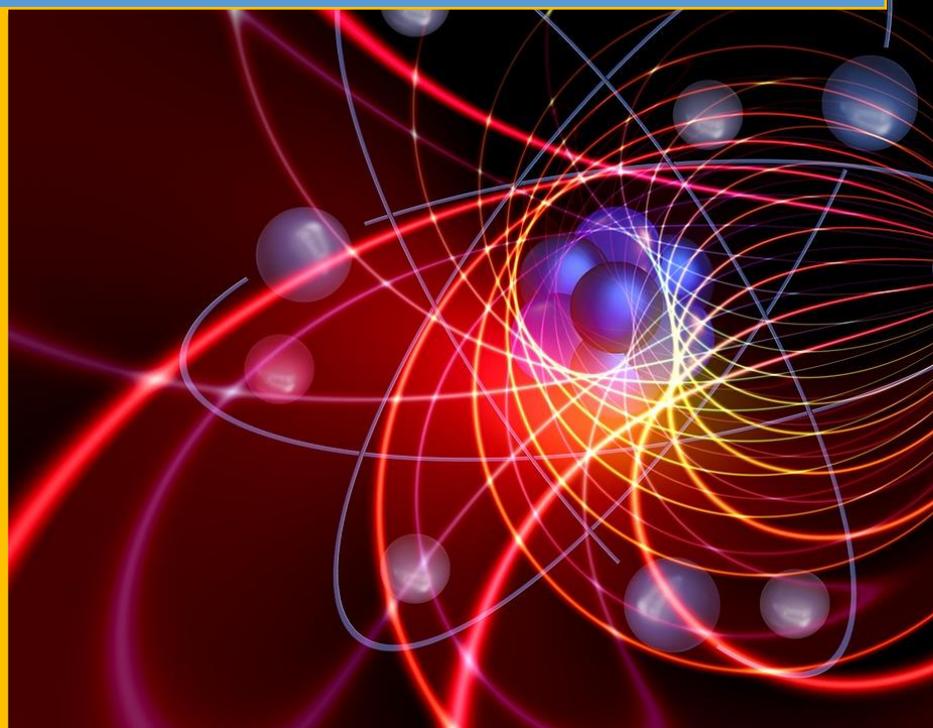


La España cuántica: Una aproximación empresarial



Grupo de Trabajo de Información, Computación y
Ciberseguridad Cuánticas de AMETIC

Mayo 2019



Equipo de trabajo

Alfonso Rubio-Manzanares, ENTANGLEMENT PARTNERS

Ulises Arranz, ACCENTURE

Víctor Gaspar, GMV

José Tomás Romero, AMETIC

Agradecimientos:

AMETIC quiere agradecer el apoyo para la realización de este informe del conjunto de empresas del Grupo de Trabajo de Información, Computación y Ciberseguridad Cuánticas y de la Comisión de Innovación de AMETIC; al Presidente y Vicepresidente de AMETIC, Pedro Mier y Luis Fernando Álvarez-Gascón; a la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT): Paloma Domingo, Nicolás Ojeda, Esther Rodríguez, Borja Izquierdo y Nuria Molinero; y a Juan Gascón, Director de Innovación de AMETIC.

Fuentes:

La parte de este informe relativa a la descripción del sistema cuántico español ha sido redactada y actualizada para este informe por el equipo de estudios de Entanglement Partners, y es parte de una acción que ha sido financiada por el Servicio Público de Empleo Estatal en el marco del Plan de Trabajo del Centro de Referencia Nacional en Sistemas Informáticos y Telemática (Think-TIC)

Adicionalmente, se ha utilizado información facilitada por la FECYT, así como diversa información pública.

Contacto: innovacion@ametic.es



Este informe se publica bajo licencia:
[Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Las imágenes utilizadas -excepto logotipos y fotografías personales- han sido tomadas de Pixabay bajo licencias de uso gratuitas

Editorial

Uno de los principales objetivos de AMETIC desde su fundación ha sido estar atenta a las nuevas tecnologías disruptivas, en beneficio de sus empresas asociadas y del conjunto de la industria española del sector.

Las tecnologías cuánticas están llamadas a jugar un papel disruptivo en los próximos años por el impacto que tendrán en muchas áreas y de forma muy notable en la capacidad de cálculo masivo y en las comunicaciones con encriptación segura, campos en los que según todas las previsiones marcarán una nueva época.

Para facilitar el acceso a la información y colaborar a la creación y consolidación de un ecosistema empresarial español de tecnologías cuánticas, en AMETIC hemos constituido un grupo de trabajo sobre tecnologías cuánticas, uno de cuyos primeros resultados es el documento “La España cuántica: Una aproximación empresarial”, que ahora tienes en tus manos y que tengo el privilegio de presentar.

Esperamos que este documento contribuya a la mejor comprensión de qué son las tecnologías cuánticas y cómo impactarán en los diferentes sectores empresariales, así como al conocimiento de los principales actores y proyectos cuánticos en nuestro



país y al descubrimiento de que España dispone de profesionales de gran talento y de instituciones científicas, ambos de primer nivel internacional.

En AMETIC estamos convencidos de que si somos capaces de aunar esfuerzos y alinear comunidad científica y universitaria, centros tecnológicos, Administraciones Públicas y sector empresarial, España puede jugar un papel relevante en el futuro de este estratégico y prometedor sector y a conseguirlo dedicaremos nuestros mejores esfuerzos.

Desde AMETIC animamos al sector empresarial a sumarse al movimiento para lograr que nuestro país aproveche la oportunidad y llegue a ser un “país cuántico”.

*Pedro Mier Albert
Presidente de AMETIC*

Sobre este documento

Apreciados amigos,

Hace unos meses, iniciamos una emocionante aventura en AMETIC; la creación de un grupo de trabajo sobre una de las tecnologías más disruptivas de los últimos años: “Computación y ciberseguridad cuánticas”.

El grupo ha ido creciendo y las tecnologías cuánticas se están haciendo cada vez más visibles y activas. Es por esto que desde este grupo de trabajo nos planteamos elaborar un documento que fuese lo más clarificador posible para todos los que se quieren iniciar en estas tecnologías. ¿Qué son? ¿Qué utilidades prácticas y casos de aplicabilidad tienen? ¿En qué sectores de la economía impactarán?

También pensamos que sería importante describir con cierto detalle todo el ecosistema cuántico o “eQcosystem” que ya existe en España.

En el documento, también hemos realizado algunas recomendaciones para avanzar en la expansión y consolidación de estas tecnologías y una llamada a que nuevas entidades y empresas, ya sean de demanda o de oferta, se sumen al grupo.

Como coordinador del grupo cuántico de AMETIC (que nos gusta llamar AMETIQ), quiero dar especialmente las gracias al Presidente de AMETIC, Pedro Mier, que creyó desde el principio en el proyecto, y al Presidente de la Comisión de Innovación de



AMETIC, Luis Fernando Álvarez-Gascón, que nos ha apoyado decididamente. También, dar las gracias a Juan Gascón y José Tomás Romero del departamento de innovación de AMETIC por su inestimable trabajo en la coordinación, contenidos y edición del documento, así como en la organización del evento de presentación.

Por último, agradecer a Ulises Arranz de ACCENTURE y Víctor Gaspar de GMV que, junto conmigo como responsable de Entanglement Partners S.L., han sido los autores de este informe. También, a la FECYT por sus aportaciones de gran valor.

Sirva este documento, para despertar el interés de los potenciales usuarios de estas tecnologías verdaderamente disruptivas que impactarán de forma sustancial en todos los ámbitos de la actividad económica.

Porque, no lo olvidemos, “el mundo es cuántico”.

*Alfonso Rubio-Manzanares
Coordinador del Grupo de Trabajo de
Computación y Ciberseguridad Cuánticas de AMETIC*

Contenido

¿A qué nos referimos con tecnologías cuánticas?	6
Principales tecnologías cuánticas	7
Sensores	7
Comunicaciones seguras	8
Simulación cuántica	8
Computación cuántica	9
¿Qué industrias se verán afectadas por esta revolución?	10
Ventajas de las tecnologías cuánticas	10
La revolución por industria	11
Aeroespacial	11
Automotriz	12
Salud	13
Sector financiero	14
Agricultura	15
Industria manufacturera	15
¿Quién está liderando estas tecnologías a nivel mundial? ¿Y en España?	17
Líderes mundiales en cuántica	17
El liderazgo en tecnologías cuánticas en España	20
Talento	21
Empresas	21
Mercado de demanda	24
Entidades del ecosistema cuántico	25
¿Qué puede hacer mi empresa? ¿Cómo me puede ayudar AMETIC?	29
Plan a corto y medio plazo (1-3 años): actividades que se pueden realizar	29
El papel de AMETIC	31
Vías de financiación de las tecnologías cuánticas	33
Convocatorias europeas en tecnologías cuánticas	33
Oportunidades nacionales	34
Recursos cuánticos: posibilidades para experimentar	36
Recomendaciones	38

¿A qué nos referimos con tecnologías cuánticas?

Las tecnologías cuánticas son un mundo completamente nuevo y, en gran medida, desconocido. Los dispositivos cuánticos se basan en las leyes de la mecánica cuántica para ejecutar sus funciones. Hoy en día estas tecnologías están generando cada vez más noticias y creando grandes expectativas, pues prometen ser uno de los pilares principales de la siguiente revolución científica y tecnológica que acontecerá en los próximos años.

