lo que hace pensar que la computación cuántica no será simplemente más rápida, sino que podría suponer un salto exponencial en la forma en que resolvemos problemas que hasta ahora eran, simplemente, inabordables.

LAS DIFICULTADES PRÁCTICAS

Después de haber intuido el inmenso potencial de la computación cuántica, conviene bajar a tierra y hablar de sus limitaciones actuales. Porque, aunque prometedora, esta tecnología todavía se enfrenta a numerosos desafíos técnicos y conceptuales. Sabemos que, en cuántica, cuando queremos establecer el valor de un sistema, tenemos que medirlo. Pero, al hacerlo, los estados probabilísticos colapsan y pasa a comportarse como un sistema clásico. Como consecuencia: cuanto menos midamos, mejor, porque en cada medida perdemos parte de las ventajas «cuánticas» que hacen útil al sistema.

A los ordenadores cuánticos hay que hacerles preguntas que se resuelvan sin pasos intermedios, dejarlos que trabajen por sí mismos sin interferir en ellos, porque, si no, perdemos sus ventajas. No podemos extraer valores intermedios sin alterar la esencia de sus procesos internos.

La principal consecuencia de esto es que los ordenadores cuánticos no son un sustituto de los ordenadores clásicos, solo son mejores que ellos en ciertas situaciones en las que podemos establecer problemas susceptibles de ser resueltos aprovechando las ventajas de la física cuántica. Para que un ordenador



cuántico aproveche su potencia, debe ser aplicado a resolver problemas de naturaleza estadística con los que pueda establecerse un paralelismo con la física cuántica que domina sus procesos.

En las aplicaciones cotidianas para las que usamos los ordenadores todos nosotros, seguramente siempre será más lento un ordenador cuántico. El potencial surge para otras aplicaciones, donde es posible que un ordenador cuántico resuelva problemas inalcanzables para un ordenador clásico: a este concepto se le conoce como «supremacía cuántica».

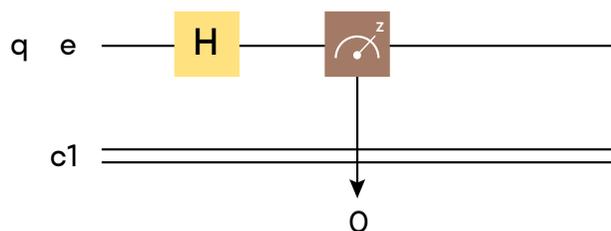


Fig. 2.9. Representación gráfica de una puerta lógica cuántica de Hadamard a partir del software propio de IBM (Qiskit).

Por supuesto, para operar con cúbits, hace falta poder desarrollar dispositivos que funcionen a nivel cuántico. Además de las clásicas puertas lógicas de los ordenadores clásicos (AND, OR, etc.), hacen falta nuevas operaciones. Por ejemplo, existen las denominadas puertas Hadamard, que se encargan de poner cúbits en superposición cuántica. Por tanto, la traslación de operaciones de un mundo al otro no es inmediata.

Los ordenadores cuánticos trabajan a temperaturas extraordinariamente frías, para evitar que se vean afectados sus estados cuánticos y su superposición. Los fenómenos de decoherencia son uno de los principales retos a los



que se enfrenta esta tecnología. En la actualidad, los tiempos de decoherencia oscilan entre los nanosegundos y los segundos, tiempos aún muy cortos, por lo que las operaciones que se realicen deben ser terminadas muy muy rápido.

Además, en algunos casos, la tecnología de superconductores está asociada al desarrollo de cúbits (cúbits superconductores). Los superconductores son materiales que, a temperaturas extremadamente bajas, conducen electricidad sin resistencia. Esta propiedad es crucial para la computación cuántica, ya que permite la creación de cúbits superconductores (transmon, fluxonium, etc.), una de las tecnologías más avanzadas y utilizadas en la actualidad por empresas como Google, IBM y Rigetti.

Los superconductores permiten la fabricación de cúbits superconductores, que almacenan y manipulan información cuántica. Estos cúbits están basados



en uniones Josephson, que son dispositivos superconductores donde los electrones pueden tunelizar entre dos materiales superconductores separados por una barrera aislante. Esta tecnología ofrece varias ventajas:

- Bajas pérdidas de energía: La superconductividad reduce las interacciones no deseadas con el entorno, permitiendo tiempos de coherencia más largos.
- Estados cuánticos bien definidos: Los cúbits superconductores pueden mantener sus estados cuánticos durante períodos lo suficientemente largos para ejecutar algoritmos cuánticos.
- Facilidad de fabricación: Se pueden construir usando técnicas estándar de fabricación de chips, lo que permite escalabilidad.

Otro de los principales inconvenientes de la computación cuántica es que, para realizar cálculos útiles, se necesitan múltiples cúbits físicos por cada cúbit lógico para reducir los errores.

LA SUPREMACÍA CUÁNTICA

Hemos mencionado el concepto de **supremacía cuántica**: ese momento en que un ordenador cuántico resuelve un problema de forma significativamente más rápida –o incluso posible– que cualquier ordenador clásico.

Este hito, aunque todavía muy específico en cuanto a sus aplicaciones, se alcanzó por primera vez en 2019. Ese año, IBM presentó el IBM Q System One, su primer computador cuántico diseñado para uso comercial. Este sistema de 20 cúbits combinaba computación cuántica y clásica, y estaba destinado a ser utilizado en investigaciones y cálculos complejos. Ese mismo año, IBM

participó en un debate sobre la supremacía cuántica. Google afirmó que su computadora cuántica había resuelto en 200 segundos un problema que a una computadora clásica le tomaría 10 000 años. IBM refutó esta afirmación, argumentando que el problema podría ser resuelto por una computadora clásica en solo 2,5 días, cuestionando así la proclamada supremacía cuántica de Google. En paralelo, investigadores utilizaron el procesador cuántico de IBM para resolver sistemas de ecuaciones lineales mediante transformaciones unitarias, demostrando aplicaciones prácticas de la computación cuántica en álgebra lineal en áreas como la física, la química o la inteligencia artificial (IA).



LOS PRINCIPIOS DE LA COMUNICACIÓN CUÁNTICA

Así como la computación cuántica promete cambiar la forma en que procesamos información, la comunicación cuántica redefine cómo la transmitimos. La base de estas tecnologías es el entrelazamiento cuántico y un fenómeno derivado de él llamado *teleportación cuántica*.

Una de las primeras consecuencias de las leyes de la física cuántica descritas en este capítulo es que no se puede medir el estado de un sistema sin modificarlo. Como consecuencia, no se puede clonar un sistema cuántico, porque para ello habría que medirlo, interactuar con él. Ese proceso lo alteraría (teorema de no clonación), y, al alterarlo, podría detectarse que alguien ha intervenido en el proceso de transmisión.

Uno de los desarrollos más prometedores en este campo es la distribución cuántica de claves (QKD,

Quantum Key Distribution), un método que permite enviar datos cifrados como bits clásicos a través de redes, mientras que las claves para descifrar la información se codifican y transmiten en un estado cuántico utilizando cúbits.

Existen varios protocolos para implementar QKD, pero uno de los más utilizados es el BB84, desarrollado en los años ochenta por Charles Bennett y Gilles Brassard. En este esquema, dos personas (tradicionalmente Alice y Bob) que quieren comunicarse de manera segura envían cúbits a través de un canal cuántico, y se comprueba a través de un medio clásico (como una fibra óptica) que no han sido interferidos por un *hacker*. Si detectan anomalías —como las que provocaría una intervención de **Eve**, la *hacker*—, pueden desechar la clave y reiniciar el proceso hasta obtener una clave compartida y segura.

Estas ideas han pasado del laboratorio al mundo real. En 2017, el satélite chino Micius realizó una

demostración experimental de QKD mediante enlace satelital para realizar la primera videollamada intercontinental entre Pekín y Viena, protegida mediante criptografía cuántica. Cada estación terrestre recibió una clave cuántica diferente y el satélite combinó ambas para generar una clave compartida. El canal clásico sirvió entonces para transmitir esa combinación, que las estaciones pudieron descifrar gracias a la clave que ya tenían, sin que nadie externo pudiera intervenir sin ser detectado.

Las redes de QKD ya están empezando a desplegarse en distintos países: China lidera con una red de más de 2032 kilómetros entre Pekín y Shanghái, utilizada por bancos y empresas financieras para la transmisión de datos seguros. En EE. UU., la *startup* Quantum Xchange ha asegurado acceso a 805 kilómetros de fibra óptica a lo largo de la costa este. Su primera conexión enlazará Manhattan con Nueva Jersey, donde se

QKD | Quantum Key Distribution



encuentran numerosos centros de datos bancarios. De la misma manera, la empresa ID Quantique lleva protegiendo los resultados de las elecciones suizas por más de diez años mediante el empleo de dichas claves de encriptación cuánticas.

La comunicación cuántica no solo promete mayor seguridad: también marca el inicio de una nueva forma de interconexión global. Pero, para ello, hará falta resolver desafíos tecnológicos adicionales, como extender el alcance de estas redes. En el siguiente apartado hablaremos de una de las piezas clave para conseguirlo: los repetidores cuánticos.

INTERNET CUÁNTICO Y LOS REPETIDORES

Para hacer realidad un Internet cuántico global es necesario mantener el entrelazamiento cuántico a largas distancias. Sin embargo, este estado cuántico es extremadamente frágil y se degrada con el tiempo y la distancia. La solución a este problema son los repetidores cuánticos, dispositivos que actúan como estaciones intermedias capaces de restaurar el entrelazamiento sin necesidad de medir –y, por tanto, sin destruir– los estados cuánticos.

La clave está en utilizar fotones entrelazados emitidos desde una fuente intermedia, que transfieren su estado a cúbits situados en cada extremo de la red. Así, se establece una conexión cuántica indirecta entre dos puntos alejados.

Este proceso puede repetirse en cadena tantas veces como sea necesario, permitiendo extender las comunicaciones cuánticas a nivel continental e incluso global. Experimentos realizados desde principios de los años 2000, especialmente por equipos como el de Christopher Monroe, han sentado las bases técnicas de esta tecnología, que hoy está en pleno desarrollo.

LA ENCRIPCIÓN Y LA CUÁNTICA

Por un lado, ya hemos descrito en el apartado anterior cómo los estados entrelazados y la teleportación pueden permitir comunicaciones más seguras, algo que hoy en día es tan importante debido a los continuos ataques de *hackers* a la seguridad de la información que circula por Internet.

Lo fundamental es que, a diferencia del cifrado clásico, que puede ser vulnerado por computadoras, la encriptación cuántica no puede ser descifrada sin que ese ataque sea detectado, pues cualquier intento de interceptación modifica la clave y alerta a los usuarios.

Aquí es donde entra una paradoja, ya que, como dice el refrán, «no hay mejor cuña que la de la misma madera», y la encriptación cuántica es la única capaz de superar el gran poder que tiene la computación cuántica para romper claves. Sin entrar en los detalles, podemos decir que una contraseña de 128 bits requeriría 2^{128} intentos en una computadora clásica. Con una computadora cuántica, se reduciría a 2^{64} intentos, haciendo que el cifrado de 128 bits sea tan débil como uno de 64 bits en una máquina clásica*.



* Los ordenadores cuánticos bajan el nivel de seguridad al equivalente del algoritmo con la mitad de la clave. Sin embargo, esto no se considera que amenace gravemente a la criptografía (en este caso simétrica, algoritmo AES) ya que es fácil duplicar la longitud de la clave con la tecnología actual. Según los expertos consultados, realmente la amenaza viene de la **criptografía asimétrica**, en la que la reducción de tiempos para romper sus algoritmos pasa de exponencial a logarítmico, y esto no se puede paliar aumentando el tamaño de la clave.



La computación cuántica no ha roto todavía el cifrado clásico, pero con el desarrollo de computadoras cuánticas más potentes en el futuro, los sistemas actuales de seguridad se volverán obsoletos. Por eso, los Gobiernos y la industria tecnológica ya están trabajando en criptografía poscuántica, que garantizará la seguridad en la era cuántica.

Hay una paradoja basada en la antigua China, donde se dice que existió un mercader que vendía un escudo impenetrable y una lanza capaz de atravesarlo todo. Cuando le preguntaron qué sucedería si ambos se enfrentaban, su respuesta fue el silencio... o el inicio del *marketing* de lo imposible.

Siglos después, la historia se repite, pero en versión cuántica: por un lado, la criptografía cuántica promete ser un escudo inquebrantable, garantizando comunicaciones imposibles de descifrar. Por otro, las computadoras cuánticas aspiran a ser la llave maestra, capaz de romper cualquier cifrado clásico. Entonces, ¿qué pasa cuando esta tecnología se enfrenta a su propio dilema del mercader chino?

Si la criptografía cuántica es realmente impenetrable, ninguna computadora cuántica podrá descifrar sus códigos. Pero si las computadoras cuánticas pueden romper cualquier clave, entonces la criptografía cuántica no es tan segura como se pensaba. La diferencia es que, en este caso, la mecánica cuántica no nos deja en un callejón sin salida, sino que nos da una respuesta... probabilística. En un universo de superposiciones, tal vez el escudo y la lanza pueden existir al mismo tiempo, pero solo hasta que alguien los observe.

Y si la lanza cuántica resulta ser más poderosa que el escudo, podríamos vernos en la situación de tener que volver al papel, como si el *blockchain* nunca hubiera existido. Reimaginar un futuro donde, ante la amenaza de que toda criptografía se vuelva inútil, los bancos vuelvan a imprimir libretas de ahorros, los títulos universitarios necesiten firmas manuscritas y las autenticaciones personales dependan otra vez de un notario, quizá armado con un sello de lacre.

2.4. PRINCIPALES CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Hasta aquí hemos visto cómo los principios de la física subatómica han generado nuevas posibilidades en computación. Pero ¿en qué sectores podemos encontrar aplicaciones para esta tecnología? La computación cuántica está llamada a revolucionar numerosos sectores al abordar problemas que resultan demasiado complejos para la informática tradicional. Su capacidad para procesar enormes volúmenes de datos y explorar múltiples soluciones simultáneamente la convierte en una herramienta poderosa en áreas donde la rapidez y la precisión marcan la diferencia. A continuación, se resumen algunos de los ámbitos con mayor potencial:

- Telecomunicaciones: criptografía y seguridad en las comunicaciones.
- Biotecnología: medicina personalizada y simulación de entornos biológicos.
- Automoción: nuevos sistemas de conducción autónoma.
- Logística: mejora de la cadena de suministro con rutas optimizadas dinámicamente, manejando más variables simultáneas.
- Empaquetado de objetos en contenedores o *bin packing*.
- Industria: procesos de fabricación más eficientes.
- Energía: predicción de la capacidad de producción energética de fuentes renovables.
- Finanzas: procesos de inversión más afinados.



- Desarrollo de nuevos materiales.
- IA.
- Industrias culturales y creativas.

Veamos algunos de ellos:

En el sector financiero, la detección de fraudes se enfrenta al reto de identificar patrones ocultos en millones de transacciones diarias. Los métodos actuales, aunque efectivos, no siempre logran adaptarse con la velocidad necesaria a nuevas estrategias fraudulentas. Los algoritmos cuánticos, en cambio, pueden analizar datos con mayor rapidez y precisión, facilitando la detección de anomalías en tiempo real y reduciendo las pérdidas económicas. Lo mismo ocurre con la optimización de inversiones, donde la cuántica permite encontrar la mejor combinación de activos, minimizando riesgos y maximizando beneficios con una eficiencia que supera con creces a los modelos tradicionales.

En el ámbito energético, la capacidad de predecir con exactitud la producción de fuentes renovables como la solar y la eólica es fundamental para equilibrar la red eléctrica. La variabilidad de estos recursos hace que la gestión sea un desafío, pero la computación cuántica puede procesar grandes cantidades de datos meteorológicos y operativos, mejorando la precisión de las predicciones y facilitando una integración más eficiente de estas energías limpias. A nivel de infraestructura, la optimización de redes eléctricas inteligentes también se beneficiará enormemente, permitiendo una distribución más equilibrada de la energía, reduciendo desperdicios y adaptándose mejor a la demanda en tiempo real.

En la industria del hidrógeno verde, la producción eficiente mediante electrólisis sigue siendo un reto por su alto consumo energético. La combinación de gemelos digitales con algoritmos cuánticos permite simular y optimizar estos procesos,

reduciendo costes y aumentando la sostenibilidad. Algo similar ocurre en la planificación del mercado eléctrico, donde encontrar la combinación ideal de oferta y demanda en cada momento es clave para evitar sobrecostes y garantizar el suministro. Los modelos cuánticos pueden calcular estas variables mucho más rápido que los métodos actuales, mejorando la eficiencia operativa.



La logística es otro campo que podría transformarse con esta tecnología. Desde la optimización del empaquetado en almacenes y camiones hasta la planificación de rutas de transporte público, los algoritmos cuánticos pueden encontrar soluciones óptimas en segundos, algo impensable con los sistemas tradicionales. Esto no solo reduce costes y tiempos de entrega, sino que también contribuye a una menor huella ambiental.



En el ámbito de la seguridad digital, la identidad autosoberana (SSI) representa una evolución en la gestión de credenciales digitales, permitiendo a los usuarios controlar su información sin depender de terceros. Sin embargo, con la llegada de la computación cuántica, muchas de las técnicas criptográficas actuales podrían quedar obsoletas. Implementar métodos poscuánticos garantizará que estas soluciones sigan siendo seguras en el futuro.

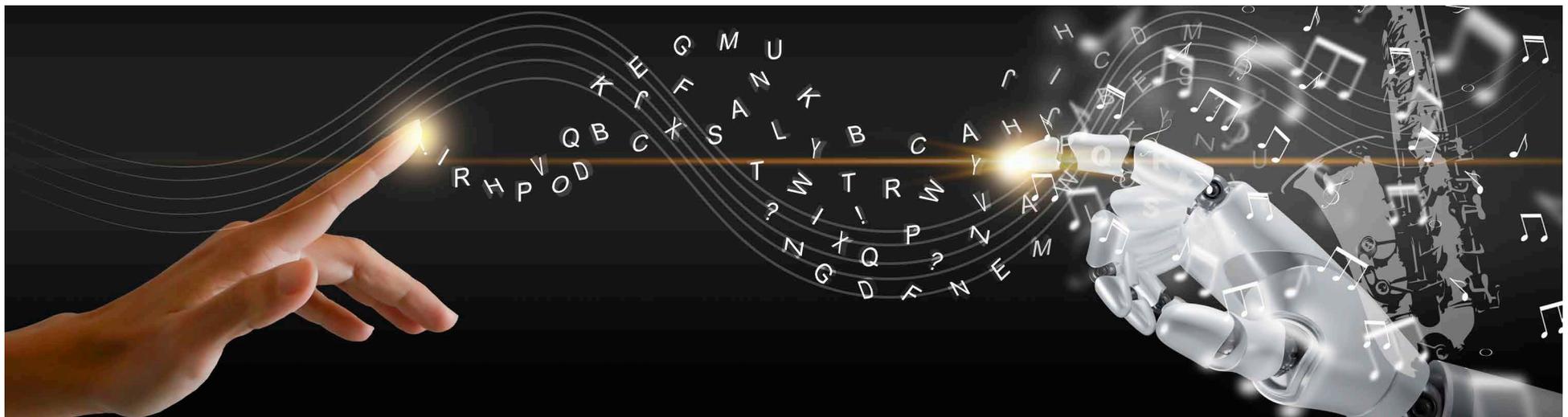
El descubrimiento de nuevos materiales es otro de los grandes beneficiados por esta tecnología. La combinación de IA y simulaciones cuánticas acelera enormemente la búsqueda de compuestos con propiedades mejoradas, como materiales más ligeros y resistentes para la industria aeroespacial o superconductores de alta temperatura para mejorar la eficiencia energética.

Incluso en la producción de fertilizantes, la computación cuántica podría marcar una diferencia. El proceso de fijación del nitrógeno, crucial para la agricultura,

sigue dependiendo de métodos industriales muy costosos y contaminantes. Comprender cómo la naturaleza realiza este proceso de forma eficiente a través de enzimas es una tarea que los ordenadores cuánticos podrían resolver, allanando el camino hacia métodos más sostenibles.

Por último, la música también podría beneficiarse de esta revolución. Desde mejorar los sistemas de recomendación hasta desarrollar nuevas formas de composición basadas en modelos cuánticos, esta tecnología abre posibilidades creativas inexploradas.

La computación cuántica no es solo una promesa de futuro; es una herramienta que ya está comenzando a transformar industrias clave. Aunque su desarrollo aún enfrenta desafíos técnicos, su potencial para resolver problemas complejos con una velocidad y precisión inigualables la convierte en una apuesta segura para el progreso tecnológico.



1. RESUMEN EJECUTIVO

2. INTRODUCCIÓN

3. CONTEXTO GLOBAL DE LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

4. RADIOGRAFÍA DE LA CAPACIDAD DE I+i EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

5. ANÁLISIS DE PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

6. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN MÁS RELEVANTES

7. ANÁLISIS DEL ENTORNO EMPRESARIAL INNOVADOR

8. PROSPECTIVA EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: CONSULTA A EXPERTOS

9. ANEXO: OTRAS EMPRESAS RELEVANTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3. Contexto global de la innovación en tecnologías cuánticas

En la última década, las tecnologías cuánticas han experimentado un crecimiento acelerado, evolucionando desde la investigación académica hasta convertirse en una industria en plena expansión. Estas tecnologías abarcan no solo la **computación** cuántica, sino también la **comunicación** cuántica, la **sen-sórica** y las **redes** cuánticas, lo cual ha ampliado significativamente sus aplicaciones en distintos sectores industriales.

El ecosistema cuántico ha avanzado en paralelo con el desarrollo tecnológico, pasando de ser un campo de estudio teórico a una realidad con aplicaciones prácticas. Destacan tres áreas clave:

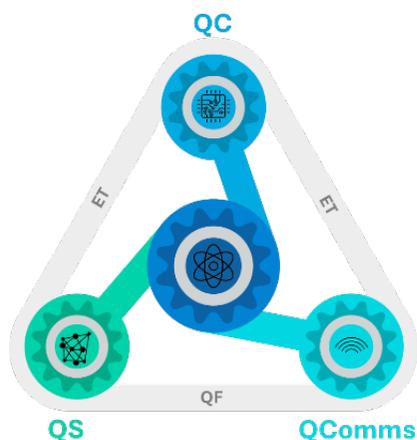


Fig. 3.1. Representación de la interrelación entre las diferentes áreas clave de cuántica: computación cuántica (QC), comunicación cuántica (QComms) y sensores cuánticos (QS).

1. **Computación cuántica (QC):** Se basa en los principios de la mecánica cuántica, como la superposición y el entrelazamiento, para resolver problemas de alta complejidad que están fuera del alcance de los ordenadores clásicos. En este ámbito, participan fabricantes de *hardware* especializados, desarrolladores de *software* y plataformas de computación cuántica en la nube (QCaaS - *quantum computing as a service*). La computación cuántica ya está siendo adoptada en sectores estratégicos, transformando diversas industrias. En **finanzas**, se utiliza para la optimización de carteras, el análisis de riesgos y el modelado predictivo, mejorando la toma de decisiones y la gestión de activos. En el sector **farmacéutico**, permite simular la dinámica molecular, acelerando el descubrimiento de nuevos fármacos y mejorando la eficiencia de los procesos de desarrollo. Por otro lado, en **sostenibilidad**, facilita el modelado climático y el diseño de materiales con menor impacto ambiental, contribuyendo a la innovación en soluciones ecológicas.
2. **Comunicación cuántica (QComms):** La comunicación cuántica se enfoca en garantizar la **seguridad en la transmisión de datos** mediante principios de la mecánica cuántica, como el entrelazamiento y la teleportación cuántica, los cuales permiten crear canales de comunicación inherentemente seguros. Su aplicación más destacada es la QKD, una tecnología que fortalece la ciberseguridad y la criptografía poscuántica, protegiendo las comunicaciones frente a amenazas futuras, especialmente ante el riesgo de que los ordenadores cuánticos puedan



comprometer los actuales métodos criptográficos.

El desarrollo de la comunicación cuántica ha avanzado significativamente en los últimos años con la creación de redes de comunicación cuántica a nivel global, como Micius, la red cuántica de China, el proyecto EuroQCI en Europa y las iniciativas cuánticas del Departamento de Energía de EE. UU. Estas infraestructuras están sentando las bases para el desarrollo de un Internet cuántico, que permitirá la transmisión ultrasegura de información entre diferentes **nodos y centros de datos**.

Además de su impacto en la ciberseguridad, la comunicación cuántica también desempeña un papel clave en la interconexión de **ordenadores cuánticos distribuidos**, lo que permitirá la creación de redes cuánticas capaces de compartir y procesar información cuántica a gran escala, mejorando la eficiencia de cálculos complejos en sectores como la banca, la defensa y las telecomunicaciones.

3. **Sensores cuánticos (QS):** Permiten realizar mediciones de alta precisión para aplicaciones en navegación, monitoreo ambiental y geofísica. Además, este segmento ha sido clave en la financiación de empresas emer-

gentes en el ámbito cuántico, impulsando la **comercialización temprana** de la tecnología. Entre las tecnologías más avanzadas se encuentran los centros de vacantes de nitrógeno en diamante (NVCD - *nitrogen-vacancy centers in diamond*), utilizados en magnetometría y biomedicina; los sensores SQUID/SQIF (*superconducting quantum interference device/superconducting quantum interference filter*) para la detección

ultrasensible de campos magnéticos aplicados en imagen por resonancia magnética y exploración geofísica; y los sensores basados en átomos fríos y átomos de Rydberg, con aplicaciones en navegación inercial y detección de campos eléctricos. Estas innovaciones están facilitando la adopción de la sensorica cuántica en sectores como la defensa, la exploración espacial, la salud y la seguridad de infraestructuras críticas.



3.1. AVANCES, RETOS Y PRÓXIMOS PASOS

El avance de estas tecnologías está creciendo a un ritmo acelerado. Gobiernos y empresas han intensificado sus inversiones en *hardware*, *software* y soluciones híbridas, acercando cada vez más la computación cuántica al mundo comercial. Sin embargo, los desafíos técnicos persisten, especialmente en torno a la escalabilidad, la corrección de errores cuánticos y la estabilidad de los cúbits.

Actualmente, los sistemas cuánticos más avanzados operan con entre **100 y 1000 cúbits físicos**, como el procesador Condor de IBM (1121 cúbits) o el chip Tianyan-504 de China (504 cúbits). Sin embargo, para alcanzar su potencial práctico y comercial, será necesario escalar hasta **decenas o cientos de miles**



de **cúbits físicos**, ya que la computación cuántica requiere cúbits **lógicos** estables, protegidos mediante corrección de errores cuánticos. Esta tecnología sigue siendo un desafío, ya que se estima que se necesitan entre 10 y 1000 cúbits físicos para generar un solo cúbit lógico útil. Empresas como Google han logrado avances en la reducción de errores, pero la estabilidad y fidelidad de los cúbits siguen siendo áreas críticas de desarrollo. Mientras se avanza en ellas, los **enfoques híbridos cuántico-clásicos** están desempeñando un papel clave, combinando algoritmos cuánticos con supercomputadoras tradicionales para maximizar su utilidad en problemas complejos.

Además, la integración de la IA con sistemas cuánticos promete acelerar aplicaciones disruptivas en múltiples áreas, como la **optimización** de modelos de aprendizaje automático, el descubrimiento de **fármacos** y la **simulación de materiales avanzados**. Los algoritmos cuánticos tienen el potencial de mejorar significativamente el rendimiento de ciertas tareas de IA, especialmente en la manipulación de grandes volúmenes de datos y en la resolución de problemas de optimización complejos. A medida que la computación cuántica avanza en corrección de errores, escalabilidad y fidelidad de los cúbits, la sinergia con la IA podría generar un salto cualitativo en capacidades computacionales, permitiendo avances en sectores como las **finanzas**, la **ciberseguridad**, la **logística** y la **biomedicina**.

Actualmente, el ecosistema cuántico está transitando de una fase de **exploración y desarrollo experimental** hacia una etapa de **validación comercial**, en la que empresas tecnológicas, *startups* y centros de investigación están llevando la teoría a aplicaciones industriales concretas. Esta transición es impulsada por una combinación de avances tecnológicos, el incremento de la inversión pública y privada, y el desarrollo de infraestructuras cuánticas globales, como redes de comunicación cuántica y servicios de computación cuántica en la nube.



3.2. LA CARRERA CUÁNTICA EN EL CONTEXTO MUNDIAL

La computación cuántica se ha convertido en un eje estratégico global, con potencias como EE. UU. y China compitiendo por liderar el desarrollo de tecnologías cuánticas avanzadas. En los últimos años, esta carrera ha dejado de ser un ejercicio de I+D académico para convertirse en una carrera tecnológica con implicaciones geopolíticas, económicas y comerciales.

El 9 de diciembre de 2024, Google anunció el lanzamiento de su chip Willow, un procesador de 105 cúbits superconductores que representa un avance crucial en la computación cuántica. Este nuevo procesador ha logrado ejecutar cálculos en menos de cinco minutos que un superordenador clásico tardaría 10 septillones de años en resolver. Uno de sus principales logros ha sido la reducción exponencial de errores a medida que aumenta el número de cúbits, un desafío que ha limitado el desarrollo de la computación cuántica durante casi tres décadas. Este avance acerca la posibilidad de construir ordenadores cuánticos útiles y escalables, con aplicaciones en sectores como la IA, la energía y la medicina.

El desarrollo de Willow es el resultado de más de una década de investigación desde la creación de Google Quantum AI en 2012 y marca una mejora significativa con respecto a su predecesor, Sycamore (2019). Con avances en coherencia y conectividad de cúbits, este procesador se posiciona como un hito en la computación cuántica. Como reflejo de su impacto, el anuncio de Willow generó un incremento del 5 % en las acciones de Alphabet, empresa matriz de Google, reforzando su posición en la vanguardia de la computación cuántica comercialmente viable.

En paralelo, China también ha logrado un avance significativo con la presentación de la computadora Tianyan-504, equipada con un chip superconductor de 504 cúbits llamado Xiaohong. Este sistema ha sido desarrollado por el China Telecom Quantum Information Technology Group (CTQG) en colaboración con la Academia China de Ciencias y la empresa QuantumCTek Co., Ltd. La Tianyan-504 forma parte de la plataforma de computación cuántica en la nube Tianyan, lanzada en noviembre de 2023, que ya cuenta con más de 12 millones de usuarios en 50 países, facilitando el acceso a la computación cuántica sin necesidad de *hardware* especializado.

No obstante, el número de cúbits no lo es todo en computación cuántica. Aunque el Tianyan-504 de China tiene más cúbits que Willow, eso no significa que sea más potente. La clave radica en la calidad de los cúbits, su estabilidad, precisión y corrección de errores. Google ha avanzado significativamente en este aspecto, logrando que Willow reduzca las tasas de fallo a medida que crece su sistema, un factor crucial para cálculos realmente útiles.



Además, la arquitectura utilizada es diferente: Google emplea cúbits superconductores, que requieren temperaturas ultrabajas, mientras que China podría estar explorando otras arquitecturas más escalables, pero con limitaciones en velocidad y fidelidad. El enfoque también varía: Willow está diseñado para desarrollar una computación cuántica más estable y práctica, mientras que Tianyan-504 parece priorizar el acceso en la nube para simulaciones y experimentos.

HITOS TECNOLÓGICOS Y EL FUTURO DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Más allá de estos avances, el panorama cuántico global sigue evolucionando con iniciativas estratégicas en distintas regiones:

- IBM ha inaugurado su primer centro de datos cuánticos en Europa, ubicado en Ehningen, Alemania, y ha anunciado la instalación de su sistema más avanzado, el Quantum System Two, en San Sebastián, España, a finales de 2025. Este sistema, con un procesador de 156 cúbits, será el más avanzado de Europa y estará disponible para la comunidad investigadora y empresarial.
- En términos de inversión gubernamental, China está construyendo la mayor instalación de investigación cuántica del mundo, con un presupuesto de 10 000 M€. En paralelo, la Unión Europea ha lanzado el programa Quantum Technologies Flagship, un megaproyecto de 10 años y 1000 M€ para consolidar su posición en el ámbito cuántico.

A pesar del optimismo, los expertos advierten que la computación cuántica aún enfrenta importantes desafíos. Se estima que hasta 2030 esta tecnología

seguirá experimentando tasas de error significativas, limitando sus aplicaciones comerciales. A partir de 2030-2040, se espera que las ventajas prácticas comiencen a materializarse en áreas clave como IA, criptografía, química computacional y optimización industrial.

Como se puede apreciar con esta línea del tiempo en la carrera cuántica, las tecnologías cuánticas están avanzando rápidamente, con grandes apuestas por parte de grandes tecnológicas y países, como Google, IBM, China y la UE. Sin embargo, aún existe incertidumbre sobre la viabilidad a corto plazo de estas tecnologías para aplicaciones comerciales. A medida que se mejoran la coherencia de los cúbits y la corrección de errores, la computación cuántica pasará de ser una promesa tecnológica a un cambio de paradigma en la industria global.

3.3. DIVERGENCIA ESTRATÉGICA EN LA CARRERA GLOBAL POR LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍA CUÁNTICA

El desarrollo y la financiación de las tecnologías cuánticas han adquirido una dimensión estratégica a nivel global, con países que ya han comprometido inversiones por más de **40 000 M€** y con previsiones que estiman que el mercado alcance los **97 500 M€ para 2040**. Sin embargo, los principales bloques económicos y tecnológicos –EE. UU, China y Europa– adoptan enfoques distintos en cuanto a sus estrategias de inversión, modelos de innovación y prioridades de aplicación.



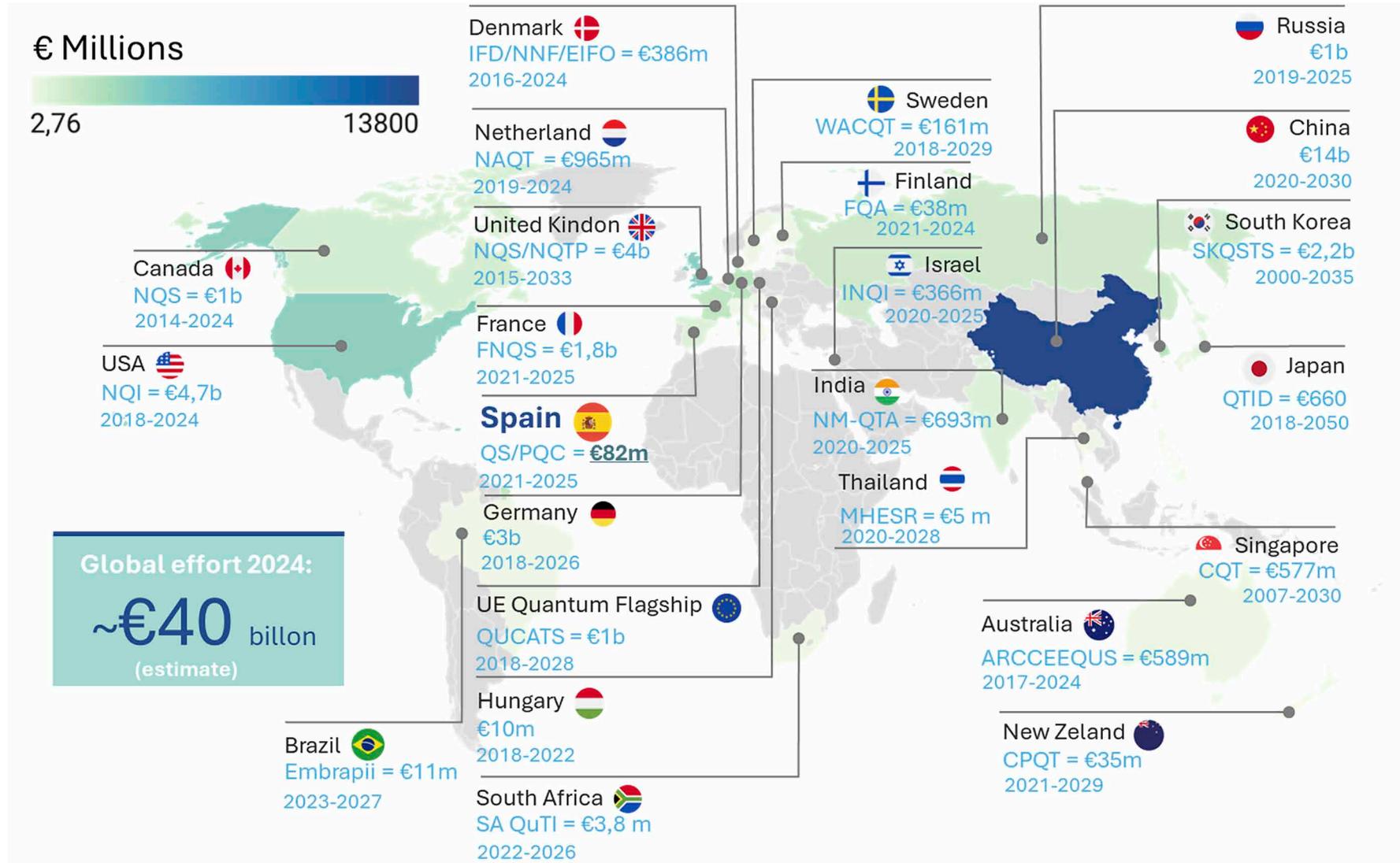


Fig. 3.2. Mapamundi de inversión en planes estratégicos en tecnologías cuánticas.



EE. UU.: liderazgo corporativo y enfoque en la supremacía tecnológica

EE. UU. ha estructurado su estrategia cuántica en torno a la colaboración entre el sector público y el privado, con una destacada participación de gigantes tecnológicos como **IBM, Google y Microsoft**. La **National Quantum Initiative Act**, lanzada en 2018, ha canalizado más de 4700 M€ destinados a la investigación en computación, comunicación y simulación cuánticas.

El enfoque estadounidense se distingue por su prioridad en la **supremacía cuántica** y la **comercialización**, con el liderazgo del sector tecnológico privado en el desarrollo de *hardware* y algoritmos cuánticos. Además, agencias federales como el Departamento de Energía y la NASA han financiado múltiples proyectos con aplicaciones estratégicas en seguridad, defensa y exploración espacial.

Otro aspecto crucial es el liderazgo en la **protección de la propiedad intelectual**. Aunque China lidera en volumen total de patentes, EE. UU. encabeza el registro de familias de patentes internacionales, asegurando su influencia en la futura estandarización global.

China: dominio en inversión pública y liderazgo en comunicación cuántica

China ha adoptado un enfoque altamente **centralizado y respaldado por políticas estatales**. Con una inversión que supera los 14 000 M€, el país ha priorizado la creación de infraestructuras estratégicas como el Laboratorio Nacional de Ciencia de la Información Cuántica y el desarrollo de la red de comunicación cuántica más avanzada del mundo, basada en el satélite Micius.

A diferencia de EE. UU., donde el sector privado desempeña un papel fundamental, la innovación cuántica en China es impulsada principalmente por instituciones estatales como la **Universidad de Ciencia y Tecnología de China** y la **Academia China de Ciencias**, en colaboración con empresas como Huawei y Alibaba.

Si bien China lidera en número de patentes, su impacto internacional es más limitado, ya que gran parte de sus registros son **patentes locales**, enfocadas en la protección doméstica más que en una expansión global.

Europa: cooperación transnacional y enfoque en aplicaciones industriales

Europa ha adoptado una estrategia de **cooperación regional**, consolidada en el programa **Quantum Flagship**, que destina 1000 M€ a la investigación cuántica durante una década. La región cuenta con múltiples polos de innovación en países como Alemania (3000 M€), Francia (1800 M€), Reino Unido (4000 M€) y Países Bajos (965 M€), donde se han creado infraestructuras avanzadas como el **IBM Quantum Data Center** en Alemania y el **Centro Nacional de Computación Cuántica** en el Reino Unido.



A diferencia de EE. UU. y China, el enfoque europeo se centra en **aplicaciones industriales y transferencia tecnológica**, priorizando áreas como **sensores** cuánticos, **criptografía** poscuántica y tecnologías **híbridas** cuántico-clásicas. Además, Europa ha trabajado en alinear la legislación de **propiedad intelectual** y en establecer estándares para fortalecer su posición en la carrera cuántica global.

Sin embargo, su fragmentación interna y la falta de un gigante tecnológico dominante en computación cuántica podrían representar un desafío para mantener el liderazgo frente a EE. UU. y China.

MODELOS DIVERGENTES HACIA UNA MISMA META

Mientras **EE. UU.** apuesta por la supremacía cuántica con un fuerte apoyo del sector privado, **China** se enfoca en la infraestructura nacional con inversión estatal masiva y **Europa** promueve una estrategia basada en la cooperación internacional y la industrialización de aplicaciones.

Cada bloque geopolítico está moldeando el futuro de la computación cuántica según sus prioridades económicas y estratégicas, con implicaciones que definirán la próxima gran revolución tecnológica.

3.4. PANORAMA DE LA ESTRATEGIA EN INNOVACIÓN CUÁNTICA EUROPEA

La Unión Europea ha desarrollado una estrategia integral de financiación para impulsar las tecnologías cuánticas, abarcando desde la investigación fundamental hasta la aplicación industrial y el desarrollo de infraestructuras de vanguardia. Programas clave como Horizon Europe (HE), Digital Europe Programme (DEP), European Innovation Council (EIC) y Connecting Europe Facility (CEF) forman el eje central de esta estrategia, reflejando el compromiso de la UE con el liderazgo global en este campo transformador.

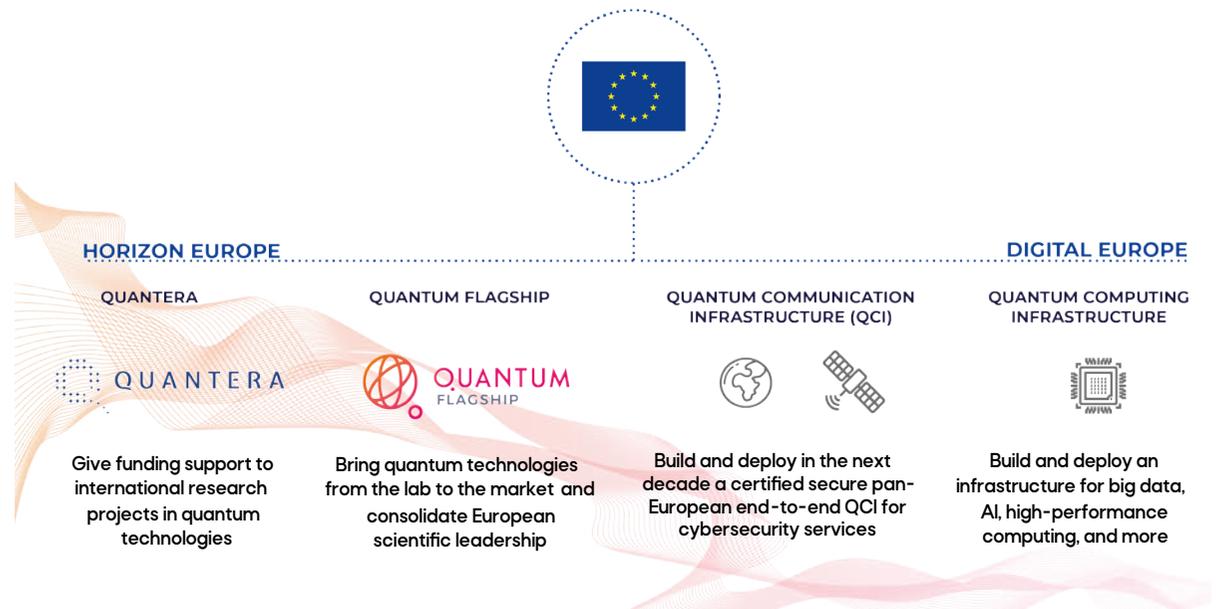


Fig. 3.3. Distribución relativa de los programas y estrategias en el ecosistema cuántico europeo de innovación. Fuente: QuantumFlagship Programme.



Horizon Europe es el principal programa de investigación e innovación de la Unión Europea y, entre 2021 y 2024, ha destinado aproximadamente 509 M€ a proyectos en tecnologías cuánticas. Dentro de esta estrategia destaca el **Quantum Flagship**, una ambiciosa iniciativa lanzada en 2018 con una duración de 10 años y un presupuesto de 1000 M€. Su objetivo es consolidar el liderazgo europeo en el ámbito cuántico, impulsando la transición de la investigación básica a aplicaciones comerciales. Con más de 5000 investigadores en universidades, centros de investigación y empresas, el Quantum Flagship promueve el desarrollo de la computación, comunicación y sensorica cuántica. Además, Horizon Europe financia programas como **QuantERA**, que fomenta la cooperación entre academia e industria, y otras iniciativas clave como el **EuroHPC Joint Undertaking**, enfocado en supercomputación,

y el **Chips Joint Undertaking**, dirigido a semiconductores avanzados. Solo en 2024, la inversión en tecnologías cuánticas alcanzó 174 M€, reflejando un crecimiento sostenido en el sector.

El **Digital Europe Programme (DEP)** se centra en el desarrollo de capacidades digitales clave, incluida la infraestructura cuántica. Entre 2021 y 2024, ha asignado 190 M€ a proyectos cuánticos, priorizando su integración en la industria europea y aplicaciones prácticas.

El **European Innovation Council (EIC)** impulsa innovaciones disruptivas con alto riesgo y alto impacto, especialmente aquellas en fase de transición del laboratorio al mercado. Entre 2021 y 2024, ha destinado 570 M€ para respaldar *startups*, *scale-ups* y pymes en la comercialización de tecnologías cuánticas.