Su promesa estriba en la gran potencia de cálculo que ofrecerá la computación cuántica, lo que hará que los ordenadores clásicos queden muy desfasados. Podrán realizarse procesamientos que, con la capacidad actual, no son abordables. Esta previsión genera, también, numerosas noticias sensacionalistas donde se especula con el poder de estos dispositivos, aunque hoy en día no seamos capaces de entrever su verdadera potencia más que en el papel. Pero, de lo que no cabe duda, es que estas tecnologías nos abren un mundo nuevo para explorar y que, aunque las expectativas creadas solo se cumplieran parcialmente, desempeñarán un papel muy relevante en un futuro.

La física cuántica es una disciplina que cuenta con ya un amplio recorrido. Max Planck fue el primer científico en introducir la física cuántica en el mundo moderno, en la primera etapa del siglo XX. Planck fue el primero en cuantizar los estados de energía de una partícula elemental, el fotón. Esta disciplina fue desarrollándose y evolucionando a través de científicos como Schrödinger y Heisenberg, entre otros. Pero nadie hasta Feynman, premio Nobel de Física en 1965, unió la física cuántica con la teoría de la información. Tras la Primera Conferencia sobre la Física de la Computación organizada por IBM y el MIT en 1981, Feynman expuso los primeros principios de la teoría de la información cuántica. Describió las bases sobre las cuales se está desarrollando hoy en día la computación cuántica. Pero no fue hasta finales de los años 90 cuando se volvió a hablar con fuerza de computación cuántica. Los científicos, después de la conferencia, continuaron pensando y teorizando sobre cómo aplicar la mecánica cuántica en la teoría de la información. Uno de los grandes referentes mundiales en este campo de la computación cuántica es Ignacio Cirac. Desde 2001 es el director de la División Teórica del Instituto Max-Planck de óptica cuántica. Es uno de los grandes líderes actuales de la física cuántica, y sus principales aportaciones han sido en la aplicación de las leyes de la mecánica cuántica en la teoría de la información y en la óptica.

No obstante, y a pesar de las grandes inversiones en curso, no está siendo fácil aplicar las capacidades de la mecánica cuántica con las tecnologías existentes hasta ahora. De hecho, el nivel tecnológico actual está apenas cubriendo necesidades y exigencias casi mínimas, y existen aún enormes retos técnicos que resolver. Hay, por lo tanto, un amplísimo campo para la evolución de las tecnologías y su aplicación a la computación cuántica, que prácticamente acaba de nacer. Hoy en día se están desarrollando distintas aproximaciones tecnológicas que se aplican a computación cuántica con diversos resultados y con potencial de evolución a distinta velocidad. Algunas van a poder aplicarse a un corto plazo, o se pueden aplicar ya, y otras se desarrollarán a medio y largo plazo.

Con el fin de entender esta revolución tecnológica que está empezando a llegar, es crucial una mínima inmersión en las leyes de la naturaleza del mundo cuántico. Por ello, es imprescindible adquirir algunos conocimientos básicos de física cuántica. Hagamos un paralelismo con la computación clásica que nos ayude a entender la diferencia. En la computación clásica

hablábamos del bit (la mínima unidad de información que puede contener un estado “0” o “1”), y en la computación cuántica hablamos del bit cuántico (*quantum bit* o qubit). El **qubit** es la nueva unidad de información elemental de la teoría de la información cuántica. Es análogo al bit clásico, aunque con ciertas propiedades distintas. Los tres conceptos más importantes a la hora de sumergirse en el mundo cuántico, relacionándolos con el qubit, son:

- ✿ **Paralelismo cuántico:** el qubit (sistema cuántico de dos estados) puede hallarse en una superposición de sus estados. Es decir, a diferencia del bit clásico, el qubit puede albergar información de los dos estados simultáneamente.
- ✿ **Entrelazamiento cuántico (entanglement):** dos qubits se entrelazan cuando forman un solo sistema cuántico (un solo bloque). Si los dos qubits se separaran una distancia arbitraria y se modifica uno de ellos, instantáneamente el otro qubit, aun estando separados, adquiere la información del modificado y podría mostrar qué cambio ha sufrido.
- ✿ **Teorema de no-clonación (non-cloning theorem),** es imposible duplicar un sistema cuántico de forma exacta. En el momento en que se desea extraer información de él, se perturba y el estado resultante es distinto al original.

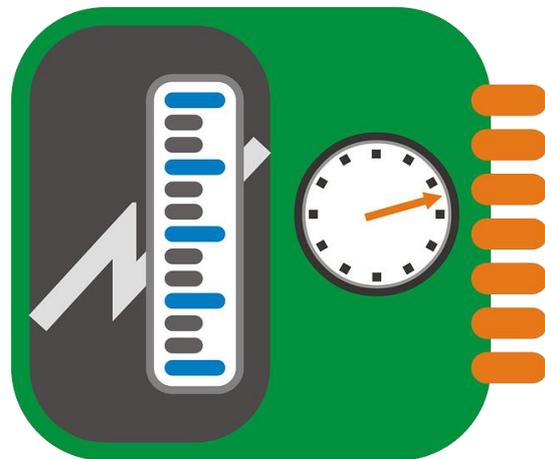
Otro concepto a tener en cuenta es que la física cuántica vive en el mundo **probabilístico**, ya que un qubit puede contener información de sus dos estados a la vez, el resultado en la medición es la probabilidad de obtener el qubit en uno de sus estados o en otro. En definitiva, como se ha podido observar, las leyes cuánticas son totalmente diferentes a las clásicas y, además, anti-intuitivas a la lógica humana.

No obstante, el hecho de que las leyes intrínsecas del mundo subatómico sean diferentes, no obstaculiza en la posible implementación de éstas en la tecnología actual. De hecho, su implementación desemboca en un significativo aumento del poder de ejecución de las mismas. Además, como ya se ha comentado, cada una de las tecnologías sigue una evolución distinta, por lo que cada una tiene un plan de desarrollo específico.

Principales tecnologías cuánticas

Sensores

Los **sensores** son una de las primeras aplicaciones de las tecnologías cuánticas. Su implementación es relativamente sencilla, por lo que su comercialización se prevé que sea a corto plazo. Los sensores cuánticos son muy sensibles a variables físicas (gravedad, campo magnético...) y detectan el cambio con una muy alta precisión. Esto es debido a que los sistemas cuánticos en superposición (paralelismo cuántico) producen una gran respuesta al cambio. Ya se han podido identificar diferentes aplicaciones de los mismos. Algunas de ellas son:



- ✿ **Metrología,** se ha podido medir el tiempo con mayor precisión que los relojes atómicos.
- ✿ **Escaneo,** se van a poder obtener imágenes con mayor precisión en aplicaciones como resonancias magnéticas o como en la visualización de átomos.

- ✿ **Navegación**, se podrán manipular los sensores cuánticos de tal manera que reciban estímulos de movimiento bajo tierra o en el interior de edificios.

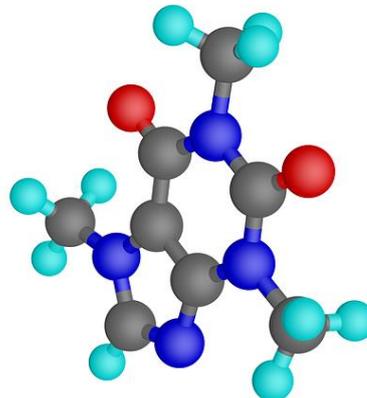
Comunicaciones seguras

Las **comunicaciones y su seguridad** también sufrirán una revolución cuántica. Ya se ha demostrado que los ordenadores cuánticos serán capaces de romper las actuales claves criptográficas clásicas; no habrá manera de mantener la información segura con los métodos actuales de ciberseguridad. Una nueva disciplina, criptografía cuántica, aparece para mejorar la transmisión de información de una forma segura. Como consecuencia del efecto de no clonación mencionado anteriormente, si alguien quisiera obtener información, debería capturar los qubit y leerlos. En el momento que se hace una medida sobre el sistema cuántico, se perturba su estado inicial, por lo que el receptor vería que el qubit se ha alterado respecto del esperado; así, se detectaría la intrusión y se podrían tomar medidas para proteger el mensaje. Las principales aplicaciones se esperan en la transmisión de información a través de canales cuánticos, así como la idea de un futuro internet cuántico.



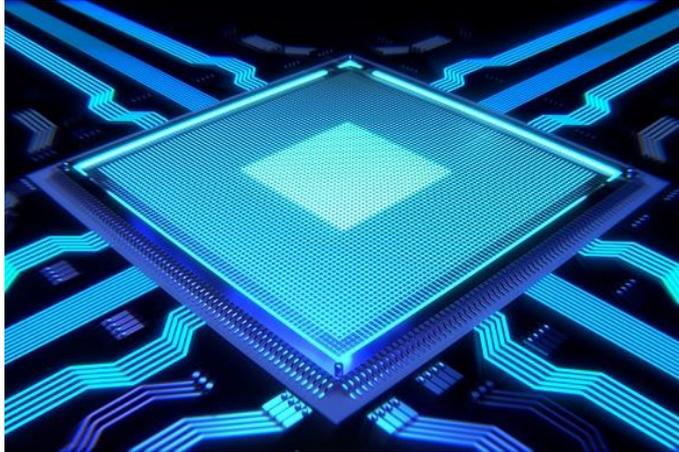
Simulación cuántica

La **simulación cuántica** es una de las tecnologías más atractivas, ya que permite simular comportamientos de sistemas complejos, desde moléculas hasta galaxias, de forma natural. Hasta ahora, con los ordenadores clásicos, solamente se ha podido aproximar e intentar predecir el comportamiento de los elementos de la naturaleza. Mediante superordenadores, se intentan simular comportamientos de elementos naturales para, por ejemplo, crear nuevos materiales o moléculas complementarias. Pero con los simuladores cuánticos, esta representación del comportamiento se realizará de manera natural, las unidades mínimas que constituyen el simulador son las mismas a la que se intenta simular. De esta forma, se podrá simular eficientemente el comportamiento de una molécula porque los elementos que componen el simulador son las mismas partículas elementales de la molécula. Las aplicaciones que esto ofrece nos ayudará en la creación de nuevos materiales, nuevos medicamentos, predicción del comportamiento de la naturaleza, etc.



Computación cuántica

Aunque todas las tecnologías cuánticas mencionadas son de inmensa utilidad, la que se espera verdaderamente importante y revolucionaria es la **computación cuántica**. Basado en los qubits antes mencionados y dotado de las tres propiedades cuánticas antes descritas, nos abren una capacidad de procesamiento que crece exponencialmente con el número de qubits que somos capaces de controlar entrelazados entre sí, llevándonos a capacidades que exceden nuestra percepción. Por ejemplo, un ordenador cuántico de 100 qubits tendría una capacidad de estados paralelos y, por lo tanto, de procesamiento, equivalente al número de átomos que compone nuestro planeta. La posibilidad de computaciones con esta capacidad de cálculo abre un nuevo universo de posibilidades. Hay ya varios tipos de computadores cuánticos, dependiendo de las tecnologías que se utilizan para su construcción y que podríamos clasificar en adiabáticos (ya operativos para determinados usos), orientados a puertas (que es una de las apuestas más fuertes por parte de fabricantes comerciales y donde se tienen puestas muchas expectativas a medio plazo) y topológicos (con un nivel de madurez menor y con revolucionarias posibilidades a medio y largo plazo). Hoy en día no se ha podido ver aplicado el verdadero potencial de la computación cuántica, pues está en sus albores, aunque ya muy cerca de los conceptos de supremacía cuántica (sobre la computación clásica). No hay duda de que estas tecnologías marcarán una auténtica revolución.



¿Qué industrias se verán afectadas por esta revolución?

Si una cosa buena tiene el futuro es que es incierto. Cualquier predicción que se haga, por más brillante que sea el individuo que la formule, está condenada a perseguirnos el resto de nuestros días, como bien sabe Lee De Forest, el inventor del triodo en tubo de vacío (el precursor del transistor), después de su desafortunada predicción: “*Me atrevo a afirmar que los viajes al espacio por el hombre jamás ocurrirán, independientemente de todos los avances futuros*” allá por el año 1957. ¿Quién le iba a decir que su tecnología sería parte de los cimientos que hicieron posibles los viajes al espacio? Con los avances actuales en ciencia básica y aplicada, podemos usar nuestra imaginación y proyectarnos al futuro, pero si miramos escasos sesenta años atrás, difícilmente De Forest podía sospechar de las implicaciones de sus investigaciones. En aquel momento el único uso de los tubos de vacío era la amplificación de las señales eléctricas para poder hacer llamadas a larga distancia.

A riesgo de equivocarnos, y sumarnos a la lista de predicciones desafortunadas, vamos en esta sección a mirar al futuro e intentar intuir qué es lo que nos depara. Empezaremos mostrando brevemente las diferentes tecnologías cuánticas y sus ventajas respecto a las tecnologías existentes, para luego enumerar aquellas industrias que creemos se verán afectadas y los avances que en ellas se están produciendo.

Ventajas de las tecnologías cuánticas

Como hemos visto en apartados anteriores, cuando hablamos de tecnologías cuánticas, no nos referimos únicamente a la computación, sino que también se hace referencia a las tecnologías de sensores y comunicaciones cuánticas. Conocer las ventajas de estas tecnologías respecto a sus hermanas “clásicas” nos ayudará a entender mejor qué industrias se pueden ver afectadas.

En primer lugar, las **comunicaciones cuánticas** tienen como principal ventaja la seguridad frente a las escuchas en el canal. Experimentos recientes¹ han demostrado el uso de la tecnología conocida como *Quantum Key Distribution* (o QKD) para securizar la comunicación entre un micro-satélite en órbita baja y una estación terrena.

En segundo lugar, los **sensores cuánticos** ofrecen mayor sensibilidad y resolución a efectos externos que sus predecesores clásicos, por ejemplo, para la medición de corrientes eléctricas, magnetismo, gravedad o tiempo. Se han realizado experimentos² con sensores cuánticos que detectan campos magnéticos millones de veces inferiores al campo magnético de la tierra.

En tercer lugar, la **computación cuántica**, aunque aún de manera teórica, sobresale por su capacidad para simular efectos cuánticos, como por ejemplo el comportamiento de átomos y partículas; o por su potencia para resolver problemas de optimización, como encontrar la ruta más corta entre dos puntos; o en la búsqueda y procesamiento de grandes volúmenes de información, como por ejemplo en las búsquedas inversas. Estas capacidades, aún por demostrar de manera práctica, son las que están creando mayores expectativas en la industria.

¹ <https://www.nature.com/articles/nphoton.2017.107>

² <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5003821>

La revolución por industria

A día de hoy es imposible encontrar una industria que no haya sido revolucionada por el transistor, desde la agricultura hasta la industria de la automoción, pasando por la salud, la logística, la manufactura, etc. Es difícil imaginarse una industria en nuestros días que no dependa en mayor o menor medida del silicio para funcionar y, de la misma manera, creemos que será difícil encontrar en el futuro cercano una industria que no dependa de las tecnologías cuánticas.

A continuación, presentamos un listado de las industrias que creemos serán revolucionadas y los proyectos o experimentos recientes que se están llevando a cabo en estos ámbitos. Es de resaltar que en el camino se descubrirán usos y aplicaciones que ahora no podemos ni siquiera sospechar.

Aeroespacial

La **industria aeroespacial** se beneficiará enormemente de las tecnologías cuánticas. El uso de comunicaciones cuánticas seguras vía satélite es uno de los campos de investigación y desarrollo donde se están obteniendo, desde hace algunos años, buenos resultados. China lidera esta carrera, como se demostró el 29 de septiembre de 2017 cuando se realizó la primera videollamada intercontinental entre Viena y Beijing a través de una red QKD³. Existen aún problemas por resolver con esta tecnología, como lo es el hecho de que se necesite línea de visión entre el satélite y la estación terrena; o en el caso de la transmisión a través de fibra óptica, la necesidad de usar repetidores que amplifiquen la señal cada cierta distancia, y que se podrían atacar, haciendo inútil el cifrado cuántico.



Además de para las comunicaciones, los computadores cuánticos también van a suponer un avance importante para la industria aeroespacial en sí. Las capacidades para resolver problemas de optimización ayudarán a la planificación de misiones, por ejemplo, para encontrar la mejor ruta a Marte, o para optimizar la gestión del tráfico aéreo, encontrando los mejores trayectos. También pueden ser muy útiles en los procesos de verificación y validación durante el posicionamiento óptimo de sensores, por ejemplo, en el caso de medir la salud estructural del ala de un avión, donde interesa disponer del mínimo número de sensores. Un ejemplo reciente de cómo la industria aeroespacial se está preparando para el futuro es el caso de Lockheed-Martin⁴, y el uso que está haciendo del computador D-Wave 2X, para verificación y validación automática de código.

³ <https://www.insidescience.org/news/china-leader-quantum-communications>

⁴ <https://lockheedmartin.com/en-us/news/features/2017/quantum-computing-spot-checking-millions-lines-code.html>

Automotriz

Otra de las industrias que mayor partido obtendrá de la revolución cuántica es la **industria automotriz**. Actualmente un vehículo dispone de 60 a 100 sensores con el objetivo de cumplir los estándares de seguridad y medioambientales exigidos, así como para mejorar la eficiencia del vehículo. Se estima que, en un plazo de 4 años, y como consecuencia del empuje del coche autónomo, este número podría aumentar a 200. A medida que la presión del mercado aumente, es muy probable que los sensores actuales sean apoyados (o sustituidos) por sensores cuánticos más precisos. Un ejemplo sería el uso de acelerómetros cuánticos, 1000 veces más precisos que los acelerómetros actuales, y que podrían usarse cuando la señal GPS no estuviera disponible, como se probó recientemente en un submarino británico⁵ para conocer su posición mientras permanece sumergido. Actualmente, el tamaño de estos acelerómetros es demasiado grande como para embarcarlos en un automóvil, sin embargo, a medida que la tecnología avance y se miniaturice, podría ser usada para este fin.



La computación cuántica sin duda también va a jugar un papel muy relevante en otros campos de la industria automotriz, como en el diseño y fabricación de nuevas baterías. Actualmente, para evaluar el rendimiento y las características de carga y descarga, es necesario fabricar efectivamente las baterías, ya que los computadores actuales no permiten crear una simulación de los procesos químicos que suceden en su interior. Con la llegada de los computadores cuánticos, será posible simular estos procesos químicos con fidelidad, minimizando los tiempos y costes de fabricación.

Otra de las aplicaciones será la optimización de los flujos de tráfico, como ha demostrado un reciente experimento realizado por Volkswagen con los datos de tráfico de unos centenares de taxis de la ciudad de Beijing⁶. Los resultados han sido publicados en el artículo científico *Quantum-assisted cluster analysis*⁷, y demuestran que la tecnología empieza a estar lista para enfrentarse a casos de uso reales.