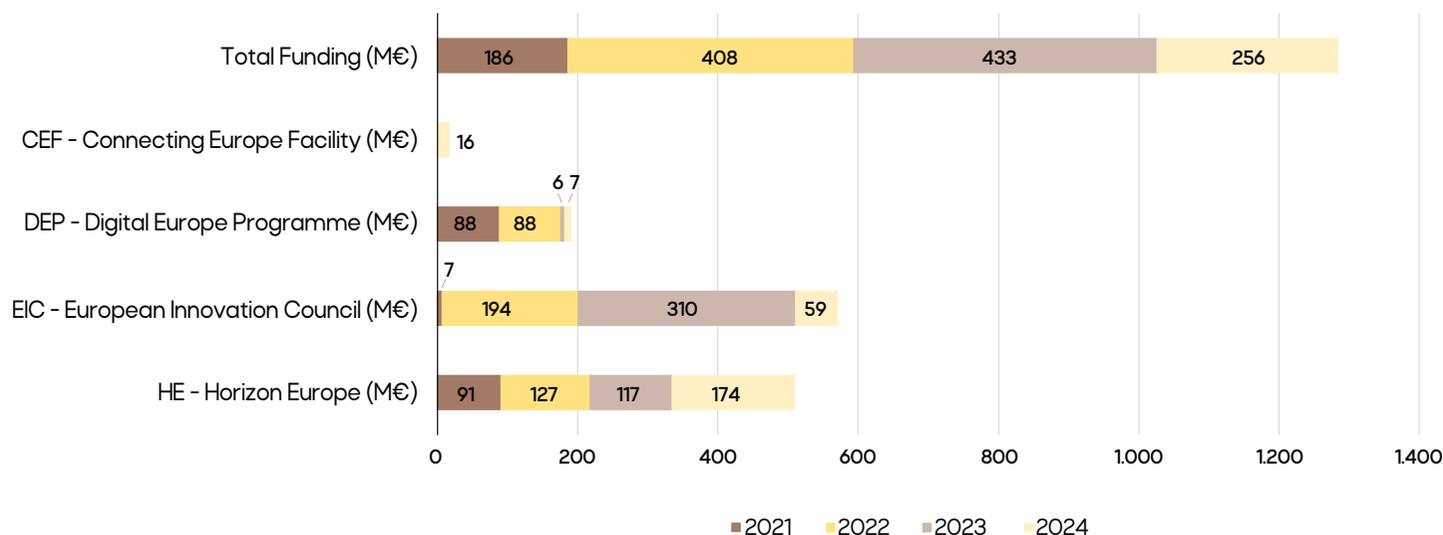


Fig. 3.4. Distribución de la financiación en los programas europeos de innovación. Fuente: QuantumFlagship Programme.



Por su parte, el **Connecting Europe Facility** (CEF), introducido en 2024, ha comenzado a financiar la infraestructura de comunicación cuántica (EuroQCI), un paso fundamental para garantizar la soberanía de datos y la ciberseguridad en Europa.

En conjunto, estos programas han movilizado más de 1200 M€ en proyectos de tecnologías cuánticas entre 2021 y 2024, consolidando la ambición de la UE de construir un ecosistema cuántico más robusto. Esta inversión busca integrar la investigación, la industria y la formulación de políticas, posicionando a Europa como un líder global en tecnologías cuánticas y facilitando avances en sectores estratégicos como la salud, la energía, las telecomunicaciones y la ciberseguridad.

A través de la Quantum Community Network (QCN), 32 países trabajan en la alineación de sus estrategias nacionales con los objetivos europeos, fortaleciendo la competitividad global del continente en este sector clave.

El panorama europeo se estructura en tres categorías de estrategias nacionales en tecnologías cuánticas:

1. Países con programas nacionales coordinados, que han establecido hojas de ruta claras y financiación específica.

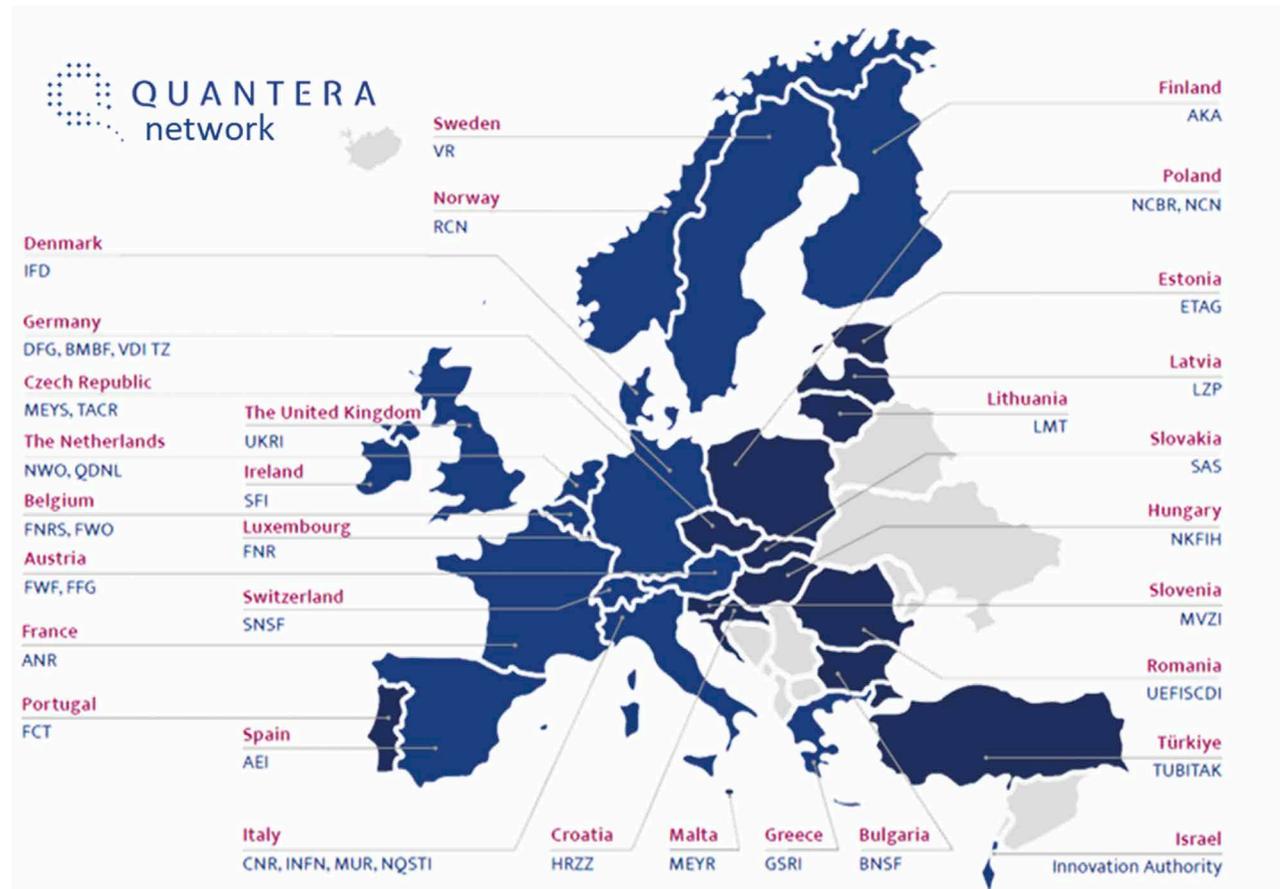


Fig. 3.5. Distribución de las medidas estratégicas prioritarias para fortalecer la I+D en tecnologías cuánticas en Europa.

Fuente: QuantERA Programme.



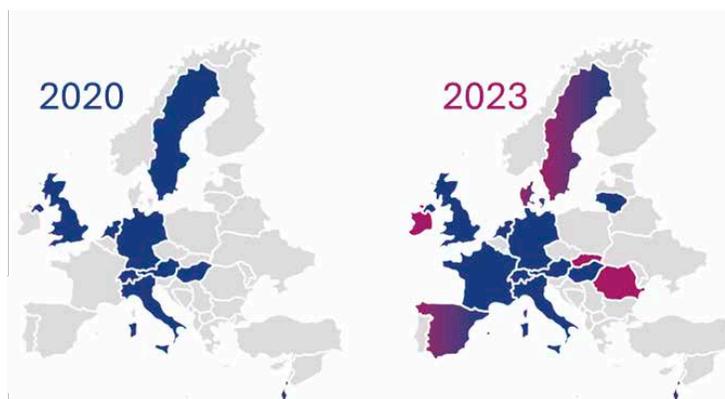
2. Países con financiación significativa, pero sin estrategia nacional definida, donde la inversión en I+D es relevante, aunque sin un marco político estructurado.
3. Países cuya actividad principal en el sector se desarrolla a través de iniciativas internacionales como QuantERA.

Según el análisis de QuantERA, una parte significativa de los 32 países europeos que participan en el programa ha desarrollado o está avanzando en la implementación de estrategias de financiación específicas para las tecnologías cuánticas. Otros, aunque aún no cuentan con presupuestos formalmente asignados, han definido prioridades estratégicas que orientan su futura inversión. Algunos ejemplos representativos incluyen:

- **España**, con el Quantum Spain (QS) y el Plan de Comunicación Cuántica (PQC), que pretenden movilizar en torno a los 85 M€.
- **Alemania**, con su estrategia nacional de Quantum Systems.

- **Dinamarca**, con el mapeo de tecnologías cuánticas en su planificación estratégica.
- **Estonia**, que incorpora las tecnologías cuánticas en su estrategia de innovación y emprendimiento 2021-2035.
- **Noruega**, con un plan a largo plazo para investigación y educación superior (2023-2032).
- **Rumanía y Turquía**, con planes nacionales centrados en la competitividad y la digitalización.

El mapa de la imagen anterior refleja la evolución de las estrategias cuánticas europeas desde 2020 hasta 2023, mostrando un notable aumento en la cantidad de países con políticas nacionales claras y apoyo gubernamental significativo. Estos avances subrayan el compromiso de Europa con el desarrollo de un ecosistema cuántico sólido, impulsando la colaboración transfronteriza y consolidando su competitividad en la revolución cuántica global.



- Countries with developed national quantum strategy and/or significant government contribution
- Countries with national quantum strategy in progress
- Countries with significant government contribution and national quantum strategy in progress

Fig. 3.5. Distribución de las medidas estratégicas prioritarias para fortalecer la I+D en tecnologías cuánticas en Europa.
Fuente: QuantERA Programme.



3.5. ACTORES Y ESTRATEGIAS CLAVE EN EL CONTEXTO EUROPEO Y NACIONAL

El desarrollo de las tecnologías cuánticas en Europa, especialmente a nivel nacional en los Estados miembros, se está impulsado por una combinación de programas estratégicos, iniciativas gubernamentales y colaboración entre instituciones de investigación, empresas y organismos públicos. A nivel europeo, se ha establecido un marco importante de financiación e impulso tecnológico a través de programas como los anteriormente mencionados –Quantum

Flagship, QuantERA, EuroQCI, etc.– con el objetivo de consolidar la soberanía tecnológica y la competitividad del continente en este ámbito emergente.

En el contexto español, el avance de la computación y comunicación cuántica se enmarca en estrategias como Quantum Spain y el Plan Complementario de Comunicación Cuántica, alineados con las políticas de digitalización e innovación del país. Además, centros de investigación, universidades y empresas tecnológicas desempeñan un papel crucial en la transferencia de conocimiento y el desarrollo de aplicaciones industriales.

Este apartado analiza los actores más relevantes en Europa y España, así como las estrategias clave que están definiendo el futuro de la innovación cuántica.



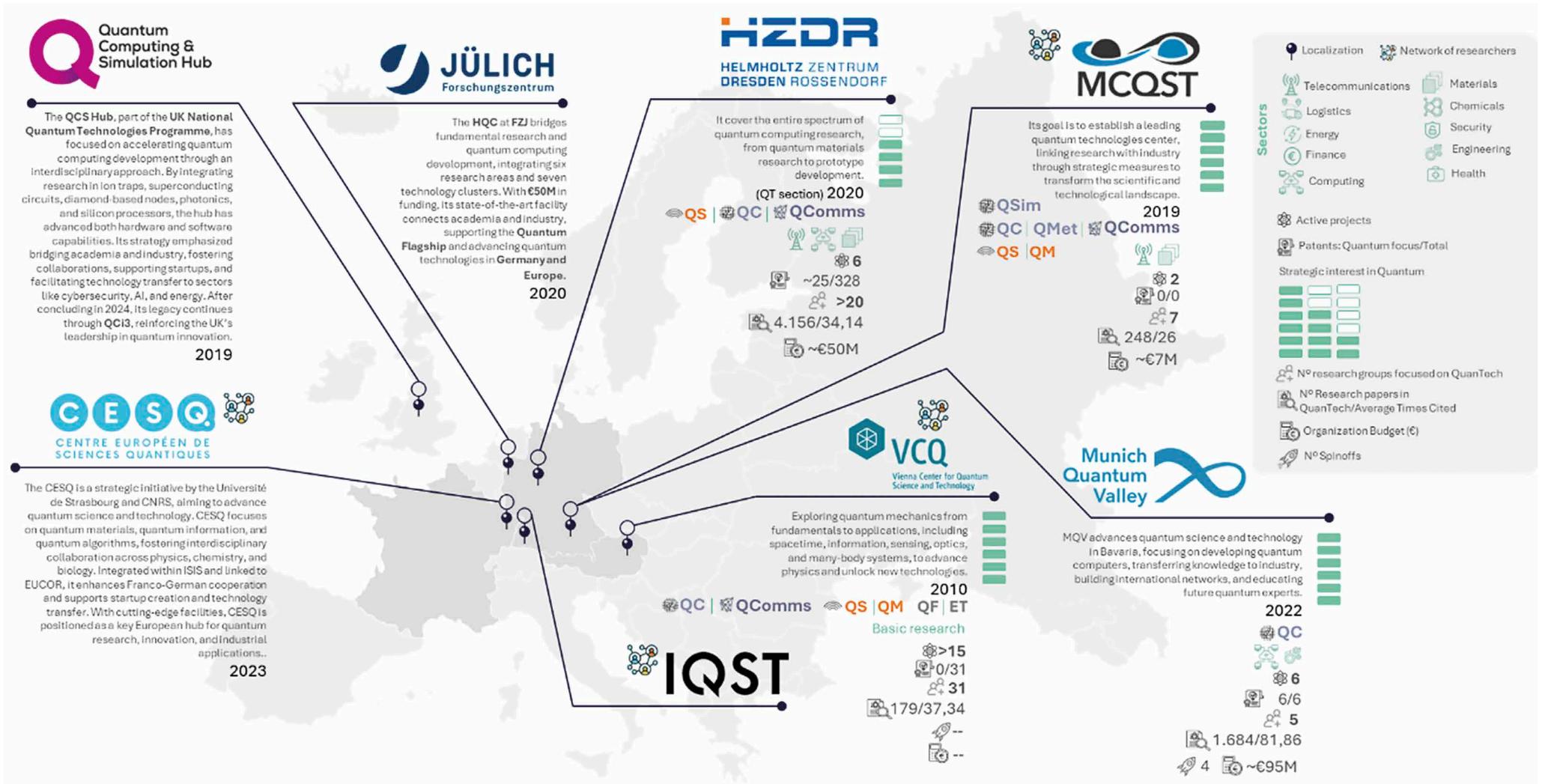


Fig. 3.7. Principales actores de la I+i en Europa en tecnologías cuánticas.



ACTORES CLAVE EN LA ESTRATEGIA CUÁNTICA EUROPEA



**Munich Center for Quantum Science and Technology
(MCQST)**

El Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST) es un «clúster de excelencia», una iniciativa que reúne a instituciones académicas y de investigación en Múnich, Alemania, con el objetivo de avanzar en el campo de la ciencia y la tecnología cuánticas. Sus principales funciones incluyen la promoción de la investigación colaborativa en áreas como la teoría de la información cuántica, la simulación cuántica, la computación cuántica, la comunicación cuántica, la metrología y sensores cuánticos, y la materia cuántica. Además, MCQST se dedica a la formación de la próxima generación de científicos cuánticos, ofreciendo programas educativos desde el nivel de licenciatura hasta el posdoctorado y fomentando la diversidad, equidad e inclusión en el ámbito científico. También organiza eventos y actividades de divulgación para involucrar al público en general y a la comunidad científica en los avances de la investigación cuántica.

En cuanto a reconocimientos, MCQST ha sido galardonado con el prestigioso Cluster of Excellence en el marco de la Estrategia de Excelencia del Gobierno alemán, lo que subraya su papel destacado en la investigación cuántica a nivel nacional e internacional. Este reconocimiento conlleva una financiación significativa destinada a apoyar sus actividades de investigación y desarrollo.

El centro está compuesto por una comunidad diversa de investigadores que incluye a profesores, científicos posdoctorales, estudiantes de doctorado y personal de apoyo, todos colaborando para impulsar el conocimiento y la innovación en el campo de la ciencia y la tecnología cuánticas.



Munich Quantum Valley (MQV)

El Munich Quantum Valley (MQV) es una iniciativa colaborativa en Baviera, Alemania, que reúne a universidades, instituciones de investigación y empresas con el objetivo de promover la investigación y el desarrollo en el campo de las ciencias y tecnologías cuánticas. Sus principales funciones incluyen la creación de una infraestructura cuántica de vanguardia, el fomento de la transferencia de conocimientos entre la academia y la industria, y la formación de profesionales altamente cualificados en este ámbito emergente.

En términos de financiación, el MQV ha recibido un respaldo significativo del Gobierno bávaro, con una inversión de 300 M€ destinada a fortalecer la investigación cuántica y acelerar la innovación tecnológica en la región. Esta inversión subraya el compromiso de Baviera con el avance de las tecnologías cuánticas y su aplicación en diversos sectores industriales.

El consorcio del MQV está compuesto por una amplia gama de participantes, incluyendo científicos, ingenieros, estudiantes y profesionales de diversas disciplinas, todos colaborando para posicionar a Baviera como un centro líder en tecnologías cuánticas a nivel mundial. Aunque no se especifica un número exacto de integrantes, la iniciativa abarca múltiples instituciones y empresas,



reflejando un esfuerzo colectivo sustancial en el área de la investigación y desarrollo cuántico.

El Munich Quantum Valley (MQV) y el Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST) están estrechamente relacionados, ya que ambos forman parte del ecosistema de investigación cuántica en Baviera y comparten el objetivo de impulsar el desarrollo de tecnologías cuánticas en la región.

- MCQST es un centro de investigación enfocado en la ciencia fundamental y aplicada en el ámbito cuántico. Su labor se centra en la investigación teórica y experimental en áreas como la computación, la metrología, la materia y la información cuánticas. Es una iniciativa académica que reúne a investigadores de la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich (LMU), la Universidad Técnica de Múnich (TUM) y el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica.
- MQV, por otro lado, es un proyecto más amplio y estratégico, impulsado por el Gobierno bávaro con una inversión de 300 M€. Su objetivo es convertir Baviera en un *hub* global de tecnologías cuánticas, desarrollando tanto la infraestructura como la colaboración entre la industria y la investigación académica. MQV busca transferir los descubrimientos científicos a aplicaciones prácticas y apoyar el crecimiento de *startups* e innovación industrial.

En términos de colaboración, MCQST forma parte de MQV, ya que los investigadores y las instituciones afiliadas a MCQST están directamente involucrados en los avances científicos que MQV busca aplicar y escalar. Ambos trabajan en conjunto para fortalecer la posición de Múnich y Baviera en la investigación cuántica a nivel internacional, combinando ciencia fundamental con desarrollo tecnológico y comercialización.



Vienna Center for Quantum Science and Technology (VCQ)

El Vienna Center for Quantum Science and Technology (VCQ) es una colaboración entre la Universidad de Viena, el Instituto de Ciencia y Tecnología de Austria (ISTA) y la Academia Austríaca de Ciencias. Su objetivo principal es promover la investigación de vanguardia en el campo de la ciencia y tecnología cuánticas. Las funciones clave del VCQ incluyen:

- Investigación interdisciplinaria: fomentar proyectos que integren diversas áreas de la física cuántica, desde la teoría hasta la experimentación.
- Formación académica: ofrecer programas educativos y de doctorado para preparar a la próxima generación de científicos en este ámbito.
- Divulgación científica: organizar eventos, talleres y conferencias para difundir los avances en ciencia cuántica tanto a la comunidad académica como al público general.

Investigadores del VCQ han sido galardonados con premios prestigiosos, como el PNF en 2022, otorgado a Anton Zeilinger por sus contribuciones pioneras en el campo de la información cuántica.

El VCQ ha recibido apoyo significativo de instituciones nacionales e internacionales, incluyendo el Fondo Austríaco de Ciencia (FWF) y programas de la Unión Europea destinados a impulsar la investigación científica.





Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)

El Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) es un centro de investigación alemán dedicado a estudios en energía, salud y materia. Fundado en 1992 en el emplazamiento del antiguo Instituto Central de Física Nuclear de Dresden-Rossendorf, sus raíces científicas se remontan a 1956. Desde 2011, forma parte de la Asociación Helmholtz de Centros de Investigación Alemanes.

El HZDR opera infraestructuras de investigación de gran envergadura que atraen a científicos de todo el mundo, como el Centro de Iones, el Laboratorio de Altos Campos Magnéticos de Dresden y el Centro ELBE para Fuentes de Radiación de Alta Potencia. Estas instalaciones están disponibles para investigadores externos, asignando aproximadamente el 50 % del tiempo de uso a usuarios internacionales.

En el ámbito de las tecnologías cuánticas, el HZDR ha emprendido iniciativas significativas. En octubre de 2024, en colaboración con ParTec AG, firmó un memorando de entendimiento para desarrollar y operar ELBJUWEL, un superordenador de inteligencia artificial destinado a respaldar la investigación científica en IA, computación cuántica y computación de alto rendimiento. Este superordenador ofrecerá aproximadamente 500 petaflops de rendimiento, alcanzando hasta 50 exaflops para operaciones de punto flotante de 8 bits.

Además, en octubre de 2023, el Departamento de Tecnologías Cuánticas del HZDR incorporó un nuevo microscopio avanzado llamado Qnami ProteusQ. Esta herramienta permite estudiar materiales prometedores para crear cúbits

que funcionen a temperatura ambiente, lo que facilitaría mucho el uso práctico de los ordenadores cuánticos. Gracias a este microscopio, el equipo puede investigar fenómenos muy pequeños en materiales magnéticos, ampliando así sus posibilidades de experimentación.

El HZDR también participa en proyectos que buscan soluciones escalables para plataformas cuánticas en silicio, abordando aspectos como el control, la lectura de resultados, el acoplamiento entre cúbits y la transmisión de información cuántica entre unidades de procesamiento en el chip. Estos esfuerzos podrían culminar en una plataforma completa de información cuántica que integre cúbits, interconexiones y electrónica de control y lectura escalables.



Helmholtz Quantum Center (HQC)

El Helmholtz Quantum Center (HQC) es un laboratorio tecnológico que estará próximamente ubicado en el campus del Forschungszentrum Jülich, diseñado para abarcar toda la investigación en computación cuántica, desde el estudio de materiales cuánticos hasta el desarrollo de prototipos. Su estructura integra seis áreas de investigación y siete clústeres tecnológicos, conectando la investigación básica con el desarrollo de *hardware* y *software* para sistemas cuánticos.

El HQC contará con un nuevo edificio equipado con tecnología de vanguardia, directamente conectado a la Helmholtz Nano Facility y al Forschungszentrum. También albergará dos nuevos institutos dedicados al control cuántico y a la computación cuántica, además del JARA Institute for Quantum Information,



establecido dentro de la Jülich Aachen Research Alliance. Además, las instalaciones del Forschungszentrum Jülich que forman parte del programa europeo Quantum Flagship se trasladarán a este nuevo espacio.

El proyecto ha recibido una financiación de casi 50 M€ por parte de la Helmholtz Association. Se inició en 2020 y se espera que esté completamente operativo en 2025, ofreciendo acceso a universidades regionales y socios industriales y científicos de Alemania y Europa.

IQST Center for Integrated Quantum Science and Technology (IQST)

El IQST, fundado en 2014, es un centro de investigación interdisciplinario dedicado al desarrollo de tecnologías innovadoras basadas en la física cuántica fundamental. Su objetivo principal es fomentar sinergias entre las ciencias naturales y la ingeniería para avanzar en la comprensión y aplicación de la ciencia cuántica.

El IQST reúne a físicos, químicos, ingenieros, matemáticos y científicos de ciencias de la vida que trabajan en instalaciones de vanguardia en la Universidad de Stuttgart, la Universidad de Ulm, el Instituto de Tecnología de Karlsruhe y el Instituto Max Planck de Investigación en Estado Sólido de Stuttgart, así como en otras universidades de Baden-Württemberg. Esta colaboración interdisciplinaria abarca áreas como la física del estado sólido, óptica cuántica, teoría cuántica, ingeniería de materiales cuánticos y ciencias de la información.

El centro ha sido reconocido por su excelencia científica, y cuenta con un equipo galardonado que realiza investigaciones de vanguardia desde los principios

fundamentales hasta aplicaciones tecnológicas. Además, el IQST es miembro de la Quantum Alliance, un consorcio de clústeres de excelencia y centros de investigación alemanes dedicados a la ciencia y tecnología cuánticas.

Quantum Valley Lower Saxony (QVLS)

El Quantum Valley Lower Saxony (QVLS) es una iniciativa que reúne a expertos en tecnologías cuánticas de la ciencia, la industria y la política en Baja Sajonia, Alemania. Su objetivo principal es promover la investigación y la transferencia de tecnologías cuánticas, posicionando a la región en la competencia global en este campo. QVLS se dedica a fomentar colaboraciones a largo plazo y a construir una comunidad activa en torno a las tecnologías cuánticas. Además, trabaja en la transferencia de conocimientos científicos hacia *startups* y empresas consolidadas, y se compromete con la formación y capacitación de la futura fuerza laboral en el ámbito cuántico.

QVLS cuenta con el respaldo financiero del Ministerio de Ciencia de Baja Sajonia y la Fundación Volkswagen, lo que refuerza su capacidad para impulsar proyectos de investigación y desarrollo en el ámbito cuántico.

Entre las iniciativas desarrolladas en este centro, destaca QuantumFrontiers, un clúster de excelencia dedicado a expandir los límites de la metrología mediante el uso de luz y materia, superando las restricciones cuánticas actuales. Su investigación se centra en desarrollar dispositivos cuánticos para monitorear recursos hídricos desde el espacio, detectar ondas gravitacionales y mejorar la precisión de los relojes atómicos.



El proyecto combina la ingeniería de nanosistemas y la física cuántica para aumentar la sensibilidad de las mediciones, lo que permite una mejor comprensión de fenómenos naturales. Sus líneas de trabajo incluyen la creación y validación de fuentes de electrones y fotones sin ruido para aplicaciones en criptografía cuántica y fuentes de corriente de alta precisión. También investiga nuevas técnicas de microscopía a escala nanométrica con el objetivo de generar avances en diversas disciplinas científicas.

QuantumFrontiers se enfoca en la exploración de la luz y la materia para ampliar las bases de la metrología y desarrollar aplicaciones tanto en los niveles más pequeños como en los más grandes del universo.



Center for Quantum Science and Engineering
(CQSE) en NRW

El Center for Quantum Science and Engineering (CQSE) en Renania del Norte-Westfalia (NRW) es una iniciativa conjunta del Fraunhofer Institute for Laser Technology (ILT) y el Forschungszentrum Jülich. Este centro tiene como objetivo principal coordinar y promover la investigación y el desarrollo en tecnologías cuánticas dentro de la región del Rin. Sus funciones incluyen la creación de un ecosistema de innovación de alto crecimiento en tecnologías cuánticas y la colaboración estrecha con instituciones académicas y socios industriales para facilitar la transferencia de tecnología al sector productivo.

El Ministerio de Cultura y Ciencia del Estado de NRW ha asignado aproximadamente 21M€ para proyectos relacionados con la computación cuántica, como el proyecto EPIQ, que busca desarrollar una computadora cuántica de iones

atrapados en colaboración con la *startup* eleQtron y el Jülich Supercomputing Centre.

El CQSE está compuesto por una red de más de setenta empresas, universidades e institutos de investigación que participan activamente en el desarrollo de una hoja de ruta cuántica para NRW. Esta colaboración busca integrar a todos los actores relevantes en el estado para maximizar el uso eficiente de los recursos y establecer condiciones marco adecuadas para el avance de las tecnologías cuánticas.



Q.Link.X network

La Q.Link.X network es una iniciativa financiada por el Ministerio Federal de Educación e Investigación de Alemania (BMBF) que tiene como objetivo desarrollar una red cuántica de alta seguridad en Alemania. Esta red busca interconectar nodos cuánticos a través de enlaces de comunicación cuántica, utilizando tecnologías como la QKD para garantizar la seguridad de las comunicaciones.

Entre las principales funciones de Q.Link.X se encuentran:

- Desarrollo de tecnologías de comunicación cuántica: investigación y desarrollo de *hardware* y *software* necesarios para la implementación de redes cuánticas seguras.
- Integración de sistemas: creación de interfaces entre la infraestructura de comunicación clásica y los nuevos sistemas cuánticos.



- Demostraciones prácticas: realización de proyectos piloto que muestren la viabilidad y las ventajas de las comunicaciones cuánticas en entornos reales.

El consorcio de Q.Link.X está compuesto por una amplia gama de participantes, incluyendo instituciones académicas, centros de investigación y empresas del sector tecnológico, sumando más de cuarenta socios.



La Quantum Alliance es un consorcio en crecimiento que desempeña un papel destacado en el avance de las tecnologías de gemelos digitales, haciéndolas accesibles para todos. Su objetivo principal es proporcionar un foro colaborativo y desarrollar estándares que faciliten y abaraten la adopción de estas tecnologías por parte de propietarios y operadores de edificios.

Quantum Alliance busca acelerar la adopción del Quantum Standard en el mercado haciéndolo más accesible y fácil de implementar. Para ello, desarrolla herramientas de alto nivel para programadores, más allá de simples modelos semánticos, y trabaja en la creación de bibliotecas de desarrollo que faciliten la gestión de datos, la sincronización, la validación y la comunicación. También se enfoca en habilitar QuantumAPI, establecer un esquema de base de datos y desarrollar un modelo en memoria compatible con varios lenguajes de programación.



Fig. 3.8. Principales actores de la I+i en Alemania en tecnologías cuánticas que forman parte del Quantum Alliance.
Fuente: <https://www.quantum-alliance.de/>





Quantum
Delta NL

Quantum Delta NL (QDNL)

QDNL es una fundación neerlandesa dedicada a acelerar el desarrollo de tecnologías cuánticas en los Países Bajos. Su objetivo principal es establecer un ecosistema nacional de excelencia en innovación cuántica, facilitando la colaboración entre instituciones científicas, empresas, estudiantes y profesionales. Para lograrlo, QDNL conecta cinco *hubs* especializados ubicados en Delft, Eindhoven, Leiden, Twente y Ámsterdam, abarcando todo el país.

Lanzada en 2021, la iniciativa cuenta con una financiación de 615 M€ del Gobierno neerlandés para un período de siete años. Esta inversión respalda programas catalizadores como Quantum Inspire (el primer ordenador cuántico europeo), una red cuántica nacional y aplicaciones de sensores cuánticos.

Además, QDNL ha establecido QDNL Participations, un fondo de capital riesgo con un presupuesto inicial de 15 M€, destinado a apoyar *startups* de tecnología cuántica en etapas tempranas. En enero de 2025, este fondo anunció una primera ronda de cierre de 25 M€, con el objetivo de alcanzar los 60 M€ para inversiones globales en *startups* cuánticas.

A través de estas iniciativas, QDNL busca posicionar a los Países Bajos como líder internacional en investigación, desarrollo y comercialización de tecnologías cuánticas, fomentando un ecosistema colaborativo y dinámico que impulse la innovación y el crecimiento económico en este campo emergente.



QUANTUM
INTERNET
ALLIANCE

Quantum Internet Alliance (QIA)

QIA es un consorcio europeo dedicado al desarrollo de la infraestructura y tecnologías necesarias para la **creación de un Internet cuántico** seguro y funcional. Su objetivo es establecer las bases de una red cuántica interconectada en Europa, aprovechando los principios de la mecánica cuántica para garantizar la seguridad en la transmisión de información y abrir nuevas posibilidades en telecomunicaciones, ciberseguridad y computación distribuida. Como parte de su estrategia, QIA trabaja en la implementación de **redes de comunicación cuántica** mediante tecnologías avanzadas como la QKD, con el propósito de fortalecer la soberanía digital europea y prevenir amenazas futuras de los ordenadores cuánticos.

Para acelerar la adopción de estas tecnologías, QIA fomenta la colaboración entre centros de investigación, universidades y empresas tecnológicas líderes en Europa, garantizando que los avances científicos puedan traducirse en aplicaciones comerciales viables y en soluciones innovadoras para la seguridad de las comunicaciones. Además, su estrategia se basa en una implementación escalonada del Internet cuántico, avanzando desde pruebas en entornos controlados hasta la construcción de una infraestructura paneuropea que permita la comunicación segura entre distintos países.

La QIA forma parte del **Quantum Flagship** de la Unión Europea, lo que subraya su papel estratégico en la consolidación del liderazgo europeo en tecnologías cuánticas. A través de sus iniciativas, la alianza busca no solo desarrollar una red cuántica segura, sino también establecer estándares globales en esta



tecnología emergente, impulsando su aplicación en sectores clave como la computación en la nube, la banca, la defensa y las telecomunicaciones.



Quantum Computing and Simulation Hub
(QCS Hub)

El QCS Hub, establecido en 2019 dentro del **Programa Nacional de Tecnologías Cuánticas del Reino Unido**, ha sido un consorcio de 17 universidades líderes dedicado a abordar los desafíos más complejos en la computación cuántica. Su estrategia se ha centrado en acelerar el desarrollo de tecnologías mediante un enfoque interdisciplinario, combinando esfuerzos en *hardware*, *software* y aplicaciones industriales. A lo largo de su trayectoria, el QCS Hub ha trabajado en múltiples líneas de investigación clave, incluyendo procesadores basados en trampas de iones, circuitos superconductores, nodos de diamante, fotónica cuántica, procesadores en silicio, redes de átomos fríos, algoritmos avanzados, verificación y validación de tecnologías cuánticas, así como el diseño de arquitecturas y control de sistemas cuánticos. Este enfoque integral ha permitido que el Reino Unido se posicione como un actor clave en la carrera global por la computación cuántica.

El QCS Hub ha sido un punto de conexión entre la industria y la academia, fomentando colaboraciones estratégicas y facilitando la transferencia de conocimiento a sectores productivos. A través de programas de participación, ha impulsado asociaciones con empresas tecnológicas y sectores industriales, promoviendo la adopción de la computación cuántica en problemas del mundo real. También ha ofrecido formación especializada, apoyo a *startups* y actividades de divulgación para fortalecer la comunidad cuántica. Su impacto ha

trascendido la investigación fundamental, orientando sus esfuerzos hacia aplicaciones concretas en optimización, simulación y seguridad cuántica, áreas de gran interés para sectores como la energía, la ciberseguridad, la farmacología y la IA.

Tras la finalización de su ciclo operativo en 2024, el QCS Hub ha dado paso al **Hub for Quantum Computing via Integrated and Interconnected Implementations (QCi3)**, que continúa su legado impulsando nuevos avances en la computación cuántica. Su contribución ha sido fundamental en el avance del conocimiento y el desarrollo de tecnologías emergentes, consolidando al Reino Unido como uno de los principales polos de innovación cuántica a nivel mundial.



Centre Européen de Sciences Quantiques
(CESQ)

El CESQ, inaugurado en octubre de 2023 en Estrasburgo, es una iniciativa conjunta de la Université de Strasbourg y el CNRS, respaldada por la Región Gran Este y la Eurometrópolis de Estrasburgo. Este centro de excelencia reúne a físicos, químicos y biólogos, sumando un equipo de 80 investigadores y técnicos distribuidos en siete laboratorios. Su misión es acelerar el descubrimiento de nuevos compuestos y materiales cuánticos, avanzar en la información cuántica basada en cúbits atómicos y moleculares, desarrollar nuevos algoritmos y diseñar procesos químicos más eficientes y ecológicos.

El CESQ se integra en el Institut de Science et d'Ingénierie Supramoléculaires (ISIS) y forma parte de la estrategia de «Iniciativa de Excelencia» de la Université de Strasbourg, que busca mejorar la visibilidad y el atractivo de la investigación y la enseñanza. Además, mantiene una colaboración estrecha con el



Karlsruhe Institute of Technology (KIT) a través de EUCOR - El Campus Europeo, financiando conjuntamente una cátedra para fortalecer la cooperación transfronteriza.

El centro se encuentra en el Campus de Cronenbourg del CNRS y está diseñado para fomentar la colaboración interdisciplinaria en física cuántica, química, informática y fotónica. Uno de sus objetivos es facilitar la creación y alojamiento de *startups*, promoviendo la sinergia con la industria y potenciando la transferencia tecnológica. Con una superficie total de 1600 m², el CESQ está equipado con infraestructuras de vanguardia para apoyar sus actividades de investigación y desarrollo.

El CESQ también se destaca por su compromiso con la divulgación y la educación en ciencias cuánticas. En marzo de 2025, organizó la Semana Cuántica, un evento de una semana que incluyó exposiciones, jornadas de puertas abiertas y actividades destinadas a desentrañar los misterios de las ciencias cuánticas, dirigido tanto al público general como a la comunidad académica e industrial.

A través de su enfoque integrador y su dedicación a la excelencia, el CESQ se posiciona como un referente en la investigación de las ciencias cuánticas, contribuyendo al avance del conocimiento y al desarrollo de tecnologías emergentes que prometen transformar la sociedad del futuro.



Estrategia Cuántica de la OTAN

La Estrategia Cuántica de la OTAN, publicada en 2023, tiene como objetivo posicionar a la Alianza como una entidad preparada para el futuro cuántico. Esta estrategia se centra en identificar aplicaciones de uso dual de las tecnologías cuánticas, establecer marcos de interoperabilidad, **migrar hacia criptografía segura** frente a la computación cuántica y prevenir inversiones adversarias en este ámbito.

En línea con esta estrategia, la OTAN ha establecido la Transatlantic Quantum Community (TQC), una plataforma que reúne a expertos de Gobiernos, industria y academia de los países aliados. El TQC facilita la colaboración en tecnologías cuánticas, promoviendo la innovación responsable y fortaleciendo la seguridad de la Alianza.

Una de las primeras iniciativas del TQC es la creación de la TQC Industry Network, un foro informal que busca facilitar la colaboración entre empresas de tecnología cuántica y usuarios finales de defensa de la OTAN. Esta red organiza eventos y encuentros, tanto virtuales como presenciales, y trabaja en iniciativas concretas como la creación de asociaciones estratégicas y la identificación de oportunidades de financiación.

Las empresas interesadas en unirse a la TQC Industry Network deben estar alineadas con los objetivos de la OTAN y tener interés en involucrarse en el ámbito de la defensa y las tecnologías cuánticas. La participación en esta red ofrece beneficios, como el acceso a información sobre las necesidades de los operadores de defensa, oportunidades para discutir estándares industriales



necesarios y la posibilidad de construir asociaciones estratégicas con actores clave en el campo de la tecnología cuántica y la defensa.

España participa activamente en la TQC, contribuyendo al desarrollo de un ecosistema que facilita el diálogo, la colaboración y el intercambio de conocimientos entre los sectores público y privado en el campo de las tecnologías cuánticas. Esta participación refleja el compromiso del país con el avance de estas tecnologías y su aplicación en la defensa y la seguridad.

The EU chips act



Ley Europea de Chips

La Ley Europea de Chips es una iniciativa de la Unión Europea que busca reforzar su **ecosistema de semiconductores**, asegurando la resiliencia de la industria y reduciendo la dependencia de proveedores externos. Con una inversión prevista de 43 000 M€, la UE aspira a duplicar su participación en el mercado mundial de semiconductores al 20 % para 2030, promoviendo el desarrollo de tecnologías avanzadas y fomentando la soberanía tecnológica en este sector estratégico. Para lograrlo, la estrategia se enfoca en mejorar la capacidad de producción, impulsar la innovación en el diseño y fabricación de chips, y consolidar una red de centros de competencia que faciliten la investigación y el acceso a infraestructuras de vanguardia. Además, se están estableciendo líneas piloto avanzadas para la fabricación de chips cuánticos y otros semiconductores de nueva generación, con el fin de integrar estos desarrollos en el ecosistema digital europeo. La ley también busca garantizar la seguridad del suministro a través de un marco regulatorio sólido y una mayor coordinación entre los Estados miembros, permitiendo a la UE responder con rapidez ante posibles

crisis en la cadena de suministro. Asimismo, se fomenta la **formación de talento** especializado y la atracción de inversiones privadas que complementen los esfuerzos públicos en la creación de una industria más competitiva. En el futuro, la UE planea expandir la Ley Europea de Chips para incluir semiconductores **fundacionales y heredados**, asegurando así que Europa no solo lidere en innovación, sino que también fortalezca su presencia en tecnologías esenciales para múltiples industrias.

Un componente esencial de esta estrategia es la creación de la Empresa Común para los Chips (**Chips Joint Undertaking**), una asociación tripartita que incluye a la Unión Europea, los Estados miembros participantes y asociaciones industriales clave. Esta entidad tiene como objetivo impulsar el desarrollo y la adopción de tecnologías avanzadas de **chips nanoelectrónicos fabricados en Europa**. Con un presupuesto total previsto de casi 11 000 M€ hasta 2030, la Empresa Común gestionará líneas piloto precomerciales, desarrollará una plataforma de diseño basada en la nube, apoyará el avance de chips cuánticos y establecerá una red de centros de competencia. Estas acciones están diseñadas para cerrar la brecha entre la investigación y la producción, facilitando la comercialización de ideas innovadoras y fortaleciendo la autonomía estratégica de la UE en el ámbito de los semiconductores.

La Ley Europea de Chips y la Empresa Común para los Chips trabajan de manera conjunta para posicionar a Europa como líder en el sector de los semiconductores, garantizando un suministro seguro y fomentando la innovación en tecnologías críticas para el futuro.



ACTORES E INICIATIVAS CLAVE EN LA ESTRATEGIA CUÁNTICA NACIONAL

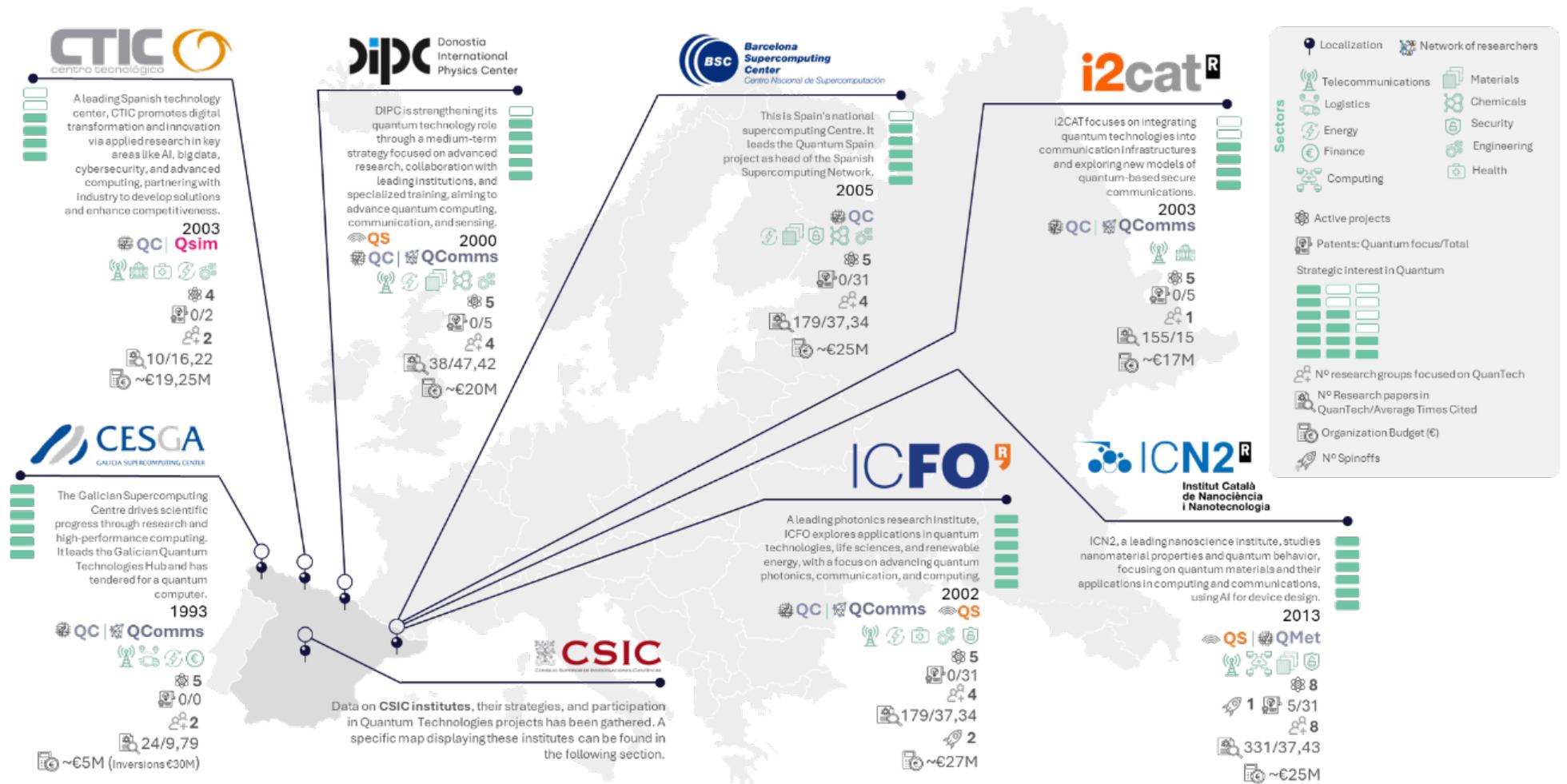


Fig. 3.9. Principales actores de la I+i en España en tecnologías cuánticas.



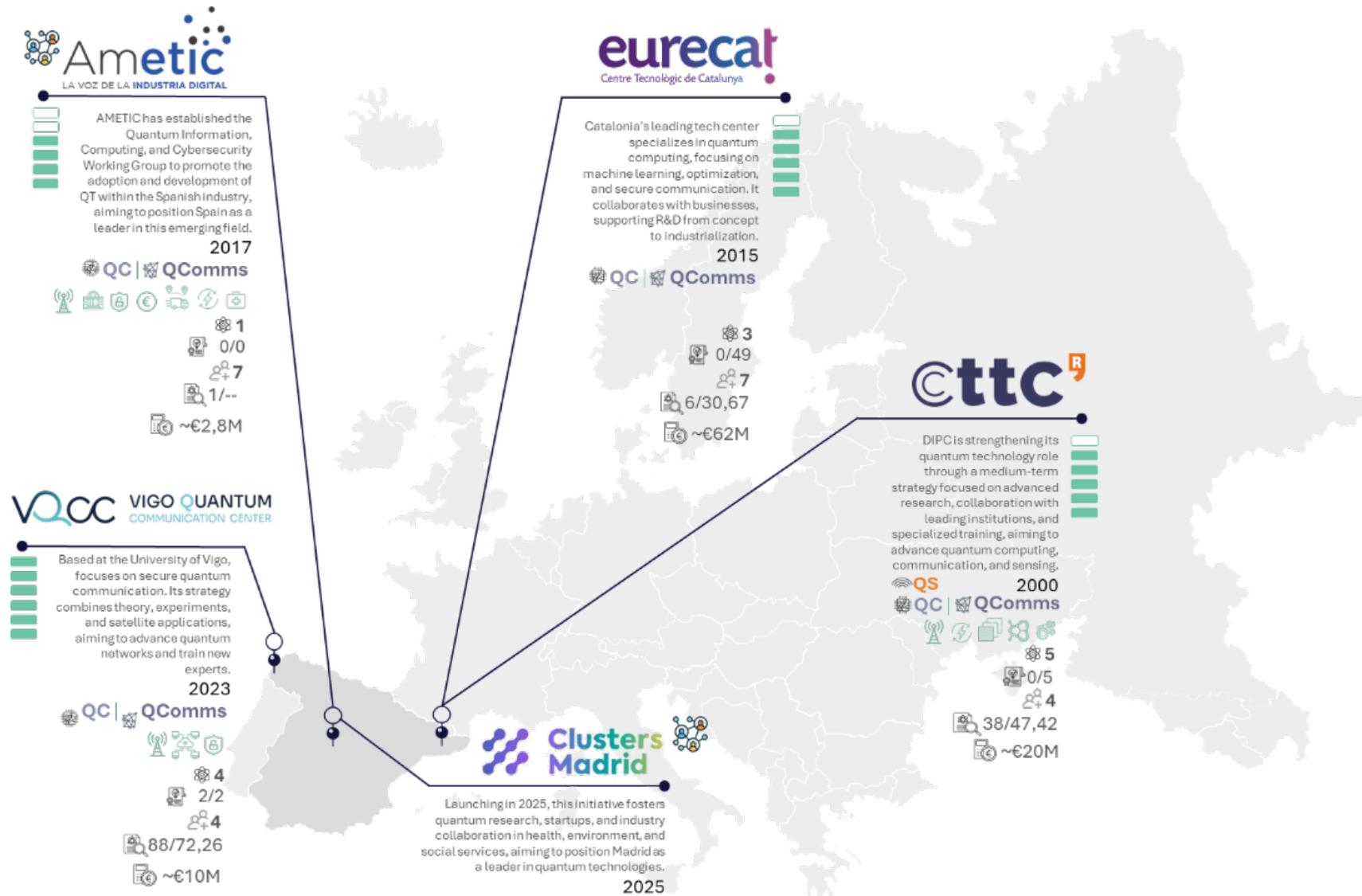


Fig. 3.9. Principales actores de la I+i en España en tecnologías cuánticas.





Barcelona Supercomputing Center - Centro Nacional de Supercomputación

El Barcelona Supercomputing Center - Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS) es la institución de referencia en supercomputación en España. Ubicado en Barcelona, combina dos funciones esenciales: es un centro de investigación con más de quinientos científicos dedicados al desarrollo de tecnologías avanzadas y, al mismo tiempo, actúa como un servicio de supercomputación para la comunidad científica. Además, es responsable de la gestión de la Red Española de Supercomputación (RES).

Fundado el 1 de abril de 2005, opera como un consorcio formado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España (60 %), el Departamento de Economía y Conocimiento de la Generalitat de Cataluña (30 %) y la Universidad Politécnica de Cataluña-Barcelona Tech (10 %).

El MareNostrum, su superordenador emblemático, está alojado dentro de la capilla de Torre Girona y se ha convertido en un símbolo de la institución. Ha sido premiado como el *data center* más llamativo y hermoso del mundo.

Junto a él, el BSC-CNS cuenta con otros sistemas de computación de alto rendimiento, como un clúster Bull con tarjetas gráficas NVIDIA y una infraestructura especializada en proyectos médicos, ampliando así su capacidad de cálculo y su impacto en diversas áreas de investigación.

En realidad, es ya la quinta de una serie de «máquinas» que, desde su fundación, han ido ocupando las instalaciones del BSC-CNS. Ahora, la idea es ubicar el MareNostrum 5 en conexión con los ordenadores cuánticos.

El 6 de febrero de 2025, este centro presentó el primer ordenador cuántico desarrollado en España con tecnología íntegramente europea. El sistema se integra en Quantum Spain, una iniciativa coordinada por el BSC y promovida por el Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública a través de la Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial (SEDIA). Financiado en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, el proyecto se alinea con los objetivos de España Digital 2026 y la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial (ENIA). Además, es socio miembro de Quantumcat, el *hub* de tecnología cuántica de Cataluña.



Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

El CSIC ha consolidado su papel como uno de los actores clave en la investigación y desarrollo de **tecnologías cuánticas** en España y Europa. Su estrategia ha evolucionado desde una estructura fragmentada y dispersa en varios institutos hacia un enfoque más coordinado gracias a la creación de la **Plataforma Temática Interdisciplinar en Tecnologías Cuánticas (QTEP)**. Este programa ha permitido agrupar capacidades, optimizar recursos y fomentar la colaboración entre distintos centros y grupos de investigación, dando lugar a una comunidad más cohesionada y con mayor impacto en el ámbito cuántico. Actualmente, el CSIC desarrolla actividades en cinco grandes áreas: computación cuántica, comunicación cuántica, sensores cuánticos, teoría cuántica e ingeniería cuántica, con aplicaciones que abarcan desde la criptografía poscuántica hasta la simulación de materiales avanzados.



La participación del CSIC en proyectos internacionales ha sido clave para su crecimiento en este sector. A nivel europeo, el organismo forma parte de iniciativas como **Quantum Flagship**, **QuantERA** y **el EuroQCI**, además de contribuir en proyectos como **S2QUIP**, **TouQan**, **CoQuaDis**, **OPTRIBITS** y **MOLAR**, dirigidos a integrar tecnologías fotónicas, optimizar operaciones lógicas cuánticas y explorar nuevas aplicaciones en metrología y sensores. Estas colaboraciones han fortalecido su liderazgo en áreas estratégicas como la fabricación de chips cuánticos superconductores, el desarrollo de sensores cuánticos de alta precisión y la implementación de tecnologías de comunicación cuántica segura.

El **mapa de capacidades del CSIC en tecnologías cuánticas** muestra una amplia distribución geográfica de centros especializados en toda España, destacando institutos como el Instituto de Física Fundamental (IFF), el Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB), el Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM) y el Instituto de Física Teórica (IFT), entre otros. En términos de líneas de investigación, el CSIC ha identificado áreas prioritarias alineadas con tendencias globales, como la computación cuántica y la corrección de errores, los materiales cuánticos y los sistemas topológicos, la metrología cuántica y la nanofotónica aplicada a redes de comunicación seguras.

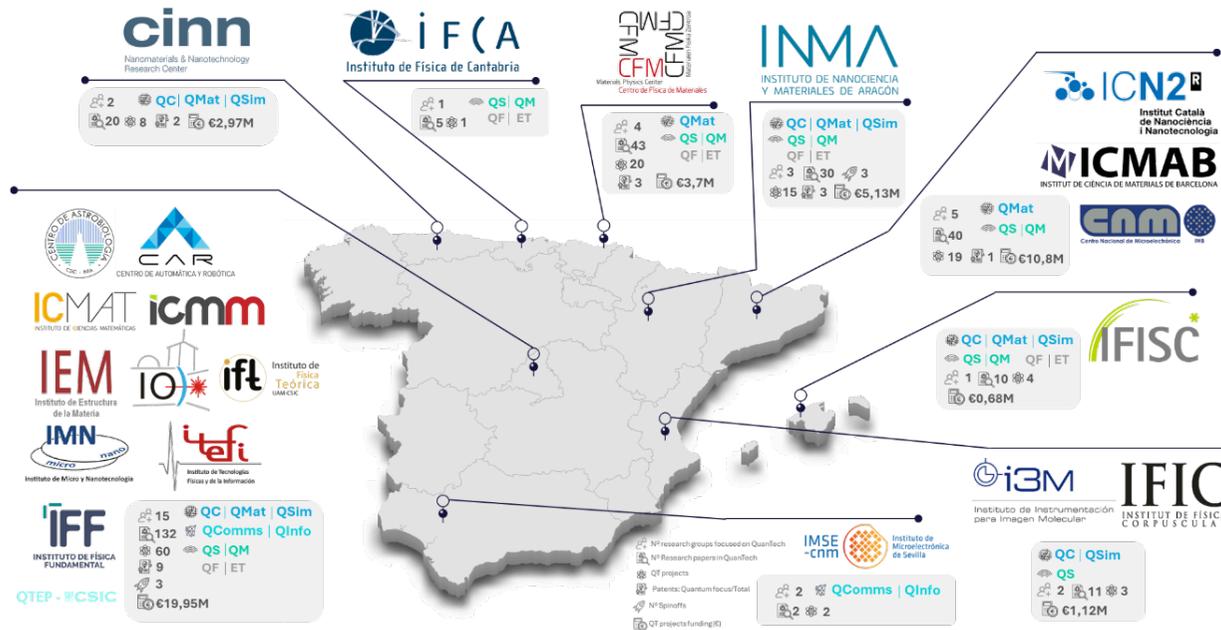


Fig. 3.10. Distribución y miembros de la QTEP en el CSIC.



Un aspecto destacado dentro del ecosistema cuántico del CSIC es la alta concentración de capacidades en la **Comunidad de Madrid**, donde se ubican algunos de los principales institutos de referencia en el área. Entre ellos, destacan el mencionado IFF, que lidera investigaciones en computación y metrología cuántica; el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM), especializado en superconductores y materiales cuánticos; el Instituto de Estructura de la Materia (IEM) y el Instituto de Física Teórica (IFT), con un fuerte enfoque en fundamentos de la mecánica cuántica y teoría cuántica de la información. Además, el Instituto de Micro y Nanotecnología (IMN-CNM) desempeña un papel clave en el desarrollo de dispositivos cuánticos, mientras que el Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI) se centra en sistemas de detección y comunicación cuántica. Complementando estas capacidades, el Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT) contribuye con desarrollos en teoría de la información cuántica y criptografía avanzada; el Centro de Automática y Robótica (CAR) explora aplicaciones de inteligencia artificial y control automático en sistemas cuánticos; y el Instituto de Óptica (IO) trabaja en tecnologías de fotónica cuántica, claves para el desarrollo de sensores y sistemas de comunicación de última generación.

Su estrategia también contempla una fuerte apuesta por la **transferencia de tecnología y la colaboración con la industria**, con la creación de *spin-offs* como **Inspiration-Q, G2-Zero, Nanological o Q-Dynamics** y acuerdos con empresas del sector. Además, iniciativas de formación, como másteres y programas de verano, buscan atraer y consolidar talento en este campo emergente. Con estos esfuerzos, el CSIC no solo refuerza su posición en el panorama internacional, sino que también impulsa el desarrollo de una infraestructura tecnológica clave para el futuro de la cuántica en España y Europa.



Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC)

El Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC) es una institución privada sin ánimo de lucro dedicada a la investigación en telecomunicaciones. Su actividad se centra en el desarrollo de proyectos de investigación, tanto básica como aplicada, en las capas inferiores de los sistemas de telecomunicaciones, con el objetivo de asimilar nuevas tecnologías y transferirlas al sector empresarial.

El CTTC forma parte de la red de Centros de Investigación de Cataluña (CERCA) y fue inaugurado en 2001 como parte de una iniciativa impulsada por la Generalitat para fortalecer la investigación y el desarrollo tecnológico en la región. En 2003 comenzó la construcción de su sede definitiva en el Parc Mediterrani de la Tecnologia, consolidando su infraestructura para la innovación.

El Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC) es una de las entidades que participa activamente en la Catalonia Quantum Academy (CQA), junto con otras instituciones de referencia como el Institute of Photonic Sciences (ICFO), la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), la Universitat de Barcelona (UB), la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), el Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology (ICN2), el Institut de Física d'Altes Energies (IFAE) y el i2CAT - The Internet Research Center.

La CQA es una iniciativa dentro del proyecto Cuántica - Mediterranean Valley of Quantum Science and Technologies, cuyo objetivo es fortalecer la formación, el desarrollo profesional y la educación en el ámbito de las ciencias y tecnologías cuánticas (QST). Se trata de una plataforma colaborativa que reúne a



múltiples instituciones con el fin de impulsar el talento y la investigación en este campo emergente.

En colaboración con Telefónica y LuxQuanta, el CTTC trabaja en la integración de la tecnología QKD en la infraestructura de red, permitiendo su coexistencia con las comunicaciones ópticas convencionales y su adaptación a entornos de redes definidas por *software* (SDN). Este enfoque busca abordar los desafíos de seguridad en las futuras redes 6G, facilitando una conectividad más fiable.

Asimismo, investiga la compatibilidad entre la tecnología QKD y las comunicaciones ópticas para mejorar la seguridad en los entornos de telecomunicaciones de próxima generación.

El CTTC es un miembro «asociado» a la iniciativa Quantumcat, por su participación en algunos de los proyectos.



Eurecat es un centro tecnológico creado en 2015 en Cataluña con el objetivo de integrar varios centros tecnológicos avanzados de la región. Está especializado en investigación aplicada y desarrollo tecnológico en diversos sectores de la industria.

Cuenta con múltiples sedes y una plantilla que abarca diversas áreas de especialización, incluyendo manufactura avanzada, biotecnología, materiales inteligentes, tecnologías digitales y sostenibilidad. Su labor se centra en desarrollar soluciones tecnológicas aplicadas, colaborando con empresas de distintos

tamaños para mejorar su competitividad mediante la incorporación de nuevas tecnologías.

Eurecat participa en proyectos de investigación nacionales e internacionales y forma parte de iniciativas estratégicas en ámbitos como la computación cuántica, la IA, la ciberseguridad y la economía circular. Además, mantiene una estrecha colaboración con el sector industrial, ofreciendo servicios de asesoramiento, desarrollo de prototipos y pruebas de validación tecnológica.

En 2018, el centro daba servicio a 1500 empresas, de las cuales la mitad eran pymes catalanas, y contaba con una plantilla de 650 empleados repartidos en once sedes.

Eurecat publicó en febrero de 2025 que ha reunido un equipo multidisciplinar que combina física cuántica, IA y desarrollo de *software* para ayudar a las empresas a aprovechar el potencial de la computación cuántica.

Según el informe de tendencias tecnológicas para 2025 de ACCIÓ, la computación cuántica será una de las tecnologías clave del año, situando a Eurecat como un actor destacado en Cataluña. Para ello, Eurecat ofrecerá soluciones de *software* cuántico dirigidas a investigadores, ingenieros y empresas para resolver problemas de alta complejidad que superan las capacidades de la computación tradicional.

La iniciativa busca acercar la innovación cuántica a sectores como la medicina, los materiales avanzados, las finanzas, la ciberseguridad y la logística. Eurecat también ha participado en la Estrategia Cuántica de Cataluña y en proyectos como la red AI4ES y la red Cervera ARQA, esta última enfocada en desarrollar aplicaciones prácticas de computación cuántica para el sector empresarial mediante un *roadmap* tecnológico que evalúa su viabilidad y eficiencia en distintos ámbitos productivos.





La Fundació i2CAT, que en septiembre de 2023 celebró su vigésimo aniversario, es un centro de investigación e innovación en Cataluña especializado en el desarrollo de tecnologías digitales avanzadas y el Internet del futuro. Forma parte de los CERCA y promueve un modelo de innovación abierta que fomenta la colaboración entre empresas, Administraciones públicas, universidades y usuarios finales.

Su objetivo es crear, desarrollar y transferir nuevas soluciones de Internet al sector industrial, contribuyendo a la evolución de una red más ubicua, instantánea y transversal a todas las actividades económicas y sociales. Su enfoque abarca desde la infraestructura de red hasta nuevos servicios y aplicaciones digitales, basándose en alianzas estratégicas entre el sector académico, público y privado.

Cuenta con una infraestructura experimental que conecta a distintos actores a nivel nacional e internacional. En el ámbito europeo, i2CAT tiene una fuerte presencia en proyectos del programa H2020 y recibe financiación de la Comisión Europea. A nivel local, participa activamente en iniciativas de la Generalitat de Cataluña, como SmartCatalonia, RIS3CAT y la Estrategia 5G de Cataluña.

Es socio también de Quantumcat, el *hub* de tecnología cuántica de Cataluña.



Con catorce de sus veintiséis grupos de investigación directamente involucrados en investigaciones en ciencia y tecnología cuánticas relevantes para los temas abarcados por el ecosistema internacional de ciencia y tecnología cuánticas, el ICFO es un centro CERCA fundado en 2002 por el Gobierno de Cataluña y la Universidad Politécnica de Cataluña.

Ubicado en el Parque Mediterráneo de Tecnología de Barcelona, en él desarrollan su actividad ochenta laboratorios centrados en técnicas de imagen avanzada, tecnologías de la información, sensores, láseres sintonizables y ultrarrápidos, energía fotovoltaica, grafeno y tecnologías cuánticas.

Entre otras actividades, ICFO participa en el proyecto europeo QUDICE (Quantum Devices and Subsystems for Communications in Space), una iniciativa lanzada en 2023 que busca desarrollar componentes y subsistemas para la distribución de claves cuánticas en el espacio, con el objetivo de fortalecer la seguridad de las comunicaciones digitales en el futuro EuroQCI. El proyecto se basa en la tecnología de QKD, que garantiza la protección de la información a nivel fundamental utilizando principios de la mecánica cuántica, en lugar de depender de la capacidad computacional de los atacantes. ICFO contribuye con su experiencia en tecnologías cuánticas aplicadas a la criptografía y las comunicaciones, impulsando el desarrollo de soluciones que permitirán la integración de sistemas satelitales en las redes de comunicación seguras de Europa. Su labor en este proyecto refuerza el papel de la cuántica en la ciberseguridad y abre el camino hacia una infraestructura europea de comunicaciones ultraseguras basada en satélites.





**Instituto Catalán de Nanociencia
y Nanotecnología ICN2**

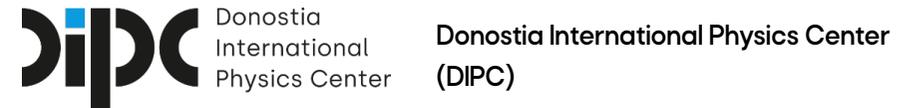
El Instituto Catalán de Nanociencia y Nanotecnología (ICN2) es un centro de investigación ubicado en Cataluña, especializado en el estudio y desarrollo de tecnologías basadas en la nanociencia. Su trabajo abarca desde la investigación fundamental hasta la aplicación industrial de soluciones innovadoras en diversos sectores, incluyendo la electrónica, la energía, la biomedicina y las tecnologías cuánticas.

El ICN2 forma parte de la red de centros de excelencia Severo Ochoa y colabora estrechamente con universidades, centros tecnológicos y empresas a nivel nacional e internacional. Su enfoque multidisciplinar combina física, química, biología e ingeniería para el desarrollo de nuevos materiales y dispositivos a escala nanométrica, con aplicaciones en sensores avanzados, computación cuántica, materiales inteligentes y terapias biomédicas.

El ICN2 centra su investigación en materiales cuánticos avanzados, incluyendo aislantes topológicos magnéticos, grafeno, heteroestructuras de Van der Waals, materiales con fuerte acoplamiento espín-órbita y estructuras magnéticas bidimensionales. Su trabajo busca desarrollar dispositivos innovadores con aplicaciones en espintrónica, fonónica y optoelectrónica. A través de distintas aproximaciones, sus investigadores consolidan el estudio de la materia cuántica como un área estratégica dentro de sus líneas de investigación.

Desde el ICN2, la investigación en materiales cuánticos se orienta a aplicaciones en transducción cuántica, comunicación cuántica y computación cuántica. Además, el centro participa activamente en la formación de nuevos talentos a

través del Máster en Ciencia y Tecnología Cuántica de Barcelona y la Catalan Quantum Academy, iniciativas destinadas a potenciar la capacitación en este ámbito y atraer talento internacional.



El Donostia International Physics Center (DIPC) es un instituto de investigación con sede en San Sebastián, fundado en 1999 con el propósito de impulsar la investigación en ciencia de materiales. Desde su creación, ha mantenido un enfoque internacional y ha promovido la colaboración con investigadores de todo el mundo.

Está gestionado por un patronato que incluye al Gobierno Vasco, la Diputación Foral de Guipúzcoa, el Ayuntamiento de San Sebastián, la Universidad del País Vasco, Kutxa, EDP, Telefónica y CAF, con la presidencia de Pedro Miguel Echenique desde su fundación. A lo largo de los años, Iberdrola y Mapfre también han formado parte de su estructura de apoyo.

En 2008, el centro fue reconocido como Basque Excellence Research Center (BERC) y en 2019 obtuvo la distinción de Centro de Excelencia Severo Ochoa. Con una amplia red de colaboración, ha contribuido a la publicación de miles de artículos científicos.

El DIPC del País Vasco desarrolla una línea de investigación centrada en el estudio de sistemas cuánticos desde la perspectiva del procesamiento de información. Su trabajo abarca el diseño y análisis de protocolos de información cuántica en sistemas de estados sólidos, el estudio de las propiedades de estados y



canales cuánticos, así como la investigación de sistemas cuánticos complejos y fuertemente correlacionados. Entre sus áreas de investigación se incluyen la acústica cuántica, los spin-cúbits y la óptica cuántica de electrones, el desarrollo de técnicas de simulación para redes cuánticas y el estudio del entrelazamiento en sistemas de muchos cuerpos y múltiples partes.

Este centro está asociado a la iniciativa Basque Quantum BasQ. BasQ es una iniciativa impulsada por el Departamento de Ciencia, Universidades e Innovación del Gobierno Vasco en colaboración con las Diputaciones Forales de Álava, Bizkaia y Gipuzkoa, con el objetivo de consolidar Euskadi como un centro de referencia en tecnologías cuánticas a nivel global, fomentando un ecosistema basado en la investigación, el talento y la innovación.

La estrategia BasQ se apoya en las capacidades científicas y tecnológicas de Euskadi en el ámbito cuántico y otras tecnologías avanzadas. Dentro de esta iniciativa, se espera que en 2025 IBM instale un ordenador cuántico en San Sebastián.



Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA)

El Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA) fue fundado en 1993 y está ubicado en Santiago de Compostela, en la provincia de La Coruña. Desde sus inicios, ha sido una de las instalaciones tecnológicas más avanzadas de Europa, ofreciendo servicios de computación de alto rendimiento a la comunidad científica, al sistema académico universitario y al Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Su historia se remonta a 1992, cuando el edificio fue construido en terrenos cedidos por el CSIC en el Campus Sur de Santiago de Compostela, con el objetivo de albergar un centro especializado en supercomputación y comunicaciones. Un año después, en mayo de 1993, el CESGA fue inaugurado y desde entonces ha evolucionado continuamente, consolidándose como un referente en computación avanzada.

Entre sus infraestructuras destaca el supercomputador Finisterrae, junto con el Superordenador Virtual Gallego y otros sistemas de cálculo alojados en sus instalaciones. A lo largo de los años, ha desarrollado una amplia capacidad de cómputo, ampliando sus recursos en diversas áreas tecnológicas clave.

El CESGA se centra en varias líneas de actividad, incluyendo la computación de altas prestaciones (HPC), la computación distribuida y en *grid* (HTC), el almacenamiento de datos, las comunicaciones, el desarrollo de herramientas de *e-learning* y colaboración, la transferencia de tecnología, el *e-business* y los sistemas de información geográfica. Su evolución y contribución al desarrollo tecnológico han convertido al centro en un pilar fundamental para la investigación y la innovación en Galicia y en el ámbito internacional.

El CESGA lleva más de siete años trabajando en computación cuántica y cuenta con una amplia trayectoria en computación de altas prestaciones (HPC) desde 1993. Ha participado en múltiples proyectos europeos y nacionales en el ámbito de la computación cuántica y, en la actualidad, dispone de un grupo de investigación de diez personas dedicadas al desarrollo de algoritmos cuánticos y *benchmarking*.

El ecosistema de computación cuántica en Galicia está liderado por el CESGA, mientras que, en lo que respecta a la comunicación cuántica, encontramos al Vigo Quantum Communication Center (VQCC).





Vigo Quantum Communication Center (VQCC)

El VQCC, con sede en la Universidad de Vigo, es un centro de referencia en el ámbito de la comunicación cuántica, disciplina clave para el futuro de las telecomunicaciones seguras. Su misión es consolidarse como un centro de investigación de excelencia a nivel internacional, atrayendo talento científico de alto nivel (incluyendo investigadores posdoctorales, estudiantes y especialistas en física, ingeniería, matemáticas e informática) para impulsar el avance en este campo. La estrategia del VQCC se basa en una aproximación integral que abarca tanto el desarrollo tecnológico como los fundamentos teóricos, y se articula a través de distintos grupos especializados en áreas como la tecnología de comunicación cuántica, la certificación y ciberseguridad, las aplicaciones satelitales y la teoría de la comunicación cuántica. Este enfoque le permite abordar desde la creación de nuevos sistemas de transmisión cuántica hasta el análisis de su seguridad y la expansión de sus aplicaciones mediante redes satelitales.

Además de su labor investigadora, el centro apuesta por la formación de una nueva generación de expertos en tecnologías cuánticas, promoviendo programas de capacitación avanzada, acceso a equipamiento de vanguardia y vínculos con instituciones académicas y el sector empresarial. Aunque el VQCC no forma parte estructural del CESGA, ambos centros colaboran estrechamente dentro del ecosistema gallego de tecnologías cuánticas, sumando capacidades complementarias: mientras el CESGA lidera el desarrollo de la computación cuántica y de altas prestaciones, el VQCC se especializa en la transmisión segura de información basada en principios cuánticos.

Bajo la dirección científica de Marcos Curty, el VQCC ha logrado posicionarse como un actor destacado en el ámbito internacional, especialmente en el desarrollo de soluciones para garantizar la seguridad de las comunicaciones cuánticas.



Fundación Centro Tecnológico de la Información y la Comunicación (CTIC)

Constituida en diciembre de 2003 como una organización de naturaleza fundacional privada, forma parte de la Red de Centros Tecnológicos del Principado de Asturias.

CTIC es la sede de la oficina española del Consorcio World Wide Web (W3C), encargada de fomentar la adopción de sus estándares entre desarrolladores, creadores de aplicaciones y la comunidad web. En la actualidad, también actúa como oficina para los países hispanohablantes de Sudamérica, ampliando su alcance en la difusión y aplicación de las recomendaciones del W3C.

En el ámbito de las tecnologías cuánticas, CTIC explora su aplicación futura en áreas como la **ciberseguridad**, la **optimización de redes de comunicación** y la **computación avanzada** para el análisis de datos complejos. A través de su participación en redes tecnológicas y proyectos de colaboración, el centro se mantiene atento a las oportunidades que ofrece la computación cuántica para el desarrollo de servicios innovadores, especialmente en entornos rurales digitalizados, donde podría tener un papel clave en la protección de infraestructuras críticas y en la eficiencia de los sistemas distribuidos.





Instituto de Física de Altas Energías (IFAE)

El Instituto de Física de Altas Energías (IFAE) es un centro de investigación creado por la Generalitat de Cataluña y la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) dedicado a explorar las fronteras de la física fundamental, tanto en áreas experimentales como teóricas. Sus principales líneas de investigación incluyen la física de partículas, la astrofísica de altas energías, la cosmología observacional, la física de neutrinos, las ondas gravitacionales, la física médica y las tecnologías de computación cuántica. Además, el IFAE cuenta con una división técnica que apoya el desarrollo de instrumentación avanzada para sus proyectos científicos.

El IFAE forma parte del Barcelona Institute of Science and Technology (BIST) y es un centro CERCA, lo que le permite recibir apoyo financiero de diversas instituciones, incluyendo el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (MCIINN), el Consejo Europeo de Investigación (ERC), los fondos FEDER, la Agencia de Gestión de Ayudas Universitarias y de Investigación (AGAUR) y la Fundación La Caixa.

En el IFAE, el grupo Quantum Computing Technologies (QCT) lidera colaboraciones nacionales e internacionales en el desarrollo de dispositivos de cúbits superconductores. Ha coordinado varios consorcios de investigación, incluyendo el proyecto FET Open AVaQus (2020-2024), enfocado en el desarrollo de recocido cuántico coherente, el consorcio Quanteria SiUCs (2020-2024) centrado en el desarrollo de superconductores, y el consorcio ICRQ, que estudia la interacción entre la radiación cósmica y los cúbits. Además, desempeña un papel

clave en el avance de la computación cuántica en el sur de Europa, siendo el laboratorio líder a nivel nacional en el desarrollo de cúbits superconductores aplicados tanto al recocido cuántico como al estudio de la interacción de los cúbits con radiación de alta energía.



Instituto IMDEA de Nanociencia

El Instituto IMDEA de Nanociencia es una fundación privada sin ánimo de lucro, establecida entre 2006 y 2007 gracias a un acuerdo de colaboración entre la Comunidad de Madrid y el Ministerio de Educación y Ciencia de España. Este instituto se dedica a la investigación de vanguardia en nanociencia, nanotecnología y diseño molecular, con el objetivo de generar innovaciones transferibles y mantener un estrecho contacto con la industria. Además, forma parte del Campus de Excelencia Internacional, un consorcio de institutos de investigación promovido por la Universidad Autónoma de Madrid y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (UAM/CSIC).

La organización está dirigida por un patronato que incluye representantes de la administración del instituto, universidades involucradas, el Gobierno regional, expertos científicos y colaboradores industriales. Desde febrero de 2007, el Dr. Rodolfo Miranda ocupa el cargo de director del instituto.

Las principales líneas de investigación del Instituto IMDEA de Nanociencia abarcan diversas áreas de la nanociencia y la nanotecnología, combinando esfuerzos de especialistas en física de la materia condensada, química, modelado computacional, espectroscopía, microscopía, ciencias de superficies y biología



molecular. Actualmente, se desarrollan más de cincuenta proyectos, tanto internacionales como regionales, que incluyen trabajos en células solares poliméricas, OLED, biosensores, láseres, administración de fármacos y bioimagen, distribuidos en siete programas científicos:

- nanociencia molecular;
- microscopías de sonda y superficies;
- nanomagnetismo;
- nanobiosistemas: biomáquinas y manipulación de macromoléculas;
- nanoelectrónica y superconductividad;
- nanosuperficies y nanodispositivos; y
- nanomedicina

El Instituto IMDEA de Nanociencia se dedica a la investigación avanzada en nanociencia y nanotecnología, con un enfoque significativo en la física cuántica. Sus actividades en este ámbito abarcan desde la exploración de fenómenos cuánticos fundamentales hasta el desarrollo de dispositivos cuánticos aplicados. Los investigadores del instituto emplean técnicas de vanguardia, como la microscopía de efecto túnel y la espectroscopía de fotoemisión resuelta en ángulo, para estudiar interacciones a escala atómica y molecular. Además, el Instituto IMDEA de Nanociencia colabora estrechamente con instituciones nacionales e internacionales, fortaleciendo su posición en la comunidad científica global.

El instituto desarrolla investigación en tecnologías cuánticas, explorando fenómenos como el efecto túnel, estados topológicos y el magnetismo a escala atómica. Sus estudios han revelado nuevos trucos cuánticos, como la generación de niveles de energía discretos sin confinamiento, lo que podría tener

aplicaciones en dispositivos electrónicos avanzados. También han investigado el efecto Kondo a nivel molecular, clave para entender la interacción entre electrones en materiales cuánticos, y han desarrollado nuevas técnicas espectroscópicas para estudiar interacciones magnéticas en sistemas topológicos dopados con tierras raras. Estos avances refuerzan su papel en el desarrollo de materiales y dispositivos con aplicaciones en computación cuántica, optoelectrónica y espintrónica.



Tecnalia es el mayor centro de investigación aplicada y desarrollo tecnológico de España, reconocido como un referente en Europa. Su sede central se encuentra en el Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia. La organización fue establecida en 2001 como una alianza estratégica, y actualmente está integrada por AZTI-Tecnalia, NEKER-Tecnalia y Tecnalia Research & Innovation.

Tecnalia se dedica al desarrollo y aplicación de tecnologías cuánticas en tres áreas principales:

- Computación y simulación cuántica: Trabaja en la hibridación de sistemas cuánticos y clásicos para abordar problemas de optimización, clasificación y aprendizaje automático. Utiliza diversas plataformas cuánticas disponibles en la nube para desarrollar soluciones avanzadas.
- Comunicaciones seguras y ciberseguridad: Enfocada en adaptar la ciberseguridad al nuevo paradigma cuántico, Tecnalia desarrolla sistemas de



QKD y trabaja en la migración hacia criptografía poscuántica para garantizar comunicaciones industriales seguras.

- Sensórica y metrología cuántica: Explora sistemas de detección de ultra-precisión que aprovechan efectos cuánticos, como los centros de vacantes de nitrógeno, para aplicaciones en identificación, medición magnética, análisis de imágenes y posicionamiento.

Iniciativas y colaboraciones destacadas

- QCentroid: En colaboración con esta plataforma, TecNALIA facilita la adopción de tecnologías cuánticas, permitiendo a las organizaciones integrar soluciones cuánticas y digitales de última generación en sus operaciones diarias de manera eficiente y rentable.
- Proyectos en el sector logístico: Junto con Erhardt Serikat, TecNALIA aplica tecnologías cuánticas para resolver problemas complejos de optimización en logística, como la distribución eficiente de mercancías y la gestión avanzada de almacenes.
- Iniciativas regionales: TecNALIA lidera esfuerzos para posicionar a regiones como Gipuzkoa y Bizkaia como nodos de referencia en el desarrollo de tecnologías cuánticas en Europa, promoviendo la creación de centros especializados y programas de aceleración de empresas cuánticas.



Instituto Gallego de Física de Altas
Energías (IGFAE)

El IGFAE, con sede en Santiago de Compostela, es un centro de investigación conjunto de la Universidad de Santiago de Compostela (USC) y la Xunta de Galicia. Aunque tradicionalmente ha estado dedicado a la física de partículas, nuclear y astrofísica, en los últimos años ha intensificado su compromiso con el desarrollo y la divulgación de las tecnologías cuánticas, consolidándose como un actor relevante en este ámbito.

El IGFAE participa activamente en la **Red Gallega de Tecnologías Cuánticas** y mantiene una estrecha colaboración con el **CESGA**. Juntos han impulsado iniciativas como el curso «Introducción a la computación cuántica», celebrado en 2020, dirigido a investigadores, docentes y profesionales, con el objetivo de formar en fundamentos, algoritmos y circuitos cuánticos. Asimismo, en abril de 2024 organizaron el programa divulgativo **Salto Cuántico**, que combinó arte, cine y ciencia para acercar la física cuántica al público general.

En el plano científico, el IGFAE investiga fenómenos como la teleportación cuántica, con aplicaciones directas en criptografía cuántica y en el desarrollo de tecnologías de comunicación ultraseguras. Además, se ha sumado al consorcio nacional **Quantum Spain**, coordinado por el Barcelona Supercomputing Center, que busca establecer un ecosistema sólido de computación cuántica en el país.

Acreditado desde 2016 como Unidad de Excelencia «María de Maeztu» e integrante de la alianza SOMMa, el IGFAE combina su consolidada trayectoria en física fundamental con una apuesta creciente por el futuro de la ciencia cuántica.





AMETIC

AMETIC es la asociación sectorial que representa a la industria tecnológica digital en España, agrupando empresas de todos los tamaños y ámbitos, desde grandes corporaciones globales de tecnologías de la información, telecomunicaciones y electrónica hasta compañías especializadas en servicios digitales y transformación tecnológica. También integra asociaciones sectoriales, consolidando un ecosistema que impulsa el crecimiento económico, la competitividad y el empleo de calidad, al tiempo que fortalece la capacidad exportadora del país.

El avance de la digitalización ha llevado a AMETIC a estrechar su colaboración con sectores estratégicos como la automoción, la aeronáutica, la agroindustria, la sanidad, el turismo, las finanzas y la manufactura. Estas sinergias se reflejan tanto en la adopción de tecnologías consolidadas como en la participación conjunta en proyectos de I+D+i, en los que los usuarios finales desempeñan un papel clave en la definición de nuevas soluciones.

En el ámbito de la computación e información cuánticas, AMETIC ha creado un grupo de trabajo dentro de su Comisión de Innovación para abordar el creciente impacto de estas tecnologías. Su objetivo es complementar el enfoque científico con una visión orientada al mercado, favoreciendo la integración de la cuántica en la industria y la economía.

A nivel nacional, AMETIC forma parte del Grupo Director en Tecnologías Cuánticas promovido por la Agencia Estatal de Investigación y la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, vinculadas al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. En el ámbito europeo, es miembro del Strategic Advisory Board

for Quantum Technology de la Comisión Europea. Esta doble presencia le permite actuar como un puente entre la oferta y la demanda tecnológica, entre el sector público y el privado, y entre las estrategias nacionales y las europeas.

El compromiso de AMETIC es contribuir a posicionar a España como un actor destacado en tecnologías cuánticas, tanto desde la perspectiva de la aplicación –impulsando la competitividad de sectores clave como la banca, la sanidad, la industria farmacéutica y la aeronáutica– como desde la oferta, promoviendo la expansión de empresas proveedoras y su catálogo de soluciones.



Estrategia IKUR

Bajo el liderazgo del Departamento de Ciencia, Universidades e Innovación del Gobierno Vasco, la Estrategia IKUR es una iniciativa para impulsar la investigación y el desarrollo en áreas científicas y tecnológicas estratégicas dentro de Euskadi. Se centra en cuatro ámbitos clave: cuántica, neurociencias, manufactura avanzada y energía. Su objetivo es consolidar un ecosistema de investigación de excelencia, atraer talento internacional y fortalecer la colaboración entre centros tecnológicos, universidades y empresas.

IKUR busca posicionar a Euskadi como un referente en tecnologías disruptivas y fomentar la transferencia de conocimiento al tejido industrial para mejorar la competitividad. Se enmarca en la apuesta por la especialización inteligente (RIS3) y la digitalización, con una fuerte inversión pública para el desarrollo de infraestructuras científicas y tecnológicas, incluyendo programas de investigación y capacitación, gestión de infraestructuras, articulación de la comunidad científica y dotación de recursos específicos.





Bizkaia Quantum Advanced Industries
(BIQAIN)

BIQAIN es una iniciativa impulsada por la Diputación Foral de Bizkaia para consolidar el territorio como un referente en tecnología cuántica. Nacido en 2021, este ecosistema integra universidades, centros tecnológicos, grandes empresas internacionales, *startups* y Administraciones públicas con el objetivo de fomentar la investigación aplicada, el desarrollo tecnológico y la innovación en computación cuántica. Su sede central estará en el edificio María Goyri del parque tecnológico de Leioa, donde se ubicarán los laboratorios cuánticos de la UPV/EHU y la infraestructura tecnológica de Tecnalia.

Bizkaia se destaca por tener acceso a doce plataformas cuánticas de fabricantes como D-Wave, Fujitsu e IBM, además de colaborar con proveedores como Amazon Web Services, Microsoft y Telefónica. BIQAIN ofrecerá apoyo a empresas en distintas etapas de desarrollo, facilitando el acceso a tecnología cuántica y asesoramiento especializado. También impulsará la formación y la alfabetización en este ámbito, trasladando a su sede a las *startups* cuánticas del territorio, que han crecido de una en 2021 a quince en la actualidad.

Como parte de la estrategia BasQ del Gobierno Vasco, BIQAIN refuerza la posición de Bizkaia como un polo de innovación en computación cuántica, conectando oferta y demanda para acelerar la adopción de esta tecnología en sectores industriales clave.



Clúster de Computación Cuántica de Madrid

La Comunidad de Madrid ha anunciado la creación del Clúster de Computación Cuántica, que entrará en funcionamiento en 2025 y tendrá su sede en Boadilla del Monte. Este será el quinto clúster tecnológico de la región, sumándose a los ya establecidos en IA (Leganés), Blockchain (Tres Cantos), Internet de las Cosas (Las Rozas) y Transformación Digital (Torrejón de Ardoz).

El principal objetivo del clúster es promover la investigación, divulgación y formación en este campo emergente. Se busca fomentar la creación de *startups* que utilicen la computación cuántica aplicada a sectores como la sanidad, el medio ambiente y los servicios sociales, permitiendo resolver operaciones complejas en tiempos significativamente reducidos.

Además, promoverá la colaboración público-privada para atraer talento y formar a futuros profesionales en esta disciplina, proporcionando al tejido empresarial e industrial oportunidades de acceso a la computación cuántica. Está previsto que cuente con un ordenador cuántico educativo adaptado a laboratorios de prácticas a nivel mundial, facilitando la formación práctica y el desarrollo de nuevas aplicaciones.

La CAM es un referente en alta tecnología, con más de 270 000 profesionales en el sector, y es la tercera región europea en empleo tecnológico. Atrae al 79,2 % de la inversión extranjera en TIC en España y concentra el 25 % de las principales empresas del país. Además, lidera en número de *startups*, con 3344 que generan más de 48 000 empleos, con lo que se sitúa como la sexta región



europea en este ámbito. Todo ello refleja un ecosistema sólido en investigación, innovación y empresa. Por tanto, la creación de este clúster, que, según las previsiones, se debería materializar a lo largo del 2025, refuerza la estrategia de

la CAM para consolidarse como un *hub* tecnológico de referencia en Europa, impulsando la innovación y la competitividad en sectores que puedan aprovechar los avances en tecnologías cuánticas.



- 
1. RESUMEN EJECUTIVO
 2. INTRODUCCIÓN
 3. CONTEXTO GLOBAL DE LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

4. RADIOGRAFÍA DE LA CAPACIDAD DE I+i EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

5. ANÁLISIS DE PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
6. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN MÁS RELEVANTES
7. ANÁLISIS DEL ENTORNO EMPRESARIAL INNOVADOR
8. PROSPECTIVA EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: CONSULTA A EXPERTOS
9. ANEXO: OTRAS EMPRESAS RELEVANTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

4. Radiografía de la **capacidad de I+i** en tecnologías cuánticas

El análisis de la producción científica en tecnologías cuánticas se ha basado en la recopilación y estudio de publicaciones indexadas en bases de datos de referencia como Web of Science (WoS), considerando un período de 23 años (2000-2023). Se han identificado tendencias globales, nacionales y regionales con el objetivo de caracterizar la evolución del campo, las principales áreas de investigación y la distribución geográfica de la actividad científica. La metodología empleada ha permitido analizar la evolución del volumen de publicaciones, las tasas de crecimiento anual compuesto y la presencia de instituciones clave en el desarrollo de estas tecnologías. En particular, se ha prestado atención al contexto de la Comunidad de Madrid, evaluando su posicionamiento respecto a otras regiones nacionales e internacionales en términos de producción científica y especialización temática. Los resultados obtenidos reflejan el impacto de estrategias de inversión, programas de colaboración internacional y el papel de los centros de investigación en la consolidación de este ámbito tecnológico.

4.1. EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD INVESTIGADORA

En las últimas dos décadas, la producción científica mundial en tecnologías cuánticas ha experimentado un crecimiento sostenido, especialmente a partir de 2006, con una aceleración significativa desde 2014 hasta la actualidad.

Esta dinámica refleja un interés global en esta área estratégica debido a sus múltiples aplicaciones potenciales en computación, comunicación y sensorica avanzada. La tendencia global muestra un aumento continuo, superando las 16 000 publicaciones anuales en 2024, lo que consolida a las tecnologías cuánticas como un ámbito prioritario para investigadores y financiadores a nivel global. El fuerte repunte observado en 2023-2024 podría atribuirse a una combinación de factores: aumento reciente de financiación específica, interés industrial creciente y definición de políticas públicas estratégicas, además de la progresiva madurez tecnológica del ámbito cuántico en los últimos dos años.

En España, y particularmente en la CAM, la evolución ha seguido una tendencia positiva similar, aunque con ciertas fluctuaciones. Desde 2006, la producción científica española muestra un crecimiento sostenido con un impulso significativo desde 2018, alcanzando más de 600 publicaciones anuales en 2024. En el caso de la Comunidad de Madrid, aunque los volúmenes son menores en términos absolutos, se aprecia también una trayectoria ascendente, con aproximadamente 200 publicaciones en el mismo período. Estos resultados regionales podrían atribuirse a la apuesta por infraestructuras científicas especializadas, programas específicos de financiación y la puesta en marcha de iniciativas locales orientadas a captar talento investigador en tecnologías cuánticas.