La competitiva industria automotriz no se quiere quedar atrás y algunas empresas están llegando a acuerdos con fabricantes de computadores cuánticos, como es el caso del

⁵ <https://www.newscientist.com/article/mg22229694-000-quantum-positioning-system-steps-in-when-gps-fails/>

⁶ <https://dwavefederal.com/app/uploads/2017/10/Qubits-Day-2-Morning-5-VW.pdf>

⁷ <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1803/1803.02886.pdf>

memorándum de entendimiento firmado recientemente entre una de las empresas del grupo Toyota y D-Wave⁸ para el uso de computadores cuánticos.

Salud

La industria de la salud tiene mucho a ganar con la llegada de nuevos sensores más precisos. Un ejemplo de ello son los recientes avances⁹ en espectrografía de resonancia nuclear magnética (*NMR spectroscopy*, por su nombre en inglés, *nuclear magnetic resonance*),



que han permitido realizar el análisis químico a una escala celular por primera vez. Este tipo de análisis permitirá en el futuro identificar la expresión génica de células tumorales o el estudio de la estructura química de nuevos tipos de medicamentos.

Por otro lado, y como se ha comentado anteriormente, los computadores cuánticos son especialmente útiles para resolver problemas de optimización, siendo estos habituales en el sector salud. Estos problemas consisten en seleccionar cuidadosamente el valor de un elevado número de variables con el objetivo de maximizar el resultado de una función. Un ejemplo de aplicación lo tendríamos en el trabajo que hace un dosimetrista médico para decidir el tratamiento adecuado en una sesión de radioterapia. Este médico debe seleccionar diferentes valores para la dosis de radiación, lugar de radiación, nivel de intensidad, etc, minimizando los efectos secundarios para el paciente de cáncer. Un estudio reciente¹⁰ entre la compañía canadiense D-Wave y el Roswell Park Cancer Institute analiza el uso de un computador cuántico en este sentido.

⁸ http://www.toyota-tsusho.com/english/press/detail/171114_004066.html

⁹ <https://www.nature.com/articles/nature25781>

¹⁰ <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/60/10/4137/pdf;jsessionid=9682F0C5C23F660B2E07B24D9161284B.c1>

Sector financiero

A finales del 2017 se habló mucho de la red fibra óptica de 2.000 kilómetros instalada entre Beijing y Shanghai, el link cuántico más largo conocido¹¹. Lo que quizá pasó un poco por alto fue el hecho de que dos empleados del Banco de Comunicaciones (uno de los 5 principales bancos comerciales chino) hiciera la primera transacción electrónica entre estas dos capitales,



adelantando así a su competencia, el Banco Industrial y Comercial de China, que dos años antes, en 2015, había realizado una transferencia de datos dentro de Beijing. Sin duda, la competencia está abierta, y estos ejemplos inspirarán a otras entidades financieras de todo el mundo a elevar sus niveles de seguridad implementando este tipo de comunicaciones.

El sector bancario no se enfrenta únicamente a problemas de seguridad en las comunicaciones, también el fraude financiero es un reto contra el que deben luchar. Actualmente existen métodos para detectar y prevenir el fraude. Sin embargo, se encuentran limitados por las capacidades de la tecnología actual. Con la proliferación de computadores cuánticos y algoritmos¹² diseñados para este tipo de tecnología, en el futuro veremos aplicaciones mejor preparadas para combatir el fraude. Actualmente existe un reto en balancear de manera adecuada la reducción del fraude con la molestia que supone para un usuario que una transacción sea rechazada. Estudios recientes muestran¹³ que, de las operaciones con tarjeta bancaria realizadas en Estados Unidos, 118 mil millones de dólares en transacciones fueron equívocamente rechazadas, mientras que “únicamente” 9 mil millones fueron perdidas por fraude. Sin duda aún queda mucho espacio de mejora.

¹¹ http://usa.chinadaily.com.cn/china/2017-09/30/content_32669867.htm

¹² <https://math.nist.gov/quantum/zoo/>

¹³ <https://www.barclaycard.co.uk/business/files/Riskified-Javelin-Whitepaper-2015.pdf>

Agricultura

En 1968 el biólogo Paul R. Ehrlich escribía en su controvertido libro “The population boom” que la batalla por alimentar a toda la humanidad había fracasado. Como otros en su época argumentaba que mientras la población crecía exponencialmente, la producción de alimentos lo hacía linealmente, y en algún momento en los años 80 habría un colapso alimenticio mundial. Sin embargo, gracias a los



avances en el conocimiento experimentados en la agricultura (mejores fertilizantes, pesticidas, mejores sistemas de riego, selección de cultivos, etc.), la humanidad ha podido alimentarse, aunque con desigualdades, por completo. Cuarenta años después vuelven a aparecer noticias que apuntan a otra crisis alimentaria en el año 2050, en parte provocada por el crecimiento de la población, y por otros factores como el cambio climático y la desertificación del suelo. Ante estas nuevas predicciones sobre el fin del mundo, creemos que será otra vez el conocimiento quien aporte la solución y, como no podía ser de otra manera, los computadores cuánticos jugarán su papel. Quizá el ejemplo más paradigmático en agricultura lo tenemos en el proceso Haber-Bosch de síntesis del amoníaco (elemento fundamental para los fertilizantes). Este proceso no ha sufrido grandes cambios desde que se inventó en la primera mitad del siglo XX y, gracias a él, hoy en día disponemos de la misma superficie cultivada que en 1900¹⁴ pero es capaz de alimentar a seis veces la población de aquel entonces. Con ordenadores más potentes se podría simular esta síntesis, utilizando diferentes compuestos, con el objetivo de mejorar los fertilizantes actuales y aumentar así la capacidad de producción por hectárea a nuevas cotas.

Industria manufacturera

La mayoría de las propiedades macroscópicas de la materia derivan de las interacciones atómicas de las partículas constituyentes. Por poner un ejemplo, tanto el grafito como el diamante están constituidos únicamente por partículas de carbono, es la estructura interna lo que a uno le da la propiedad macroscópica de ser un buen lubricante sólido y, al otro, ser uno de los materiales más duros conocidos. Con la llegada de la



computación cuántica, que nos va a permitir por primera vez simular estas interacciones

¹⁴ <http://vaclavsmil.com/wp-content/uploads/docs/smil-article-worldagriculture.pdf>

atómicas de manera fidedigna, será posible explorar e inventar nuevos materiales, como podrían ser mejores superconductores, baterías con mayor densidad energética, o mejores aislantes térmicos.

La industria de la manufactura y la ciencia de materiales se van a beneficiar enormemente de esta tecnología. Sin embargo, todavía queda un largo camino por recorrer. Las simulaciones más avanzadas, como la llevada a cabo recientemente por IBM¹⁵, utilizó su computador cuántico de 6 qubits para calcular los niveles más bajos de energía para tres moléculas de diferente complejidad. La de mayor complejidad simulada en este estudio es el hidruro de berilio (BeH_2) una molécula minúscula de únicamente tres átomos. Sin duda es un paso adelante, aunque pasarán años hasta que podamos simular interacciones entre moléculas de interés que contengan decenas de átomos.

¹⁵ <https://www.nature.com/articles/nature23879>

¿Quién está liderando estas tecnologías a nivel mundial? ¿Y en España?

Parte del actual momento que vivimos en las áreas de las aplicaciones cuánticas en la industria se debe en buena parte al “**Quantum Manifesto**”. En 2016 la comunidad científica genera un documento, el Manifiesto, firmado por 3.400 investigadores, donde se realiza una llamada de atención a los gobiernos y al mundo de la industria sobre el potencial de estas tecnologías y propone la inversión para la implementación de las mismas en apoyo a la transformación tecnológica que estaba ya aconteciendo.



El documento fue presentado en 2016 en la *Quantum Europe Conference* y el interés fue tal que **la Comisión Europea** respondió con un proyecto de 10 años de duración (Flagship) y con una inversión de más de 1 billón -1.000 millones- de euros, que está aumentando en volumen cada año que pasa. El programa ha comenzado en 2018 y fomenta la colaboración entre los países de la Unión Europea. El principal objetivo del Flagship es la formación y apoyo a la industria europea en tecnologías cuánticas. Que se sepa definir y desarrollar tecnología para emplear la física cuántica, identificar cómo esta revolución cambiará el mundo, o en qué casos de uso se puede aplicar y en cuáles no, son algunas de las preguntas que el Flagship y la industria europea deberían poder responder gracias a este plan. A pesar de estas importantes iniciativas e inversiones, los países de la Unión Europea han sido los últimos en entrar en la competición cuántica. Desafortunadamente, aunque la mayoría de publicaciones científicas en este campo provienen de investigadores europeos, el tejido industrial europeo ha sido el último en incorporarse en la inversión de tecnologías cuánticas. Otras potencias a nivel mundial, aparte de Europa, están haciendo inversiones incluso mayores que el Flagship para el desarrollo de estas tecnologías.

Líderes mundiales en cuántica



China, con una capacidad de inversión inmensa es probable que vaya por delante en la aplicación de estas tecnologías a nivel mundial, aunque no publica la mayoría de sus avances. China es, probablemente, el país más potente en comunicación y criptografía cuántica. Realizó una inversión enorme con el objetivo de ser los primeros en poder transmitir información totalmente segura, además de también querer asentar las bases del internet cuántico. Para poder conseguir este objetivo, China lleva años investigando acerca de la criptografía cuántica. Transmitir información de una forma totalmente protegida e infalible es una utopía de las grandes empresas de seguridad, además de los gobiernos de todo el mundo, que se va a poder desarrollar ahora gracias a la mecánica cuántica. Por ello, China apostó en todo momento por ser líder en este sector. Para ello, unió fuerzas con el gigante chino de Internet, Alibaba, con el fin de crear el primer buscador cuántico en la red. Además, China es el país que sustenta el récord de transmisión de información por medios cuánticos. El 29 de septiembre de 2017, la Academia de Ciencias Chinas y la Academia de Ciencias Austríaca realizaron una videoconferencia de 75 minutos comunicándose solamente con tecnologías cuánticas. Mediante el satélite chino Micius, se realizó una comunicación cuántica entre las

ciudades de Pekín y Viena, criptografía cuántica a 760 kilómetros de distancia: la transferencia de información cuántica a mayor distancia hasta la fecha.