4.2. EVOLUCIÓN DE LAS TASAS DE CRECIMIENTO ANUAL COMPUESTO (CAGR)

El análisis de la **tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR)** revela una **alta variabilidad entre regiones** y períodos. En particular, destaca el notable auge registrado en **2020** en la CAM, con una tasa del 59 %, muy por encima del 25 %

observado en España y del 9 % a nivel mundial. Este repunte podría relacionarse con la puesta en marcha ese mismo año de políticas específicas regionales de inversión e iniciativas público-privadas. Por otro lado, es notable la desaceleración registrada en 2023 a nivel mundial, con una CAGR negativa del -14 %, posiblemente reflejando una maduración del sector o el impacto de reajustes en financiación internacional tras eventos económicos globales recientes.

Por su parte, como se mencionaba anteriormente, en el **último año completo con datos disponibles (2024)** se observa un **patrón común de crecimiento**

(QT) Evolución anual de la producción científica

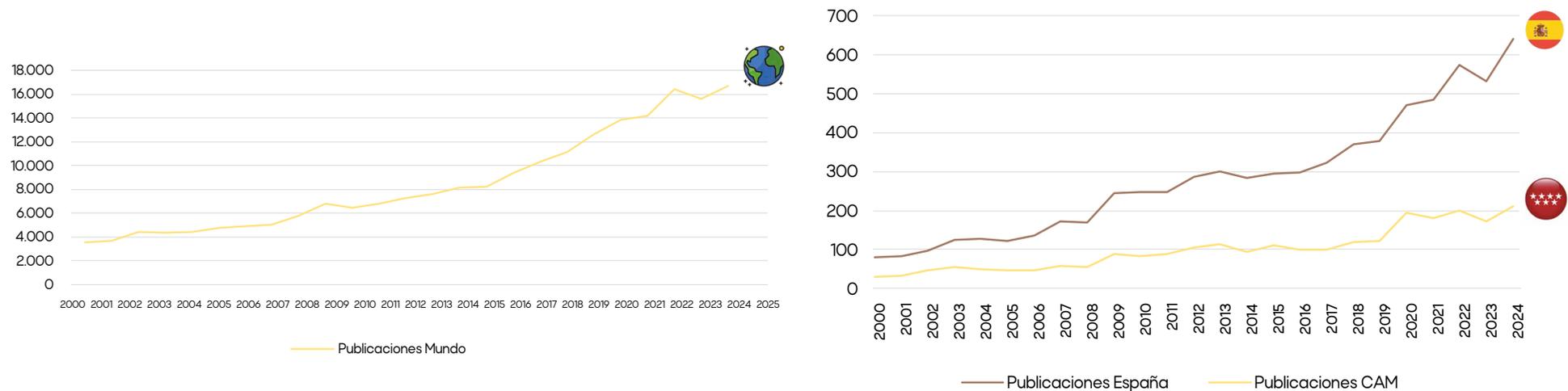


Fig. 4.1. Evolución anual de la producción científica en tecnologías cuánticas.



positivo en la producción científica, destacando fundamentalmente los casos de España y la CAM (20 y 24 %, respectivamente) frente a la evolución mundial. Este comportamiento sugiere un entorno local todavía en expansión, menos afectado por las tendencias globales de desaceleración.

Entre los factores que podrían explicar este dinamismo se encuentran la concentración de centros especializados, la mayor disponibilidad de financiación nacional y europea, y la capacidad de adaptación del sistema científico español y madrileño ante contextos internacionales adversos. A ello se suma una **apuesta estratégica sostenida** por las tecnologías cuánticas en los últimos años.

En conjunto, estos datos subrayan la relevancia estratégica creciente de las tecnologías cuánticas, así como la necesidad de mantener inversiones

específicas y coordinación institucional para sostener este ritmo de crecimiento y aprovechar las oportunidades que el contexto global presenta.

4.3. ÁREAS DE INVESTIGACIÓN MÁS ACTIVAS

El análisis revela que la actividad científica en tecnologías cuánticas, tanto a nivel mundial como nacional y regional, se concentra principalmente en las áreas de física, óptica y matemáticas. En el caso de la CAM, el 81 % de las publicaciones científicas en el área de física están relacionadas con tecnologías cuánticas, un dato que refleja la influencia de instituciones de excelencia como

Evolución de las tasas de crecimiento anuales de producción científica

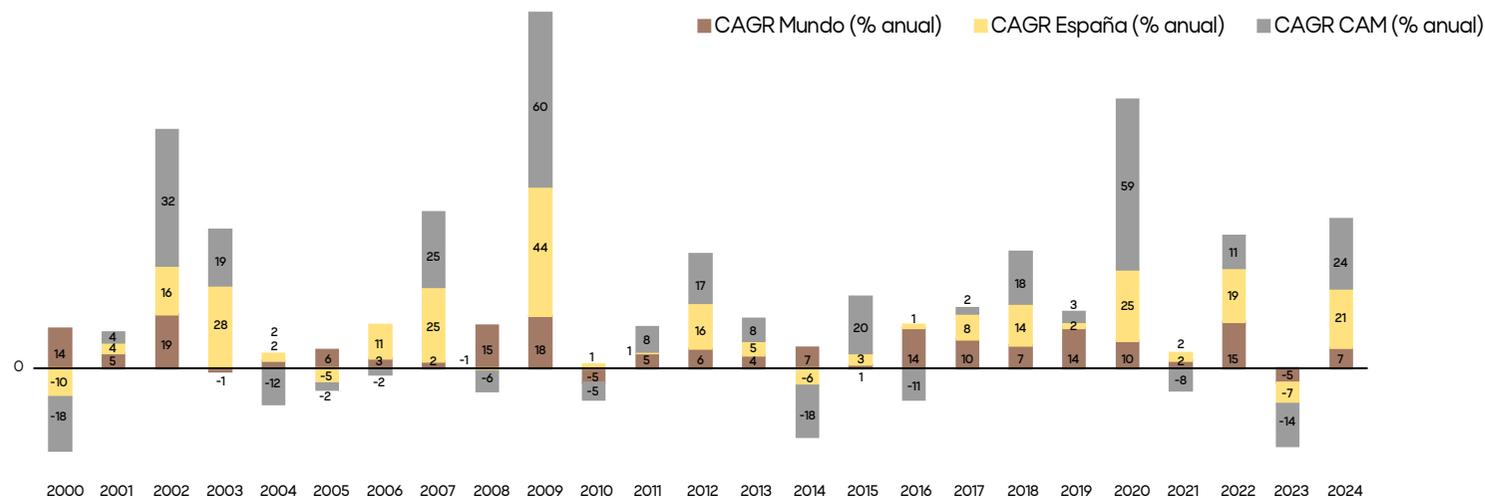


Fig. 4.2. CAGR en producción científica en tecnologías cuánticas.



el Instituto de Física de la Materia Condensada (IFMAC). De forma similar, en la CAM, el 57,8 % de la producción en óptica y el 43,7 % en matemáticas también se vinculan con investigaciones cuánticas, impulsadas por departamentos especializados en universidades locales y centros como el Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT).

Este posicionamiento se ve reforzado por programas estratégicos regionales como MADQuantum-CM, que fomentan la inversión específica en estas disciplinas y promueven colaboraciones público-privadas en torno al ámbito cuántico.

4.4. ÁREAS DE INVESTIGACIÓN EMERGENTES

Uno de los ejemplos más destacados es el área de termodinámica, que ha experimentado un crecimiento del 81,7 % en los últimos tres años en publicaciones con participación de instituciones madrileñas, lo que sugiere un renovado interés por explorar los fundamentos energéticos de los sistemas cuánticos. También sobresalen áreas como comunicación (37,5 %) y ciencias de la computación (31,5 %), donde las tecnologías cuánticas

encuentran aplicaciones directas en criptografía, redes de comunicación seguras y algoritmos avanzados.

Estas tendencias podrían estar vinculadas al auge de enfoques interdisciplinarios y a la creciente demanda de soluciones tecnológicas en

sectores estratégicos como la energía, las telecomunicaciones y la IA. Asimismo, responden probablemente al efecto combinado de inversiones regionales específicas y al fortalecimiento de ecosistemas colaborativos público-privados orientados al desarrollo de capacidades cuánticas aplicadas.

Distribución de la producción científica por áreas de investigación

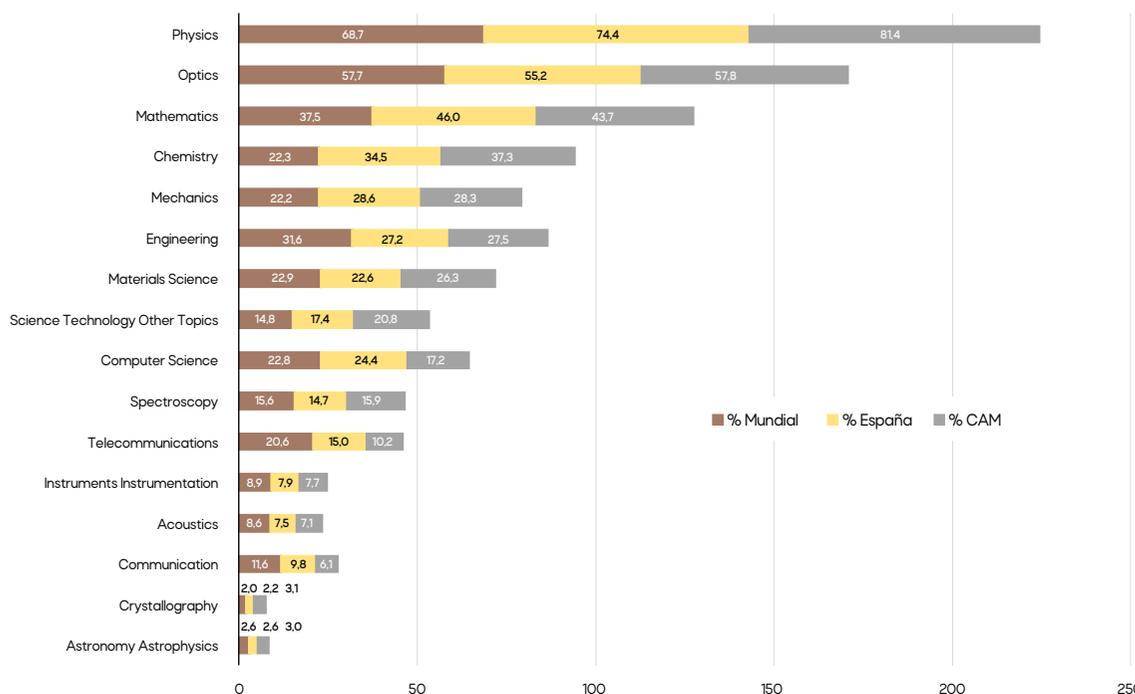


Fig. 4.3. Principales áreas de investigación en tecnologías cuánticas por volumen de publicaciones.



Áreas emergentes CAM

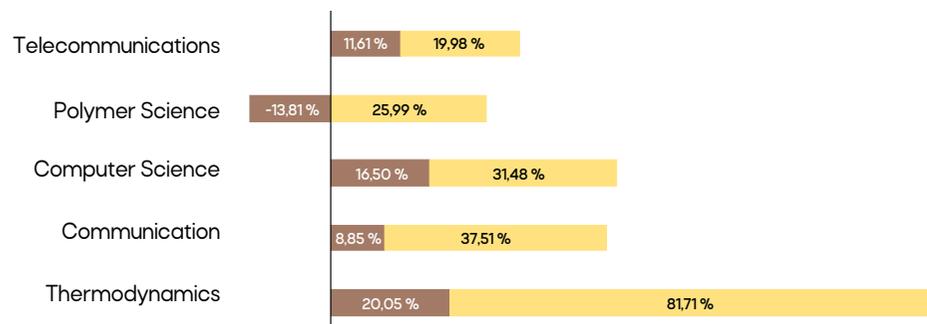


Fig. 4.4. Principales líneas emergentes de investigación cuántica.

Hay que destacar el caso especial del área de las ciencias de los polímeros. Con un alto crecimiento en los últimos años en la CAM, sin embargo, contrasta con una desaceleración global en esta área. En la CAM se muestra una tendencia al impulso de aplicaciones innovadoras específicas que combinan polímeros con tecnologías cuánticas para sectores estratégicos. Este empuje puede atribuirse a iniciativas regionales específicas que han potenciado este campo. Un ejemplo destacado es la próxima inauguración del primer laboratorio mundial de robótica con IA dedicado al descubrimiento de nuevos materiales basados en polímeros, ubicado en el Instituto IMDEA Materiales en Getafe. Este proyecto (DIGIMATER-CM) contará con la colaboración de empresas tecnológicas, universidades e institutos de investigación, y está financiado por la CAM. Además, la región ha lanzado convocatorias de ayudas a la innovación tecnológica, como las gestionadas por la Dirección General de Investigación e Innovación Tecnológica, que apoyan proyectos en áreas estratégicas, incluyendo los polímeros.

En conjunto, estos datos subrayan la relevancia estratégica creciente de las tecnologías cuánticas, así como la necesidad de mantener inversiones específicas y coordinación institucional para sostener este ritmo de crecimiento y aprovechar las oportunidades que el contexto global presenta.

4.5. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

La actividad científica global en tecnologías cuánticas se concentra principalmente en Norteamérica, Europa y Asia, destacando especialmente EE. UU., China y varios países europeos. Aunque individualmente China (37,30 %) y EE. UU. (26,70 %) son líderes claros en volumen de publicaciones, la Unión Europea, considerada como bloque, presenta la mayor producción científica acumulada, alcanzando un 50,85 %¹. Este liderazgo europeo podría explicarse por políticas específicas de apoyo a las tecnologías emergentes, así como por colaboraciones internacionales consolidadas y programas estratégicos de financiación como el Quantum Flagship de la Comisión Europea. En Norteamérica, especialmente en EE. UU. (26,70 %), el impulso proviene de inversiones públicas significativas y un fuerte ecosistema de innovación tecnológica. Por su parte, China (37,30 %) ha potenciado el área gracias a políticas nacionales que promueven grandes inversiones estatales en infraestructuras y alianzas con el sector industrial. Esta distribución global es una respuesta a cómo las estrategias regionales y el apoyo institucional determinan el liderazgo y posicionamiento científico en tecnologías cuánticas.

¹ Cabe destacar el hecho de que hay publicaciones científicas asignadas a varios países a la vez en investigaciones en colaboraciones internacionales, por lo que el acumulado de las publicaciones es mayor del 100 %.



(QT) Distribución geográfica de la actividad científica

Tecnologías Cuánticas 2000-2024

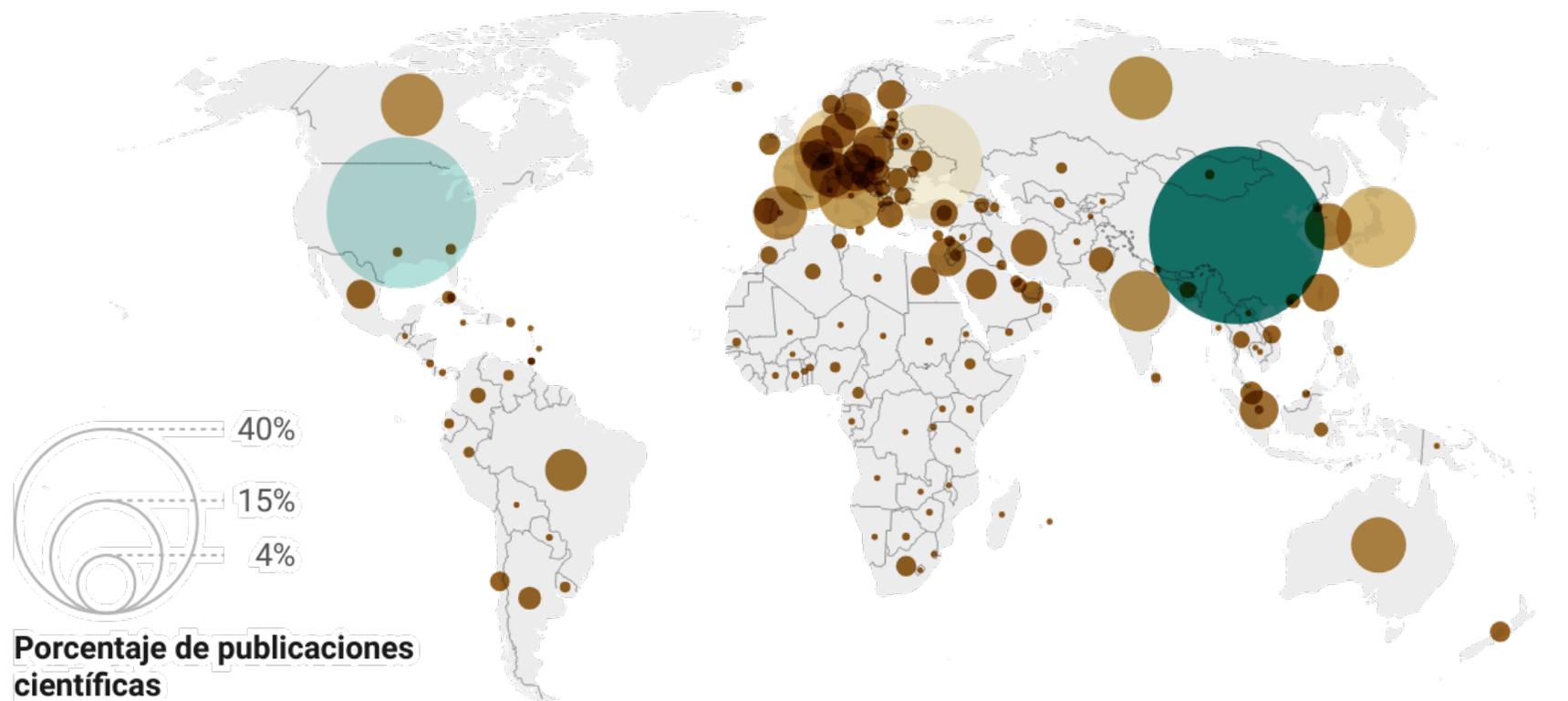


Fig. 4.5. Distribución geográfica de publicaciones científicas en tecnologías cuánticas.



4.6. PRINCIPALES ORGANISMOS DE INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS POR PRODUCCIÓN CIENTÍFICA EN LA CAM

El análisis de la producción científica en tecnologías cuánticas en la CAM desde el año 2000 hasta 2024 destaca claramente al CSIC (51,2 %) como la institución más activa, seguido por universidades como la Universidad Complutense de Madrid (UCM, 19,2 %), la Universidad Autónoma de Madrid (UAM, 16,2 %) y, en menor medida, la Universidad Politécnica de Madrid (UPM, 6,6 %) y la Universidad Carlos III (UC3M, 4 %). Este liderazgo indiscutible del CSIC se explica por la extensa red de institutos especializados adscritos a la entidad en la región de Madrid, destacando especialmente el Instituto de Física Fundamental (IFF), el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM), el Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT), el Instituto de Estructura de la Materia (IEM), el Instituto de Micro y Nanotecnología (IMN), el Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI), el Centro de Astrobiología (CAB), el Centro de Automática y Robótica (CAR), el Instituto de Óptica (IO) y el Instituto de Física Teórica (IFT), instituto mixto con la UAM, todos ellos reconocidos internacionalmente y con actividad relevante en investigación básica y aplicada en tecnologías cuánticas.

La relevancia científica de las universidades madrileñas, en particular la UCM y la UAM, se manifiesta en su sólido compromiso con la formación avanzada y la investigación en física cuántica y disciplinas afines. La UCM alberga la

Facultad de Ciencias Físicas, que se originó en 1974 tras la división de la antigua Facultad de Ciencias, y desde entonces ha sido un pilar en la educación e investigación en física. Esta facultad cuenta con diversos departamentos especializados, entre los que destaca el Departamento de Física Teórica I, que organiza enseñanzas en mecánica cuántica, teoría de campos y física de partículas. Además, la UCM participa en el Máster Universitario en Física Nuclear, un programa conjunto con otras universidades españolas, que refleja su implicación en la formación de expertos en áreas relacionadas con la física cuántica.

(QT) Organizaciones de I+D con mayor actividad científica

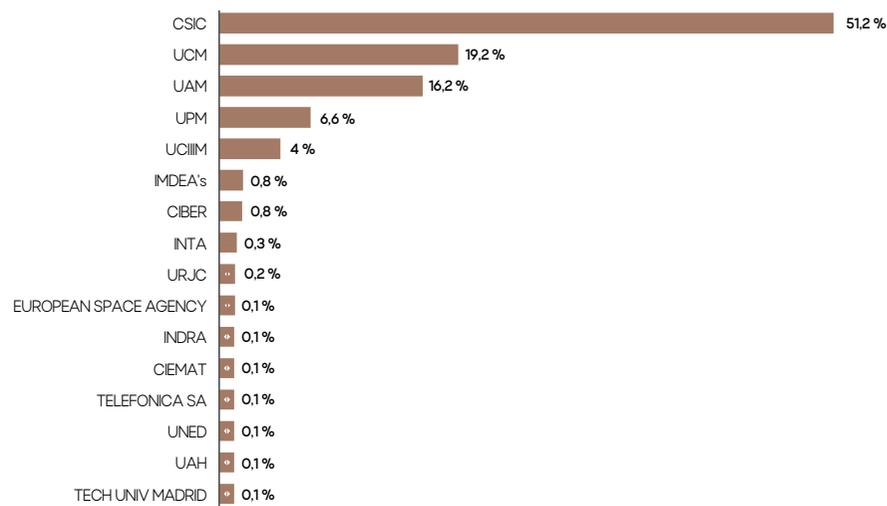


Fig. 4.6. Principales centros de investigación en tecnologías cuánticas en la CAM.



Por su parte, la UAM se distingue por su Departamento de Física Teórica, cuyas actividades de investigación abarcan numerosas áreas, incluyendo la física de partículas y la física cuántica. La UAM también ofrece un Máster Universitario en Computación Cuántica, orientado a formar a investigadores y tecnólogos con sólidos conocimientos teóricos y prácticos en este campo emergente. Además, como se mencionaba anteriormente, el Instituto de Física Teórica (IFT) es un centro mixto UAM/CSIC que se dedica a la investigación en física teórica, abarcando áreas como la física de partículas elementales, astropartículas y cosmología, y ha sido reconocido como Centro de Excelencia Severo Ochoa.

La colaboración entre la UCM y la UAM con centros especializados en física cuántica en Madrid es notable. Estas sinergias facilitan proyectos conjuntos y la optimización de recursos, potenciando la calidad y el impacto de la investigación en tecnologías cuánticas en la región.

También es destacable la participación de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) por su contribución a la investigación en tecnologías cuánticas,



especialmente mediante iniciativas formativas avanzadas como el Máster en Tecnologías e Ingeniería Cuánticas, desarrollado juntamente con el CSIC. Asimismo, lidera la Cátedra PERTE Chip EPIQ junto con la empresa Arquimea, impulsando la transferencia tecnológica en áreas estratégicas como la fotónica y electrónica integrada aplicadas a tecnologías cuánticas.

Estas instituciones no solo contribuyen significativamente a la producción científica en tecnologías cuánticas, sino que también desempeñan un papel crucial en la formación de nuevos investigadores y en la promoción de colaboraciones internacionales, consolidando a Madrid como un referente en este ámbito de investigación.

Por otro lado, la presencia de centros como el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), el CIEMAT, empresas tecnológicas como INDRA o Telefónica, así como colaboraciones internacionales con la Agencia Espacial Europea, reflejan el interés creciente por desarrollar aplicaciones prácticas, innovadoras y de alto impacto industrial en el ámbito cuántico.

En conjunto, estos datos ponen de relieve el sólido ecosistema investigador madrileño en tecnologías cuánticas, impulsado por la combinación de infraestructuras avanzadas, financiación específica, colaboración interinstitucional y estratégica, así como una creciente conexión con el sector industrial y empresarial. Sin embargo, aunque Madrid cuenta con un gran potencial gracias a la concentración de instituciones destacadas, investigadores de prestigio y recursos, todavía persiste una cierta desconexión entre los distintos agentes del ecosistema científico e industrial. La puesta en marcha del clúster de tecnologías cuánticas en 2025 representa un avance significativo hacia una estrategia más integrada, aunque aún queda camino por recorrer para alcanzar un posicionamiento como el logrado en regiones como Cataluña o el País Vasco.



4.7. PRINCIPALES FINANCIADORES DE LA INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

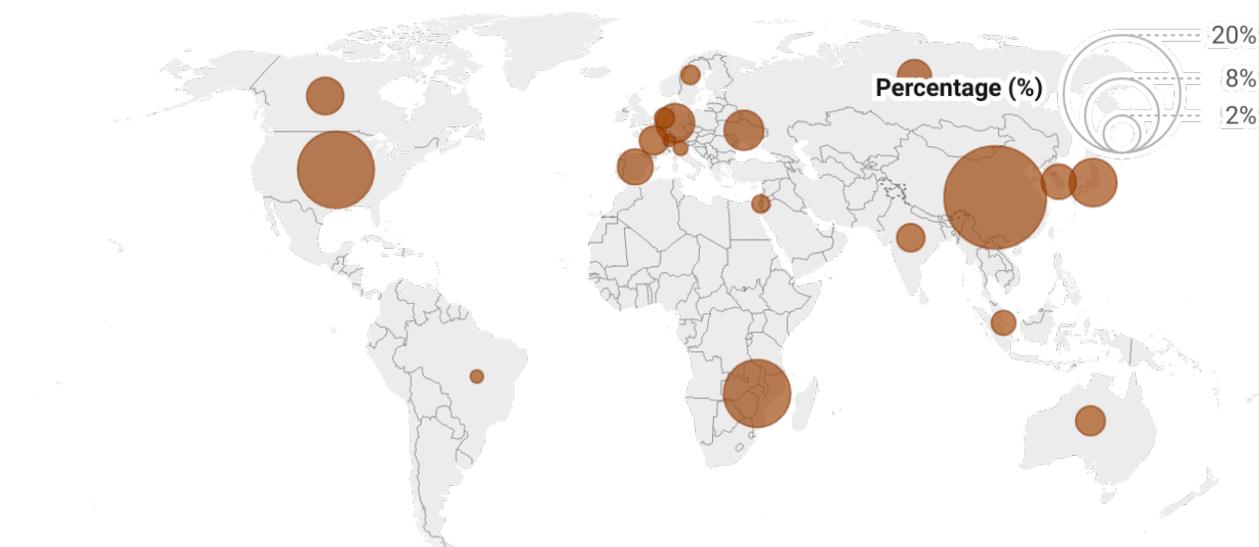
La distribución geográfica global de las agencias financiadoras muestra focos claros en Norteamérica, Europa y Asia, destacando EE. UU., China y la UE como principales protagonistas. Esta distribución podría explicarse por la existencia de estrategias nacionales y regionales definidas que priorizan la investigación en tecnologías cuánticas como motor económico y estratégico a largo plazo. En EE. UU., la inversión sustancial refleja no solo intereses científicos, sino también estratégicos y de defensa, mientras que en China la financiación pública se orienta fuertemente hacia la creación de infraestructuras y liderazgo tecnológico mundial. Por su parte, la UE concentra inversiones a través de programas multilaterales como Horizon Europe y los programas de cuántica específicos como Quantum flagship o QuantERA, lo que facilita colaboraciones

internacionales amplias. Esta distribución subraya cómo las políticas estratégicas y los intereses geopolíticos definen la asignación de recursos a nivel global, influenciando directamente la producción científica en este campo emergente. Como dato curioso adicional obtenido del análisis

global de financiadores, cabe destacar la presencia de instituciones relacionadas con defensa, armamentística o seguridad, que representan el 3,17 % del total de financiadores a nivel mundial, pero que concentran un 5,2 % de la financiación medida en términos de publicaciones asociadas.

Focos geográficos de financiación de la investigación

Tecnologías cuánticas 2000-2024



Localización de Agencias de financiación por su presencia en los documentos científicos

Creado con Datawrapper

Fig. 4.7. Distribución geográfica de los principales organismos financiadores de investigación cuántica a nivel global.



En contraste, instituciones relacionadas con biomedicina, salud o tecnologías médicas apenas suponen el 0,92 % de las agencias financiadoras, con una contribución limitada al 0,78 % del total de las publicaciones financiadas. Esto sugiere que, aunque las tecnologías cuánticas poseen potencial interdisciplinar, actualmente existe un claro predominio estratégico orientado hacia la seguridad y defensa frente a aplicaciones médicas.

4.8. PRINCIPALES FINANCIADORES DE LA INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS EN LA CAM

Las principales agencias financiadoras que impulsan la investigación en tecnologías cuánticas en la Comunidad de Madrid desde 2000 hasta 2024 son, de forma mayoritaria, el Gobierno de España (24,4 %), seguido de la Unión Europea (17,5 %) y la propia comunidad autónoma (4,4 %), lo que pone de manifiesto una fuerte apuesta pública nacional y regional. Existe también una participación notable de agencias estadounidenses (3,5 %) y británicas (UKRI/RS - UK, 2,5 %), lo que indica colaboraciones internacionales relevantes.

Esta distribución refleja un interés estratégico claro en las tecnologías cuánticas como ámbito de futuro tanto a nivel estatal como europeo, donde resultan fundamentales programas como Horizon Europe o iniciativas nacionales específicas que promueven proyectos colaborativos y multidisciplinares.

(QT) Principales financiadores de la investigación en la CAM

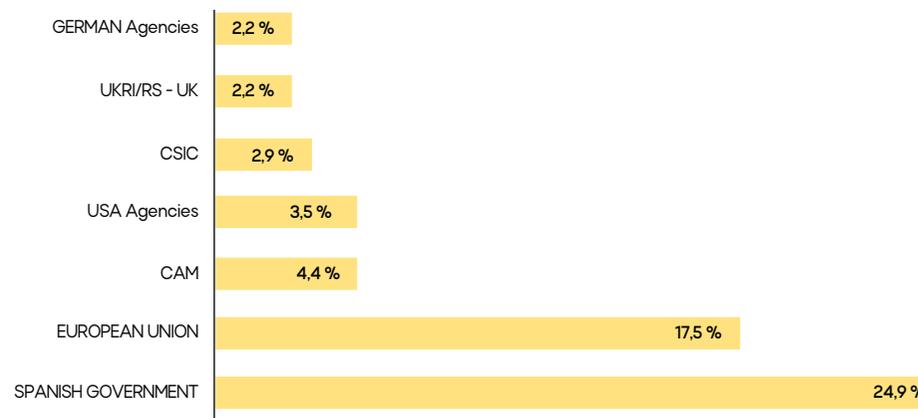


Fig. 4.8. Principales centros de investigación en tecnologías cuánticas en la CAM.

Estos datos subrayan la importancia de la CAM dentro del panorama global y nacional de financiación científica en tecnologías cuánticas, destacando la necesidad de mantener políticas públicas sólidas y colaboraciones internacionales para afianzar su liderazgo y maximizar el impacto socioeconómico de estas inversiones estratégicas.



1. RESUMEN EJECUTIVO
2. INTRODUCCIÓN
3. CONTEXTO GLOBAL DE LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
4. RADIOGRAFÍA DE LA CAPACIDAD DE I+D EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

5. ANÁLISIS DE PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

6. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN MÁS RELEVANTES
7. ANÁLISIS DEL ENTORNO EMPRESARIAL INNOVADOR
8. PROSPECTIVA EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: CONSULTA A EXPERTOS
9. ANEXO: OTRAS EMPRESAS RELEVANTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

5. Análisis de patentes en tecnologías cuánticas

El panorama de patentes en tecnologías cuánticas ha experimentado un crecimiento significativo en la última década, reflejando la creciente transición de la investigación teórica a aplicaciones comerciales tangibles. En este apartado se analiza la evolución de las patentes en los diferentes sectores de las tecnologías cuánticas, incluyendo computación cuántica, comunicación cuántica y sensores cuánticos, así como su distribución geográfica y la competencia entre los principales actores del sector.

5.1. EVOLUCIÓN DE LAS PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

El panorama de patentes en tecnologías cuánticas refleja en la última década un creciente interés global en trasladar la investigación cuántica al ámbito comercial. Los datos muestran un aumento constante en el número de solicitudes de patentes en áreas clave como los sensores cuánticos, la comunicación y criptografía cuántica, y la computación cuántica. Entre 2016 y 2021, el número de patentes cuánticas creció a un ritmo del 35 % anual, con un incremento del 50 % en computación cuántica, el sector con mayor expansión, impulsado por empresas como IBM, Google, Microsoft y *startups* emergentes en EE. UU. y Europa. El ámbito de los sensores cuánticos ha mantenido un crecimiento sostenido, con aplicaciones estratégicas en biomedicina, navegación y materiales

avanzados. Por su parte, la comunicación y criptografía cuántica ha registrado un aumento significativo, especialmente en China y Europa, debido a inversiones en redes cuánticas y en seguridad poscuántica. En general, la tendencia de crecimiento continuo sugiere que la innovación en tecnologías cuánticas está avanzando rápidamente desde la fase de investigación hacia aplicaciones comerciales concretas.

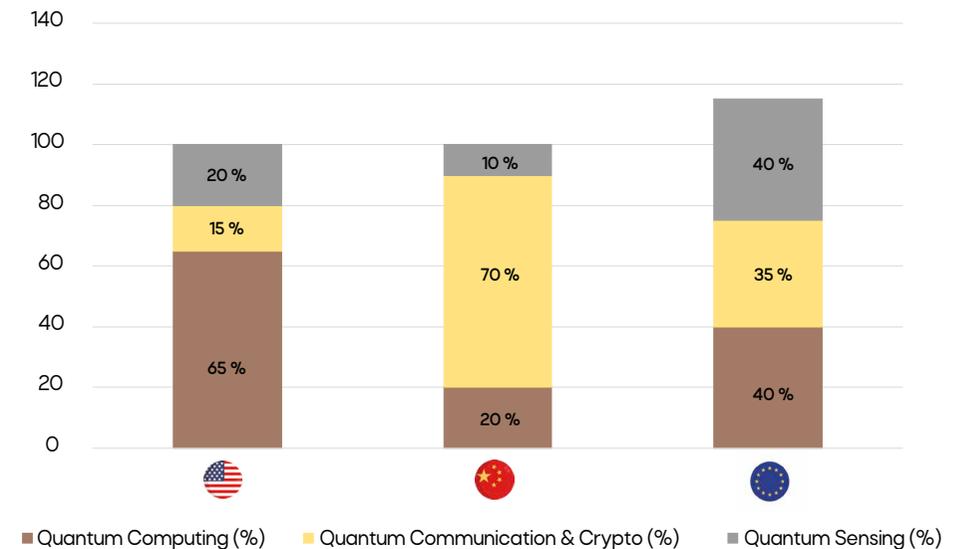


Fig. 5.1. Evolución del número de patentes en tecnologías cuánticas por área temática.



5.2. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS PATENTES

El análisis de patentes en tecnologías cuánticas evidencia el liderazgo de China, que entre 2000 y 2022 ha concentrado el 52,3 % de las solicitudes, impulsado por políticas gubernamentales que fomentan la I+D. Japón y la Unión Europea le siguen con un 13,8 % cada uno, mientras que EE. UU. representa el 10 %. Sin embargo,

al analizar exclusivamente las familias de patentes internacionales, el panorama cambia significativamente: EE. UU. lidera con un 48 %, seguido por Europa con un 22 %, mientras que China cae al 11 %, lo que sugiere que China tiene un enfoque más orientado a la protección nacional que a la expansión global. En este contexto, las estrategias de propiedad intelectual están definiendo el liderazgo en el sector cuántico, con una creciente inversión en la protección y comercialización de patentes. Esta evolución refleja la madurez del sector, donde la computación cuántica se perfila como el principal motor de la próxima ola de avances tecnológicos.

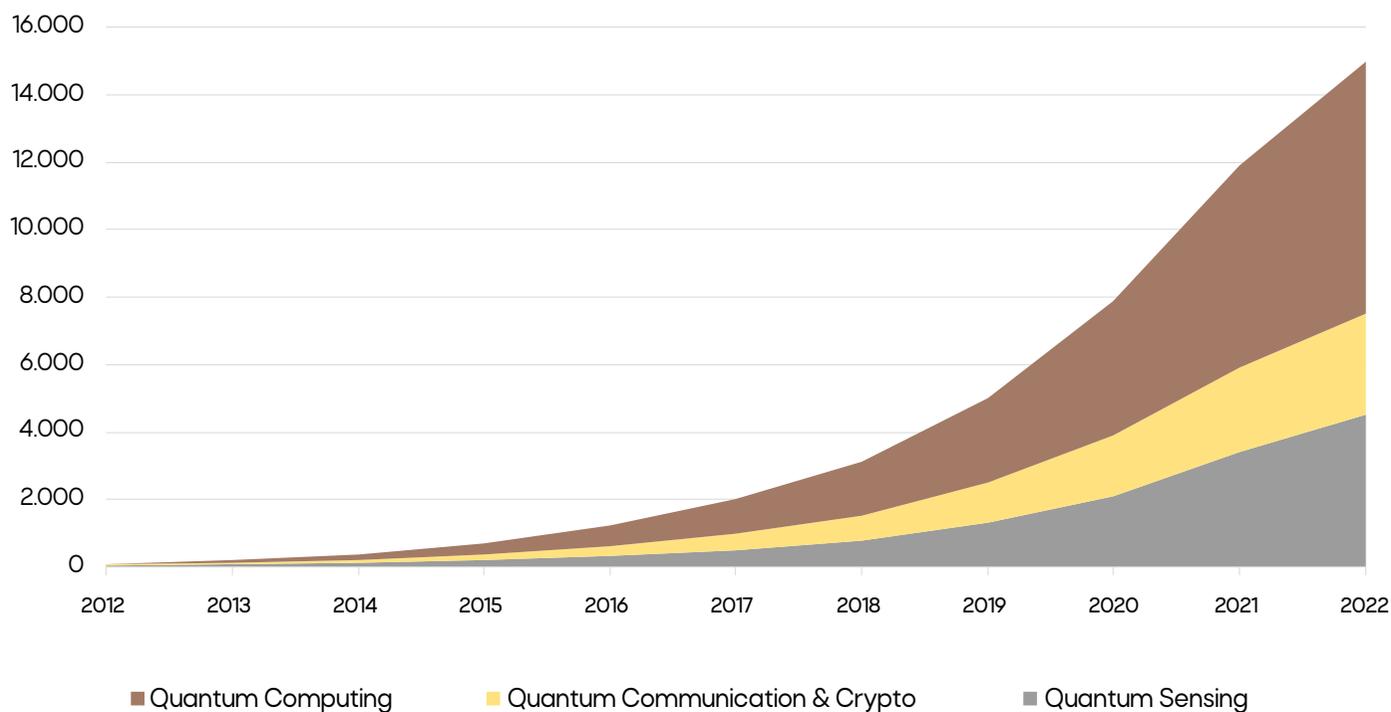


Fig. 5.2. Distribución por los principales países tractores en la producción de patentes en tecnologías cuánticas.



5.3. PRINCIPALES ACTORES EN PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

El panorama de patentes en el área de **computación cuántica** está dominado por un grupo reducido de actores clave, con **IBM, Google y Microsoft** liderando el desarrollo del sector. Estas empresas han realizado inversiones sostenidas en investigación cuántica y registran cientos de patentes que definirán el futuro de la industria. Otras compañías como **Intel, Quantinuum y Alibaba** también han incrementado su presencia, reflejando el creciente interés tanto de mercados occidentales como asiáticos.

IBM encabeza el registro de patentes a nivel global, impulsado por sus avances en **cúbits superconductores** y computación cuántica en la nube. Google y Microsoft se centran en el desarrollo de **computación cuántica tolerante a fallos**, logrando avances en **corrección de errores cuánticos** y arquitecturas híbridas. Mientras tanto, **Intel y Quantinuum** refuerzan sus capacidades en *hardware* y

software, consolidando su posición en la innovación cuántica.

Por su parte, empresas asiáticas como **Alibaba, Huawei, Toshiba y NTT** han intensificado su actividad, asegurando patentes en **algoritmos cuánticos, seguridad y diseño de chips**. En este escenario, la computación cuántica se está consolidando en torno a un grupo de líderes con estrategias agresivas de propiedad intelectual. Mientras que

las empresas estadounidenses y chinas dominan la carrera global, Europa busca mantenerse competitiva en este sector estratégico.

El ámbito de los **sensores cuánticos** está dominado por las patentes que protegen tecnologías relacionadas con los centros de vacancia de nitrógeno en diamante **NVCD (37%)**, que impulsan avances en magnetometría, imagen biomédica y comunicación cuántica. Le siguen las tecnologías

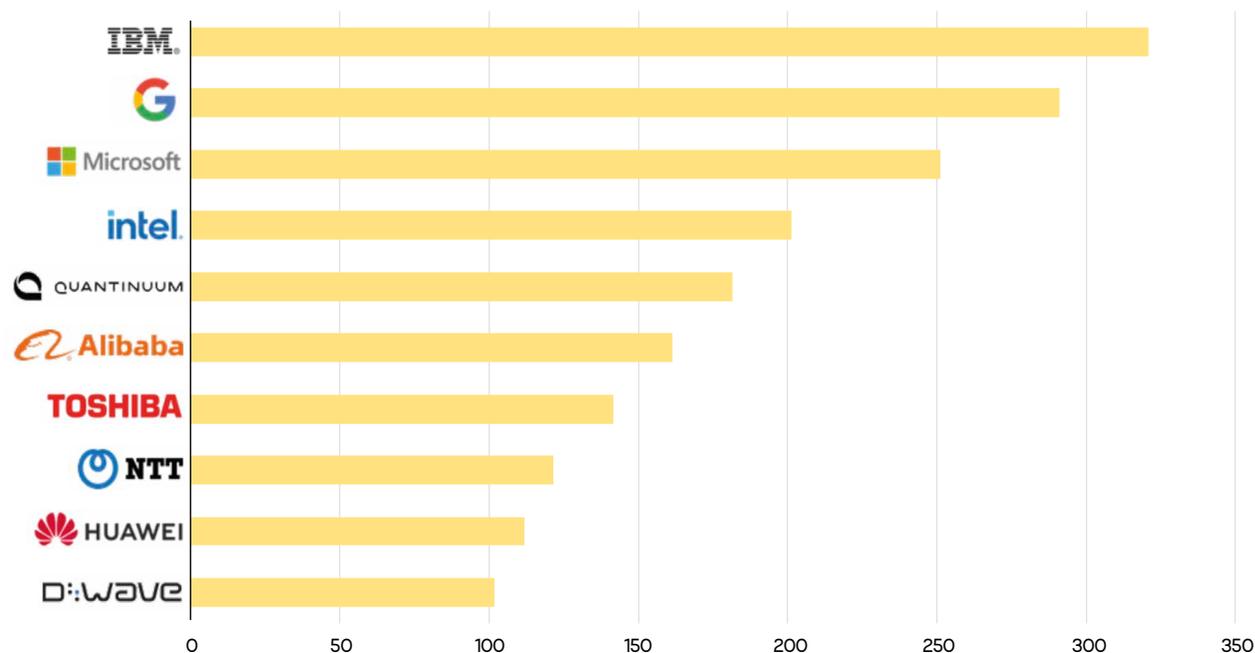


Fig. 5.3. Principales actores en patentes en tecnologías cuánticas.



relacionadas con dispositivo y filtros de interferencia cuántica superconductorra **SQUID/SQIF (25 %)**, tecnologías clave para la detección magnética ultrasensible, con aplicaciones en resonancia magnética (MRI) y geofísica.

Por otro lado, las tecnologías de **átomos fríos (13 %)** desempeñan un papel crucial en navegación inercial cuántica y experimentos de física fundamental, mientras que los **átomos de Rydberg (6 %)** están emergiendo en metrología cuántica y detección de campos eléctricos. Finalmente, un **19 %** de las tecnologías protegidas en sensores cuánticos se basan en **sensores híbridos y fotónicos**, abriendo nuevas posibilidades en este campo en expansión.

■ NV Centers in Diamond ■ SQUID/SQIF ■ Cold Atoms ■ Rydberg Atoms ■ Other

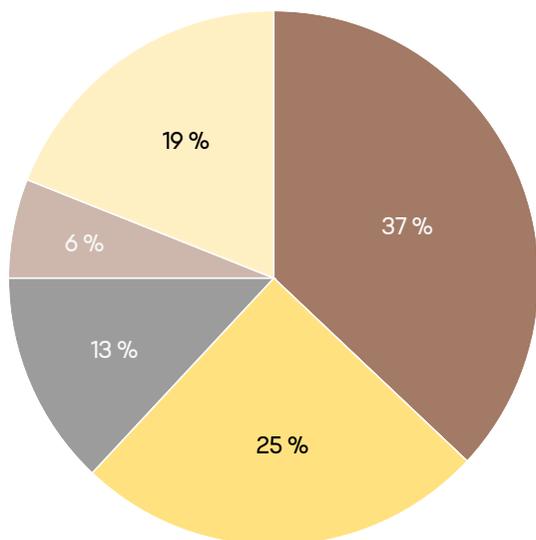


Fig. 5.4. Distribución de patentes según el ámbito de sensores cuánticos.

5.4. POLÍTICAS DE PROTECCIÓN DE PATENTES

Las restricciones a la exportación de tecnologías cuánticas por razones estratégicas y de seguridad suponen un tema de debate candente, con potenciales repercusiones en el comercio, la captación de talento y la inversión en *startups*, afectando especialmente a las pymes. En este contexto, el **Consortio Europeo de la Industria Cuántica** trabaja para influir en la regulación y establecer mejores prácticas que equilibren la seguridad con el crecimiento del sector.