Rusia es otro gigante en cuanto a seguridad y comunicaciones cuánticas. El centro de investigación Russian Quantum Center en Moscú, está enfocado en todos los asuntos relacionados con las tecnologías cuánticas. Su estrategia se concentra en la inversión en comunicaciones y dispositivos cuánticos. Mediante el exhaustivo estudio de la calidad de los equipos y el progreso de los mismos, Rusia intenta también hacerse con el control de las comunicaciones cuánticas. Aunque su verdadero objetivo es el desarrollo de la red cuántica, quieren ser los primeros en usar Internet cuántico.

Es un hecho que la implementación más rápida y factible de la comunicación y criptografía cuánticas ofrecerá una gran ventaja competitiva. He ahí la importancia de ser pioneros y dominar en este sector. El primero en ganar la carrera en la supremacía dispondrá de las tecnologías más fuertes del planeta. Tendrá la posibilidad de empezar con los recursos necesarios en esta revolución científica y tecnológica y ganar la gran competición cuántica que está comenzado.



No obstante, es también importante el desarrollo de tecnologías cuánticas de medio y largo plazo, y **Australia** es un claro ejemplo de ello. A principios de 2016, Australia anunció una financiación de 25 millones de dólares durante 5 años para la construcción de un circuito integrado cuántico de silicio. Nuestras antípodas apuestan por la inversión en computación cuántica, y aunque ésta sea la tecnología de evolución más lenta, su aplicabilidad es infinitamente más amplia que el resto.

Por otra parte, **Norteamérica**, con enormes inversiones privadas de sus grandes compañías tecnológicas y fuertemente apoyado por su ecosistema de grandes multinacionales y corporaciones públicas, es la primera que está desplegando soluciones comerciales en el mercado.



En **Estados Unidos**, a mediados del 2016, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología aconsejó una gran inversión en tecnologías cuánticas involucrando a las instituciones educativas, la industria y el gobierno en esta nueva revolución. Su principal objetivo fue concienciar a la población y al mundo de la industria de las tecnologías cuánticas emergentes. Estados Unidos está apostando por todas las líneas innovadoras que surgen. No se está centrando en una única tecnología, sino que invierte y se desarrolla en todas y cada una de ellas. Una muestra de ello es la gran cantidad de startups de computación cuántica que han surgido en Silicon Valley — aunque también hay otras muchas más repartidas a lo largo del país—, en cualquier aspecto cuántico, cubriendo simulación, computación, comunicación, criptografía, etc. Estados Unidos quiere ser referencia en todo lo relacionado con las tecnologías cuánticas a nivel mundial. Cuenta con gigantes tecnológicos como Google o IBM que lideran algunas de las soluciones en computación cuántica globalmente.



El otro país que está haciendo mucho énfasis en todo lo relacionado con esta innovación es **Canadá**. En septiembre de 2016, el gobierno canadiense realizó una inversión de 75 millones de dólares con la

Universidad de Waterloo para su proyecto Transformative Quantum Technologies. Su objetivo era abordar tres desafíos en investigación cuántica: desarrollar un procesador cuántico universal, fabricar sensores cuánticos y extender a larga distancia las comunicaciones cuánticas. Son pioneros, sobre todo, porque en este país es dónde se potenció por primera vez el desarrollo de un ordenador cuántico adiabático. De aquí surgió la primera compañía que empezó a invertir en estos desarrollos, y una de las que ha adquirido más reputación: D-Wave. Además, recientemente se ha esbozado el proyecto Creative Destruction Lab en Toronto, con el fin de atraer el interés de pequeños emprendedores del sector que quieran abrir un startup y así potenciar la computación cuántica en su ecosistema.

Este breve repaso a las aproximaciones y foco de inversión de las distintas potencias a nivel mundial nos hace comprender los riesgos de demorar el foco en este tipo de tecnologías y el retraso que la Comunidad Europea tiene como reto atajar en los próximos años.

Hagamos con otra perspectiva un breve repaso al estado de evolución de algunas de las tecnologías que hemos mencionado anteriormente y algunas de las compañías que han surgido e invertido en ellas.

En el mundo de **sensores cuánticos**, ya hay varias compañías referentes globalmente. Todas han llevado esta tecnología a la fase de producción con el objetivo de implementarla en seguridad o telecomunicaciones, entre otras. En Europa hay varias empresas líderes. **Muquans** es una compañía francesa que se basa en la distribución de instrumentos de medición de alta precisión. Por una parte, comercializa gravímetros, donde cubre las áreas de aplicación en investigación de terremotos o hidrología y, por otra parte, relojes atómicos, con aplicación en metrología, telecomunicaciones o navegación por radio. **Oscilloquartz**, compañía establecida en Saint-Blaise (Suiza), quiere hacer uso de sensores cuánticos para mejorar los servicios que ofrece de generadores de frecuencia, GPS o relojes de cesio en las telecomunicaciones. **M Squared**, que históricamente se ha centrado en instrumentos fotónicos, quiere aprovecharse de la mecánica cuántica para mejorar sus prestaciones en defensa, asistencia médica, seguridad, etc. Aunque se puede ver una concentración de compañías europeas invirtiendo, también hay varias americanas. Un ejemplo es la compañía **Microsemi**, la cual no se ha rezagado y ha comenzado a invertir en tecnologías cuánticas para mejorar en la industria aeroespacial, en defensa y comunicaciones; o como la entidad **AOSense**, situada en California, con labor de diseño y construcción de sensores gravitatorios para navegación o exploración geofísica, entre otros.

Respecto a **comunicaciones**, la densidad de empresas es distinta a la anterior. Los gobiernos e instituciones científicas son las que han invertido en este aspecto, más que el mundo de la industria. China es la máxima exponente en todo lo relacionado con comunicaciones cuánticas, tanto en criptografía como en la transmisión de información, y la empresa líder en este sector es **Alibaba**. Junto con el Gobierno y la Academia de Ciencias Chino han desarrollado la transmisión de información cuántica con mayor longitud, como ya se ha comentado anteriormente, y tienen como objetivo construir la mayor red cuántica existente. **Qubitekk** es una empresa estadounidense que se caracteriza por ser la primera en comercializar un generador de fotones entrelazados. Básico en comunicación, ya que es el instrumento esencial para realizar una transmisión de máquina a máquina. También se están desarrollando un ordenador cuántico fotónico. **Quintessence** por otro lado, es una empresa australiana focalizada en criptografía cuántica. Aborda la generación de números aleatorios para claves actuales, junto con el desarrollo de protocolos de seguridad cuánticos. También **ID Quantique** trabaja en este ámbito. La compañía situada en Suiza define su estrategia de negocio a través de tres líneas

principales: generación de verdaderos números aleatorios, diseño de hardware para el conteo fotónico en la comunicación y el desarrollo de soluciones de cifrado para las redes cuánticas.

En el sector de **computación y simulación cuántica**, también hay ya diversas empresas profundizando sobre ello. Todas abarcan ambos temas, la simulación y la computación, pero existe diferencia entre ellos. Mientras que la computación cuántica se centra en la construcción de un ordenador cuántico —sin dejar de lado el desarrollo del entorno en que se ejecuta—, la simulación cuántica se enfoca en el software, en el entorno donde se producen los cálculos. Así, podemos distinguir varias empresas referentes a nivel mundial. Una de las más importantes es **IBM**, la compañía que se encuentra, junto con **Google**, más avanzada en la construcción del primer ordenador cuántico de puertas lógicas. La misión de ambos es alcanzar la supremacía cuántica, es decir, el ordenador cuántico de al menos 50 qubits, lo antes posible. IBM comercializa un ordenador de 20 qubits, con planes para antes de finales de 2019 de poner en el mercado uno de 50 qubits, y Google recientemente desveló que había alcanzado los 72 qubits. En esta carrera pesa tanto el número de qubits como la coherencia y corrección de los errores. El apropiado equilibrio entre ambos parámetros nos dirá quién va en cabeza en cada momento en esta competición. Por otro lado, **Microsoft** está confeccionando un ordenador cuántico topológico: ordenador cuántico que hace uso de la llamada partícula Majorana para suprimir los errores. Esta tecnología no está a la fecha muy evolucionada, aunque su enfoque puede ser el inicio de una segunda revolución cuántica a medio o largo plazo. Otras grandes compañías como **Intel** o **HP** también están haciendo grandes inversiones en la construcción de ordenadores cuánticos de puertas lógicas. Una interesante empresa, sin ser una de las grandes, es **Rigetti**. Esta startup de California tiene un simulador en la nube donde se pueden ejecutar los códigos que se crean con su API Forest. Además, está construyendo un chip superconductor que equivale a un ordenador cuántico de 19 qubits. Adicionalmente, las empresas con más implantaciones cuánticas reales en el mercado, pero apostando por otra familia de tecnologías, son **D-Wave** y **1QBit**. D-Wave se ha centrado en la construcción de un ordenador cuántico adiabático. Éstos tienen ahora mismo más presencia comercial que los de puertas lógicas, porque tienen menor tasa de errores y se pueden empezar a aplicar en casos prácticos —básicamente analíticos—. D-Wave ha desarrollado una API de conexión a su ordenador adiabático de 2.000 qubits. 1QBit es la empresa asociada a D-Wave que tiene como objetivo el empleo de las capacidades de los ordenadores D-Wave en aplicaciones industriales, principalmente en sanidad y farmacia. Como se aprecia, en este campo, desde el punto de vista comercial, predomina un monopolio norteamericano.