De cara a **2035**, Europa debe fortalecer su posición en **propiedad intelectual y patentes** para mantenerse competitiva. La colaboración con la **Oficina Europea de Patentes (EPO)** busca mejorar la patentabilidad y proporcionar formación especializada a *startups*. Además, se supervisan las patentes esenciales estándar (SEP) para evitar barreras de acceso al mercado. Actualmente, las empresas europeas poseen solo el 31 % de las patentes cuánticas registradas en Europa, mientras que EE. UU. domina con un 52 %, lo que supone un riesgo estratégico. Aumentar el número de solicitudes de patentes en áreas clave será esencial para consolidar la competitividad europea en el sector cuántico a largo plazo.



5.5. ANÁLISIS DE REDES DE PATENTES

Al realizar un análisis de los textos de las patentes en **tecnologías cuánticas** y las redes de conexión que las conectan, se aprecia la existencia de **tres grandes clústeres tecnológicos** que concentran la mayor parte de la innovación en este campo.

- **Tecnología de puntos cuánticos (12,82 %):** Nodo central que conecta múltiples áreas cuánticas, con aplicaciones que van desde LED de alta eficiencia hasta computación cuántica avanzada mediante coherencia y entrelazamiento cuántico.
- **Comunicación cuántica (10,18 %):** Se centra en sistemas criptográficos avanzados, distribución de claves cuánticas y teleportación cuántica para garantizar la seguridad en la transmisión de datos.
- **Computación cuántica (6,5 %):** Campo emergente y de rápido crecimiento, caracterizado por alta innovación y complejidad, con un gran potencial para transformar la capacidad computacional global.

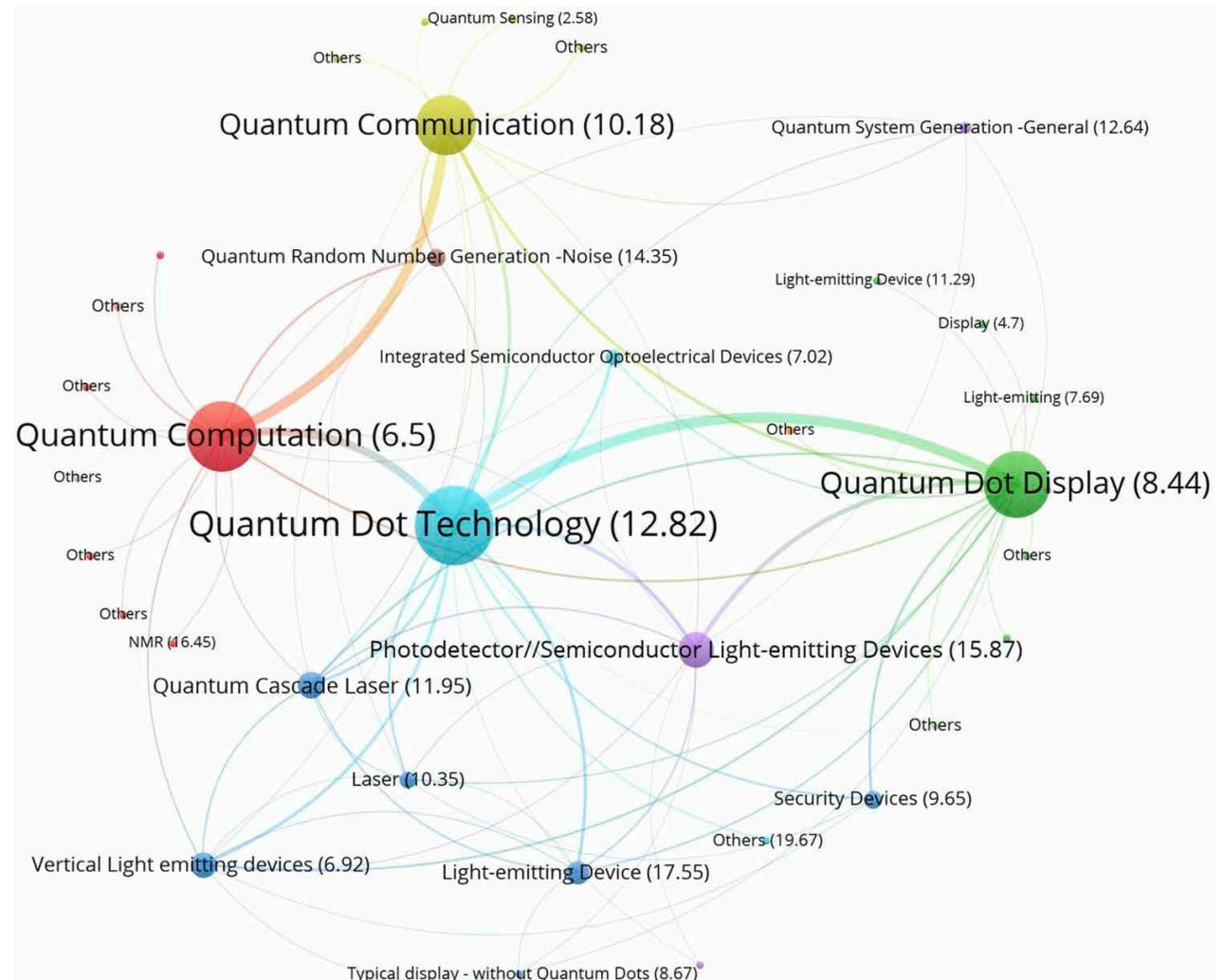


Fig. 5.5. Redes de conexión entre clústeres tecnológicos de patentes cuánticas.



Las patentes están interconectadas a través de **relaciones de citación**, lo que indica un flujo de conocimiento entre actores clave. Instituciones como la Universidad de California y el MIT desempeñan un papel central al conectar la innovación académica con la industria, donde destacan empresas como Samsung, D-Wave y Toshiba.

El análisis sugiere que la actividad de patentes refleja tanto **madurez tecnológica** como **potencial de mercado**. La computación cuántica es un campo altamente competitivo, con una fuerte participación de actores globales, incluidas agencias de defensa de EE. UU., lo que resalta su importancia estratégica en **seguridad y defensa**, ámbitos tan mencionados en los actuales desequilibrios en las estrategias geopolíticas.

El estudio también revela disparidades regionales en la innovación cuántica. **Norteamérica (IBM, D-Wave)** lidera en tecnologías de la segunda revolución cuántica (computación y comunicación cuántica), mientras que **Asia (Samsung, Toshiba, Panasonic)** domina las aplicaciones de la primera revolución cuántica (puntos cuánticos). Estas diferencias reflejan variaciones en prioridades nacionales, capacidades industriales e inversión en tecnología, marcando estrategias diferenciadas en el desarrollo de tecnologías cuánticas a nivel global.

5.6. ANÁLISIS DE PATENTES A NIVEL NACIONAL

El panorama de patentes en tecnologías cuánticas en España ha experimentado un crecimiento sostenido a lo largo de los años, con un pico de actividad entre **2012 y 2015**. La mayor parte de las solicitudes se concentran en el área

de **sensores cuánticos**, lo cual refleja la sólida base investigadora del país en metrología y mediciones de alta precisión.

Por otro lado, la **comunicación y criptografía cuántica** ha ido ganando interés progresivamente, en línea con los esfuerzos globales por desarrollar redes cuánticas seguras. En cuanto a **computación cuántica**, aunque representa una fracción menor del total de patentes, muestra un crecimiento gradual, con contribuciones españolas en cúbits superconductores y algoritmos cuánticos.

A pesar de ciertas fluctuaciones, los últimos años reflejan un **renovado interés** en la protección de la propiedad intelectual cuántica, lo que sugiere un compromiso continuo con la investigación y la innovación en el sector.

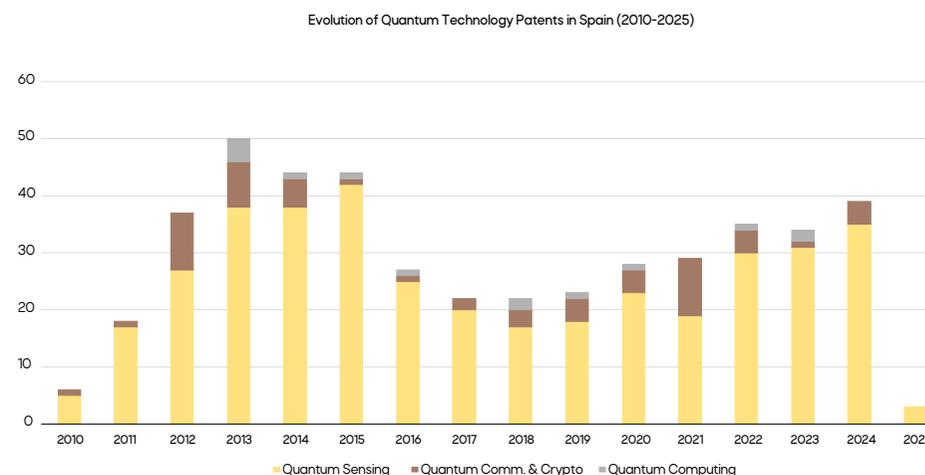


Fig. 5.6. Clasificación de patentes en tecnologías cuánticas en España.



El análisis de los principales solicitantes de patentes en tecnologías cuánticas en España muestra un claro liderazgo del **CSIC**, consolidándose como la institución con mayor número de patentes en este ámbito. Le siguen universidades de referencia como la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), la Universidad de Santiago de Compostela (USC) y la Universidad de Valladolid (UVA), destacando el papel clave del sistema académico en la investigación cuántica.

El liderazgo del CSIC subraya su papel fundamental en la investigación nacional y la transferencia de tecnología, mientras que la fuerte presencia de universidades demuestra el compromiso del sector académico con el desarrollo de la ciencia cuántica en España.

A diferencia de la tendencia global, donde las empresas tienen un rol predominante, en España el sector privado tiene una participación limitada en la generación de patentes cuánticas, concentrándose principalmente en instituciones públicas de investigación. Esto evidencia que la innovación en el país sigue impulsada por la academia, aunque existe un potencial significativo para una mayor colaboración con la industria, lo que podría acelerar la comercialización de los avances científicos en este campo.

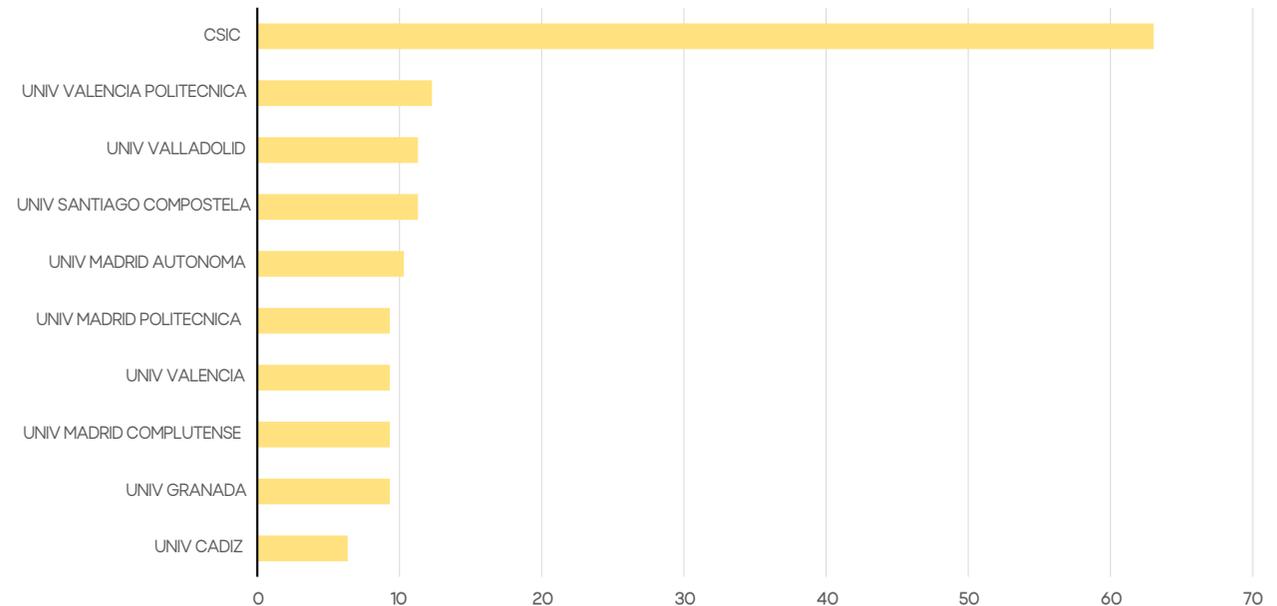


Fig. 5.7. Listado de los diez organismos con mayor número de patentes registradas a nivel nacional.



- 
1. RESUMEN EJECUTIVO
 2. INTRODUCCIÓN
 3. CONTEXTO GLOBAL DE LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 4. RADIOGRAFÍA DE LA CAPACIDAD DE I+D EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 5. ANÁLISIS DE PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

6. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN MÁS RELEVANTES

7. ANÁLISIS DEL ENTORNO EMPRESARIAL INNOVADOR
8. PROSPECTIVA EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: CONSULTA A EXPERTOS
9. ANEXO: OTRAS EMPRESAS RELEVANTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6. Análisis de los proyectos de investigación más relevantes

Los proyectos de investigación en tecnologías cuánticas en Europa reflejan un esfuerzo estratégico y coordinado para consolidar el liderazgo en este ámbito. En esta línea, los programas clave en vigor focalizados en tecnologías cuánticas ya mencionados a lo largo del informe, como el **Quantum Flagship** y **QuantERA**, están desempeñando un papel fundamental en la financiación de iniciativas innovadoras, con una inversión acumulada de unos **374 M€** destinados a **76 proyectos** clave entre 2018 y 2027. Estas iniciativas han permitido ampliar el desarrollo de aplicaciones en computación, comunicación, sensorica, simulación y ciencias de la información cuántica, asegurando un enfoque integral para fortalecer el ecosistema cuántico europeo y su impacto en sectores estratégicos.

El programa **Quantum Flagship**, lanzado en 2018 dentro del marco de **Horizon 2020**, constituye uno de los pilares fundamentales de la estrategia cuántica europea. Su objetivo es fortalecer la colaboración entre la academia, la industria y los responsables políticos, facilitando la transición de la investigación básica a aplicaciones comerciales. En su primera fase (2018-2022), se financiaron 20 proyectos con una inversión de 132 M€, centrados en computación cuántica (QC), comunicación cuántica (QComms), sensores cuánticos (QS), simulación cuántica (QSim) y ciencias de la información cuántica (QInfo). En la segunda fase (2022-2024), se han financiado 32 nuevos proyectos con 207,34 M€ de inversión, consolidando así el ecosistema europeo de tecnologías cuánticas.

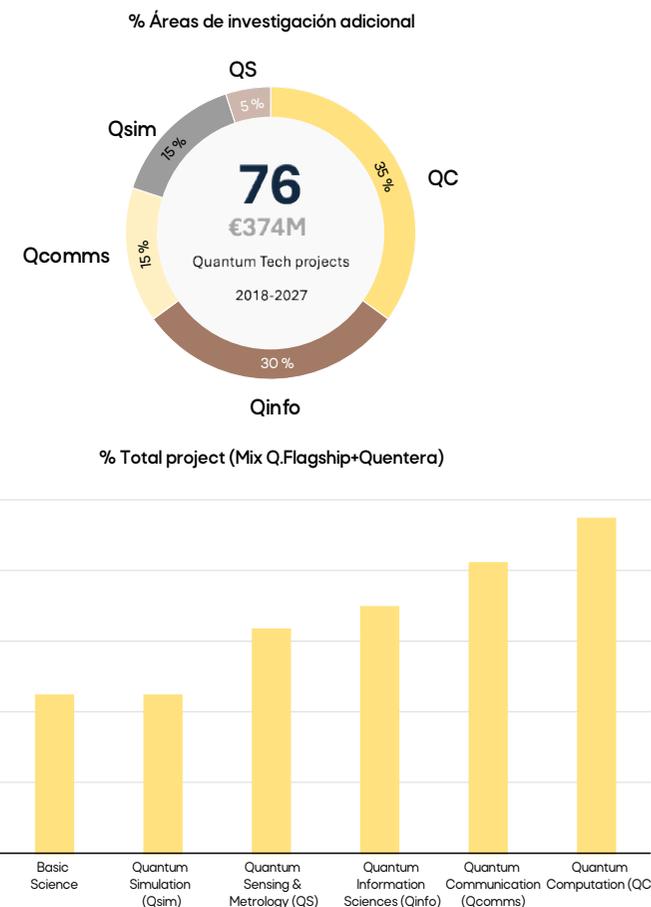


Fig. 6.1. Distribución de proyectos de investigación europeos con participación española.



En paralelo, el programa **QuantERA** ha complementado estos esfuerzos con la financiación de 24 proyectos adicionales, que han recibido 34,3 M€ en su última convocatoria. Estos proyectos abarcan áreas como la comunicación cuántica, los sensores cuánticos, la simulación y la computación cuántica, promoviendo una estrategia de alineación entre los distintos programas nacionales y europeos.

El gráfico circular presentado en el informe refleja la distribución de estos 76 proyectos financiados más relevantes en Europa. Asimismo, la infografía inferior ofrece una representación visual de los proyectos más relevantes en cada categoría, marcando con un icono la participación española y de la CAM, ilustrando la diversidad y alcance de la investigación cuántica en Europa.



Fig. 6.2. Distribución por ámbitos de tecnologías cuánticas de proyectos europeos de investigación. Se destacan los proyectos con participantes españoles y de la CAM.



En términos estratégicos, estos programas no solo buscan avanzar en las capacidades tecnológicas cuánticas, sino también facilitar su integración en sectores clave como la sanidad, la energía y la ciberseguridad. Un ejemplo de ello es el desarrollo de infraestructuras críticas como el **Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI)**, que permitirá la transmisión de datos ultrasegura en el ámbito europeo.

La financiación y el impulso de estos proyectos intentan posicionar a Europa cerca de los líderes de la revolución cuántica, asegurando una estrategia a largo plazo para la transferencia tecnológica y la creación de aplicaciones industriales con un alto impacto económico y social.

6.1. DESCRIPCIÓN DE PROYECTOS RELEVANTES CON PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA

España desempeña un papel activo en la investigación y el desarrollo de tecnologías cuánticas dentro del marco europeo, con varias instituciones que participan en proyectos clave en diversas áreas. En el ámbito de **ciencia básica**, destacan iniciativas como **S2QUIP**, que investiga la integración de la fotónica cuántica en sistemas de comunicación, y **MACQSIMAL**, que desarrolla sensores cuánticos avanzados para aplicaciones en metrología y telecomunicaciones. Ambos proyectos están alineados con la estrategia española de impulsar la investigación en sensores cuánticos y sus aplicaciones tecnológicas.

En el área de **computación cuántica (QC)**, España participa en **OpenSuperQ**, un proyecto centrado en el desarrollo de ordenadores cuánticos superconductores accesibles para la comunidad científica europea. Este esfuerzo es

clave para fortalecer la infraestructura de *hardware* cuántico en Europa, con la contribución de centros de investigación españoles en el diseño y optimización de estos sistemas.

Dentro del área de **simulación cuántica (QSim)**, el CSIC tiene una presencia destacada en los proyectos **TouQan** y **MOLAR**, que se centran en el desarrollo de teoría de información cuántica aplicada a redes y en la optimización de operaciones lógicas cuánticas, respectivamente. Ambos proyectos reflejan el interés español en mejorar la eficiencia y escalabilidad de las arquitecturas cuánticas, fortaleciendo la cooperación con otros centros europeos.

En el ámbito de **sensores cuánticos (QS)**, destacan proyectos como **OPTRIBITS**, dedicado al desarrollo de cúbits basados en radicales tritilo ópticamente direccionables, y **QRaDES**, que desarrolla sensores cuánticos para la detección de axiones en el contexto de la astrofísica. Estas iniciativas, en las que participa el CSIC, refuerzan la capacidad investigadora española en el desarrollo de nuevos materiales y dispositivos para los sensores cuánticos.

Por último, en el campo de las **comunicaciones cuánticas (QComms)**, España participa en proyectos como **CiviQ**, que busca desarrollar sistemas de comunicación cuántica versátiles para redes de telecomunicaciones. Esta línea de trabajo se alinea con los esfuerzos europeos por garantizar la seguridad de las comunicaciones mediante tecnologías cuánticas. En esta misma dirección, el proyecto **QRANGE** se centra en la generación de números aleatorios cuánticos para mejorar la seguridad criptográfica, un aspecto crucial en la protección de datos frente a amenazas emergentes. Además, el proyecto **QCALL** contribuye a la formación de investigadores en tecnologías de comunicación cuántica, reforzando la capacitación de expertos que impulsarán el desarrollo y la implementación de estas infraestructuras en el futuro. Estas iniciativas contribuyen a la consolidación de infraestructuras de comunicación seguras y de alto rendimiento en Europa.



6.2. DESCRIPCIÓN DE PROYECTOS RELEVANTES CON PARTICIPACIÓN DE LA CAM

La CAM se ha consolidado como un nodo estratégico en la investigación cuántica en España, lo cual se refleja en la notable participación de sus instituciones en proyectos europeos de gran relevancia. Dentro de este ecosistema, el **CSIC** se posiciona como el actor con mayor presencia, participando en cinco proyectos clave, seguido por la **UAM**, que está involucrada en tres iniciativas. La **UPM** y la **UCM** también forman parte de estos consorcios, al igual que **Telefónica**, representando al sector privado de la región.

Los proyectos en los que participan estas instituciones abarcan diversas áreas estratégicas de la tecnología cuántica. En el ámbito de la **ciencia básica**, el **S2QUIP** busca integrar la fotónica cuántica en sistemas de información y comunicación. En el campo de los **sensores cuánticos**, **MIRAQLS** desarrolla tecnología cuántica en el infrarrojo medio para aplicaciones en sensorica avanzada. En el ámbito de la **computación cuántica**, el **AQTION** trabaja en ordenadores cuánticos compactos basados en trampas de iones para su integración industrial, mientras que **MILLENION**, con participación del CSIC, se centra en computación cuántica modular a gran escala con trampas de iones. En el área de **simulación cuántica**, el **TouQan**, con participación de la UAM y el CSIC, explora aplicaciones en teoría de la información cuántica y sistemas en red, mientras que **MOLAR**, también con el CSIC, optimiza operaciones cuánticas lógicas. En **comunicación cuántica**, el **CiViQ** investiga sistemas versátiles de comunicación cuántica para redes de telecomunicaciones, con participación de la UPM y Telefónica, y **COMPHORT** desarrolla protocolos de comunicación cuántica segura con la UAM como actor clave.



Fig. 6.3. Distribución por ámbitos de tecnologías cuánticas de proyectos europeos de investigación con participación de entidades localizadas en la CAM.



Finalmente, en **tecnologías facilitadoras**, el **QU-PILOT**, con el CSIC, impulsa capacidades experimentales de producción para tecnologías cuánticas en Europa.

La relevancia de Madrid en estos proyectos se ve reflejada en la financiación obtenida por las instituciones de la región, que representa un **1,07 % de la**

financiación total europea en los proyectos analizados y supone **casi el 22 % de la financiación obtenida por España**. Esto refuerza el papel central de la Comunidad de Madrid dentro del ecosistema cuántico europeo, consolidando su liderazgo en el desarrollo de tecnologías clave para la computación, la comunicación y los sensores cuánticos.



- 
1. RESUMEN EJECUTIVO
 2. INTRODUCCIÓN
 3. CONTEXTO GLOBAL DE LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 4. RADIOGRAFÍA DE LA CAPACIDAD DE I+D EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 5. ANÁLISIS DE PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 6. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN MÁS RELEVANTES

7. ANÁLISIS DEL ENTORNO EMPRESARIAL INNOVADOR

8. PROSPECTIVA EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: CONSULTA A EXPERTOS
9. ANEXO: OTRAS EMPRESAS RELEVANTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7. Análisis del entorno empresarial innovador

Se ha desarrollado un análisis sobre el ecosistema de empresas innovadoras dedicadas a la tecnología cuántica a nivel global, en España y en la CAM. En total, se han detectado a nivel global **182 empresas** innovadoras en este sector, de las cuales **27** pertenecen a firmas de capital de riesgo, pero especializadas en *deep-tech* y específicamente con inversiones en tecnologías cuánticas. Si focalizamos el análisis a nivel nacional, **España cuenta con 33 empresas** en este ámbito, con una distribución geográfica en la que destaca la **CAM (35 %)**, seguida de Cataluña (24 %) y el País Vasco (18 %), con presencia también en Galicia, Valencia, Andalucía y Canarias.

El análisis desarrollado clasifica las empresas en diferentes áreas de especialización, como computación cuántica (*hardware* y *software/simulación*), criptografía

y comunicación, tecnologías complementarias y servicios de consultoría. En términos de tamaño y estructura, el **46 %** de las compañías analizadas son **pymes**, mientras que el **30 % son startups**, en su mayoría *spin-offs* de centros de investigación o universidades creadas después de 2017. El **24 %** restante corresponde a **grandes empresas**.

Dentro del sector español, **13 compañías** están enfocadas en **software y aplicaciones**, de las cuales más del **50 %** aplican su tecnología al **fintech**. Además, la mayoría de estas empresas dedicadas al *software* son pymes o startups, mientras que las compañías centradas en *hardware* cuántico tienden a ser grandes corporaciones.

Distribución geográfica de las empresas analizadas



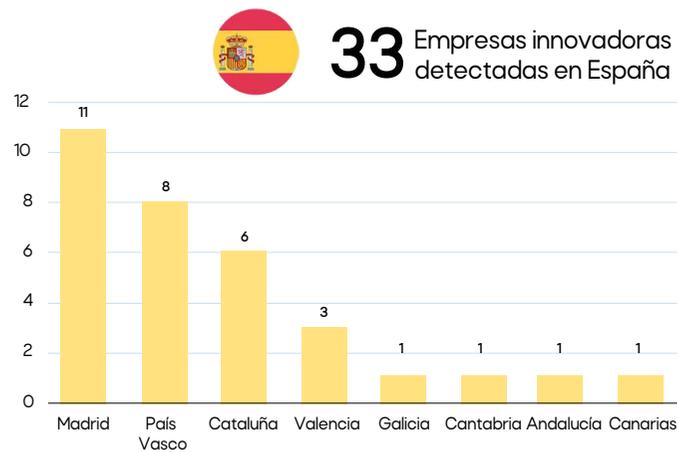
182
Detected
companies
27
Venture Capital



Fig. 71. Distribución por sector y ámbito geográfico de las empresas analizadas.



Este análisis proporciona una visión detallada de la distribución, el tipo y el enfoque de las empresas que están impulsando el desarrollo de la tecnología cuántica, destacando la creciente importancia de este sector en la innovación y la economía global.



Empresas de cuántica por tipo de empresa

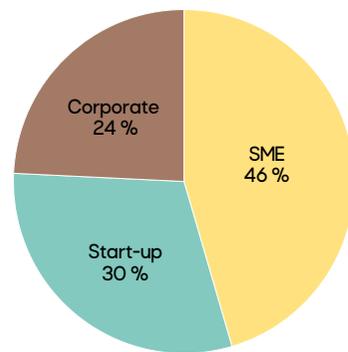


Fig. 72. Segmentación de las empresas emergentes analizadas por comunidad autónoma y por tipo de empresa.

7.1. EVOLUCIÓN DE LAS INVERSIONES

El número de inversiones en empresas emergentes de tecnologías cuánticas ha crecido exponencialmente en la financiación total del sector, con una concentración significativa en la **computación cuántica**. En los últimos años, la inversión total ha alcanzado los **7500 M€**, con un **75 %** de estos fondos destinados a empresas especializadas en computación cuántica. Este sector se posiciona como el más atractivo para los inversores, con un tamaño de mercado estimado entre **9000 y 93 000 M€ para 2040**. Otras áreas, como la **comunicación y los sensores cuánticos**, también están en crecimiento, aunque con inversiones menores y aún en etapas tempranas de desarrollo.

Evolución anual de las inversiones en innovación

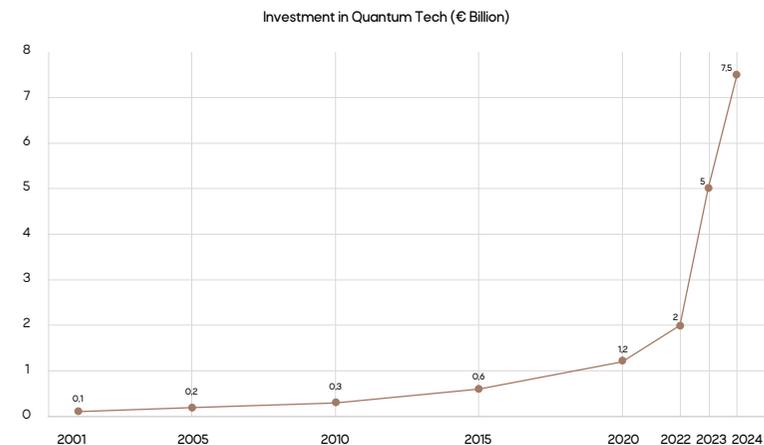
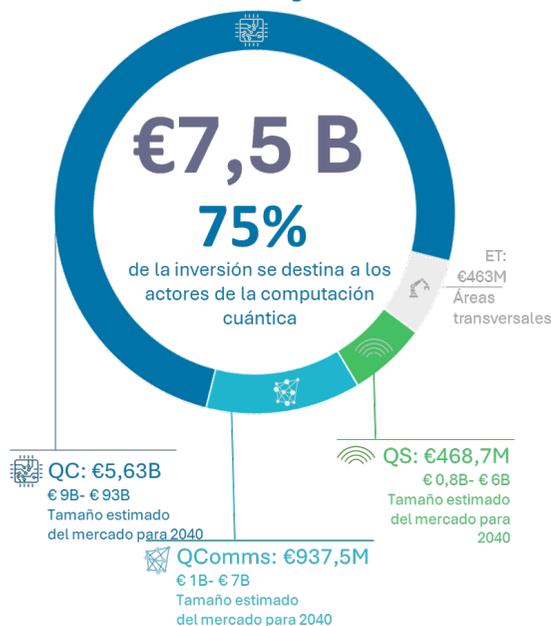


Fig. 73. Evolución anual de las inversiones en innovación y empresas innovadoras en tecnologías cuánticas.



Resumen estimado de los hallazgos del monitor de tecnología cuántica



7.4. Distribución total de la inversión por ámbito de las tecnologías cuánticas

El número de *startups* dedicadas a las **tecnologías cuánticas** ha aumentado de manera acelerada, con una concentración de nuevas empresas en los últimos cinco años, especialmente en el ámbito de la computación cuántica, que representa el **80 %** de las *startups* fundadas en este período. Sin embargo, el análisis destaca desafíos

clave, como la **escasez de talento especializado**, ya que muchos profesionales con formación en estas tecnologías ya están empleados en empresas establecidas, lo que limita el acceso a nuevos emprendimientos. Además, el reducido número de aplicaciones comerciales viables en ciertas áreas, como los **sensores cuánticos**, dificulta la consolidación de nuevas *startups*.

A nivel global, la inversión en *startups* de tecnología cuántica está dominada por **EE. UU., Francia, Canadá y el Reino Unido**, con un ecosistema de investigación fuerte y apoyo gubernamental para *startups* de tecnología profunda. En contraste, **España y otros países europeos** muestran una presencia más limitada en las clasificaciones de inversión, lo que resalta la necesidad de fortalecer mecanismos de financiación y colaboración

Inversión total en start-ups de QT por ubicación (2024), € million

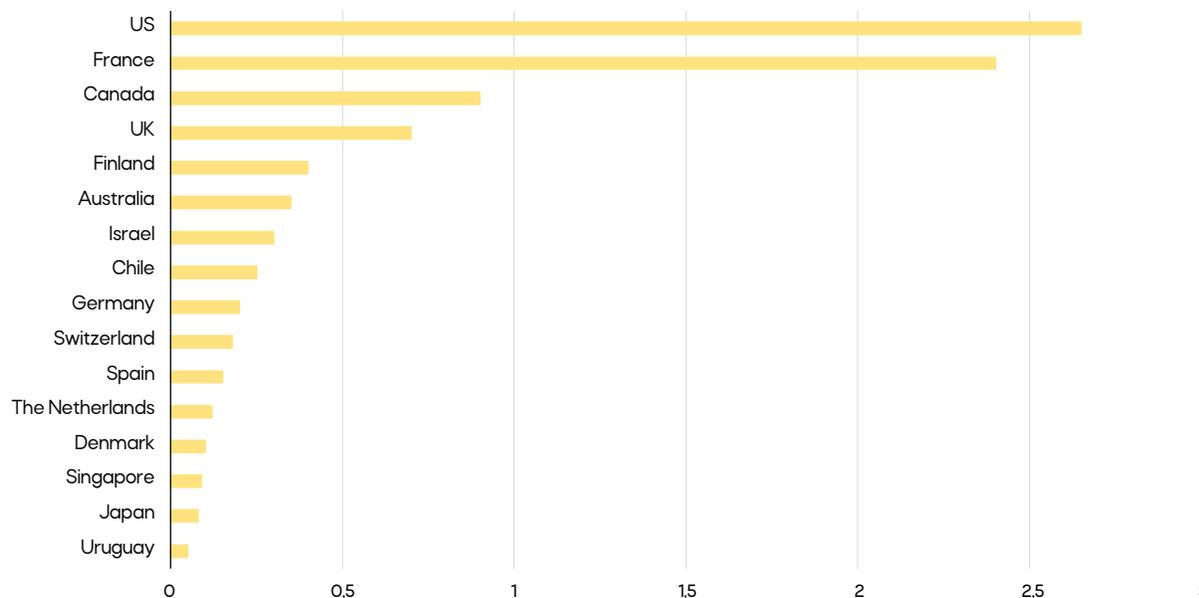


Fig. 7.5. Distribución por países de las inversiones en empresas emergentes relacionadas con tecnologías cuánticas.



entre *startups*, centros de investigación e inversores para competir a nivel global. En España, el 72,4 % de la inversión se destina a *startups* en fase inicial de crecimiento, mientras que un 26,5 % corresponde a financiamiento tipo *seed*. Sin embargo, el acceso a fondos públicos y fusiones/adquisiciones es mínimo, lo que restringe la escalabilidad de las empresas emergentes y la posibilidad de atraer inversiones en etapas más avanzadas.

Este panorama refleja un sector en auge, pero con desafíos estructurales que requieren mayor financiación en **etapas avanzadas de desarrollo**, una estrategia coordinada a nivel europeo y el fortalecimiento de los vínculos entre inversores y *startups* para consolidar el crecimiento del ecosistema cuántico.

7.2. SECTORES CLAVE Y TENDENCIAS EMERGENTES EN EL ECOSISTEMA EMPRESARIAL CUÁNTICO

A partir del análisis de una base de datos global sobre empresas y *startups* (a partir de la base de datos de Crunchbase) enfocadas en tecnologías cuánticas, se ha identificado una serie de categorías tecnológicas clave que reflejan las áreas prioritarias y tendencias emergentes en este sector.

La gráfica muestra el peso relativo de cada categoría en función de su frecuencia de aparición dentro del muestreo del ecosistema empresarial analizado. Entre las áreas más destacadas están la **seguridad poscuántica**, la **computación cuántica** y la **IA cuántica y ciencia de datos**, que representan los campos

más activos en términos de actividad empresarial innovadora. También se refleja un marcado interés en mejorar la infraestructura tecnológica, tanto en *hardware* como *software*, abordando retos críticos como la escalabilidad y la corrección de errores mediante tecnologías emergentes como superconductores y circuitos modulares.

Otras categorías relevantes incluyen servicios de consultoría, sensores y metrología cuántica, así como comunicación cuántica segura, y destaca la necesidad urgente de desarrollar soluciones criptográficas resistentes frente al avance tecnológico actual.

En paralelo, se observa una segmentación de los sectores objetivo, resaltando principalmente el **descubrimiento de fármacos y química**, capital riesgo, aplicaciones transversales e **industria sanitaria**. En estos sectores estratégicos, la simulación cuántica promete acelerar significativamente el desarrollo de **nuevos medicamentos y materiales avanzados**, mientras que la presencia destacada del capital riesgo refleja **altas expectativas de mercado** pese a la incertidumbre comercial inmediata.

La creciente aplicación de la IA en la computación cuántica impulsa sectores como la logística, ampliando el alcance de estas tecnologías en múltiples industrias.

Finalmente, tecnologías emergentes con alto potencial de crecimiento, como las redes cuánticas y comunicaciones seguras, la computación híbrida cuántico-clásica y la simulación cuántica aplicada a investigación farmacéutica y materiales, anticipan potenciales protagonistas en el desarrollo del sector, indicando una clara transición desde la investigación hacia aplicaciones industriales prácticas con fuerte respaldo inversor.

Cuando se realiza un análisis de *clustering* aplicado al ecosistema global de empresas de tecnologías cuánticas, se identifican patrones claros



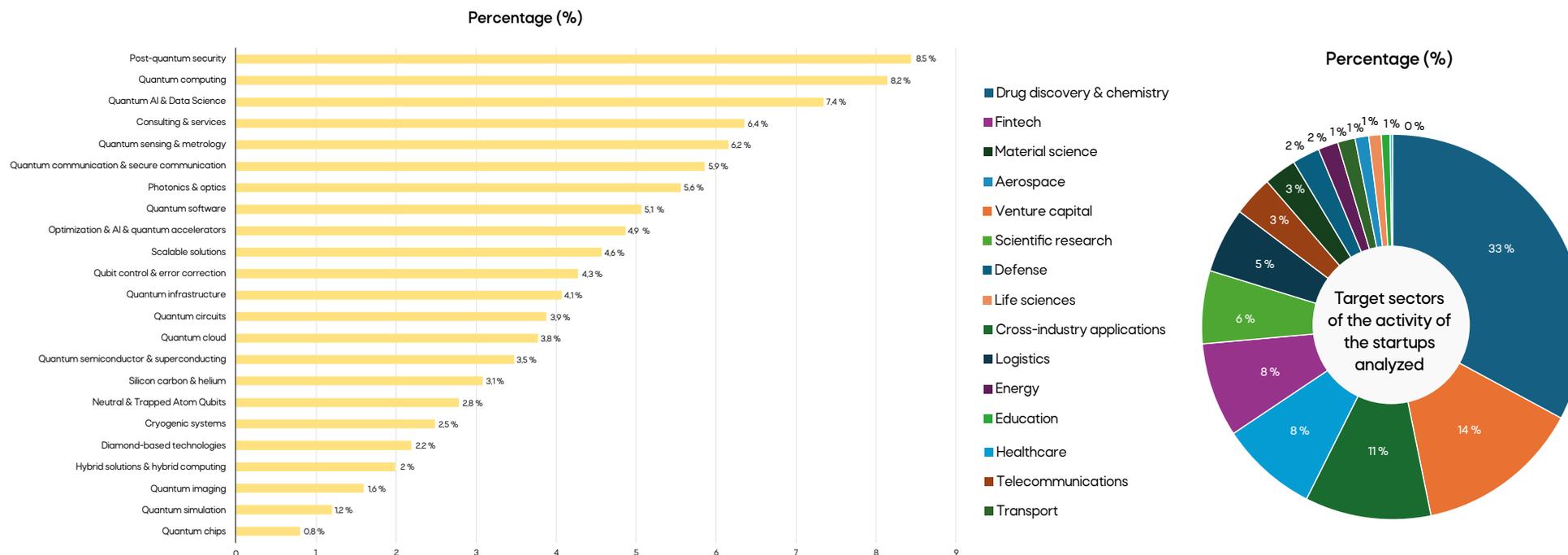


Fig. 7.6. Distribución por sectores clave y tendencias emergentes en el ecosistema empresarial cuántico a nivel mundial.

relacionados con la madurez tecnológica, la estrategia de inversión y el grado de desarrollo empresarial. Este análisis segmenta las compañías en cuatro clústeres diferenciados según sus características tecnológicas y financieras.

Un primer grupo (clúster 0) está compuesto por empresas emergentes con bajos niveles de inversión, principalmente orientadas al desarrollo de aplicaciones basadas en **software y algoritmos cuánticos**, con menor número de patentes y financiación limitada. Un segundo clúster (clúster 1) agrupa

empresas especializadas en tecnologías cuánticas aplicadas, con un enfoque más definido hacia **soluciones prácticas** en áreas como **simulación, optimización y criptografía**, mostrando un aumento moderado en financiación y patentes.

En un tercer nivel (clúster 2) se ubican compañías más avanzadas tecnológicamente, que se enfocan en **hardware cuántico sofisticado**, incluyendo circuitos superconductores e iones atrapados, caracterizadas por una mayor actividad en I+D, así como un alto número de patentes y una inversión financiera considerable.



Visualización del algoritmo de agrupación aplicado K-Means

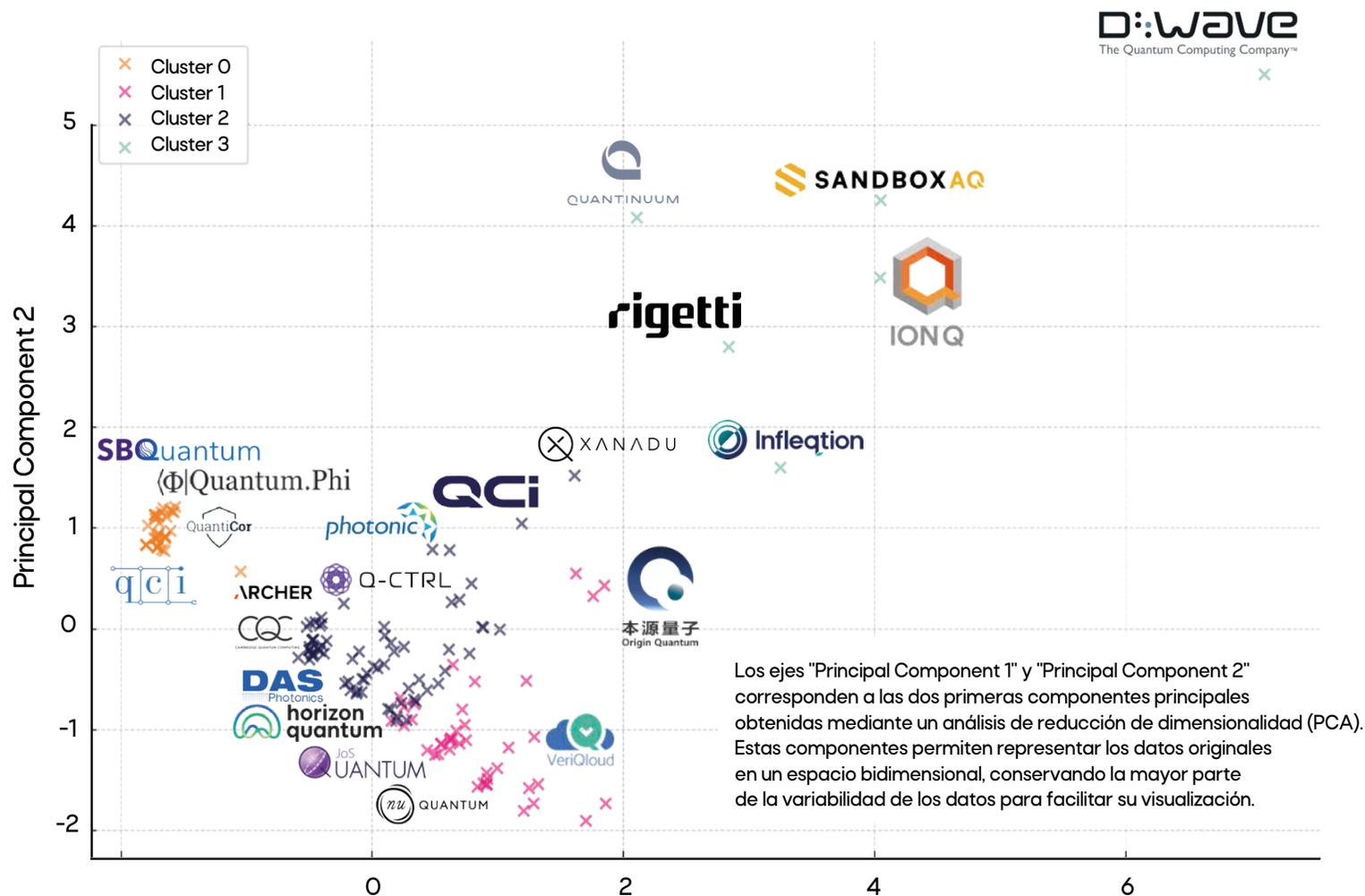


Fig. 7.7. Visualización del posicionamiento y agrupamiento de las empresas emergentes al aplicarles un algoritmo de clustering a nivel mundial.



Finalmente, el cuarto grupo (clúster 3) incluye empresas altamente consolidadas que lideran el sector, con los niveles más altos de financiación, patentes y gasto en tecnologías de la información, destacándose por ofrecer **productos comerciales** y mantener alianzas corporativas relevantes.

Este estudio de agrupamiento refleja una progresión clara desde *startups* orientadas al *software* y algoritmos hacia compañías maduras centradas en el *hardware* y productos comerciales, donde resalta que las tecnologías cuánticas disruptivas requieren altas inversiones y ciclos prolongados de desarrollo antes de alcanzar una adopción generalizada en el mercado.