Como hemos apreciado en este breve repaso, países como Estados Unidos, China, Australia, Rusia o Canadá se adelantaron al resto e invirtieron desde el inicio en estas revolucionarias tecnologías. Europa debe acelerar en las inversiones y en la asignación de talento a estas áreas para recuperar el retraso de forma acelerada y alcanzar el máximo nivel para competir con los otros países mencionados, como un jugador de primer orden en un nuevo mercado aún por definir.

El liderazgo en tecnologías cuánticas en España

Nos gustaría hacer algunas consideraciones previas que nos ayudarán a entender mejor lo que está pasando en España en torno al desarrollo del sistema de ciencia y tecnologías cuánticas o eQosystem.

Talento



Estamos ante una auténtica guerra de talento. En el mundo, unos cientos de científicos y empresas “dominan” el ecosistema cuántico.

España es una potencia en cuanto a talento. Numerosos científicos españoles forman la punta de lanza del conocimiento cuántico, como el Dr. Ignacio Cirac (Director en el Instituto Max Planck), la Dra. Maria Marced, Presidenta europea de TMSC, el Dr. Dario Gil (CVP en IBM), el Dr. Jordi Ribas (GVP en Microsoft), el Dr. Sergio Boixo (Google), el Dr. Borja Peropadre (Raytheon) y muchos otros. La diáspora española de talento cuántico

es interminable, una verdadera “fuga de cerebros”.

El talento cuántico que reside en España es muy relevante y reconocido en ámbitos internacionales. Podemos citar algunos: Dr. José Ignacio Latorre, Dr. Juan José García Ripoll, Dr. Vicente Martín Ayuso, Dr. Pol Forn, Dr. Miguel Ángel Martín-Delgado, Dra. Verónica Fernández, Dra. Anna Sanpere, Dr. Antonio Acín, Dr. Darrick Chang, Dr. Maciej Lewenstein, Dr. Morgan Mitchell, Dr. Hugues de Riedmatten, Dra. Leticia Tarruell, Dr. Marcos Curty, Dr. Gueza Toth, Dr. Enrique Solano, Dr. Geza Giedke, Dr. Carlos Tejedor, Dra. Roberta Zambrini, Dr. David Zueco, Dr. Adán Cabello, Dra. Leticia Tarruell, Dr. Fernando Luis Vitalla, Dr. David Pérez García, Dra. Roberta Zambrini, y, un largo etcétera de grandes científicos. Como dijimos antes, es sólo una pequeña muestra de nuestros científicos en estas disciplinas que están liderando algunos de los grupos que desarrollan ciencia y tecnología cuántica en España.

Empresas



Han surgido varias iniciativas privadas, sobre todo en Barcelona, que están conformando un incipiente eQosistema en torno a unos de los centros fotónicos más relevantes del mundo, sino el primero: el **ICFO**. Las grandes multinacionales españolas todavía no están participando activamente, como mucho, están desarrollando algunos pilotos.

Es verdad que, por primera vez en la historia de nuestro tejido industrial, un físico teórico, el Dr. Ignacio Cirac, forma parte del Consejo de Administración de una compañía del IBEX35. Parece que algo está cambiando y para bien.

Las grandes multinacionales de oferta ven en España un mercado muy incipiente como para tomar verdaderas posiciones. Quizás **IBM** y **Accenture** son las que tienen más avanzada su hoja de ruta de despliegue de su oferta en nuestro país.

El último informe de Gartner destinado a los CIOs, en el que se alerta sobre el impacto de las tecnologías cuánticas en todos los sectores de la economía, es muy posible que haga que se empiecen a tomar las cosas verdaderamente en serio.

Teniendo en cuenta este contexto, **AMETIC** —la patronal de empresas tecnológicas de España— ha apostado por organizar un grupo de trabajo cuántico en su Comisión de Innovación: AMETIQ. Este grupo de miembros de AMETIQ incluye, entre sus objetivos, informar a todo el sector empresarial de España de los actores y sus actividades en torno a la ciencia y tecnologías cuánticas que, sin duda, se están moviendo muy deprisa, y han motivado la realización del presente informe.

Las empresas que desarrollan su negocio en torno a las tecnologías cuánticas o las que las tienen que utilizar para la mejora estratégica de su negocio pueden clasificarse en empresas de oferta y de demanda. Las empresas de oferta pueden ser consultoras, de software, hardware, inversiones, tecnologías auxiliares, telecomunicaciones o ciberseguridad cuánticas.

Las primeras empresas o start-ups que han surgido en España en este ámbito son:

-  **Entanglement Partners SL.** Con sede en Barcelona, Madrid, San José de California y Kerala en la India. Es la primera empresa de consultoría cuántica que se creó en España y Latinoamérica. Su actividad principal se centra en consultoría estratégica y tecnológica en torno a las tecnologías cuánticas. Cuenta entre sus socios con ejecutivos de negocio del sector de las tecnologías, especialistas en inversiones y con relevantes científicos de la información cuántica. Entre sus socios principales, están la ingeniería de software Opentrends. Asimismo, Entanglement Partners ha establecido un acuerdo con la empresa suiza ID Quantique/SK Telecom para distribuir e instalar sus sistemas QKD. Entanglement Partners realizó la primera videoconferencia encriptada cuánticamente en España entre dos empresas. Es miembro fundador de la Quantum World Association (QWA) y del grupo AMETIQ. Entanglement Partners está presidida por el Dr. Josep María Vilà y su CEO es Alfonso Rubio-Manzanares.
-  **Metempsy,** con sede en Barcelona. Empresa dedicada al diseño de arquitectura de procesadores. Contratada por Microsoft para desarrollar procesadores para controlar los Chips cuánticos in-situ dentro del criostato. En la actualidad, Microsoft ha alcanzado un acuerdo de compra.
-  **Multiverse Computing,** con sede en San Sebastián, se dedica a la aplicación de la computación cuántica a problemas que no pueden resolver los ordenadores actuales. El campo escogido son las finanzas y la economía. En el campo de las finanzas, aplica los nuevos algoritmos de computación cuántica para resolver problemas como la búsqueda y asignación óptima de inversiones, el cálculo ajustado de riesgos incurridos por inversores y entidades financieras, y la utilización de herramientas de computación cuántica para entrenar redes neuronales de inteligencia artificial. En el campo de la economía, Multiverse Computing proporciona alternativas para ayudar a predecir y prevenir las crisis financieras. Las técnicas de Multiverse Computing tienen cabida también en otros ámbitos donde sea necesario incrementar la rapidez de las herramientas de inteligencia artificial actual: química, biología, etc. Sus fundadores son el Dr. Roman Orus, el Dr. Sam Mugel y el Dr. Enrique Lizaso. Son autores de dos de los artículos más consultados en computación cuántica aplicada de los últimos años: uno de análisis y revisión sobre las herramientas proporcionadas por la computación

cuántica en las finanzas y otro sobre las posibilidades de predecir las crisis financieras ayudándose de computadores cuánticos.

- ✿ **Sygnadine/keysight** con sede en Barcelona. Empresa de manufactura electrónica que produce módulos de generación de frentes de onda y digitalizadores utilizando tecnología FPGA programable. Es una spin-off del ICFO. Fue adquirida por la multinacional Keysight para desarrollar módulos de control y lectura de sistemas cuánticos para computación.
- ✿ **QuSide**, con sede en Castelldefels, Barcelona. Diseñan y comercializan tecnologías cuánticas para alimentar todos los dispositivos conectados con componentes de alta calidad. Las fuentes de entropía cuántica patentadas de Quside permiten la generación de números aleatorios cuánticos y ultrarrápidos para entornos móviles, IoT y centros de datos.
- ✿ **Quilimanjaro**. Con sede en Barcelona. Servicio de computación cuántica abierta. Desarrollan computadoras cuánticas prácticas. Su ecosistema para la computación cuántica se centra en crear una comunidad abierta para la investigación de la computación cuántica en la que los usuarios se benefician de las capacidades cuánticas y pueden guiarse a través de este nuevo paradigma. Han puesto en el mercado internacional el primer ICO cuántico del mundo para realizar sus proyectos.
- ✿ **The Quantum Revolution Fund**. Con sede en Barcelona. El primer fondo de inversión europeo centrado en la industria cuántica. Invierten en aplicaciones prácticas de conocimiento cuántico profundo.
- ✿ **Quantum2Business - qb**. Con sede en Barcelona. Empresa de consultoría estratégica en torno a tecnologías cuánticas especializada en su difusión, comunicación, eventos, creación de comunidades y recursos humanos.
- ✿ **VLC Photonics**. Con sede en Valencia. Empresa de diseño de chips ópticos que opera de manera sencilla (confiando en fundiciones externas para la fabricación de chips) y pure-play. Brinda soluciones de integración fotónica. Ofrece servicios de integración para múltiples campos como fibra óptica, fotónica de microondas, detección óptica, instrumentación, biofotónica, etc.
- ✿ **Zapata Computing**. Start-up americana que ha decidido poner una de sus sedes en Barcelona. Zapata Computing es una compañía de servicios y software cuánticos lanzada por un grupo de científicos de Harvard. Desarrollan software y algoritmos de computación cuántica para resolver problemas críticos de la industria. Sus oficinas principales se encuentran en The Engine, la incubadora de empresas del MIT en Cambridge.
- ✿ **Q-Lion**. Con sede en Madrid. Tiene como objetivo a construir una computadora cuántica de iones atrapados por RRR, confiable y robusta, a corto plazo. Para ello, plantea utilizar un número pequeño pero suficiente de iones que permitan mejorar los algoritmos clásicos para aplicaciones interesantes que no se pueden resolver con las computadoras actuales.

En cuanto a empresas multinacionales españolas con departamentos que desarrollan y comercializan tecnologías cuánticas y/o post-cuánticas, cabe destacar GMV.

- ✿ **GMV**. Con sede principal en Madrid y oficinas en 9 países, cuenta con un importante departamento de ciberseguridad y telecomunicaciones y ofrece soluciones para sectores como aeronáutica, espacio, automoción, sanidad o banca, entre otros. Están trabajando en soluciones de ciberseguridad cuántica y post cuántica.

- ❁ **Telefónica.** Con sede principal en Madrid. Ha desarrollado, conjuntamente con Huawei y la Universidad Politécnica de Madrid, el primer PoC de encriptación cuántica en una red comercial. Los Doctores Vicente Martín Ayuso de la UPM y Momtchil Peev por Huawei, son los científicos que han hecho posible este importante evento tecnológico en España. Sin duda de lo más relevante que ha ocurrido en torno a las tecnologías cuánticas en España durante el año 2018.

Las multinacionales americanas con sede en España que desarrollan actividad en torno a estas tecnologías son:

- ❁ **Accenture.** Con sede en Madrid. Accenture es líder global y local en servicios profesionales de Estrategia, Consultoría, Digital, Tecnología y Operaciones. Con más de 460.000 empleados en todo el mundo y más de 12.000 de ellos en España, sirve a clientes en 120 países. Accenture, en 2016, en sus laboratorios, comenzó a trabajar con tecnologías cuánticas y a colaborar con compañías como 1Qbit. En 2017 la Firma en España lanzó su equipo de Computación Cuántica que está desarrollando casos de uso con las principales tecnologías cuánticas.
- ❁ **IBM.** Con sede en Madrid. Desarrolla y comercializa su ordenador cuántico en la nube Q Experience. El principal responsable global del programa cuántico de IBM es el Dr. Darío Gil, CVP.
- ❁ **Microsoft.** Con sede en la Torre Agbar de Barcelona. La multinacional americana ha decidido abrir en Barcelona un "Design Center and Quantum Lab."
- ❁ **ATOS.** Con sede principal en Madrid. Comercializan un interesante simulador cuántico.

Otras empresas como Fujitsu, Everis/NTT y Huawei están iniciando su puesta en escena en España, aunque de momento existe muy poca información de sus actividades en este campo.

Mercado de demanda



El **mercado de demanda en España**, todavía es muy incipiente y se centra en algunos pilotos sobre ciberseguridad cuántica para el sector financiero. Unos de los objetivos de este documento es sensibilizar a la demanda para que empiecen a interesarse por estas tecnologías. Caben destacar los sectores de la automoción, aeronáutico y farmacéutico como los más relevantes en la adopción de estas tecnologías. Así mismo, las tecnologías sobre la

ciberseguridad cuántica y post-cuántica, impactarán sin remedio en los sectores de defensa, infraestructuras críticas y financiero entre los 5-7 años próximos.

Entidades del ecosistema cuántico

En cuanto a las entidades, contamos con dos **asociaciones empresariales** que han apostado decididamente por las tecnologías cuánticas.

- ✿ **Quantum World Association - QWA.** Con sede en Barcelona. Organización internacional que cuenta entre sus socios fundadores a empresas de Europa (Entanglement Partners, ID Quantique), Norte América (EvolutionQ) y Australia (H-Bar). Desarrolla un intenso trabajo mediante comisiones tales como el Quantum Mobile Lab, Quantum Blockchain Alliance, Quantum 4Quants, Quantum4Business, QuantumArt Lab y dos más en preparación: QuantumCommissionforPeace y QuantumIA-Machine Learning. Entre sus miembros institucionales podemos destacar a ISACA Barcelona Chapter, la red de Blockchain ALASTRIA, Mobile World Capital, Barcelonaqbit - bqb o Quo Artis.
- ✿ **AMETIC.** Con sede principal en Madrid. Ha creado un Grupo de Trabajo en tecnologías cuánticas dentro de su Comisión de Innovación y, entre otros objetivos, pretende dar a conocer las soluciones tecnológicas cuántica y activar la demanda de las mismas en los distintos sectores de la economía.

Otras entidades sin ánimo de lucro en forma de Think Tank, comunidad on-line, plataforma de coordinación, centro de difusión de la ciencia o asociación de formación son:

- ✿ **Barcelonaqbit - bqb.** Con sede en Barcelona. “The Quantum Information & Cybersecurity Think Tank”. Es el Think Tank más relevante del mundo centrado en tecnología cuántica y sus oportunidades de negocio. Cuenta más de 200 miembros activos y una red de profesionales en LinkedIn y Twitter con más de diez mil contactos especializados en información cuántica. Recoge, analiza, elabora y difunde información relevante para informar a los distintos actores del eQosystem internacional. Barcelonaqbit-bqb ha creado el **Observatorio de tecnologías cuánticas de Latinoamérica, Caribe, España y Portugal**. Barcelonaqbit-bqb también acoge al “**Grupo cuántico de Ribes**” #QuantumSPRibes que, trabaja en la divulgación en torno al arte, ciencia, tecnología y negocio cuánticos.
- ✿ **Q Foundation.** Con sede en Barcelona. Es una iniciativa de The Quantum Revolution Found. La Fundación Q se creó en 2018 con la misión de promover la Mecánica Cuántica a través del diálogo entre especialistas en una gran variedad de áreas. La Fundación busca fomentar actitudes éticas en organizaciones, empresas y personas activas en el campo de la tecnología. Para lograr esto, ofrecemos una plataforma de discusión que nos proporciona un foro para el intercambio de las perspectivas sobre la ética de la vida. El Presidente del Patronato es Jaume Torres.
- ✿ **Observatorio de tecnologías cuánticas de Latinoamérica, Caribe, España y Portugal.** Es una iniciativa de Barcelonaqbit-bqb. Entre sus funciones tiene: Recoge, analiza, elabora y difunde información relevante para los distintos actores del eQosystem de España y Latinoamérica. Tiene como objetivo impulsar entidades de difusión, startups y promover todo tipo de iniciativas con el objetivo de crear mercado en torno a las tecnologías cuánticas. Cuenta con una red de corresponsales en los diferentes países en los que opera: España, Argentina, México, Brasil, Colombia y Chile.
- ✿ **RITCE hbar.** Con sede en Madrid. Una iniciativa del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y el CSIC. Comunidad online de networking de centros y grupos de investigación. Realizan labores de difusión a través de twitter. Está esponsorizado por QUITEMAD y Benasque Science Center.

- ✿ **QUITEMAD.** Con sede en Madrid. El proyecto es un esfuerzo de coordinación de cinco grupos de investigación en cinco centros de la Comunidad de Madrid: GICC de la U. Complutense de Madrid, GIICC de la U. Politécnica de Madrid, MIC de la U. Complutense, El QC & T de la U. Carlos III y CeSViMa. Su objetivo es desarrollar nuevos modelos de computación, simulación y comunicación basados en computación cuántica y criptografía.
- ✿ **Centro de ciencias de Benasque Pedro Pascual.** Con sede en Benasque. Es una instalación para el sistema científico español. Este Centro ofrece la posibilidad de organizar reuniones internacionales en Benasque. Se celebran los más importantes encuentros científicos internacionales en torno a la información cuántica. También realiza una importante labor difusión científica mediante su web, redes sociales, publicaciones y documentales
- ✿ **qbitInstitute.** Con sede en Barcelona. Es una asociación sin ánimo de lucro cuyo objetivo es la formación profesional centrada en tecnologías cuánticas.
- ✿ **SECPHO.** Tiene su sede en Barcelona. SECPHO (Cluster del sur de Europa en fotónica y óptica) es un clúster orientado a los negocios para el sector de la óptica y la fotónica, que reúne a grandes empresas, pymes y centros de investigación alrededor de esta idea fundamental: mejorar la competitividad en el sector de la fotónica y la óptica en el sur de Europa. Es una asociación sin fines de lucro que es propiedad de sus miembros. Lo preside Sara Otero, Rosa M. Sánchez Valero.
- ✿ **EPIC.** Tiene su sede en París pero con fuertes implicaciones en Barcelona. Como parte de la misión EPIC, su Director General, Carlos Lee trabaja en estrecha colaboración con las empresas fotónicas industriales para garantizar un ecosistema vibrante y competitivo, manteniendo una red sólida y actuando como un catalizador y facilitador para el avance tecnológico y comercial. Trae consigo una sólida experiencia en microelectrónica que fue adquirida a través de 15 años de cargos gerenciales en la asociación mundial de la industria SEMI. Carlos pone su extensa red y experiencia en beneficio de los miembros de EPIC para ayudar a las empresas a acelerar su crecimiento y avances tecnológicos a través de la colaboración de la industria.
- ✿ **Consell Quantic de Catalunya.** Impulsado por el Colegio Oficial de Ingeniería Informática de Catalunya.