El análisis específico del **ecosistema español** de empresas en tecnologías cuánticas muestra una alineación general con las tendencias globales, pero con particularidades relevantes. Al igual que a nivel mundial, en España destacan áreas como la **seguridad poscuántica** y la **IA cuántica y ciencia de datos**, aunque con un énfasis aún más pronunciado en esta última categoría, lo que sugiere un mayor interés por aplicaciones de análisis de datos y optimización. Destacan también sectores como **fotónica y óptica**, y comunicación cuántica, probablemente impulsados por centros de investigación especializados. En contraste, áreas como la computación y simulación cuánticas tienen una

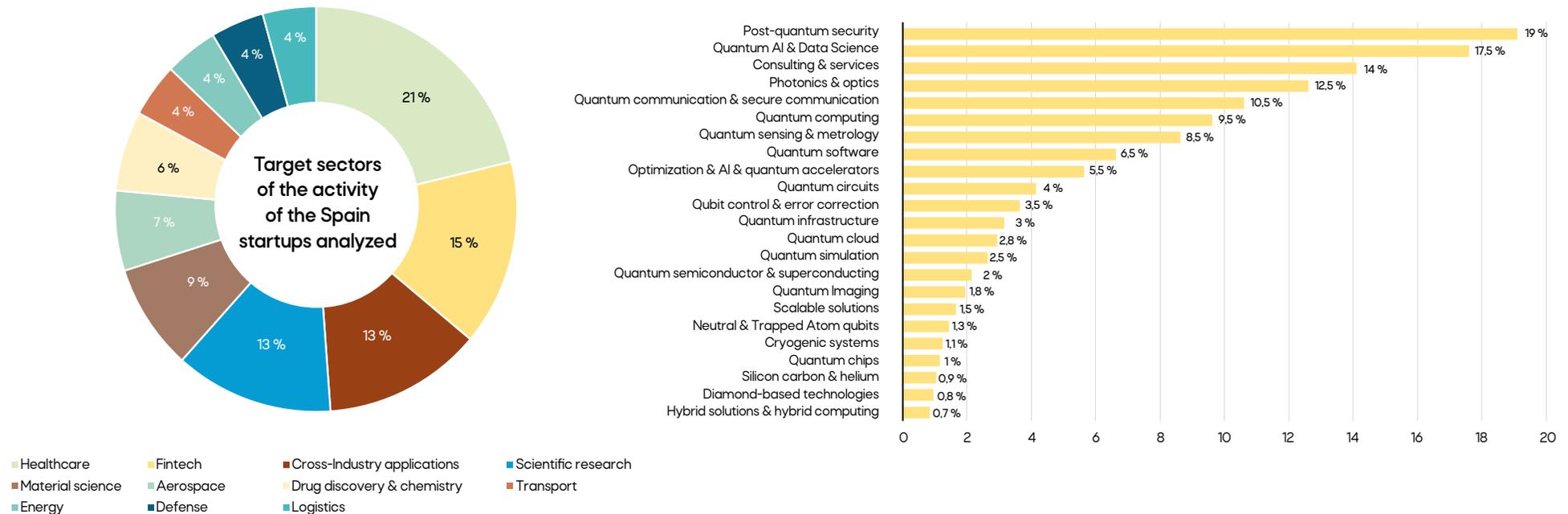


Fig. 78. Distribución por sectores clave y tendencias emergentes en el ecosistema empresarial cuántico a nivel nacional.



representación más baja respecto al panorama global, lo cual indica una menor actividad relativa en *hardware* cuántico y un enfoque predominante hacia aplicaciones industriales y desarrollo de *software*.

Desde el punto de vista sectorial, España prioriza claramente el **ámbito sanitario**, especialmente en salud digital y diagnóstico, a diferencia del mercado global, donde tienen más peso la química y las simulaciones farmacéuticas. Además, se observa una fuerte representación en **investigación científica y ciencia de materiales**, lo que refleja vínculos sólidos con centros académicos e I+D. Por otra parte, la menor presencia relativa de capital riesgo en el mercado español podría señalar un ritmo más lento en la transferencia y comercialización respecto a otros países. Sin embargo, la presencia significativa de aplicaciones transversales y comunicación cuántica señala una dirección clara hacia sectores como la logística, telecomunicaciones y sanidad, aprovechando las fortalezas investigadoras locales para generar innovación con impacto industrial.

7.3. EL ECOSISTEMA MADRILEÑO

La carrera por la cuántica no es solo una cuestión de innovación tecnológica, sino también de desarrollo económico e influencia geopolítica, lo que ha llevado a Gobiernos, instituciones de investigación y empresas a intensificar sus esfuerzos en este campo. Por estas razones, todos los países y, a nivel nacional, todas las comunidades están buscando activamente posicionarse a tiempo e incluso, en la medida de lo posible, no perder esta oportunidad de obtener liderazgo en un ámbito que está llamado a transformar sectores estratégicos como la computación, la seguridad, la IA, la energía o la biomedicina.

En este contexto, el ecosistema cuántico ha crecido de manera acelerada en los últimos años gracias a la combinación de inversión pública, iniciativas de empresas privadas y generación de talento en universidades y centros de investigación. Desde la Administración, se han impulsado estrategias específicas y programas de financiación para facilitar el desarrollo de infraestructuras y fomentar la colaboración entre los distintos actores del sector. Por su parte, las empresas, tanto emergentes como consolidadas, han entendido que la cuántica es un ámbito con un enorme potencial de crecimiento y han comenzado a desplegar soluciones enfocadas en la computación, la simulación y las aplicaciones industriales.



El papel de las universidades y los centros de investigación es fundamental, pues proporcionan la base científica y formativa que alimenta este ecosistema. La transferencia de conocimiento y la creación de *spin-offs* han permitido que nuevas empresas surjan y exploren modelos de negocio viables en torno a esta tecnología. En paralelo, la colaboración internacional y la integración en redes europeas han sido claves para avanzar en un sector donde la competitividad global es intensa y la innovación requiere una fuerte cooperación entre entidades de diferentes países.

En definitiva, la computación cuántica y sus aplicaciones representan una de las oportunidades tecnológicas más importantes del siglo XXI, y aquellos territorios que logren consolidar un ecosistema sólido en torno a ella estarán mejor posicionados para liderar su desarrollo. En este contexto, Madrid se ha convertido en un punto clave dentro del panorama nacional, atrayendo inversiones, desarrollando talento y consolidando una red de actores capaces de impulsar la innovación en este ámbito.

Madrid combina el empuje de nuevas empresas especializadas con la adopción temprana por gigantes corporativos, un modelo híbrido que refuerza su posición como *hub* cuántico emergente. Las *startups* aportan agilidad e innovación disruptiva, mientras que las compañías consolidadas brindan inversión, infraestructura y acceso al mercado, creando sinergias para desarrollar productos y servicios cuánticos «made in Spain». La región, con su talento científico y apoyo institucional, está forjando un ecosistema cuántico competitivo que abarca desde *hardware* y *software* hasta aplicaciones financieras y de seguridad, con ambición de situarse entre los líderes mundiales del sector.

STARTUPS CUÁNTICAS MADRILEÑAS

Se destacan en este análisis del ecosistema global varias empresas emergentes en Madrid que se dedican exclusivamente a tecnologías cuánticas, entre las que se pueden citar como más relevantes:



aQuantum es una empresa madrileña especializada en la ingeniería y desarrollo de *software* cuántico. Fundada en febrero de 2019 como resultado de un acuerdo de colaboración entre Alhambra IT y la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), aQuantum se dedica a la investigación, desarrollo, consultoría y servicios en los campos de la ingeniería y programación de *software* cuántico, en los cuales el Grupo de Investigación Alarcos desempeña un papel relevante en la investigación científica sobre ingeniería de *software* cuántico.

El Grupo Alarcos es un equipo de investigación de la UCLM especializado en ingeniería del *software* y sistemas de información. Su trabajo se centra en la calidad y sostenibilidad del *software*, y aborda áreas como la calidad de datos, pruebas de *software*, desarrollo global y gobierno de tecnologías de la información.

La empresa aQuantum ofrece una gama de servicios que incluyen soluciones híbridas de *software*, mentoría en tecnologías cuánticas, suscripciones a su plataforma **QuantumPath**[®] (de la que es *reseller* por acuerdo con la empresa Quantum Software Engineering, QST) y también consultoría especializada.



QuantumPath® es una plataforma de desarrollo y ciclo de vida de aplicaciones de *software* cuántico que permite la integración de sistemas de información híbridos cuánticos/clásicos.

Debido a su crecimiento, en noviembre de 2020 aQuantum se convirtió en aQuantum Software Engineering.

Además, aQuantum participa en proyectos de investigación y desarrollo, como el proyecto **QHealth**, que aplica la **farmacogenómica cuántica** al envejecimiento.

La empresa también ha sido seleccionada por entidades como CaixaBank para abordar retos estratégicos en el ámbito **fintech**, destacando por el uso de tecnologías punteras y disruptivas. En este contexto, en el año 2021 aQuantum fue seleccionada de entre doscientos aspirantes en el listado de las siete empresas seleccionadas por CaixaBank para afrontar sus retos estratégicos, y así demostrar las capacidades de la herramienta QuantumPath.



Quantum Software Technology (QST)

QST es una empresa especializada en ingeniería y programación de *software* cuántico, enfocada en el desarrollo de soluciones híbridas cuánticas/clásicas listas para la industria. Diseñan, desarrollan y comercializan tecnologías, productos, métodos y servicios que aceleran la adopción práctica de la computación cuántica.

Una de sus principales contribuciones es **QuantumPath®**, una plataforma integral que facilita el desarrollo, prueba, implementación y reutilización de aplicaciones cuánticas. QuantumPath® permite a las organizaciones integrar

soluciones cuánticas en sus sistemas existentes, ofreciendo herramientas y servicios que simplifican la creación de *software* cuántico de calidad industrial. QST es la empresa que diseña, desarrolla y comercializa **QuantumPath®** como su producto comercial. Por otro lado, **aQuantum** es una iniciativa de investigación y desarrollo en ingeniería de *software* cuántico que colabora estrechamente con QST en la promoción y utilización de QuantumPath®.

QST también se dedica a la investigación y desarrollo en ingeniería de *software* cuántico, aplicando estos conocimientos en la creación de tecnologías que integran soluciones cuánticas en entornos reales. Además, ofrecen servicios especializados que permiten a las organizaciones obtener ventajas comerciales mediante la implementación de soluciones híbridas (clásicas/cuánticas).



G2-Zero es una *startup deeptech* española enfocada en tecnologías cuánticas fotónicas, surgida como *spin-off* del IMN del **CSIC** en colaboración con la **UPM**. Se constituyó en diciembre de 2020 y tiene su sede en Getafe (CAM). Su principal desarrollo consiste en **fuentes de fotones individuales** y **componentes cuánticos fotónicos** basados en semiconductores, destinados a aplicaciones en criptografía cuántica, computación cuántica fotónica y sensores cuánticos.

La empresa ha diseñado y patentado una arquitectura innovadora de emisores de fotones que operan eléctricamente, eliminando la necesidad de láseres externos, lo que los hace ultracompactos y fácilmente integrables en sistemas industriales. Su tecnología, protegida por una familia de patentes internacionales,



permite una generación precisa y estable de fotones individuales y pares de fotones entrelazados. Esto posiciona a G2-Zero como un proveedor clave de **hardware cuántico** para la implementación práctica de tecnologías cuánticas en diversas industrias.

Su modelo de negocio es principalmente B2B, orientado a empresas tecnológicas, centros de investigación y corporaciones que trabajan en comunicaciones cuánticas, computación y sensores avanzados. Sus clientes potenciales incluyen sectores como la ciberseguridad, donde sus fuentes de fotones pueden mejorar la criptografía cuántica, y la metrología cuántica, que requiere fuentes estables y precisas para aplicaciones avanzadas en detección y medición. Además, G2-Zero desarrolla herramientas de prueba y caracterización para facilitar la integración de sus componentes en sistemas más amplios.

En términos de financiación, la empresa ha combinado inversión privada y ayudas públicas, logrando recaudar más de un millón de euros. Ha recibido subvenciones como el programa Neotec del CDTI por 325 000 €, un préstamo de ENISA por 184 000 €, y financiación de la aceleradora NATO DIANA con 136 000 €. En 2024, cerró su primera ronda de inversión por 315 000 € con la participación de FI Group, el fondo corporativo de Hamamatsu Photonics y socios de B5tec, lo que ha permitido consolidar su crecimiento y acelerar la comercialización de su tecnología. Los grupos de investigación del que proviene esta startup, trabaja actualmente en el proyectos NextGenSPS, centrado en desarrollar fuentes de fotones individuales para comunicaciones cuánticas, mediante nuevos materiales semiconductores y dispositivos avanzados compatibles con redes ópticas y tecnologías cuánticas.

La empresa se encuentra en **fase de escalado** y aspira a suministrar sus fuentes cuánticas a clientes industriales y centros de investigación. Sus avances buscan facilitar la integración de la fotónica cuántica en aplicaciones comerciales, contribuyendo a la consolidación del ecosistema cuántico español y europeo.



Inspiration-Q

Inspiration-Q es una empresa española especializada en soluciones de *software* inspiradas en computación cuántica, con un enfoque particular en el **sector financiero**. Desarrolla algoritmos cuántico-inspirados que operan en *hardware* clásico, lo que les permite resolver problemas complejos de optimización, análisis de riesgos y modelado de mercados sin depender aún de ordenadores cuánticos físicos. Sus algoritmos son **quantum-ready**, es decir, podrán adaptarse fácilmente a *hardware* cuántico cuando este sea comercialmente viable.

Fundada en mayo de 2021 como una *spin-off* del IFF del CSIC, la empresa fue creada por investigadores con amplia trayectoria en computación cuántica. La estructura de Inspiration-Q combina expertos en algoritmos cuánticos y profesionales del sector financiero, lo que le permite desarrollar soluciones avanzadas con aplicaciones prácticas inmediatas. Con sede en Madrid, la empresa se ha consolidado en la aplicación de tecnologías cuánticas para el sector financiero, con una clara visión de transferencia de conocimiento desde la investigación hasta el mercado.

El modelo de negocio de Inspiration-Q se basa en un enfoque SaaS (*software as a service*), proporcionando acceso a sus herramientas a través de una plataforma en la nube. Esto permite a entidades financieras optimizar carteras de inversión y analizar datos de mercado sin necesidad de infraestructura propia. Además de la nube, también ofrecen soluciones *on-premise* para clientes que requieren mayor control sobre sus datos. Inspiration-Q ha desarrollado tecnologías propietarias basadas en técnicas de optimización cuántico-inspiradas,



destacando productos como iQ-Xtreme, un optimizador para problemas complejos de tipo discreto, e iQ-Finance, una *suite* de herramientas específicas para el sector financiero que facilita el análisis de mercados y estrategias de inversión.

La empresa ha recibido inversión privada y pública. En 2024, cerró una ronda de financiación *early stage* liderada por Bullnet Capital, un fondo especializado en *deeptech*, y contó con el respaldo del programa Invierte del CDTI y de InnovFin de la Unión Europea. Además, ha obtenido apoyo de ENISA y ha sido reconocida como Pyme Innovadora por el CDTI.

Inspiration-Q destaca por acercar beneficios cuánticos a corto plazo. Su impacto industrial ya se deja sentir en el sector de las finanzas (mejora de un 15 % en detección de fraude frente a IA convencional, según casos divulgados) y su reciente inyección de capital la coloca como una de las *startups* españolas de *software* cuántico más prometedoras.

MULTINACIONALES TECNOLÓGICAS EN MADRID

Diversas empresas globales con fuerte presencia en Madrid ofrecen «servicios cuánticos» o cuentan con equipos dedicados. Todas estas empresas consolidadas combinan su modelo de negocio tradicional (consultoría, *cloud*, *hardware*) con nuevas líneas cuánticas, a menudo mediante laboratorios de I+D y alianzas: de este modo, aportan sus recursos para acelerar el desarrollo cuántico (como los laboratorios de Microsoft o Amazon en otras ciudades) y a la vez preparan su portfolio de servicios para la futura era cuántica.

Accenture

Accenture es una multinacional de consultoría estratégica, tecnología y externalización (*outsourcing*) con presencia en más de 120 países. Sus orígenes se remontan a principios de los años cincuenta como una división de la firma auditora **Arthur Andersen**. A lo largo de su historia, ha evolucionado hasta convertirse en un referente en transformación digital, ofreciendo soluciones innovadoras en sectores como **finanzas, salud, telecomunicaciones, industria y Administraciones públicas**. Su enfoque se basa en la integración de tecnologías avanzadas como IA, computación en la nube, análisis de datos y, más recientemente, computación cuántica, para optimizar procesos empresariales y mejorar la competitividad de sus clientes.

En el ámbito de la computación cuántica, Accenture ha sido pionera en su adopción y aplicación empresarial a nivel mundial. En 2017, instaló en España un **equipo de computación cuántica** para desarrollar casos de uso específicos para sus clientes. También ha establecido alianzas con *startups* como **1QBit** y ha explorado diversas plataformas cuánticas para garantizar soluciones óptimas según las necesidades de cada sector.

Para estructurar su estrategia en esta área, Accenture creó el **Accenture Quantum Program**, con un equipo de especialistas dedicados al desarrollo de *frameworks* y casos de uso en múltiples industrias. Sus servicios incluyen **consultoría estratégica**, donde evalúa el impacto de la computación cuántica en los negocios, el desarrollo de pruebas de concepto y soluciones híbridas cuánticas, así como la integración de esta tecnología en las operaciones de sus clientes.



Accenture cuenta con alianzas con los principales proveedores de computación cuántica, como IBM Quantum, D-Wave, Microsoft Azure Quantum, Google e IonQ, lo que le permite probar distintos *hardware* según el caso de uso. Esta versatilidad le ha permitido desarrollar proyectos destacados en sectores clave:

- **Finanzas:** En 2018, colaboró con BBVA y D-Wave para optimizar carteras de inversión y evaluar riesgos mediante la comparación de plataformas cuánticas con algoritmos clásicos.
- **Farmacéutica:** Ayudó a Biogen a acelerar el descubrimiento de fármacos mediante simulaciones cuánticas de interacciones moleculares, con especial foco en enfermedades como el alzhéimer, el párkinson y la esclerosis múltiple.
- **Ciberseguridad:** Ofrece servicios de criptografía poscuántica, evaluando la seguridad de los sistemas de sus clientes ante posibles amenazas cuánticas.
- **Industria y energía:** Desde Accenture Labs, ha desarrollado prototipos en logística, manufactura y energía, optimizando rutas, programación de tareas y uso de materiales.



IBM España

IBM España, líder mundial en tecnologías de la información, ha sido pionera en el desarrollo de la computación cuántica. A nivel global, la empresa ha introducido sistemas avanzados como el IBM Quantum System One, el primer ordenador cuántico comercial, y el más reciente IBM Quantum System Two, que incorpora procesadores modulares como el **IBM Heron de 156 cúbits**, presentado en

diciembre de **2023**. Estas innovaciones reflejan el compromiso de IBM con la evolución de la computación cuántica y su aplicación práctica en diversos sectores.

La plataforma en línea **IBM Quantum** ofrece acceso a sus sistemas cuánticos, permitiendo a investigadores, desarrolladores y empresas experimentar y desarrollar soluciones basadas en esta tecnología. Esta iniciativa democratiza el acceso a la computación cuántica, fomentando una comunidad global de usuarios que contribuyen al avance de la tecnología.

En España, IBM desempeña un papel importante en la promoción y adopción de la computación cuántica. Recientemente, la empresa se incorporó al patronato del **Donostia International Physics Center (DIPC)**, fortaleciendo una colaboración de décadas y subrayando su compromiso con la investigación y el desarrollo en el ámbito cuántico en el país. Esta alianza busca potenciar la excelencia en tecnologías cuánticas, supercomputación e IA, alineándose con la estrategia del Gobierno Vasco en estas áreas.

Además, IBM España **colabora con instituciones académicas** y centros de investigación para impulsar proyectos que exploren aplicaciones prácticas de la computación cuántica en sectores como las **finanzas, la energía y la salud**.



Atos es una multinacional (su división digital se denomina Eviden) con sede española en Madrid que ofrece el simulador cuántico Quantum Learning Machine (QLM), el cual **emula circuitos cuánticos** para formación y pruebas, una herramienta muy utilizada por universidades y centros de supercomputación locales.



Eviden (división digital de Atos), junto a HPCNow!, han firmado un acuerdo de colaboración para desarrollar conjuntamente soluciones en supercomputación y simulación cuántica. Esta alianza permitirá a Eviden, líder europeo en computación de alto rendimiento (HPC), ampliar su alcance a nuevos clientes y sectores, mientras que HPCNow! aportará su experiencia en integración y puesta en marcha de **clústeres de supercomputación** a nivel internacional. Ambas compañías ya han colaborado en proyectos destacados, como la instalación del supercomputador Finisterrae III para el CESGA, que multiplicó por doce la potencia de cálculo de su predecesor, y el despliegue del supercomputador Hércules en el Centro Informático Científico de Andalucía (CICA), situado entre los cinco más potentes de España.



NTT Data Spain (Everis), con sede en Madrid, es una empresa de consultoría tecnológica especializada en sectores como **telecomunicaciones, banca, seguros, energía, industria** y **Administraciones públicas**. En los últimos años, ha fortalecido su presencia en el ámbito de la computación cuántica a través de diversas iniciativas estratégicas, entre ellas la creación de un **Laboratorio Global** centrado en esta tecnología. Este laboratorio, que actualmente cuenta con 150 profesionales y prevé alcanzar los 500 en 2025, tiene como objetivo asesorar a clientes y facilitar la adopción de la computación cuántica en distintos sectores. En España, alrededor de cincuenta especialistas colaboran en esta iniciativa, con planes de duplicar su número en los próximos años.

Entre sus proyectos más relevantes destaca la optimización del **ensamblaje genómico** mediante tecnologías cuánticas, lo que supone un avance en la

aplicación de estos métodos en **salud y ciencias de la vida**. La empresa también impulsa la estrategia *quantum-ready*, que busca preparar a las organizaciones para la transición hacia la computación cuántica, especialmente en sectores como el financiero, farmacéutico, biomédico y de defensa. Además, NTT Data subraya la importancia de la convergencia de esta tecnología con otras emergentes, como el 5G, lo que puede transformar modelos de negocio y procesos operativos.

En el ámbito de la ciberseguridad, la compañía trabaja en el desarrollo de **algoritmos de criptografía poscuántica** para proteger los sistemas frente a la amenaza de los futuros ordenadores cuánticos, que podrían comprometer la seguridad de los sistemas actuales.



Fujitsu España, filial de la empresa japonesa líder en tecnologías de la información y la comunicación (TIC), ha desarrollado una **plataforma híbrida de computación cuántica** que combina un ordenador cuántico superconductor de 64 cúbits con un simulador cuántico de 40 cúbits.

Además, la compañía impulsa la adopción de la computación cuántica como una herramienta clave para la **optimización de procesos empresariales**, integrando tecnologías avanzadas como IA, automatización robótica de procesos (RPA), *blockchain* y *chatbots* en soluciones de automatización inteligente. En este contexto, la computación cuántica juega un papel crucial en la resolución de problemas de optimización complejos, que serían inviables o excesivamente costosos con métodos tradicionales.



Un ejemplo destacado es la colaboración con **Bayer Crop Science**, donde se utilizó **Digital Annealer**, un procesador de optimización combinatoria de inspiración cuántica desarrollado por Fujitsu. Aunque no es un ordenador cuántico, esta tecnología permite resolver problemas de optimización altamente complejos en *hardware* clásico, imitando el comportamiento de los sistemas cuánticos. En esta prueba de concepto, Digital Annealer fue empleado para mejorar la planificación de la producción de semillas y la programación de la campaña de materiales, es decir, la gestión eficiente de los insumos y recursos necesarios para garantizar la producción y distribución óptima de semillas en los tiempos y lugares adecuados.

A través de sus servicios de optimización cuántica, Fujitsu España busca maximizar la eficiencia operativa de sus clientes mediante soluciones personalizadas que mejoran los procesos internos, reducen costes y optimizan el rendimiento global del negocio.

En España, Fujitsu ha establecido una colaboración con el CESGA para crear un centro de conocimiento cuántico en la región. Esta iniciativa, formalizada en abril de 2023, tiene como objetivo acelerar la investigación conjunta en tecnologías de computación cuántica y promover el desarrollo de la industria cuántica tanto a nivel regional como internacional.

Además, Fujitsu ha sido seleccionada para instalar un ordenador cuántico de 32 cúbits en el CESGA, lo que convertirá a Galicia en un referente en este ámbito y apoyará el ecosistema innovador de la región.



Telefónica es una de las principales empresas de telecomunicaciones del mundo, con presencia en Europa y América Latina. Fundada en 1924 y con sede en Madrid, ofrece servicios de telefonía fija y móvil, Internet de banda ancha, televisión digital y soluciones tecnológicas para empresas y Administraciones públicas. A través de su división Telefónica Tech, la compañía impulsa la innovación en áreas como **ciberseguridad**, IA, computación en la nube y **tecnologías cuánticas**, explorando su aplicación en telecomunicaciones y seguridad. Además, participa en proyectos de infraestructuras de comunicación cuántica, como MadQCI y EuroQCI, con el objetivo de fortalecer la ciberseguridad y desarrollar redes de comunicación más seguras y avanzadas.

Telefónica ha sido pionera entre las operadoras en explorar tecnologías cuánticas, especialmente enfocadas en ciberseguridad de redes y nuevos servicios. Desde 2018 probó QKD en redes metropolitanas (ensayo Telefónica-Huawei Madrid) y en 2022 desplegó la primera SIM 5G cuánticamente segura con IDEMIA (usando criptografía poscuántica).

En 2024, presentó en MWC (Mobile World Congress) su demo Quantum-Safe Networks con tres casos de uso:

- cifrado poscuántico en redes 5G privadas;
- protección cuántica de eSIM IoT y
- VPN cuántico-seguras para comunicaciones corporativas.



En IoT, junto con la empresa Quside e IDEMIA, implementó tarjetas SIM y protocolos TLS cuánticos que no requieren cambiar *hardware*, pero fortalecen la seguridad de dispositivos industriales frente a ataques futuros.

También evalúa computación cuántica para optimizar redes, colaborando con *startups* en **optimización de redes móviles** mediante algoritmos cuánticos (Quantum MPO en asignación de espectro, etc.).

En 2023 Telefónica creó un **Centro de Excelencia Cuántica** interno para coordinar estos esfuerzos (I+D en poscuántica, computación cuántica y talento).

Telefónica busca incorporar resultados cuánticos en sus servicios. Por ejemplo, ofrecer a sus clientes corporativos VPN cuántico-seguras como producto premium o *quantum key as a service* en su plataforma Open Gateway.

Forma parte del consorcio europeo **OpenQKD** y, en 2022, estableció acuerdos con **QuiX** y **Qrypt** para evaluar generadores de números aleatorios cuánticos (QRNG) en redes. Además, su filial **Telefónica Ventures** participó en el proyecto europeo **QRANGE**, centrado en el desarrollo de tecnología de generación cuántica de números aleatorios.

Como uno de los principales operadores de redes, Telefónica desempeña un papel clave en la adopción de las comunicaciones cuánticas. Al integrar tecnologías como QKD y el cifrado poscuántico, contribuye a acelerar su desarrollo y generar confianza en el mercado. Gracias a su impulso, España se ha convertido en uno de los primeros países en contar con demostraciones prácticas de redes seguras con tecnología cuántica.

Aunque no fabrica *hardware*, su papel como **integrador y primer usuario** es fundamental para trasladar estas soluciones del laboratorio a las redes comerciales.

Entanglement Partners_ >

Entanglement Partners

Entanglement Partners es una empresa de consultoría fundada en 2016 en Barcelona, especializada en tecnologías cuánticas. Ofrece servicios en áreas como computación cuántica, telecomunicaciones, ciberseguridad, simulación y algoritmos. La compañía se centra en la consultoría estratégica, distribución e implementación de productos cuánticos y el diseño de proyectos relacionados con las telecomunicaciones y la tecnología cuántica. Cuenta con un equipo multidisciplinario de ejecutivos y científicos reconocidos internacionalmente, y tiene presencia en Barcelona y en Madrid, así como en el ámbito internacional.

Es la primera consultora en España y Latinoamérica enfocada 100 % en negocios de consultoría estratégica para empresas que quieran evaluar e implementar soluciones cuánticas, diseño de proyectos de *quantum computing* y telecomunicaciones cuánticas, así como distribución de productos cuánticos de terceros.

Actúa como puente entre desarrolladores de tecnología (*hardware/software*) y sectores industriales tradicionales. Por ejemplo, asesora en ciberseguridad y optimización cuántica en logística y finanzas. Aunque no desarrolla tecnología propia, fue pionera en el asesoramiento en tecnologías cuánticas a nivel empresarial en España. Su impacto innovador es indirecto, pero ha ayudado a numerosas organizaciones a explorar casos de uso cuánticos, contribuyendo a la adopción temprana. En la clasificación, destaca como facilitador y primer referente de consultoría cuántica hispana.



APOYOS ESTRATÉGICOS Y ACELERADORAS



Clusters Madrid

Madrid está impulsando un entorno favorable a estas iniciativas cuánticas. El gobierno regional anunció la creación de un **Clúster de Computación Cuántica** en 2025 (con sede en Boadilla del Monte) para fomentar la colaboración entre *startups*, universidades y empresas establecidas. Muchas de las empresas mencionadas participan en redes y proyectos respaldados públicamente: por ejemplo, Quantum Spain (proyecto nacional coordinado por el BSC) integra a Qilimanjaro y Multiverse junto a universidades madrileñas, e Indra y GMV colaboran en programas de defensa y supercomputación. También existen *venture capital* y aceleradoras locales interesadas en *startups* cuánticas, desde el *venture builder* MadridQ (MadQCI) hasta fondos *deeptech* nacionales que han comenzado a invertir en compañías como Quantum Mads o Quside.



MadQ-CM

MadQuantum-CM

MadQuantum-CM (MadQCI), la red cuántica de Madrid, se ha consolidado como la mayor de Europa gracias a su evolución y logros en el ámbito de las comunicaciones cuánticas. Desde sus inicios en 2009, ha avanzado significativamente, comenzando con la primera línea de criptografía cuántica en España en 2006 y el desarrollo de prototipos en laboratorios de Telefónica.

En 2018, marcó un hito global al desplegar la primera red cuántica en centrales de producción de Telefónica en Madrid, utilizando la infraestructura de fibra óptica existente para acercar esta tecnología a aplicaciones reales. Posteriormente, proyectos europeos financiados por la convocatoria Quantum Flagship y OpenQKD impulsaron su crecimiento, permitiéndole demostrar aplicaciones industriales y gubernamentales y posicionándola como la red más grande y avanzada de Europa.

Actualmente, MadQCI forma parte de la nueva infraestructura cuántica nacional en alineación con el programa europeo EuroQCI, que busca construir una red cuántica paneuropea. Su diseño como una infraestructura permanente la convertirá en la primera red cuántica accesible para usuarios con altos requisitos de seguridad, por lo que desempeñará un papel clave en la consolidación de la infraestructura cuántica en España y Europa.

Las líneas de investigación abarcan desde el desarrollo de infraestructuras hasta la aplicación de *software* y la formación de talento especializado. Se trabaja en la integración de España en la red europea de comunicaciones cuánticas (EuroQCI), estableciendo una infraestructura nacional inicial con nodos capaces de ofrecer servicios prácticos y adaptarse a las necesidades del ecosistema europeo. A corto plazo, el enfoque está en la seguridad en las comunicaciones y, a largo plazo, en la interconexión de computadoras cuánticas. También se desarrollan dispositivos y sistemas de *hardware* para comunicaciones cuánticas e Internet cuántico, incluyendo repetidores y aplicaciones satelitales. En el ámbito del *software*, se diseñan soluciones criptográficas avanzadas y herramientas de optimización para garantizar la seguridad y funcionalidad de las redes cuánticas. En cuanto al procesamiento cuántico, se investiga la fabricación de cúbits y arquitecturas computacionales, combinando nuevas estrategias de *hardware* y *software* para mejorar el rendimiento y la eficiencia de



los sistemas cuánticos. Paralelamente, se impulsan programas de formación y capacitación para generar un ecosistema de talento que facilite la transferencia de conocimiento a la industria. Finalmente, se trabaja en la industrialización de estas tecnologías con el objetivo de acelerar su adopción en el mercado y fomentar la creación de un nuevo sector tecnológico basado en la computación y las comunicaciones cuánticas.

Los colaboradores en el desarrollo de tecnologías cuánticas abarcan diversas disciplinas e instituciones clave en España. La UPM contribuye a la investigación en microtecnología y materiales avanzados a través del Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (ISOM) y el Centro de Metrología (CEM). La UCM se especializa en ingeniería cuántica, explorando aplicaciones avanzadas en este campo. Por su parte, IMDEA Software e IMDEA Networks aportan su experiencia en investigación de *software* y redes de comunicación, fundamentales para el desarrollo de infraestructuras cuánticas. En el ámbito de la salud, la Fundación Vithas colabora en la aplicación de estas tecnologías en medicina. La UAM, con su sólida trayectoria en física cuántica, contribuye al desarrollo de nuevos paradigmas en computación y sensores cuánticos. Finalmente, el INTA desempeña un papel crucial en la investigación de aplicaciones aeroespaciales y la integración de tecnologías cuánticas en el ámbito de la defensa y la exploración espacial.

FONDOS DEEPTTECH

Banca e industria financiera: Madrid alberga la sede de grandes bancos que exploran la computación cuántica para ganar ventaja competitiva y reforzar la seguridad. **BBVA**, por ejemplo, ha invertido en talento y proyectos cuánticos aplicados a finanzas. Es parte del consorcio español CUCO para investigar algoritmos cuánticos en energía, espacio, defensa, logística y finanzas. También

colaboró con la *startup* vasca Multiverse Computing para demostrar la optimización de carteras de inversión usando algoritmos cuánticos en entornos reales. BBVA incluso cofundó alianzas internacionales como el Quantum Safe Finance Forum (impulsado por Europol) para compartir con otros bancos las mejores prácticas ante riesgos cuánticos emergentes. Por su parte, el **Banco Santander** ha formado un *quantum threat group interno* (grupo de amenazas cuánticas) con expertos de ciberseguridad y criptografía, activo desde 2019. Este grupo lidera la estrategia del banco hacia la **criptografía poscuántica**, definiendo una hoja de ruta para migrar a nuevos estándares antes de que las futuras computadoras cuánticas hagan obsoletos los cifrados actuales. Tanto Santander como BBVA y CaixaBank se han unido a iniciativas europeas para probar algoritmos poscuánticos y garantizar la seguridad de datos bancarios de sus clientes. En cuanto al modelo de negocio, la banca ve la computación cuántica no como un producto que comercializar, sino como una tecnología estratégica: buscan optimizar riesgos, inversiones y detección de fraude, así como proteger sus comunicaciones, anticipándose varios años a su aplicación comercial masiva.

CONSORCIOS



Consortio de Computación Cuántica (CUCO)

El proyecto CUCO es una iniciativa española constituida en enero de 2022. Está financiado por el CDTI, respaldado por el Ministerio de Ciencia e Innovación dentro del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, y se establece



como la primera gran iniciativa nacional en computación cuántica con enfoque empresarial. Su objetivo es avanzar en el desarrollo científico y tecnológico de algoritmos cuánticos a través de la colaboración público-privada entre empresas, centros de investigación y universidades, impulsando así la adopción de estas tecnologías en un horizonte de medio plazo.

CUCO se impulsa a través de un consorcio integrado por siete empresas (Ama-tech, BBVA, DAS Photonics, GMV, Multiverse Computing, Qilimanjaro Quantum Tech y Repsol), con el respaldo de cinco centros de investigación (BSC, CSIC, DIPC, ICFO y Tecnalia) y la participación de la UPV. Su objetivo es investigar el potencial de la computación cuántica en sectores estratégicos de la economía española, como la energía, las finanzas, el espacio, la defensa y la logística, y desarrollar casos de uso que mejoren procesos industriales y empresariales.

De los socios localizados en la CAM, se puede destacar su participación en el consorcio por distintas aportaciones, como son los casos de:



Para el BBVA, la participación en CUCO consolida su apuesta por el impulso de la investigación cuántica en el sector financiero, en el cual, en los últimos años, está llevando a cabo una estrategia que implica la creación de alianzas, la consolidación de capacidades internas y la realización de pruebas de concepto en colaboración con centros de investigación, empresas y *startups* para la optimización de carteras o el cálculo de derivados.



GMV (Tres Cantos) participa en el consorcio CUCO con el objetivo de aplicar la computación cuántica a la optimización en la **adquisición de imágenes satelitales**, un problema clave en la observación de la Tierra. En el ámbito espacial, los operadores de satélites deben seleccionar qué imágenes capturar en cada paso orbital, considerando múltiples restricciones como el tiempo de maniobra, la proximidad geográfica y la capacidad del sistema. Este problema de optimización combinatoria, clasificado como NP-difícil, requiere algoritmos altamente eficientes para seleccionar el subconjunto óptimo de imágenes que adquirir en cada órbita. Actualmente, los métodos clásicos utilizados para resolver este problema recurren a algoritmos heurísticos, dado que los enfoques exactos resultan inviables en términos computacionales. En este contexto, GMV investiga el uso del paradigma de computación cuántica conocido como *quantum annealing* (QA), que se basa en la búsqueda del estado de mínima energía en un sistema físico para resolver problemas de optimización de manera más eficiente que con algoritmos clásicos.



- 
- 
1. RESUMEN EJECUTIVO
 2. INTRODUCCIÓN
 3. CONTEXTO GLOBAL DE LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 4. RADIOGRAFÍA DE LA CAPACIDAD DE I+D EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 5. ANÁLISIS DE PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 6. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN MÁS RELEVANTES
 7. ANÁLISIS DEL ENTORNO EMPRESARIAL INNOVADOR

8. PROSPECTIVA EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: CONSULTA A EXPERTOS

9. ANEXO: OTRAS EMPRESAS RELEVANTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8. Prospectiva en tecnologías cuánticas: consulta a expertos

8.1. RESUMEN

En esta consulta a expertos en tecnologías cuánticas se han identificado **avances importantes** y **desafíos clave** para el desarrollo del sector, junto con recomendaciones estratégicas para potenciarlo en España y específicamente en la CAM. A grandes rasgos, los expertos coinciden en que las áreas de **computación cuántica** (*hardware* y *software*) han progresado rápidamente, al igual que la **simulación cuántica**, mientras que otras áreas como las comunicaciones y los materiales cuánticos avanzan más lentamente, pero siguen siendo relevantes. Existe un consenso en que el potencial de la tecnología cuántica para transformar distintos sectores es enorme (especialmente defensa, telecomunicaciones y finanzas), aunque España, y Madrid en particular, aún se encuentran por detrás de los líderes globales en este ámbito.

Las principales barreras que han detectado los expertos para acelerar el desarrollo cuántico en España son la insuficiente financiación, la falta de infraestructuras y la escasez de talento especializado, junto con dificultades técnicas para escalar las tecnologías actuales. Para superar estos obstáculos, los expertos recomiendan una serie de **medidas prioritarias**:

- **Aumentar la inversión sostenida en I+D cuántica:** Dotar de mayores recursos financieros a proyectos de investigación y a infraestructuras

(laboratorios y centros de computación cuántica), garantizando además continuidad a largo plazo para afianzar los resultados que se vayan consiguiendo.

- **Fomentar la formación y atracción de talento:** Implementar programas educativos especializados, becas y entornos atractivos para jóvenes investigadores, de modo que se forme una masa crítica de expertos cuánticos en España y en regiones como Madrid.
- **Impulsar la colaboración público-privada e internacional:** Facilitar consorcios y redes de colaboración entre centros de investigación, universidades, empresas y Administraciones públicas, tanto a nivel nacional como internacional, para compartir conocimientos, recursos y acelerar aplicaciones industriales.
- **Apoyar la innovación y las startups cuánticas:** Crear *hubs* de innovación y mecanismos de financiación (por ejemplo, fondos para pruebas de concepto y prototipos) que permitan a las empresas emergentes llevar las tecnologías cuánticas del laboratorio al mercado.
- **Enfocar la estrategia en áreas de alto impacto:** Priorizar líneas de investigación estratégicas (como algoritmia cuántica, corrección de errores, integración cuántico-clásica o aplicaciones en IA) donde España pueda destacar, alineadas con las necesidades de la industria y la sociedad.



En este sentido, los expertos ofrecen una **visión optimista pero prudente**: reconocen los logros alcanzados hasta ahora en tecnologías cuánticas, pero enfatizan la necesidad de acciones decididas por parte de los distintos organismos y Administraciones para acelerar el desarrollo. Este informe detalla los hallazgos cuantitativos de la encuesta (estadísticas de respuestas en escalas de 1 a 5 y preguntas de opción múltiple), así como un análisis cualitativo de las opiniones y recomendaciones proporcionadas, culminando en sugerencias estratégicas concretas para fortalecer el ecosistema cuántico español y madrileño.



8.2. ANÁLISIS CUANTITATIVO

PARTICIPANTES

En la consulta participaron diversos expertos destacados en tecnologías cuánticas, procedentes tanto del mundo de la investigación como del sector empresarial. Sus áreas de especialización abarcan principalmente la **computación cuántica** (*hardware* y *software*) y la **fotónica**, con menor representación en campos como las comunicaciones cuánticas o la criptografía poscuántica, el *software* híbrido y de inspiración cuántica, como alguna de las áreas más destacadas. Todos los expertos consintieron en compartir sus opiniones para este análisis, lo que permitió recopilar tanto valoraciones numéricas como comentarios abiertos. Algunos de los expertos amablemente han aceptado aparecer mencionados como muestra de la heterogeneidad alcanzada y de su alto conocimiento el campo analizado.

RELEVANCIA DE ÁREAS DE INVESTIGACIÓN CUÁNTICA

Se evaluó en escala de 1 (mínima) a 5 (máxima) la importancia o nivel de desarrollo de diversas áreas de I+D en tecnologías cuánticas. En general, todas las áreas fueron consideradas bastante importantes (mayoría de las puntuaciones entre 3 y 5). Destacan especialmente:

- La **computación cuántica** (*hardware*), que incluye arquitecturas de cúbits superconductores, atrapamiento de iones, etc., y la **computación cuántica** (*software* y algoritmos), incluyendo algoritmos cuánticos, compiladores y enfoques híbridos, son algunas de las áreas que recibieron valoraciones muy altas por su función clave en el avance de este ámbito.





David Gómez Plaza
Perfil profesional

Director de Tecnologías Avanzadas de Fabricación en Tekniker, David Gómez Plaza participa activamente en la aplicación de tecnologías emergentes, incluyendo la computación cuántica, en procesos industriales avanzados. Su trabajo se centra en impulsar la transferencia tecnológica y la innovación aplicada a sectores estratégicos.



Samuel Fernández Lorenzo
Perfil profesional

CEO de Inspiration - Q, Samuel Fernández Lorenzo lidera una empresa pionera en el desarrollo de soluciones basadas en tecnologías cuánticas. Con una visión orientada a la aplicación práctica, promueve la adopción de estas tecnologías en sectores industriales mediante el diseño de herramientas accesibles y escalables.



Iñigo Artundo
Perfil profesional

CEO de VLC Photonics, Iñigo Artundo trabaja en el ámbito de la fotónica integrada, una tecnología clave para el desarrollo de sistemas cuánticos avanzados. Su experiencia combina la gestión empresarial con el impulso a la I+D en aplicaciones cuánticas para comunicaciones y sensorial.



Víctor Canivell
Perfil profesional

Cofundador y presidente de Qilimanjaro Quantum Tech, Víctor Canivell lidera iniciativas centradas en computación cuántica aplicada. Su trayectoria combina experiencia tecnológica y visión estratégica para posicionar a su empresa como referente en soluciones cuánticas accesibles y de alto impacto.



Juan José García Ripoll
Perfil profesional

Investigador del CSIC y coordinador de la Plataforma de Tecnologías Cuánticas, Juan José García Ripoll es una figura clave en el impulso a la investigación cuántica en España. Su trabajo se centra en la teoría cuántica y en el desarrollo de algoritmos y arquitecturas para computación y simulación cuántica.



Elena Yndurain
Perfil profesional

Profesora en IE University y autora del libro *Quantum Computing for Beginners*, Elena Yndurain combina la divulgación con la formación de nuevas generaciones de profesionales en tecnologías cuánticas. Su labor académica contribuye a acercar este campo emergente a estudiantes, empresas e instituciones.



Carlos Kuchkovsky
Perfil profesional

CEO de QCentroid, Carlos Kuchkovsky impulsa el desarrollo de plataformas que integran inteligencia artificial, blockchain y computación cuántica. Con una sólida experiencia en innovación tecnológica, lidera soluciones orientadas a resolver problemas complejos en entornos empresariales.



Enrique Lizaso
Perfil profesional

CEO de Multiverse Computing, Enrique Lizaso lidera una de las empresas europeas más reconocidas en computación cuántica aplicada a las finanzas y la industria. Su enfoque combina el rigor científico con la estrategia empresarial para llevar la computación cuántica al entorno real.



Benito Alén
Perfil profesional

Investigador en el CSIC y fundador de g2-Zero, Benito Alén trabaja en la interfaz entre la investigación fundamental en tecnologías cuánticas y su aplicación práctica. Su trayectoria combina el desarrollo científico con el impulso a iniciativas emprendedoras en el ámbito cuántico.

Fig. 8.1. Muestra de participantes expertos en diferentes sectores de las tecnologías cuánticas en el proceso de prospectiva tecnológica.



- La **simulación cuántica** (modelado de materiales, química cuántica, simulación de sistemas biológicos, etc.) también fue valorada como un área de gran impacto potencial, cercana en importancia a la computación cuántica.
- Áreas como los **sensores y metrología cuántica** y los **materiales cuánticos aplicados** fueron consideradas importantes, aunque, según algunos expertos, aún están emergiendo y podrían requerir más tiempo para madurar comparadas con la computación.
- En el caso de las **comunicaciones cuánticas**, las opiniones estuvieron algo más divididas: si bien varios expertos reconocen su importancia para la seguridad y la creación de un futuro Internet cuántico, otros las priorizan menos en relación con la computación. No obstante, ningún experto calificó esta área como irrelevante; simplemente quedó ligeramente por detrás de computación y simulación en las prioridades globales.
- En menor medida también se mencionan como áreas relevantes el **software** y los **algoritmos de inspiración cuántica**, los cuales aplican principios cuánticos, como la superposición o el entrelazamiento, en soluciones que se ejecutan en ordenadores clásicos.



Fig. 8.2. Análisis cuantitativo de la encuesta de prospectiva tecnológica.



Permiten abordar problemas complejos, especialmente de optimización y *machine learning*, con mayor eficiencia que los métodos tradicionales, siendo útiles en sectores como las finanzas, la IA o la logística.

Por tanto, en estas valoraciones se refleja que, dentro del ecosistema cuántico, la **computación** y la **simulación** son percibidas como las áreas más dinámicas y con mayor impacto a corto-medio plazo, sin que ello reste mérito a las demás líneas de investigación, que se consideran todas necesarias para un desarrollo equilibrado del sector.

SECTORES MÁS BENEFICIADOS A MEDIO PLAZO

Los expertos indicaron qué sectores económicos creen que serán los más beneficiados por los avances en tecnologías cuánticas en los próximos 10-15 años (pregunta de opción múltiple, pudiendo elegir varios). Los resultados se resumen en la gráfica de la derecha.

Se puede observar que los sectores **aeroespacial y defensa**, junto con **telecomunicaciones y ciberseguridad**, fueron los más mencionados (81 %) como aquellos potenciales beneficiarios más prometedores en las aplicaciones de las tecnologías

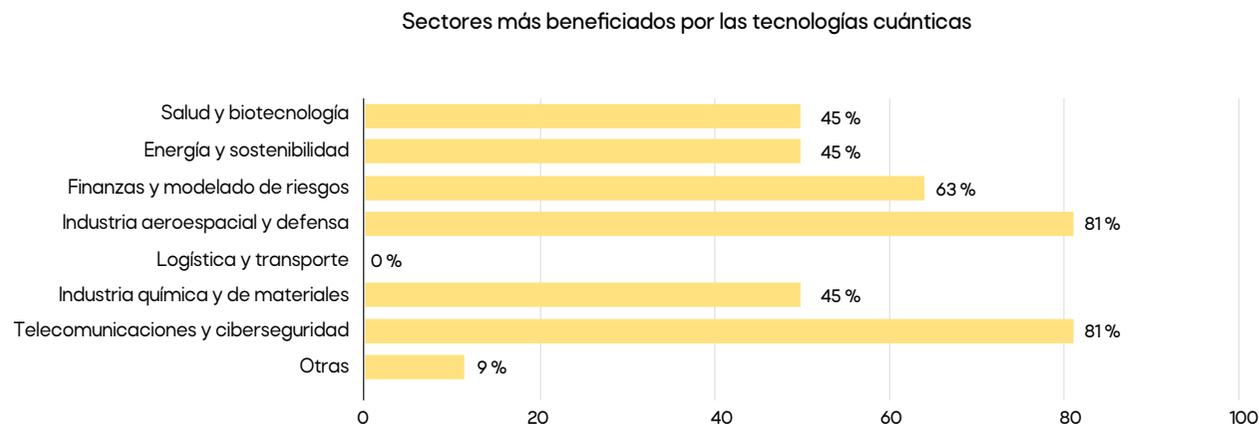


Fig. 8.3. Sectores considerados con mayor potencial de beneficio gracias a las tecnologías cuánticas en la próxima década (porcentaje de los expertos que mencionan cada sector).

cuánticas. Esto sugiere que los expertos ven aplicaciones claras en, por ejemplo, navegación y comunicación seguras, detección avanzada y computación de alto rendimiento para criptografía. Los siguen de cerca el sector de las **finanzas y modelado de riesgos** (63 % de las menciones), donde la optimización y simulación cuántica podrían revolucionar el análisis de riesgos, y los sectores de **salud y biotecnología**, además de **energía y sostenibilidad** (con 45 % de las menciones respectivamente), que también aparecen bien posicionados gracias a posibles avances en descubrimiento

de fármacos, nuevos materiales u optimización de redes energéticas inteligentes mediante algoritmos cuánticos.

Destaca que, a pesar de aparecer mencionado en distintos informes y la apreciable actividad de diversas empresas, el sector de la **logística y el transporte** no obtuvo menciones por parte de los expertos, lo que indicaría que, a juicio de los participantes en el ejercicio de prospectiva, las aplicaciones cuánticas en optimización logística podrían tardar más en materializarse o tener un impacto



relativamente menor en comparación con los sectores anteriormente mencionados. El sector de la **industria química y de materiales** recibió un 45 % de las menciones, reflejando interés moderado en cómo la simulación cuántica de moléculas y materiales podría beneficiar a la química industrial, aunque quizás a un nivel más específico. En conjunto, estos resultados perfilan una expectativa de **impacto transversal**, con énfasis particular en sectores donde la seguridad, la optimización compleja y la computación de altas prestaciones son críticas.

PRINCIPALES OBSTÁCULOS EN ESPAÑA Y EN LA CAM

Se preguntó a los expertos cuáles son los obstáculos más importantes para el desarrollo y adopción de las tecnologías cuánticas en España. Las respuestas, de tipo selección múltiple, se ilustran a continuación:

Los datos cuantitativos evidencian una **preocupación generalizada por la financiación**: la totalidad de expertos señala la **falta de apoyo institucional y recursos económicos** como uno de los principales obstáculos para el desarrollo cuántico. Este factor se constituye como la barrera más mencionada por los expertos, indicando que los recursos

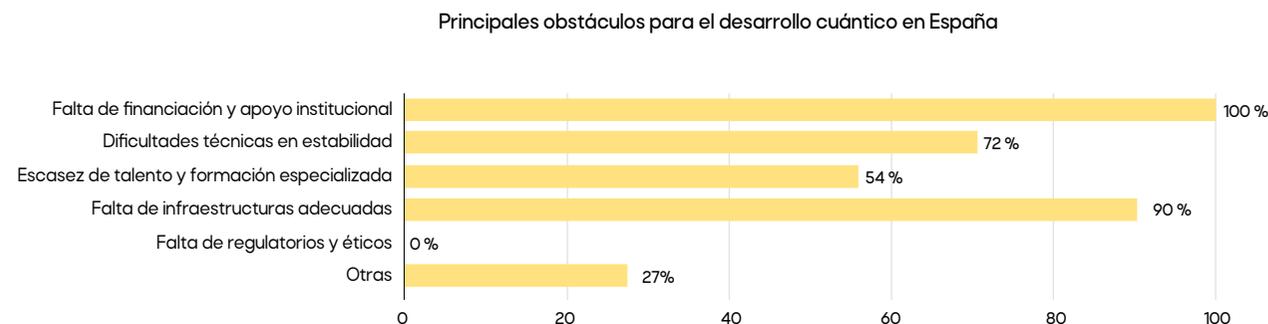


Fig. 8.4. Obstáculos considerados más urgentes de abordar para impulsar el desarrollo de las tecnologías cuánticas en España (porcentaje de expertos que mencionan cada obstáculo).

económicos destinados a la I+D cuántica en España son insuficientes actualmente para competir al nivel global o para madurar las tecnologías emergentes. En segundo lugar, aparece la **falta de infraestructuras adecuadas**, estrechamente ligada a la financiación. La ausencia de laboratorios especializados, centros de computación cuántica o acceso a equipamiento puntero dificulta la experimentación y el escalado a prototipos que permitan desarrollar y escalar las tecnologías.

Un tercer obstáculo también ligado en parte a la falta de infraestructuras son las **dificultades técnicas en escalabilidad**. Esto hace referencia a los desafíos científicos propios del campo cuántico, como escalar el número de cúbits manteniendo

la coherencia, mejorar la fiabilidad de los sistemas o reducir la tasa de error. Aunque estos retos son globales, los expertos los resaltan como barreras que hay que superar para que la tecnología cuántica sea realmente **efectiva y accesible** fuera del laboratorio.

La **escasez de talento y formación especializada** fue mencionada por el 60 % de los expertos, lo que señala la necesidad de implantar una estrategia educativa y de formación para cualificar a más profesionales en este tipo de tecnologías disruptivas. Aunque España cuenta con investigadores de alto nivel, el rápido crecimiento del sector demanda ampliar la base de expertos (ingenieros



y programadores cuánticos, técnicos de laboratorio, etc.) y evitar la fuga de talento al extranjero.

Curiosamente, los **desafíos regulatorios y éticos** no fueron considerados urgentes. Ningún experto priorizó aspectos regulatorios como obstáculo, lo cual sugiere que actualmente se perciben como secundarios frente a problemas más inmediatos como la falta de recursos o las limitaciones técnicas. Esto no significa que las cuestiones legales o éticas carezcan de importancia, sino que en el estado actual de desarrollo aún no se han manifestado como barrera significativa en España.

Como resumen de este análisis se desprende que las **barreras predominantes son de carácter estructural** (financiación, infraestructura y personal cualificado). Los obstáculos puramente científicos existen (escalabilidad, fiabilidad, etc.), pero los expertos parecen confiar en que se podrán resolver con los actuales procesos de investigación, siempre y cuando se cuente con los medios y el entorno adecuados para hacerlo.

Medidas prioritarias para fortalecer la investigación cuántica: Ante estos obstáculos, se consultó a los expertos sobre qué medidas deberían priorizarse en España para fortalecer la investigación y el desarrollo en tecnologías cuánticas. Podían

Medidas prioritarias para fortalecer la investigación cuántica

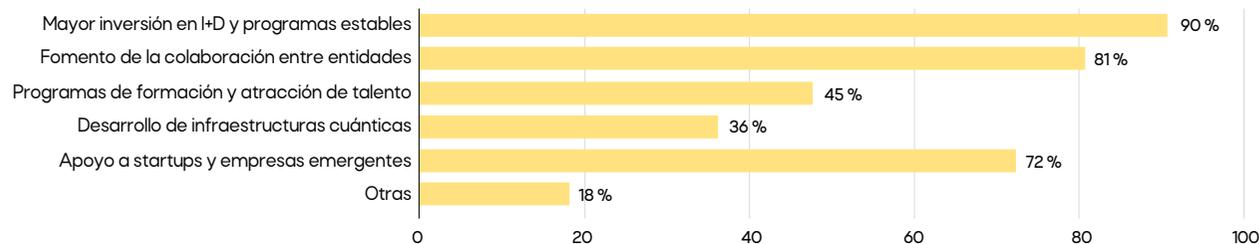


Fig. 8.5. Medidas estratégicas que los expertos consideran prioritarias para impulsar la investigación en tecnologías cuánticas en España (porcentaje de expertos que apoyan cada medida).

seleccionar múltiples opciones. Los resultados se presentan en la siguiente gráfica:

La medida más apoyada (90 % de los expertos) fue la de **invertir mayor financiación en I+D y crear programas estables**, lo cual concuerda directamente con la identificación de la falta de financiación como principal obstáculo. Los expertos demandan un aumento significativo de los fondos dedicados a investigación cuántica, idealmente mediante programas sostenidos en el tiempo que permitan planificación a largo plazo (frente a iniciativas aisladas). Esta inyección de recursos debería destinarse tanto a proyectos científicos como a construir y actualizar infraestructuras.

En segundo lugar (81 % de las menciones) se sitúa el **fomento de la colaboración entre las distintas entidades**, englobando colaboración academia-industria y sinergias público-privadas. Dado lo complejo y multidisciplinar del ámbito cuántico, los expertos ven imprescindible estrechar la colaboración entre universidades, centros de investigación, empresas tecnológicas, *startups* e incluso entre distintos organismos públicos. Esta medida apunta a romper silos y favorecer **proyectos conjuntos** que aceleren la transferencia tecnológica.

Le sigue en prioridad el **apoyo a startups y empresas emergentes** con el 72 % de menciones. Muchos expertos consideran crítico impulsar el ecosistema emprendedor en torno a las



tecnologías cuánticas, por ejemplo, mediante incubadoras, financiación específica para empresas emergentes, o políticas que faciliten la creación y crecimiento de *startups* de *hardware* o *software* cuántico. Las *startups* son vistas como vehículos clave para llevar las innovaciones del laboratorio al mercado, por lo que su éxito contribuiría directamente a la adopción industrial de estas tecnologías.

La **formación de talento y programas de atracción de investigadores** obtuvo el 45 % de las menciones. Esta medida consiste en desarrollar iniciativas educativas (másteres, doctorados especializados, cursos de actualización) y crear incentivos para atraer talento internacional o repatriar investigadores españoles en el extranjero. Aunque con algunas menciones menos que las anteriores, sigue siendo un eje prioritario, dado que, sin capital humano suficiente, las demás medidas perderían eficacia.

El **desarrollo de infraestructuras cuánticas** (36 % de las menciones) aparece ligeramente por debajo, quizás porque muchos lo consideran implícito al hablar de mayor financiación. Aun así, los expertos hicieron referencia a la necesidad de contar con plataformas nacionales de computación cuántica en la nube, laboratorios compartidos con equipamiento puntero (por ejemplo, criogenia, salas limpias para fabricación de chips cuánticos, etc.) y bancos de pruebas donde las empresas puedan experimentar con tecnología cuántica sin tener que asumir inversiones prohibitivas individualmente.

Finalmente, **«otras»** medidas recibieron un 18 % de las menciones, entre las cuales (según las respuestas abiertas asociadas) figuran propuestas específicas como facilitar **acceso en la nube a hardware cuántico** internacional y crear un **quantum hub** dedicado en España. Estas ideas complementan las categorías principales, subrayando la importancia de la accesibilidad tecnológica y la concentración de esfuerzos en un nodo central de innovación.

En conjunto, el análisis cuantitativo demuestra una **alineación clara** entre los obstáculos identificados y las soluciones propuestas: a mayores carencias en financiación, talento e infraestructuras, los expertos responden pidiendo **más inversión, formación y colaboración**. Se puede inferir que existe entre ellos un diagnóstico compartido de la situación actual y un conjunto de acciones relativamente consensuadas que, de aplicarse, podrían mejorar significativamente el panorama de la investigación cuántica en España.

8.3. ANÁLISIS CUALITATIVO

En las preguntas abiertas de la encuesta, los expertos proporcionaron opiniones detalladas sobre el estado actual de las tecnologías cuánticas, los desafíos por superar y sus recomendaciones para el futuro. A continuación, se integran estas reflexiones, organizándolas por grandes temas emergentes: estado tecnológico actual, talento, financiación, colaboración, desafíos técnicos y visión de futuro (incluyendo consideraciones específicas para España y Madrid).

ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA CUÁNTICA

De las respuestas cualitativas se desprende que los expertos perciben el estado actual de la tecnología cuántica como una etapa de rápido progreso, pero aún **incipiente en cuanto a aplicaciones prácticas**. Varios participantes destacaron avances recientes significativos en el ámbito de la computación cuántica, especialmente en lo que respecta a la mejora de la **corrección de errores** y al aumento gradual de la **capacidad de los procesadores cuánticos**. Por ejemplo, un experto mencionó que en los últimos años se ha logrado una

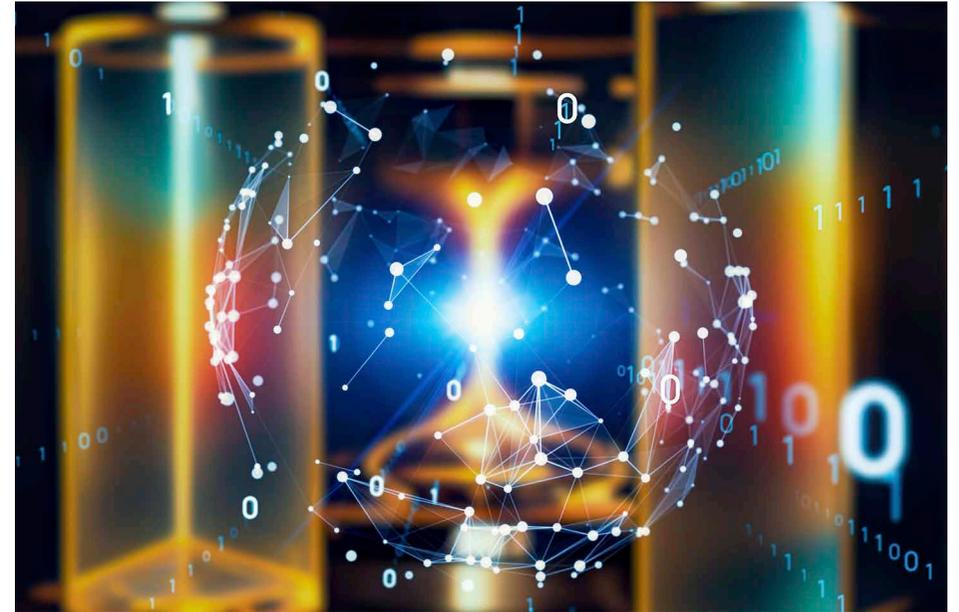


«mejora en la corrección de errores, mejoras en el rendimiento de los cúbits», lo cual es crucial para escalar los sistemas. Otro señaló el avance en la **integración híbrida cuántico-clásica**, citando la «orquestación híbrida de procesos cuánticos y clásicos» como una innovación que está acelerando el aprovechamiento de los algoritmos cuánticos con los recursos computacionales tradicionales disponibles.

Un tema recurrente fue la aplicación de **IA y machine learning** en el ámbito cuántico. Se mencionó la utilización de técnicas de IA para optimizar el rendimiento de *hardware* cuántico, por ejemplo, ajustando parámetros de control de cúbits. Asimismo, algunos expertos consideran que el **quantum machine learning** (QML) en sí es un avance notable: algoritmos cuánticos que mejoran o aceleran tareas de aprendizaje automático están emergiendo como un frente prometedor. Una respuesta combinó ambos aspectos, señalando que la «IA puede acelerar el rendimiento de la computación cuántica», lo cual sugiere sinergias entre estos campos.

No obstante, junto a los logros, los expertos identifican que la tecnología cuántica **no ha alcanzado aún su madurez**. El principal **obstáculo técnico** citado en las distintas opiniones es la **falta de fiabilidad y robustez** de los sistemas cuánticos actuales. Un experto lo resumió así: «El principal obstáculo es el aumento en la fiabilidad, resistencia y número de cúbits». En otras palabras, aunque existen prototipos de computadoras cuánticas, sensores, etc., estos todavía presentan altos índices de error, pocos cúbits utilizables y fragilidad ante perturbaciones, lo que limita su uso real. Esta valoración coincide con la priorización de la escalabilidad y corrección de errores que vimos en los datos cuantitativos.

En cuanto al **desarrollo por áreas**, se percibe que la **computación cuántica** (especialmente en lo relativo a algoritmos y *hardware* de superconductores) va a la cabeza, impulsada por grandes actores internacionales, mientras que



áreas como **comunicaciones cuánticas** avanzan a paso más lento en España. Un encuestado resaltó que «las tecnologías habilitadoras para crear un cúbit resistente» deberían ser un foco, dando a entender que hay terreno por cubrir en materiales y control de cúbits (por ejemplo, cúbits topológicos, semiconductores, fotónicos) para llegar a dispositivos estables.

Respecto a la situación en España y la CAM, las opiniones reflejan que se han dado **pasos positivos**, pero aún con amplio **margen de mejora** significativo. Varios expertos reconocen iniciativas recientes valiosas: «Madrid está haciendo una buena apuesta», comenta algunos de los expertos, mencionando la existencia de «un par de *startups* de *software* y telecomunicaciones cuánticas» en la región como indicio de progreso. También se valora la creación de



algunas redes y proyectos financiados (como Quantum Spain a nivel nacional). Sin embargo, la percepción común es que España está claramente por detrás de potencias líderes (EE. UU., China, países punteros de la UE) en este ámbito. Un experto calificó el estado del sector cuántico madrileño afirmando que «hay margen de mejora» y sugiriendo acciones como «fomentar proyectos colaborativos a largo plazo» e incrementar los recursos disponibles.

En resumen, los expertos ven el momento actual de las tecnologías cuánticas como ilusionante pero frágil: hay demostraciones científicas de principio exitosas (por ejemplo, ventajas cuánticas iniciales en laboratorio, prototipos funcionales) y un panorama internacional muy dinámico, pero convertir esos logros en **herramientas útiles para la industria y la sociedad** requerirá más avances en estabilidad, escalabilidad y un apoyo decidido en la etapa temprana en la que nos encontramos.

TALENTO HUMANO Y FORMACIÓN

El talento especializado emergió como un factor crítico en múltiples respuestas. Los expertos coinciden en que, sin personas formadas adecuadamente, el

desarrollo tecnológico no será posible. Actualmente, identifican una **escasez de personal cualificado** en España en áreas clave de la cuántica. Aunque existen grupos de investigación excelentes, el número de ingenieros o desarrolladores de *software* cuántico o técnicos con experiencia en experimentos cuánticos es limitado.

Varios encuestados abogaron por **reforzar la formación académica** en este campo. Recomiendan crear programas educativos específicos, tales como másteres interdisciplinarios en tecnologías cuánticas, que combinen física, informática e ingeniería. También sugieren incluir contenidos de computación y física cuántica aplicada en planes de estudio de grado, para exponer a más estudiantes a estos temas desde temprano. Una de las medidas cuantitativas destacadas son los «Programas de formación y atracción de talento», que se refleja cualitativamente en comentarios que subrayan la importancia de retener a los jóvenes científicos que se forman en España y de repatriar talento desde el exterior ofreciendo oportunidades atractivas.

Además de la **formación local**, se menciona la necesidad de **atraer talento internacional**. Dado el carácter global de la competencia, proponen facilitar la incorporación de investigadores extranjeros de alto nivel a centros españoles,



simplificando trámites y ofreciendo entornos de investigación punteros (equipamiento, financiación, estabilidad contractual). Un experto enfatizó que, junto con el dinero, tener a «las personas adecuadas» liderando proyectos es lo que marca la diferencia.

Por otro lado, la **fuga de cerebros** es una preocupación latente: sin suficientes oportunidades en España, doctores y expertos cuánticos pueden optar por desarrollarse en otros países. Para evitarlo, los encuestados recomiendan **crear más plazas de investigación** y una **carrera atractiva** en el ámbito cuántico (por ejemplo, plazas permanentes en organismos públicos dedicadas a estas áreas, contratos posdoctorales competitivos, etc.). También sugieren que las empresas tecnológicas nacionales ofrezcan posiciones de I+D en computación o comunicación cuántica, absorbiendo parte del talento que sale del mundo académico.

Parece que es generalizado el hecho de que los expertos resalten que **el talento es la base** sobre la que se construirá cualquier avance. Invertir en educación cuántica y en condiciones profesionales para los especialistas tiene un efecto multiplicador: forma a los innovadores, emprendedores y científicos que, a su vez, impulsarán el desarrollo tecnológico y atraerán proyectos internacionales.

FINANCIACIÓN Y APOYO ECONÓMICO

El tema de la financiación fue, sin sorpresa, uno de los más recurrentes y urgentes en las respuestas abiertas. Los expertos profundizaron en cómo debería adaptarse el modelo de financiación para respaldar eficazmente la investigación y desarrollo cuántico.

Continuidad en el tiempo: La mayoría insiste en que se destinen **fondos significativamente mayores** a proyectos cuánticos; pero no solo se trata de aumentar los presupuestos anuales, sino de **garantizar su continuidad**. Actualmente,

muchos proyectos dependen de convocatorias puntuales; los expertos recomiendan establecer programas plurianuales específicos para tecnologías cuánticas, con horizonte de 5-10 años, evitando así la **incertidumbre anual** y permitiendo planificación estratégica. En palabras de un experto, es clave «que consigan más fondos a largo plazo para poder investigar», indicando que la seguridad de financiación en el largo plazo es tan importante como la cantidad.

Financiación orientada a las fases críticas: Se menciona la necesidad de apoyar con fondos las **etapas intermedias** de desarrollo tecnológico, no solo la investigación básica. En particular, **financiar pruebas de concepto y prototipos** (*proof of concept*) fue destacado como prioritario. «Financiación para pruebas de concepto», señala sucintamente un encuestado, enfatizando que muchas ideas



prometedoras se quedan en el papel por falta de recursos para construir un primer prototipo o validación experimental. Un modelo de financiación exitoso debería cubrir ese «valle de la muerte» entre la investigación fundamental (financiada típicamente por agencias públicas científicas) y el interés comercial privado.

Agilidad y adecuación de los programas: Algunos expertos comentaron que los modelos actuales de subvenciones no siempre se ajustan a las necesidades del sector cuántico. Dado que es un ámbito altamente innovador y competitivo, proponen que los mecanismos de financiación sean **más ágiles** (reduciendo burocracia para proyectos punteros) y que existan convocatorias específicas para tecnologías cuánticas, evitando que compitan directamente con áreas más establecidas. También sugieren incentivar proyectos multidisciplinarios (por ejemplo, colaboraciones entre físicos e informáticos) mediante convocatorias adaptadas a esa naturaleza transversal.

Inversión privada complementaria: Aunque la mayor parte de la discusión se centra en fondos públicos, varios expertos mencionan que movilizar inversión privada es igualmente crucial. Para ello, ven necesario crear un **entorno atractivo para inversores y empresas**. Una de las propuestas cualitativas fue la creación de un «*quantum hub* con claro foco en industrias». Este *hub*, que podría materializarse como un centro de innovación o programa nacional, serviría para aglutinar proyectos e inversión de empresas en el área cuántica, posiblemente cofinanciado públicamente. La idea subyacente es que el Estado asuma parte del riesgo inicial (con fondos públicos) para atraer luego capital privado que multiplique el impacto.

Ejemplos internacionales como guía: Implícitamente, las recomendaciones se hacen eco de modelos que están funcionando en otros países. Por ejemplo, los fondos federales estadounidenses a largo plazo (como los del National Quantum Initiative), los consorcios público-privados alemanes y franceses que invierten cientos de millones en *hubs* cuánticos, o las subvenciones orientadas a

aplicaciones que Reino Unido ha desplegado. Los expertos españoles parecen querer ver iniciativas similares adaptadas al contexto nacional.

En conclusión, las sugerencias en financiación se pueden resumir en «**más y mejor**»: más recursos económicos y mejor gestionados para cubrir todas las fases del ciclo de I+D+i cuántico. Sin este sustento financiero robusto, alertan, España corre el riesgo de quedarse rezagada, independientemente del talento o las buenas ideas que tenga.

COLABORACIÓN Y ECOSISTEMA DE INNOVACIÓN

El fortalecimiento de la colaboración entre actores aparece como uno de los pilares principales en las recomendaciones de los expertos. Actualmente, perciben que el ecosistema cuántico español está algo **fragmentado**, con grupos de investigación excelentes, pero a veces trabajando de forma aislada, y con **poca interacción sistemática con la industria**. Para corregir esto, propusieron varias líneas de acción:

Colaboración academia-industria: Prácticamente todos los expertos aludieron a la importancia de estrechar lazos entre centros de investigación (universidades, OPI, centros tecnológicos...) y empresas. Esto incluye desde **proyectos de I+D conjuntos** hasta **programas de intercambio de personal** (por ejemplo, que doctorandos puedan realizar estancias en empresas y viceversa, que ingenieros de empresas pasen tiempo en laboratorios académicos). La transferencia de conocimientos cuánticos al sector productivo es vista como esencial para que la tecnología tenga impacto real. Un comentario representativo fue: «Se necesita una colaboración investigación-empresa a largo plazo», señalando que no valen colaboraciones puntuales, debe crearse una relación sostenida donde ambos mundos aprendan mutuamente y coordinen objetivos.





Redes y consorcios nacionales: Algunos expertos sugieren formalizar una **red cuántica española**, quizás con apoyo gubernamental, que conecte a todos los grupos relevantes. Esto podría tomar la forma de un **consorcio nacional cuántico**, análogo a iniciativas en otros países (ver la sección 3.5.1. Actores clave en la estrategia cuántica europea de este informe), donde se comparta infraestructura, se organicen reuniones periódicas y se emprendan proyectos multicentro. Una red de este tipo facilitaría también presentarse de forma unificada a convocatorias internacionales o atraer inversiones de multinacionales interesadas en proyectos cuánticos en España.

Colaboración público-público: No solo se trata de academia con empresa; también se mencionó la necesidad de mejor cooperación **entre instituciones públicas** (ministerios, comunidades autónomas, organismos de investigación). Coordinación entre distintos programas nacionales, evitar duplicidades y alinear estrategias regionales con la nacional (y esta con la europea) fueron

puntos señalados. Por ejemplo, maximizar el impacto de iniciativas en Madrid implicaría coordinarlas con esfuerzos a nivel estatal para que se complementen en vez de competir por recursos.

Apertura internacional: Varios encuestados resaltaron que la colaboración debe ser internacional. Recomiendan participar activamente en proyectos europeos (por ejemplo Quantum Flagship, QuantERA, etc.) y forjar alianzas con laboratorios líderes mundiales. Esto no solo trae recursos adicionales, sino que actualiza a los investigadores locales con las últimas tendencias y evita el aislamiento. La opción del consorcio internacional fue la más votada en la parte cuantitativa, reflejando esta prioridad.

Espacios de encuentro e innovación: Además de colaboraciones formales, se propuso crear espacios físicos o virtuales de encuentro. Por ejemplo, organizar conferencias regulares en España sobre tecnologías cuánticas, *workshops* temáticos, o incluso un centro (el mencionado *quantum hub*) donde convivan



startups, grupos de investigación y laboratorios universitarios bajo un mismo techo. Estos entornos de innovación abierta pueden generar intercambios informales fructíferos, acelerar la generación de ideas y fomentar un sentido de comunidad cuántica nacional. En la CAM este hecho sería destacable, a tenor de la riqueza del entorno de investigación, universidades y empresarial.

En síntesis, las recomendaciones piden pasar de una situación donde actores aislados empujan cada uno por su lado, a un **ecosistema integrado** donde la suma de capacidades dé resultados muy superiores. La colaboración es vista como el catalizador que puede convertir la masa crítica de conocimiento que existe en España en verdaderas soluciones cuánticas de alto impacto comercial y social.

DESAFÍOS TECNOLÓGICOS Y ÁREAS DE FUTURO

En cuanto a los desafíos tecnológicos concretos, los expertos profundizaron en aspectos ya mencionados anteriormente: **escalabilidad de cúbits, fiabilidad y desarrollo de nuevas tecnologías habilitadoras**. Se reconoce que, a nivel mundial, el campo enfrenta retos científicos de gran calado, pero no insalvables. Hay un tono de confianza en que con suficiente I+D estos obstáculos técnicos se superarán. De hecho, algunos avances recientes citados (por ejemplo, mitigación de errores mediante *software* o algoritmos de corrección más eficientes) apuntan en esa dirección.

Varias respuestas sugieren **áreas de investigación de futuro** que consideran especialmente prometedoras o necesarias:

- **Corrección de errores cuánticos avanzados:** Aunque ya es un área activa, se enfatiza seguir innovando en métodos para detectar y corregir

errores en sistemas cuánticos, ya sea a nivel de *hardware* (cúbits más inmunes por diseño) o de *software* (protocolos de corrección, códigos cuánticos, etc.). Esto es visto como el requisito *sine qua non* para cualquier computador cuántico escalable.

- **Nuevos tipos de cúbits y materiales:** Algunos expertos mencionaron la exploración de cúbits más robustos, como los **cúbits topológicos** (basados en cuasipartículas exóticas que podrían resistir mejor la decoherencia) o cúbits en **nuevas plataformas físicas** (espintrónica, átomos neutros, etc.). También subrayan la importancia de materiales superconductores avanzados y de la nanofabricación precisa para mejorar la calidad de los chips cuánticos.
- **Integración cuántica-clásica y en la nube:** Varios comentarios aludieron a la idea de **acceso en la nube a recursos cuánticos**. Esto implica desarrollar la infraestructura y el *software* necesarios para que usuarios remotos puedan utilizar procesadores cuánticos eficientemente junto con recursos clásicos (HPC, *cloud computing*). Tecnologías de orquestación híbrida y *middleware* cuántico son parte de este desafío.
- **Algoritmos cuánticos para aplicaciones reales:** Los expertos ven crucial investigar nuevos algoritmos que demuestren ventajas cuánticas en **problemas concretos** de la industria. Mencionaron, por ejemplo, algoritmos de optimización cuántica aplicados a IA, simulación de sistemas químicos complejos para diseño de fármacos (un experto sugirió «creación de nuevas medicinas» como área que impulsar) o modelos cuánticos para pronóstico meteorológico («predicción meteorológica» apareció en varias respuestas). Estas líneas aplicadas requieren colaboración interdisciplinar entre expertos cuánticos y especialistas del dominio de aplicación.
- **Criptografía y comunicaciones cuánticas:** Si bien en obstáculos y medidas no se priorizó la regulación, algunos expertos sí hablaron de la im-



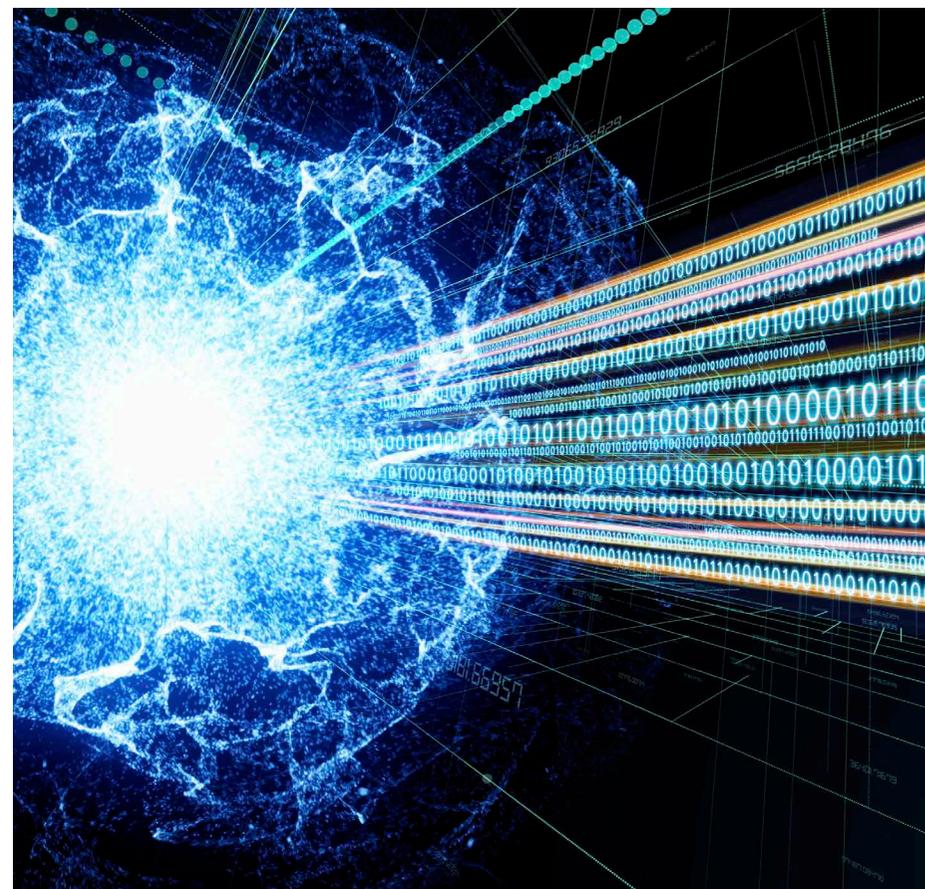
portancia de prepararse para la era poscuántica. Esto incluye tanto **desarrollar comunicaciones cuánticas seguras** (por ejemplo, QKD) como **algoritmos poscuánticos** para proteger la información clásica frente a futuros ordenadores cuánticos. Un participante recomendó no descuidar esta vertiente, aunque actualmente en España esté menos desarrollada.

En general, los expertos proyectan una visión donde España debería centrar sus esfuerzos en nichos donde pueda ser competitiva. Por ejemplo, dado el historial en óptica y fotónica, potenciar las comunicaciones cuánticas o sensores en este ámbito, o aprovechar fortalezas en IA, como es la intersección entre IA y computación cuántica, podrían ser alguno de estos nichos propuestos. También señalan que es importante **seguir las tendencias globales** (computación universal superconductora, etc.), pero **buscando diferenciarse** o colaborar en consorcios, ya que competir solo en todo es inviable.

En cuanto a la visión del sector en España y Madrid en el contexto global, hay consenso en que se debe aspirar a **integrarse en la vanguardia internacional**. Los expertos evalúan que la CAM, en particular, cuenta con **buenos mimbres**, centros de investigación reputados (CSIC, universidades, IMDEA, centros tecnológicos y *startups* innovadoras), pero requiere un **impulso adicional** para destacar. Proponen que la CAM pueda especializarse en ciertos aspectos (por ejemplo, simulación cuántica en química, dados sus potentes centros en ciencias de materiales, o comunicaciones cuánticas aprovechando la infraestructura de comunicaciones existente). También sugieren que la CAM trabaje de la mano con el Estado para atraer instalaciones singulares, como podría ser un centro nacional de computación cuántica ubicado en la región, lo que tendría efecto tractor.

En suma, las reflexiones cualitativas pintan un mapa de **retos a corto plazo** (fiabilidad, escalado, coordinación) y **apuestas estratégicas a largo plazo**: cada

decisión que se tome ahora (en qué áreas invertir, cómo organizarse, etc.) determinará la posición de España en el concierto cuántico mundial en la próxima década. Los expertos abogan por decidir esas apuestas basándose en **nuestras capacidades y necesidades**, apoyándose en colaboraciones internacionales para complementarlas.



CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS ESTRATÉGICAS

A la luz de los hallazgos, tanto cuantitativos como cualitativos, se pueden extraer una serie de conclusiones integradas y recomendaciones estratégicas dirigidas a las instituciones responsables de impulsar la ciencia y la tecnología tanto en España como en la CAM y a organismos financiadores:

1. **Apuesta decidida y sostenida por las tecnologías cuánticas:** España se encuentra en un momento crítico en el que debe escalar su compromiso con el sector cuántico si quiere competir globalmente. Es imperativo establecer un plan estratégico nacional cuántico, dotado con financiación creciente, realista y estable a largo plazo. Esta estrategia debe estar alineada con iniciativas europeas (Quantum Flagship, QuantERA), pero sobre todo adaptada a nuestras fortalezas locales.
2. **Creación de infraestructuras y entornos colaborativos:** Una recomendación clara es construir o habilitar infraestructuras clave, desde laboratorios punteros hasta acceso a computadores cuánticos (propios o vía nube). En este sentido, se sugiere la fundación de un centro de referencia en tecnologías cuánticas, en Madrid o en colaboración interregional, que opere como *hub* donde confluyan esfuerzos de distintas instituciones. Este centro podría gestionarse de forma consorcial (OPI, universidades, empresas) y albergar tanto investigación básica como incubación de *startups*. Asimismo, facilitaría la formación práctica de nuevos científicos e ingenieros en un entorno de alto nivel técnico.
3. **Impulso al talento y al empleo cuántico:** Como han indicado los expertos, sin personas capacitadas no habrá progreso. Se recomienda a los OPI y a las universidades desarrollar programas formativos especializados (másteres en tecnología cuántica, escuelas de verano, etc.) y aumentar el número de posiciones (contratos predoctorales, posdoctorales y plazas permanentes) dedicadas a estas áreas. Adicionalmente, sería estratégico lanzar un programa de atracción de talento internacional en tecnologías cuánticas, ofreciendo condiciones competitivas a investigadores destacados de otros países para que lideren grupos aquí. En paralelo, hay que fomentar que las empresas absorban talento: incentivos fiscales o ayudas a empresas que integren doctores en sus filas podrían retener personal cualificado en el sector privado nacional.
4. **Modelo de financiación adaptado y mixto:** Las instituciones deben revisar y adaptar sus instrumentos de financiación. Se aconseja establecer convocatorias específicas para proyectos cuánticos, evaluados por paneles con conocimiento profundo del tema, evitando que compitan directamente con propuestas de áreas más consolidadas. Estas convocatorias deberían cubrir fases diversas: desde la investigación básica hasta la innovación orientada a producto. Un componente que fortalecer es la financiación «translacional»: por ejemplo, programas de *proof of concept* gestionados por un *quantum hub* específico u otras agencias para llevar descubrimientos del laboratorio al prototipo funcional. Por otro lado, el Estado y la CAM, de la forma más coordinada posible, deberían jugar un rol facilitador para atraer inversión privada: organizando foros con inversores, cofinanciando proyectos con *venture capital* y dando visibilidad al potencial comercial de las tecnologías cuánticas desarrolladas localmente.
5. **Fomento de la colaboración y la internacionalización:** Como principio rector, se debe cultivar una cultura de colaboración abierta. En el plano nacional, se recomienda formalizar una Red Española de Tecnologías Cuánticas que coordine esfuerzos entre comunidades autónomas y en-



tre el sector académico y empresarial. En el plano internacional, la consigna es integrarse en grandes proyectos: apoyar activamente la participación de equipos españoles en consorcios europeos, intercambiar investigadores con laboratorios extranjeros y, si es posible, atraer sedes de proyectos internacionales a España (por ejemplo, ofrecerse como piloto de plataformas cuánticas europeas en sectores como energía o transporte). La colaboración público-privada igualmente debe incentivarse estructuralmente: quizá mediante programas concertados donde cada euro aportado por la industria para I+D cuántica sea complementado por dinero público, asegurando compromiso mutuo.

6. **Enfoque en aplicaciones estratégicas para España:** Aunque la ciencia cuántica es amplia, conviene identificar qué aplicaciones pueden generar mayor impacto económico y social en el contexto español y focalizar esfuerzos en ellas. Según el *input* de los expertos, áreas aplicadas como la optimización cuántica para industria, la ciberseguridad cuántica, la simulación de nuevos materiales y medicamentos, o la mejora de algoritmos de IA con técnicas cuánticas podrían ser líneas estratégicas. Las agencias u organismos de referencia elegidos deberían promover proyectos interdisciplinarios en estos temas, involucrando a los usuarios finales (empresas energéticas, farmacéuticas, financieras, etc.) desde el inicio para orientar la investigación a resolver problemas concretos del país. Este enfoque en «verticales» de aplicación no implica abandonar otras áreas, pero sí crear casos de éxito que demuestren el valor de lo cuántico en la vida real, generando a su vez apoyo político y financiero adicional.

Después de todo este análisis de prospectiva con la inestimable colaboración de expertos, se constata que España cuenta con el conocimiento y diagnóstico claros que hacen falta para impulsar las tecnologías cuánticas. Las

recomendaciones vertidas apuntan todas en la misma dirección: aumentar la masa crítica (de dinero, personas e infraestructuras) y orquestar un esfuerzo coordinado entre todos los agentes (OPI, universidades, empresas, Administración...) para aprovechar al máximo las oportunidades de la segunda revolución cuántica. La CAM, como uno de los polos científicos y tecnológicos del país, está llamada a ser protagonista en este esfuerzo, liderando iniciativas y sirviendo de ejemplo de cómo una región puede volcarse en potenciar un sector de alta tecnología.

Si se actúa siguiendo estas sugerencias (con una visión a largo plazo, inversión inteligente y colaboración), es razonable esperar que en los próximos años la CAM, y España en su conjunto, no solo reduzca la brecha con los líderes globales, sino que aporte **contribuciones relevantes** en tecnologías cuánticas que repercutan en su tejido industrial y en el bienestar de la sociedad. Este análisis solo pretende servir de aproximación a una necesaria hoja de ruta inicial para encaminar esos pasos futuros, aprovechando la valiosa perspectiva proporcionada por quienes están en la vanguardia de este apasionante campo.



- 
1. RESUMEN EJECUTIVO
 2. INTRODUCCIÓN
 3. CONTEXTO GLOBAL DE LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 4. RADIOGRAFÍA DE LA CAPACIDAD DE I+D EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 5. ANÁLISIS DE PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 6. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN MÁS RELEVANTES
 7. ANÁLISIS DEL ENTORNO EMPRESARIAL INNOVADOR
 8. PROSPECTIVA EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: CONSULTA A EXPERTOS

9. ANEXO: OTRAS EMPRESAS RELEVANTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

9. Anexo: Otras empresas relevantes en tecnologías cuánticas

Como se analizó en la sección del ecosistema empresarial, se han identificado patrones claros de posicionamiento de las empresas relacionado con la madurez tecnológica, la estrategia de inversión y el grado de desarrollo empresarial. Con este análisis se podría segmentar y agrupar las compañías según sus características tecnológicas y financieras en distintos grupos con patrones similares, como pueden ser:

- **Líderes globales** (innovación y adopción): IBM Quantum, Microsoft y Keysight encabezan la lista. IBM ha impulsado gran parte de la innovación *hardware* y creado un amplio ecosistema de adopción. Microsoft, con Azure Quantum y su ecosistema de *software*, acerca la computación cuántica a desarrolladores de todo el mundo, integrándola con la nube convencional. Keysight es crucial como proveedor de instrumentación y control, habilitando a casi todos los actores del sector. Su impacto industrial es enorme: estas tres empresas fijan estándares, disponen de los mayores recursos I+D y colaboran en numerosos casos de uso reales.
- **Referentes de la industria/consultoría** que aceleran la adopción en entornos empresariales: Accenture y, en menor medida, Telefónica y GMV. Accenture ha demostrado casos de uso en múltiples sectores, asesorando a las empresas sobre el valor cuántico, actuando de puente entre la tecnología y sus aplicaciones comerciales. Telefónica, desde su rol de operadora, se posiciona como usuaria temprana en comunicaciones cuánticas

(redes seguras) y promueve estándares en telecomunicaciones seguras, lo cual influye en la adopción en su industria. GMV lidera consorcios como CUCO, aporta liderazgo nacional y adopta *hardware* cuántico (con Qilimanjaro) en infraestructuras de supercomputación, sentando las bases para impacto en defensa, espacio y otros campos estratégicos.