En cuanto a **centros y grupos de investigación** en torno a información y tecnologías cuánticas podemos destacar:

- ✿ En **Andalucía**, el grupo de la U. Sevilla y el grupo de física atómica y molecular de la U. Granada.
- ✿ En **Aragón** los grupos UniZar-ICMA-CSIC-ARAID.
- ✿ En **Baleares** el IFISC-CSIC.
- ✿ En **Cataluña**, cabe destacar los diferentes grupos de investigación del ICFO, el GIC y el QAOG de la UAB, QuantIC del BSC-UB, El GMMF de la UB-BKC y el BQMCG de la UPC.
- ✿ En **Galicia**, el QG de la U. Vigo.
- ✿ En **Madrid**, los grupos de investigación asociados a QUITEMAD, además de los diferentes grupos del CSIC (ICMM Theoretical Group on Quantum Transport on the Nanoscale, Theory of Quantum effects in novel materials and nanostructures, QUINFOG Quantum Information and Foundations Group, FT - CSIC Theoretical Condensed Matter and Quantum Information, Group on Cryptography and Communication Security, IMM-CNM, Grupo de Dispositivos nano fotónicos, Pablo Aitor Postigo, Comunidad de Madrid

QUITEMAD Research Consortium, IMDEA Nanociencia Quantum NanoDevices, IFIMAC-UAM Carlos Tejedor, Condensed Matter Physics Institute.

- ✿ En **Murcia**, QMBS Quantum Many Body Systems de U. Cartagena.
- ✿ En el **País Vasco**, los diferentes grupos de investigación de UPV/EHU - Ikerbasque y de DIPC.
- ✿ En **Valencia**, el ITEAM Research Institute.



Cabe destacar el proyecto **CUANTIC**, el primer chip cuántico desarrollado en el sur de Europa. El primer qubit de España es fruto de la colaboración entre el Barcelona Supercomputing-BSC y la U. Barcelona.

El MICIU, organiza un encuentro con el sector científico y ahora empresarial a través de AMETIC, en el que se debaten las acciones a tomar en torno al

flagship de la UE. La UE redactó un importante documento sobre el futuro en Europa de estas tecnologías; **QUANTUM MANIFESTO** en el que participó el Dr. Ignacio Cirac. En un año ha aprobado un flagship sobre tecnología cuántica dotado con 1 billón (1.000 millones) de € y ha lanzado el programa QUANTERA.

En **Cataluña**, la Generalitat, a través de ACCIÓ, destinará 24 millones de euros para impulsar seis nuevas comunidades RIS3CAT entre ellas, una sobre tecnologías cuánticas.

A lo largo del año 2017 y 2018 se han celebrado en España numerosos **“EnQuantros Cuánticos”**: La participación de Entanglement Partners, Barcelonaqbit-bqb y la QWA en el MWC16, MWC17 y MWC18, los encuentros internacionales sobre ciencia cuántica en el centro de Benasque Pedro Pascual, la jornada #QuantumPoblet en la que se anunció la formación de la Quantum Blockchain Alliance o el importante simposio internacional celebrado en Bilbao a principios de 2018.

Uno de los principales objetivos del eQosistema cuántico de España es impulsar la creación de una “ingeniería cuántica” dentro de la oferta de estudios universitarios, tal y como tienen otros países punteros en estas tecnologías como Estados Unidos, Canadá o Reino Unido.

En estos momentos, en cuanto a formación, a parte de las jornadas de formación de qubitInstitute, se puede cursar un Posgrado sobre tecnologías cuánticas en Barcelona, organizado por la UPC School y Entanglement Partners SL, o la formación que IBM y la ETSE de la U. Valencia imparten sobre “Introducción a la Computación Cuántica con IBM Q Experience”.

Entre algunas de las publicaciones y libros de divulgación sobre ciencia y tecnologías cuánticas de 2018, cabe destacar “CUANTICA” del Dr. José Ignacio Latorre, “La puerta de los tres cerrojos” (novela dirigida al público juvenil) de la Dra. Sonia Fernández Vidal o el manual de “Problemas sobre física cuántica para ingenieros” de la Dra. Nuria Ferrer y el estudiante de doctorado David Arcos.

Podemos concluir que en los últimos años se ha desarrollado en España un ecosistema cuántico incipiente en cuanto a empresas y startups (focalizado en Barcelona y Madrid) y más consolidado, pero excesivamente fragmentado en cuanto a centros de investigación, universidades y sus grupos cuánticos. El sector sigue pidiendo un gran proyecto nacional liderado por el Estado que sea la punta de lanza para el desarrollo de la ciencia y las tecnologías cuánticas y no dependa en su financiación exclusivamente de nuestra participación en el flagship europeo.

Esperamos que este documento ponga en valor todas las iniciativas y esfuerzo que muchos profesionales del ámbito público y privado están haciendo para dar un impulso a la creación de nuevas iniciativas empresariales, de un incipiente mercado y, sobre todo, para que España no quede relegada a una potencia de segunda en cuanto a ciencia y tecnologías cuánticas.

¿Qué puede hacer mi empresa? ¿Cómo me puede ayudar AMETIC?

Plan a corto y medio plazo (1-3 años): actividades que se pueden realizar

Como estamos viendo, las tecnologías cuánticas van a suponer una auténtica revolución en computación. Será un mercado emergente donde, por su complejidad e inmadurez, obtener un correcto conocimiento y asesoramiento va a ser primordial de cara a poder aprovechar las evoluciones que se están produciendo y se producirán en los próximos años. Todas las compañías que quieran y necesiten mantenerse cercanas a estas tecnologías, de todos los sectores industriales, deberán definir sus planes a corto y estratégicos si no quieren perder esta nueva revolución computacional o arriesgarse al desfase y la pérdida de competitividad en el mercado frente a compañías que están ya posicionándose en estos ámbitos.



Algunas de las tecnologías cuánticas que se encuentran más desarrolladas, como pueden ser las tecnologías de sensores o comunicaciones, ya están empezando a estar disponibles para su implementación industrial. La situación respecto a computación cuántica es más inmadura, pero su evolución se espera que sea rápida. En cualquier caso, es el momento para que las compañías empiecen a definir desde ahora su estrategia y posicionamiento

sobre estas tecnologías. Las compañías que den un paso adelante, innovando y preparándose para esta revolución en la computación, podrán capitalizar las oportunidades que estas tecnologías traerán al mercado.

Por ello, es importantísimo que el mundo industrial y sus líderes sean conscientes de la transformación que se va a producir. Los directivos deben preparar a sus compañías para asegurar que sus negocios van a poder aprovechar esta próxima revolución tecnológica. La adaptación del negocio es obligatoria si se quiere competir en un mercado donde los principales jugadores están ya apostando por el cambio.

Se deberán planificar las estrategias de inmersión cuántica en base a unos planes de acción, que deberán abordar cómo se realizará la transformación a corto plazo y desde un punto de vista estratégico.

El plan de acción que se defina a **corto plazo** ha de tener como objetivo preparar a la organización para el cambio y definir los primeros casos de uso de aplicación práctica inmediata. Por lo cual, la contextualización del negocio en el mundo cuántico es la primera y más importante parte de esta inmersión. Saber a qué procesos de negocio pueden afectar las tecnologías, cómo cambiarán éstos o conocer de qué herramientas se disponen son algunas de las tareas que las compañías deben realizar si se quieren preparar para este nuevo entorno. A corto plazo recomendamos definir y lanzar las siguientes iniciativas:

1. Empezar identificando y formando algunas **personas o equipos claves** en estas disciplinas técnicas con el objetivo de conocer las distintas herramientas y tecnologías disponibles, así como entrar en contacto con el ecosistema existente. Entender cómo es el funcionamiento de los ordenadores cuánticos es un proceso complejo y bastante anti-intuitivo, así que es muy importante comprender cómo operar con estos dispositivos si se quiere hacer un correcto uso de ellos. Tener personas cualificadas con este perfil tan específico, que comprendan los fundamentos de la física cuántica y puedan aplicarlos al mundo computacional, es clave si se quiere obtener el máximo del potencial que ofrecen estas tecnologías. Conocer las herramientas de las que se dispone en el mercado es también un aspecto fundamental de esta iniciativa.
2. Con esta inicial base técnica, identificar áreas, procesos o casos de uso de valor dentro de la compañía, donde la aplicación de estas tecnologías puede marcar la diferencia a corto plazo (quick-wins). Es muy importante identificar dónde la computación cuántica es diferencial y cómo se traduce esa diferencia en el área de negocio. La computación cuántica será más potente en procesos de cálculo exigentes. Se debe, pues, determinar en qué puntos exactamente de los procesos se podría alcanzar la supremacía cuántica, y en qué puntos la computación clásica continúa teniendo sentido.
3. Establecer unos proyectos de implantación y prueba de dichas tecnologías que ayuden al resto de la organización en su conocimiento, entendimiento y aceptación. Estos proyectos, con duraciones y alcances limitados, y tomando ventaja de las tecnologías seleccionadas como más adecuadas para el caso a implementar, deben tener unos objetivos y recursos realistas para asegurar la obtención de los objetivos fijados. Un correcto plan de comunicación interno del programa y sus resultados ayudará igualmente al conocimiento y concienciación en la organización.
4. Definir una hoja de ruta para el escalado de esos casos de uso en función de la evolución de las tecnologías cuánticas empleadas. Así se mantendrán y evolucionarán los casos de uso buscando el máximo impacto posible de estas nuevas tecnologías sobre el negocio, a la vez que se continúa con la formación, comunicación y concienciación dentro de la compañía.