- **Startups españolas** de primer nivel (alta relevancia por innovación y avances industriales tempranos): Entre ellas destacan Multiverse Computing y Qilimanjaro. Multiverse ha llevado la delantera mundial en *software* cuántico financiero, con pilotos exitosos en bancos y el apoyo masivo de inversión pública/privada. Qilimanjaro, con su *hardware* analógico único y proyectos con Gobiernos, es un referente en innovación de computación cuántica en Europa. Ambas han logrado la adopción temprana (contratos con clientes relevantes) y un elevado perfil internacional, situando a España en el mapa cuántico global.
- **Otros protagonistas clave** en España/EU (relevancia media-alta en nichos específicos): Qside (líder en QRNG comercial, crucial para ciberseguridad cuántica), LuxQuanta (pionera en QKD integrada, componente esencial del futuro Internet cuántico), iPronics (computación fotónica reconfigurable con amplio financiamiento, posible *game-changer* en *hardware* acelerador para IA/*quantum*) e Inspiration-Q (algoritmos cuántico-inspirados con aplicación inmediata, respaldada por científicos top y capital reciente). Estas empresas, aunque más jóvenes o focalizadas, muestran



alta innovación y potencial de impacto industrial en sus ámbitos: Quside y LuxQuanta ya venden productos punteros en seguridad cuántica, iPro-nics puede transformar centros de datos, Inspiration-Q mejora de forma comercial la eficiencia de la IA.

- **Actores habilitadores y facilitadores:** Aquí figuran compañías que, sin ser protagonistas, son imprescindibles para el ecosistema. Entanglement Partners y Grant Thornton, como consultoras que han concienciado y asesorado a muchas empresas para entrar en la era cuántica. Serikat y Cinfo, como *hubs* de I+D e integradores, han aplicado cuántica a problemas concretos (logística, redes...) y forman talento, multiplicando el impacto de la tecnología en sectores tradicionales. VLC Photonics y Celestia TTI son proveedores de tecnología habilitadora (diseño fotónico, componentes RF cryo) sin la cual muchas innovaciones cuánticas no llegarían a prototipo o producción. Aunque individualmente sus perfiles son más discretos, en conjunto sostienen la infraestructura y conocimiento que permiten al sector avanzar.
- **Emergentes de nicho y casos especiales:** Quantum Mads y Quanvia están en **fases emergentes**, aportando valor en formación y desarrollo teórico (finanzas y educación), pero aún con impacto industrial limitado (necesitan consolidar productos y clientes).

A continuación, se añaden fichas explicativas de algunas de las empresas más relevantes situadas o con sede nacional:



QCentroid es una *startup* española fundada en 2022 en Bilbao. Desarrolla una plataforma *quantum as a service* para empresas, que conecta algoritmos cuánticos de múltiples proveedores de *hardware* con casos de negocio. Su tecnología propia Quantum Ops permite diseñar, probar y desplegar algoritmos cuánticos de forma agnóstica al *hardware*, integrando simuladores, *hardware* cuántico (*annealers*, puertas lógicas, etc.) y algoritmos clásicos en un flujo unificado. Tienen un modelo de negocio basado en SaaS para grandes empresas (suscripción/licencia de plataforma y servicios asociados). Ha obtenido financiación NEOTEC (CDTI) en 2025 y apoyos de aceleradoras (Creative Destruction Lab) y fondos como Sabadell BStartup. Su plataforma colabora con *startups* cuánticas (Qilimanjaro, Quside, Kipu...) e integró tecnologías de optimización como Q-CTRL Fire Opal. Casos de uso: programas de *quantum readiness* en corporaciones (por ejemplo, pilotos en finanzas sostenibles, optimización logística). Podría considerarse una empresa emergente que destaca por facilitar la adopción empresarial de la computación cuántica (acortando la brecha entre negocios y laboratorio) y que precisa de apoyo público temprano (NEOTEC) para escalar su innovación.





Qilimanjaro Quantum Tech

Qilimanjaro Quantum Tech es una *startup* cuántica fundada en el año 2019 por expertos españoles, con sede en Barcelona. Ofrece una solución *full-stack*: diseña *hardware* cuántico analógico basado en cúbits superconductores de flujo de larga coherencia y algoritmos a medida (QASIC). Su enfoque diferenciador es la **computación cuántica analógica** de propósito específico, que evita las correcciones de error masivas necesarias en sistemas de puertas lógicas, buscando ventaja cuántica más rápida en problemas concretos. Proporciona acceso a sus chips mediante la nube (*quantum as a service*) y servicios de consultoría. El modelo de negocio está basado tanto en el desarrollo de procesadores cuánticos propios como en la venta de tiempo de cómputo/servicios asociados. Ha firmado contratos con centros de supercomputación e industrias para desarrollar casos de uso (por ejemplo, simulación química y optimización). Recibió financiación semilla (incluido un premio del programa Quantum Flagship en 2020) y apoyo de la Generalitat de Cataluña en 2024, obteniendo 1,5 M€ de Avançsa (Gobierno catalán) para construir el primer centro de datos cuánticos en Barcelona. Además, lidera junto a GMV un consorcio para instalar el primer computador cuántico español (Proyecto Quantum Spain).

Fue reconocida como una de las *startups* cuánticas pioneras en España (miembro fundador de la asociación IND+I Quantum). Qilimanjaro es referente en innovación *hardware* cuántico en España, con impacto en la industria (colaboraciones con HPC, apoyo público) y gran potencial para acelerar la ventaja cuántica en aplicaciones concretas.

Es además un importante integrante del consorcio CUCO. Su labor en esta iniciativa se centra en la definición de métricas y *benchmarks* para evaluar el rendimiento tanto de la computación clásica como de la cuántica. Esta línea de investigación busca desarrollar un conjunto de medidas que permitan certificar objetivamente las capacidades computacionales de un sistema clásico, como un superordenador o un clúster HPC, así como de un procesador cuántico. Estimar con precisión los recursos necesarios para completar una tarea computacional, ya sea en sistemas tradicionales o en dispositivos cuánticos experimentales, es un desafío complejo que involucra variables como el tiempo de ejecución, el espacio de almacenamiento, el consumo energético y los costos de producción.

Dentro de este consorcio, Qilimanjaro colabora en el desarrollo de casos de uso específicos, como la **optimización logística**, con especial atención en la **planificación de rutas** en entornos interiores y exteriores, así como en la optimización de la **carga y descarga de camiones**. El objetivo es reducir costes y tiempos de entrega, además de minimizar la contaminación generada por el transporte. Uno de los problemas clave abordados en este contexto es el Vehicle Routing Problem (VRP), un desafío de optimización combinatoria que ha sido objeto de investigación en las últimas dos décadas.



MULTIVERSE
COMPUTING

Multiverse Computing

Multiverse Computing es una *startup* de *software* cuántico fundada en el año 2019 en Donostia, especializada en algoritmos cuánticos e «inspirados cuánticamente» para **finanzas** y otras industrias, con su plataforma insignia



Singularity. Su misión es aplicar la computación cuántica o de inspiración cuántica a problemas complejos en finanzas, energía, fabricación, defensa, química, etc., aportando valor práctico. Han desarrollado algoritmos de optimización de carteras, detección de fraude y simulación de mercados que corren en *hardware* cuántico o clásico optimizado. En 2024 lanzaron **CompactifAI**, una herramienta de compresión de modelos de IA inspirada en técnicas cuánticas que reduce modelos al 10 % de su tamaño original sin pérdida de rendimiento, aplicada ya en *healthcare*, automoción y telecom.

Su modelo de negocio se basa en la venta de *software* (licencias de Singularity y CompactifAI) y la consultoría para proyectos piloto cuánticos. Es sin duda una de las *startups* cuánticas europeas mejor financiadas, levantando una inversión de 10 M€. En 2021 y en 2023 anunció una financiación de 25 M€ (serie A). En 2025, el Gobierno español anunció la inversión de 67 M€ (coinversión vía SETT) para impulsar su tecnología de IA cuántica eficiente. Sus principales clientes son multinacionales financieras e industriales como BBVA (optimización de carteras), Bankia, Crédit Agricole (valoración de derivados con Pasqal) o Bank of Canada (simulación de adopción de criptomoneda). También colabora con Gobiernos (por ejemplo, con Alemania, en detección de fraude en *blockchain*).

Reconocida en 2022 por Sifted y CB Insights como una de las cien compañías de IA más prometedoras, la empresa es referente global en *software* cuántico aplicado, con fuerte impacto industrial (ha demostrado ventajas en banca, ha atraído gran inversión pública/privada), y expande el uso de algoritmos cuánticos mediante soluciones cuántico-inspiradas.

De la misma manera que el caso anterior, Multiverse Computing también participa en el consorcio CUCO con el objetivo de expandir la aplicación de la computación cuántica a sectores estratégicos como la **energía, fabricación avanzada, logística** y el ámbito **aeroespacial**. La empresa ya colabora

con compañías como Repsol, Bosch, la multinacional alemana ZF e Hispavisita, y planea incursionar en nuevos mercados, incluyendo el **sector biomédico**. Su enfoque dentro del proyecto CUCO se alinea con su visión de desarrollar soluciones cuánticas aplicables a diversas industrias, explorando el potencial de esta tecnología para optimizar procesos y mejorar la eficiencia en sectores donde el procesamiento de datos y la toma de decisiones son críticos. La participación en el consorcio CUCO refuerza su compromiso con la investigación y el desarrollo en computación cuántica.



Quside es una *spin-off* de *hardware* cuántico fundada en el año 2017 a partir de investigadores procedentes del ICFO (Institutos de Ciencias Fotónicas) en Barcelona. Desarrolla chips semiconductores y módulos de generación de números aleatorios cuánticos (QRNG) de ultra alta velocidad. Sus dispositivos producen aleatoriedad genuina a tasas elevadas, útiles en criptografía y simulaciones HPC. Tiene soluciones para mercados de seguridad (clave criptográfica cuántica) y computación. Su tecnología diferenciadora utiliza **fotónica integrada** (chips con puntos cuánticos/láseres) para generar ruido cuántico a gran escala, integrable en sistemas clásicos. Su QRNG es líder mundial en rendimiento y puede incorporarse en *data centers* y distintos dispositivos, demostrando ventajas en simulaciones financieras respecto a los RNG tradicionales.

Su modelo de negocio se basa en la venta de componentes (chips, tarjetas PCIe) y *randomness as a service* para clientes que requieran aleatoriedad certificada. Ha conseguido atraer inversión de Triumph Photonics (multinacional alemana) y del fondo español Bullnet en 2022 para escalar la fabricación en



semiconductores. Ha participado en el programa europeo Quantum Flagship en proyectos europeos como QUPIC o QRANGE para impulsar la tecnología de generación cuántica de números aleatorios.

Algunos de sus clientes son del sector de las telecomunicaciones y la ciberseguridad, como es el caso de Telcos, o el de Telefónica, que en 2024 integró la tecnología de Qside en SIM cuántico-seguras para IoT junto a IDEMIA, protegiendo redes 5G/IoT contra ataques cuánticos. También suministra sus módulos QRNG a plataformas financieras y de *gaming*.



LuxQuanta

LuxQuanta es una *spin-off* procedente también del ICFO, fundada en Barcelona en el año 2021 e incubada allí durante cuatro años. Cuenta con accionistas mayoritarios europeos, incluyendo el grupo tecnológico GTD, la corporación óptica Corning, ICFO e ICREA. Desarrolla sistemas QKD basados en tecnologías de variable continua (CV-QKD) para integrar en redes de fibra óptica existentes. Su producto principal NOVA LQ® es un sistema QKD capaz de generar **claves criptográficas inviolables mediante luz cuántica**, añadiendo una capa de seguridad cuántica sobre la criptografía clásica. Posee un enfoque de ingeniería robusto, formado por sensores y emisores fotónicos propios, operando en bandas de telecomunicaciones (SWIR) y compatibles con infraestructura de red real (fibra estándar) sin perturbar el tráfico clásico.

Su modelo de negocio se basa en la venta de equipos QKD y de licencias de tecnología a operadoras de telecos y entidades gubernamentales que requieran

comunicaciones ultra seguras (banca, defensa). Ha obtenido financiación de 2,5 M€ del EIC Accelerator (UE) en 2022 para llevar su QKD al mercado. Participa en el despliegue de la infraestructura cuántica europea (EuroQCI) y se espera que sus sistemas refuercen redes de operadores a partir de pruebas con RedIRIS en España.



Cinfo es una pyme tecnológica fundada en el año 2005 en Galicia. Se trata de una empresa experta en sistemas de vídeo OTT (*over the top*, plataformas que distribuyen contenido audiovisual por Internet) y redes de telecomunicaciones, que desde 2022 se ha introducido en el ámbito de la computación cuántica aplicada a la optimización de redes. En ese mismo año Cinfo formó un equipo cuántico y se alineó con la *startup* Kipu Quantum (Alemania/España) para desarrollar algoritmos cuánticos para el sector de las telecomunicaciones. Junto al operador R (Grupo MásMóvil) y Kipu, diseñaron un algoritmo cuántico para evaluar la resiliencia de la red óptica. Este algoritmo se ejecutó en dos tecnologías de computación cuántica diferentes: en los Quantum Annealers de D-Wave, utilizando hasta 180 cúbits, y en procesadores cuánticos de átomos neutros de QuEra, con un máximo de 46 cúbits. El objetivo de estos desarrollos es avanzar lo máximo posible en estos algoritmos hasta el año 2025-2026, cuando el tamaño de los ordenadores cuánticos pueda permitir al Grupo MASMOVIL expandir este trabajo inicial desde una red troncal específica de cable a redes más grandes, propensas a un mayor número de errores.

Por tanto, el modelo de negocio se centra en la integración de soluciones cuánticas en productos para operadoras. De esta manera, Cinfo planea ofrecer



herramientas de **optimización de redes y logística** usando algoritmos cuánticos como parte de su portfolio. También provee consultoría y desarrollo a medida en IA y además ha sumado a su portfolio de productos los algoritmos cuánticos.

Cinfo ejemplifica cómo la adopción temprana de la computación cuántica por pymes tradicionales puede ser rentable aplicándolo a casos reales. Aunque de tamaño modesto, su proyecto pionero en telecomunicaciones le otorga relevancia en demostración de valor industrial cuántico (optimización de infraestructuras).

iPronics iPronics

iPronics es una *spin-off* del Photonics Research Lab de la UPV que se dedica a la **computación fotónica reconfigurable**. Ha creado el primer chip FPGA² fotónico programable del mundo, una matriz de módulos fotónicos que puede configurarse vía *software* para realizar distintas operaciones de cómputo óptico.

Este circuito integrado fotónico reprogramable permite implementar aceleradores para algoritmos de IA, optimización o incluso simulaciones cuánticas usando luz en lugar de electricidad, con altísimo paralelismo y velocidad. En 2025, iPronics pivotó su tecnología hacia el *optical networking engine* (ONE) para centros de datos de IA, un tejido de interconexión óptica reconfigurable que aumenta ancho de banda y reduce consumo en comunicaciones entre clústeres de GPU³.

² *Field programmable gate array*, un tipo de chip reconfigurable que utiliza tecnología fotónica para procesar información mediante luz en lugar de electricidad.

³ *Graphics processing units*, unidades de procesamiento gráfico diseñadas para realizar cálculos en paralelo, muy utilizadas en IA y computación de alto rendimiento.

En esta fase inicial, colabora con grandes operadoras de la nube y centros de supercomputación para validar su circuito óptico en *data centers*. En 2020 cerró una ronda de capital semilla de 3,7 M€ liderada por Amadeus Capital (UK); posteriormente cerró una serie A de 20 M€ en 2025 con inversores globales (F-Prime, Bosch Ventures, Caixa Capital, TRUMPF Ventures, etc.), confirmando con ello el interés inversor en su tecnología.

Aunque iPronics no se dedica directamente a computación cuántica, su computación fotónica programable es parte del mismo ecosistema de computación avanzada. Sus chips podrían acelerar simulaciones cuánticas o complementar *hardware* cuántico. Con su reciente capital y su producto ONE, podría revolucionar la infraestructura de IA con un impacto industrial relevante por ser más eficiente y escalable que los tradicionales. Se le considera una de las *scale-ups deeptech* españolas más destacadas, potenciando la convergencia entre fotónica y computación.



Quantum Mads es una *startup* de algoritmos cuánticos para sistemas complejos fundada en Vitoria en el año 2020, especializada en estudiar **dinámicas intrínsecas de sistemas financieros complejos** (y otros industriales) con enfoques cuánticos, tanto teóricos como prácticos. Su misión es desarrollar



soluciones que «sean disruptivas dentro de las técnicas de modelado actuales» en finanzas, brindando perspectivas diferentes a sus clientes.

Quantum Mads es principalmente una consultoría I+D para entidades financieras, con el objetivo de codesarrollar pruebas de concepto del uso de tecnologías cuánticas en banca de inversión, *trading* algorítmico, logística financiera, etc. También ofrecen *software* especializado (por ejemplo, un motor de simulación cuántica de mercados).

Dentro del nicho de las finanzas cuánticas, Quantum Mads complementa a la empresa Multiverse, enfocándose más en la investigación de nuevos modelos. Su impacto industrial aún es residual, pero con un alto potencial (esperando validación en pruebas reales), por lo que se sitúa como una promesa emergente en algoritmos cuánticos aplicados.



Qurv es una *spin-off* del **ICFO** fundada en Barcelona en 2020. Se especializa en el desarrollo de **sensores de imagen de amplio espectro** (desde el visible hasta el infrarrojo SWIR), utilizando **nanomateriales cuánticos** como puntos cuánticos coloidales sobre grafeno.

Estos sensores destacan por su capacidad de integrarse con la **tecnología CMOS** (*complementary metal-oxide-semiconductor*), la misma utilizada en cámaras digitales y dispositivos electrónicos actuales. La tecnología CMOS permite bajos costos de producción y alta eficiencia energética, lo que facilita la adopción industrial de los sensores de Qurv sin necesidad de infraestructuras completamente nuevas.

Su tecnología permite desarrollar cámaras CMOS sensibles en infrarrojo de onda corta sin materiales tóxicos ni costosos (evitando el InGaAs), lo que abarata y expande aplicaciones de visión cuántica. En 2021 crearon un sensor SWIR de alto rendimiento hecho con puntos cuánticos no tóxicos, operando a temperatura ambiente.

Estos sensores cuánticos habilitan la visión nocturna e hiperspectral asequible para vehículos autónomos, *smartphones*, seguridad y también para la detección cuántica (por ejemplo, podrían usarse en cámaras de entrelazamiento fotónico). Su modelo de negocio se basa en el desarrollo de IP y prototipos que licencian o codesarrollan con fabricantes de semiconductores y cámaras.

Qurv tiene contratos de desarrollo con empresas automotrices e industriales interesadas en incorporar sus sensores en próximas generaciones de productos. Qurv no vende «computadores cuánticos», pero su tecnología cuántica aplicada a sensores es parte esencial del ecosistema (*quantum sensing* es uno de los pilares de la revolución cuántica). Su sensor SWIR económico puede impulsar nuevas aplicaciones industriales de visión e incluso es habilitador para experimentos de comunicación cuántica masivos (cámaras infrarrojas baratas).



Serikat Servicios Informáticos

Serikat Servicios Informáticos forma parte del Grupo Erhardt. Es una consultora TIC vasca creada en Bilbao en 1991 que ha incorporado proyectos cuánticos recientes enfocados a optimización logística. En 2023, su división Erhardt-Serikat, junto con el centro Tecnalia, presentó soluciones cuánticas innovadoras a tres retos logísticos:



Optimización de carga de contenedores en 3D (*bin packing*): Este proceso tiene como objetivo minimizar la cantidad de contenedores o camiones necesarios para el transporte de un conjunto de bultos de diferentes dimensiones, pesos y niveles de fragilidad. La optimización busca maximizar el aprovechamiento del espacio disponible, reduciendo costos y mejorando la eficiencia operativa.

Optimización de rutas de reparto: Se centra en determinar qué camiones utilizar y, para cada uno de ellos, la secuencia óptima de entrega y la distribución de la carga. Esta optimización permite reducir tiempos de entrega, costos operativos y mejorar la eficiencia en la distribución.

Gestión de almacenes: Comprende la ubicación estratégica de productos dentro del almacén, optimizando tanto el almacenamiento como la recuperación de mercancías. El sistema define dónde deben almacenarse los productos al ingresar y, en el momento de expedición, determina la ubicación exacta de cada artículo para su rápida recolección y despacho.

Serikat busca integrar estas soluciones en su oferta a clientes de logística y transporte (muchos con su base en el puerto de Bilbao y sectores industriales). Al ser integrador, puede ofrecer a empresas soluciones mejoradas por computación cuántica sin que el cliente tenga que interactuar con el *hardware* cuántico directamente. Estos desarrollos se enmarcan en el proyecto nacional CUCO. Serikat forma parte del consorcio liderado por GMV, aportando casos de uso en logística.



Celestia TTI (antes TTI Norte, ahora parte del grupo neerlandés Celestia) es conocida por sus soluciones de radiofrecuencia, antenas y estaciones de satélites, y es un proveedor de soluciones de ingeniería en antenas, radiofrecuencia, criogenia y sistemas de comunicaciones.

Ha aportado su experiencia a proyectos de comunicación cuántica de microondas. Participó en el proyecto europeo QMiCS (Quantum Microwave Communication & Sensing) financiado por el Quantum Flagship, desarrollando componentes para redes cuánticas de microondas (*quantum LAN*) y sensores cuánticos tipo radar. Celestia TTI diseña y fabrica amplificadores de muy bajo ruido (*cryogenic LNA*) operando a frecuencias cuánticas (0.6 y 6 GHz) y temperatura de milikelvin, para conectar dos refrigeradores cuánticos mediante cable superconductor sin perder coherencia. Estos amplificadores criogénicos mejoran la lectura de cúbits superconductores y permiten el teletransporte cuántico por cable coaxial (demostrado en QMiCS).

Asimismo, Celestia investiga con receptores para *quantum sensing* (radar cuántico). Sus componentes son cruciales para escalar plataformas superconductoras y de comunicación cuántica por microondas. Es de las pocas pymes españolas integradas en proyectos cuánticos europeos de *hardware*. Su impacto directo en el sector cuántico es técnico (mejor desempeño de sistemas), con menos visibilidad comercial, pero la calidad de sus amplificadores y sistemas destaca en avances en computación y redes cuánticas.





VLC Photonics

VLC Photonics es una empresa *spin-off* nacida del grupo iTEAM de la UPV, fundada en el 2011 y especializada en diseño fotónico integrado. VLC Photonics se especializa en servicios de diseño y prueba de fotónica, proporcionando soluciones de ingeniería «llave en mano» en fotónica de silicio y semiconductores III-V. Su infraestructura, equipamiento avanzado y amplia experiencia permiten desarrollar innovaciones adaptadas a diversos sectores, incluyendo comunicaciones de datos, computación cuántica, metrología, sensores, LiDAR y biofotónica.

Aunque su enfoque inicial se centró en **comunicaciones y sensores**, los **circuitos fotónicos integrados** son fundamentales en el ámbito de la fotónica cuántica. En este contexto, VLC se ha especializado en la ingeniería y desarrollo de estos circuitos para diversas aplicaciones.

La empresa ofrece servicios de diseño y prueba de circuitos fotónicos, así como la gestión de su fabricación a través de terceros, ya que no dispone de una planta propia de producción. Trabaja con diversas tecnologías, como silicio (Si), fosforo de indio (InP) y nitruro de silicio (SiN), entre otras, lo cual permite adaptarse a distintas necesidades y optimizar el rendimiento de los chips fotónicos.

VLC participó en proyectos europeos de fotónica cuántica integrando circuitos de interferómetros, divisores de fotones y fuentes integradas para experimentos de entrelazamiento. La propia empresa indicó que los PIC (circuitos integrados fotónicos) serán una plataforma crítica en automoción, test medioambiental y tecnología cuántica. Por ejemplo, colaboró con universidades en chips

para QKD miniaturizada y procesadores de fotones (su experiencia de diseño ha beneficiado a *startups* cuánticas clientes).

En 2020, Hitachi High-Tech adquirió VLC Photonics para reforzar su portfolio global en fotónica. Ahora, como subsidiaria, VLC sigue prestando servicios de diseño PIC, pero con más recursos.

Ha completado más de doscientos proyectos de PIC, incluyendo los primeros transceptores fotónicos españoles y chips para LiDAR y biosensores. VLC Photonics ha sido pieza clave de la cadena de valor cuántica en España, habilitando que innovaciones fotónicas (incluyendo cuánticas) lleguen a prototipo. Su adquisición por Hitachi confirma su excelencia. Es una empresa «habilitadora», es decir, que no produce sistemas cuánticos finales, pero sí diseña sus «cerebros» ópticos, permitiendo que muchas ideas de fotónica cuántica se hayan convertido en chips reales, acelerando la investigación y futura adopción industrial de tecnologías cuánticas integradas.

IBM Quantum IBM Quantum

IBM Quantum es la división de IBM dedicada a la computación cuántica, enfocada en el desarrollo de *hardware*, *software* y aplicaciones para aprovechar el potencial de esta tecnología en diversos sectores. IBM ha sido pionera en la creación de procesadores cuánticos accesibles a través de la nube, permitiendo a empresas, instituciones académicas y centros de investigación experimentar con algoritmos cuánticos. Su ecosistema incluye IBM Quantum Network, una red global de socios que colaboran en la exploración de aplicaciones cuánticas en áreas como optimización, simulación de materiales, finanzas



y seguridad. Con iniciativas como el desarrollo de *superconducting qubits* y la implementación de herramientas de *software* como Qiskit, IBM busca acelerar la adopción de la computación cuántica y posicionarse como líder en este campo emergente.

Pionero mundial en *hardware* cuántico desde 2016, IBM es ampliamente reconocido como líder global en computación cuántica superconductor. Cuenta con más de **20 sistemas cuánticos operativos** en la nube (tecnología de cúbits superconductores de transmon), incluyendo hitos como los procesadores Eagle de 127 cúbits (2021) y Osprey de 433 cúbits (2022).

Su hoja de ruta apuntaba a más 1000 cúbits en 2024 (Condor) y arquitecturas escalables modulares. IBM ofrece acceso a sus computadores a través de IBM Quantum Experience (*freemium*) y alianzas (IBM Quantum Network) con empresas, universidades y Gobiernos. Como actividades de innovación, IBM investiga algoritmos de química cuántica (por ejemplo, simulación de moléculas para BASF, Exxon) y optimización (colaboraciones con Mitsubishi, Honda). Ha demostrado avances en corrección de errores (códigos bosónicos, célula de superficie pequeña) y en supresión de ruidos vía *software*. Su kit de *software* Qiskit es estándar adoptado por multitud de instituciones educativas y de investigación.

IBM comercializa sus sistemas cuánticos mediante IBM Quantum Services, mediante suscripciones en la nube para uso prioritario (utilizado por entidades financieras como JPMorgan o Gobiernos como el de Alemania, etc.). También comercializa la plataforma IBM Quantum System One (computador llave en mano encapsulado), ya instalado por ejemplo en Alemania, Japón y pronto en España, en cooperación con el Gobierno Vasco.

Como división de IBM, destina una fuerte inversión en I+D (más de mil millones de dólares) obteniendo logros y reconocimientos importantes, como ser la primera entidad en número de patentes de computación cuántica solicitadas; un equipo científico ganador de premios relevantes como el Premio Descartes Europeo por contribuciones a algoritmos cuánticos; industrialmente, es el proveedor con mayor ecosistema de usuarios empresariales, con más de doscientas organizaciones en su red que ya utilizan sus cúbits para desarrollar aplicaciones, etc. Su tecnología se considera referencia en fiabilidad y su apuesta por ecosistemas abiertos acelera la adopción de estos estándares. IBM se ha convertido en un referente del sector cuántico actual.



Keysight Technologies

Keysight Technologies es una empresa líder en soluciones de medición y prueba electrónica, especializada en el diseño y desarrollo de equipos para sectores como telecomunicaciones, aeroespacial, automoción y electrónica de consumo. Su tecnología abarca desde instrumentación para pruebas de radiofrecuencia y microondas hasta soluciones avanzadas para redes 5G, IA y computación cuántica. En este último ámbito, Keysight desarrolla herramientas para la **caracterización, simulación y validación de hardware cuántico**, facilitando la investigación y el desarrollo de sistemas cuánticos mediante plataformas de control y medición de alta precisión. Con una fuerte presencia global, la compañía impulsa la innovación tecnológica colaborando con centros de investigación, empresas y Gobiernos en la construcción de infraestructuras tecnológicas avanzadas.



Keysight, líder en instrumentación electrónica, ha expandido su cartera hacia la computación cuántica como habilitador clave. Identificó que los laboratorios cuánticos requieren instrumentación especializada para controlar y leer cúbits, por lo que lanzó su Quantum Control System (QCS), un sistema modular de generación y adquisición de señales totalmente digital, optimizado para cúbits superconductores/iónicos. Además, Keysight incorporó el *software* de control experimental Labber (adquirido en 2020), que facilita la automatización de experimentos cuánticos, y la compañía canadiense Quantum Benchmark en 2021, experta en diagnóstico y supresión de errores cuánticos.

Con la adquisición de tres empresas cuánticas en cinco años (Signadyne, Labber, Quantum Benchmark), Keysight ofrece un portfolio integral: generadores AWG⁴, controladores FPGA, amplificadores cryo, *software* de calibración y mitigación de errores.

Muchas *startups* compran a Keysight la electrónica de control para sus prototipos en vez de desarrollarla desde cero. Keysight también colabora en el diseño, como por ejemplo la alianza con Q-CTRL para integrar sus filtros de error en el *hardware* de Keysight.

La empresa tiene un alto impacto industrial, ya que casi todos los laboratorios de superconductores usan algún instrumento Keysight. Su solución QCS permite escalar desde los aproximadamente 10 cúbits a más de 100 con una arquitectura unificada, acelerando la evolución hacia procesadores más potentes.

Keysight se ha convertido en una pieza fundamental, ya que sus instrumentos y *hardwares* cuánticos forman parte de la cadena de valor de la industria actual. Ha invertido fuerte para asegurar que, conforme crezca la computación cuántica, ellos provean las «armas» (osciloscopios, AWG, *software*, etc.)

necesarias. En innovación, su integración en corrección de errores y la mejora continua de fidelidad de control inciden directamente en lograr computadores cuánticos útiles. Es un facilitador global con impacto en casi todos los proyectos del sector.

La empresa también ofrece Keysight University, una plataforma de formación en línea gratuita con cursos autodidactas sobre diversas áreas de la ingeniería. Próximamente, el programa incluirá cursos especializados en temas de computación cuántica, impartidos por expertos en el campo.



Microsoft Azure Quantum

Microsoft Azure Quantum es la plataforma en la nube de Microsoft dedicada a la computación cuántica, que proporciona acceso a *hardware* cuántico de diferentes proveedores, herramientas de simulación cuántica y recursos de desarrollo para explorar algoritmos y soluciones cuánticas. Diseñada para investigadores, empresas y desarrolladores, Azure Quantum permite experimentar con diferentes paradigmas de computación cuántica, como los **ordenadores de iones atrapados**, superconductores y recocido cuántico. Además, ofrece integración con lenguajes como Q# y Python, facilitando la creación y optimización de aplicaciones cuánticas. Microsoft también trabaja en el desarrollo de su propio *hardware* cuántico basado en **cúbits topológicos**, con el objetivo de mejorar la estabilidad y escalabilidad de la computación cuántica en el futuro.

⁴ *Arbitrary waveform generator* (generador de formas de onda arbitrarias).



Microsoft ha apostado por la computación cuántica en dos áreas principales: el desarrollo de un **tipo avanzado de hardware cuántico** (basado en los llamados cúbits de Majorana) y una **plataforma en la nube** para acceder a servicios cuánticos.

Aunque el progreso en su *hardware* ha sido más lento (confirmaron experimentalmente los cúbits Majorana en 2022), Microsoft ha desarrollado en paralelo un **ecosistema de software cuántico** muy completo. Su plataforma **Azure Quantum**, lanzada en 2020, permite a los usuarios acceder a computadoras cuánticas de otras empresas como IonQ, Quantinuum y Rigetti, además de ofrecer herramientas de optimización avanzadas que funcionan en computadoras clásicas.

Para facilitar la programación cuántica, Microsoft creó el **lenguaje Q#** y un **kit de desarrollo** con simuladores que permiten a los desarrolladores probar sus algoritmos sin depender de un *hardware* específico. Además, ha impulsado **Quantum Katas**, una serie de ejercicios diseñados para enseñar programación cuántica de forma práctica.

El modelo de negocio de Microsoft es el de cobrar por uso a través de Azure (modelo *cloud pay-per-use*), integrando computación cuántica en su nube estándar. También vende el concepto de *hybrid quantum computing*: los clientes pueden orquestar flujos donde parte del proceso corre en Azure clásico (pre-procesamiento, posprocesamiento) y parte en *hardware* cuántico por Azure Quantum.

Microsoft lidera las actividades de formación (Quantum for Teachers, qInstitute) y apoya *startups* a través de su programa Azure Quantum Credits.

Aunque su *hardware* propio aún no está disponible, Microsoft es líder en *ecosistema software* y en democratización. Azure Quantum lleva la computación

cuántica a desarrolladores .NET y empresas de forma accesible, aumentando la adopción. Su visión híbrida y sus inversiones (por ejemplo, en OpenAI para algoritmos cuánticos) muestran que integrará la parte cuántica masivamente en la nube. Como gigante tecnológico, su apuesta cuántica influye en estandarización (QIR, alianza con Qtum Consortium) y en asegurar que la industria tenga herramientas de desarrollo profesionales. Microsoft, junto a IBM, define la hoja de ruta de estándares para implantar cómo las empresas utilizarán la computación cuántica en la próxima década.



Amatech Group

Amatech Group es un conglomerado de empresas tecnológicas liderado por el empresario **Adelio Machado**, que incluye a **Eurohelp Consulting** y **Nahitek Digital**. Con más de veinte años de experiencia en el sector, Amatech se ha consolidado como una consultora especializada en soluciones de TIC, con una presencia destacada en Administraciones públicas y sectores como automoción, hotelería, banca, seguros y sanidad.

La empresa ofrece una amplia gama de servicios, incluyendo desarrollos a medida, implementación de ERP y soluciones de Microsoft 365, así como tecnologías emergentes como *blockchain*, *big data*, Internet de las Cosas (IoT) y RPA. En el ámbito de la Industria 4.0, Amatech ha desarrollado la plataforma **Traceseal**, centrada en la trazabilidad y compartición segura de información.

Desde 2019, Amatech mantiene una alianza estratégica con la *startup* bilbaína **Quantum Mads**, especializada en tecnologías cuánticas. Inicialmente, ambas empresas colaboraron en el sector financiero, desarrollando soluciones como



Q-Allocare para la optimización de carteras de inversión y **Q-Crypto** para el arbitraje de criptomonedas. Posteriormente, ampliaron su colaboración al sector industrial, enfocándose en reforzar la ciberseguridad y optimizar procesos logísticos mediante la aplicación de IA y computación cuántica.

La colaboración entre Amatech y Quantum Mads combina la experiencia de Amatech en desarrollo de *software* e IA con el conocimiento especializado de Quantum Mads en tecnologías cuánticas, posicionándolas como referentes en la aplicación práctica de la computación cuántica en la industria.



DAS Photonics

DAS Photonics es una empresa española de alta tecnología fundada el 16 de agosto de 2005 como una *spin-off* del **Centro de Tecnología Nanofotónica** (NTC) de la UPV. La compañía se especializa en el desarrollo y comercialización de productos innovadores basados en tecnología fotónica propia, orientados a sectores de alto rendimiento como defensa, aviónica y espacio.

DAS Photonics abarca todas las fases del ciclo de vida del producto, desde el diseño hasta la fabricación, integración y comercialización. Su cartera de productos incluye soluciones completas para aplicaciones como guerra electrónica, inteligencia electrónica y transpondedores fotónicos para comunicaciones por satélite (SATCOM), que abarcan conformadores ópticos de antena y comunicaciones láser seguras mediante QKD.

En el ámbito de la computación cuántica, DAS Photonics participa en el proyecto **CUCO**, en el cual DAS Photonics se centra en explorar el potencial de la computación cuántica para mejorar su tecnología de **inteligencia de señales**

(SIGINT). Esta tecnología permite la detección de señales en un amplio ancho de banda instantáneo de más de 40 GHz, lo que genera grandes volúmenes de información que deben ser procesados y clasificados de manera eficiente. Aunque el aprendizaje automático puede optimizar este procesamiento, la gran cantidad de datos hace que, en muchos casos, el análisis deba realizarse *offline* debido a las limitaciones de los sistemas clásicos. La computación cuántica podría ofrecer soluciones más eficientes para el procesamiento en tiempo real de estos datos masivos.



- 
1. RESUMEN EJECUTIVO
 2. INTRODUCCIÓN
 3. CONTEXTO GLOBAL DE LA INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 4. RADIOGRAFÍA DE LA CAPACIDAD DE I+D EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 5. ANÁLISIS DE PATENTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS
 6. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN MÁS RELEVANTES
 7. ANÁLISIS DEL ENTORNO EMPRESARIAL INNOVADOR
 8. PROSPECTIVA EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: CONSULTA A EXPERTOS
 9. ANEXO: OTRAS EMPRESAS RELEVANTES EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10. Referencias bibliográficas

- ACCIÓ e ICFO (julio de 2019). *Quantum Technologies in Catalonia: Technology Report*. Gobierno de Cataluña.
- Acín, A., Esteve, D., Bloch, I., Gisin, N., Walmsley, I., Cirac, I., ... y Marcus, C. (2016). *Quantum Technologies Roadmap*. European Commission, Future and Emerging Technologies (FET).
- Aiello, C. D., Awschalom, D. D., Bernien, H., Brower, T., Brown, K. R., Brun, T. A., ... y Zwickl, B. M. (2021). Achieving a quantum smart workforce. *Quantum Science and Technology*, 6(3), 030501.
- Allende López, M. (2019). *Tecnologías cuánticas: Una oportunidad transversal e interdisciplinar para la transformación digital y el impacto social*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- AMETIC (2022). *Spain Quantum Industry Report: A Business Approach (English edition)*. ICEX España Exportación e Inversiones.
- Barcelona Supercomputing Center (BSC-CNS) (2024). *BSC summary 2023*.
- Binosi, D., Calarco, T., Colin de Verdière, G., Corni, S., Garcia-Saez, A., Johansson, M. P., Kannan, V., Katz, N., Kerenidis, I., Latorre, J. I., Lippert, T., Mengoni, R., Michielsen, K., Nominé, J. P., Omar, Y., Öster, P., Ottaviani, D., Schulz, M., y Tarruell, L. (febrero de 2022). *European Quantum Computing & Simulation Infrastructure (EuroQCS): White Paper*. Strategic Research Agenda Working Group on Quantum Computing and Simulation; Research and Innovation Advisory Group (RIAG), EuroHPC Joint Undertaking.
- Centre for Quantum and Society & Quantum Delta Nederland (2023). *Exploratory quantum technology assessment: A practical roadmap for exploring the societal, technical, legal, and ethical implications of quantum technology*.
- Chou, C., Manyika, J., y Neven, H. (enero-febrero de 2025). *La carrera por liderar el futuro cuántico: cómo la próxima revolución informática transformará la economía global y la seguridad nacional*. Foreign Affairs.
- Council of Canadian Academies (2023). *Quantum Potential*. Expert Panel on the Responsible Adoption of Quantum Technologies. Ottawa, ON: Council of Canadian Academies.
- Debuisschert, T. (2021). Quantum sensing with nitrogen-vacancy colour centers in diamond. *Photoniques*, 107, 50-54.
- Díaz Sánchez, E. (s. f.). *El ecosistema europeo y nacional de startups de tecnologías cuánticas: Apoyo al emprendimiento científico en la CAM*. Fundación para el Conocimiento Madrid.
- Diez, Ó. (octubre de 2022). *Quantum technologies standardization landscape in the EU [Presentación]*. European Commission, HPC and Quantum Technologies Unit.
- European Innovation Council (2023). *Emerging Semiconductor and Quantum Technology Components: EIC Accelerator Challenge Information Document*.
- European Investment Bank (enero de 2024). *A quantum leap in finance: How to boost Europe's quantum technology industry*.
- European Quantum Flagship (2024). *Strategic Research and Industry Agenda 2030*. Coordination and Support Action QUCATS (Grant No. 101070193).
- European Quantum Industry Consortium (QulC) (enero de 2024). *A portrait of the global patent landscape in quantum technologies (White Paper IPT)*.
- European Quantum Industry Consortium (QulC) (enero de 2024). *Strategic Industry Roadmap (SIR)*.
- Everett, M. (enero de 2021). *EU-US collaboration on quantum technologies: Emerging opportunities for research and standards-setting (Research Paper)*. Chatham House, The Royal Institute of International Affairs.
- Federal Ministry of Education and Research (BMBF) (septiembre de 2018). *Quantum technologies - From basic research to market: A federal government framework programme*.
- ICFO - The Institute of Photonic Sciences (febrero de 2024). *European Quantum Projects Overview*.
- Information Commissioner's Office (octubre de 2024). *ICO tech futures: Quantum technologies (Version 1.0.0)*.
- Jiang, S.-Y., y Chen, S.-L. (2021). Exploring landscapes of quantum technology with Patent Network Analysis. *Technology Analysis & Strategic Management*, 33(11), 1317-1331.



- Klug, A. (23 de abril de 2024). *Quantum sensing & photonics for automotive measurement and test systems [Presentación]*. Quantensensorik Linz, Linz, Austria. AVL List GmbH.
- KPMG (noviembre de 2020). *Quantum technology in Denmark: The case for Danish investment in quantum technology*. Industriens Fond & IT-Branchen.
- Le Bars, L. (27 de octubre de 2023). *Quantum computing: Emerging technologies and ecosystems [Presentación]*. European Big Data Value Forum (EBDVF 2023), Valencia.
- Lewis, A. M., Ferigato, C., Travagnin, M., y Florescu, E. (2018). *The impact of quantum technologies on the EU's future policies: Part 3 Perspectives for quantum computing (EUR 29402 EN)*. Publications Office of the European Union.
- McKinsey y Company (abril de 2023). *Quantum Technology Monitor*.
- Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal CSIC, Gobierno Vasco, Generalitat de Catalunya, Xunta de Galicia, Comunidad de Madrid y Junta de Castilla y León (2021). *Convenio marco del Plan Complementario en el área de comunicación cuántica*.
- Ministry of Science, Research and Arts Baden-Württemberg & Ministry of Economic Affairs, Labour and Tourism Baden-Württemberg (marzo de 2024). *QuantumBW strategy paper: Quantum technology in Baden-Württemberg*.
- Mlynek, J. (2 de diciembre de 2020). *European Quantum Flagship: Strategic Research Agenda & Key Performance Indicators*. Strategic Advisory Board of the European Quantum Flagship. Presentado en la Board of Funders Meeting.
- Pijselman, M., Ten Holter, C., Inglesant, P., y Jirotko, M. (mayo de 2024). *Responsible quantum computing for everyone (EY & University of Oxford White Paper)*. Ernst & Young LLP & Responsible Technology Institute, University of Oxford.
- Pupillo, L., Ferreira, A., Lipiäinen, V., y Polito, C. (2023). *Quantum technologies and cybersecurity: Technology, governance and policy challenges*. Centre for European Policy Studies (CEPS).
- QuantERA Consortium (2023). *Quantum technologies public policies in Europe*. QuantERA Network.
- QuantERA Consortium (2024). *The QuantERA Project Catalogue: Call 2023*. National Science Centre, Polonia.
- Quantum Support Action (7 de mayo de 2018). *Supporting quantum technologies beyond H2020 (Version 1.1)*. European Commission.
- Riekeles, G. E. (marzo de 2023). *Quantum technologies and value chains: Why and how Europe must act now - A test case for the EU's technological competitiveness and industrial policies (Discussion Paper)*. European Policy Centre.
- Royal Academy of Engineering (6 de junio de 2024). *Quantum Infrastructure Review: An independent review of the UK's quantum sector's infrastructure requirements for the next decade*. Department for Science, Innovation and Technology (DSIT), Gobierno del Reino Unido.
- Rubio-Manzanares, A., Arranz, U., Gaspar, V., y Romero, J. T. (mayo de 2019). *La España cuántica: Una aproximación empresarial*. AMETIC.
- Swayne, M. (31 diciembre de 2024). *Predicciones cuánticas de expertos para 2025: computación cuántica*. The Quantum Insider.
- Tanasa, D. (s. f.). *The European Programme in Quantum Technologies*. European Commission, HPC and Quantum Technologies Unit.
- The Quantum Insider (febrero de 2023). *Quantum technology investment update: 2022 review*.
- Van Deventer, O., Spethmann, N., Loeffler, M., Amoretti, M., Van den Brink, R., Bruno, N., Comi, P., Farrugia, N., Gramegna, M., Jenet, A., Kassenberg, B., Kozłowski, W., Länger, T., Lindstrom, T., Martin, V., Neumann, N., Papadopoulos, H., Pascasio, S., Peev, M., Pitwon, R., Rol, M. A., Traina, P., Venderbosch, P., y Wilhelm-Mauch, F. K. (2022). *Towards European standards for quantum technologies*. *EPJ Quantum Technology*, 9, 33. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-022-00150-1>
- World Economic Forum & Accenture (septiembre de 2024). *Quantum for society: Meeting the ambition of the SDGs*. World Economic Forum.





PATRONOS DE LA FGCSIC:

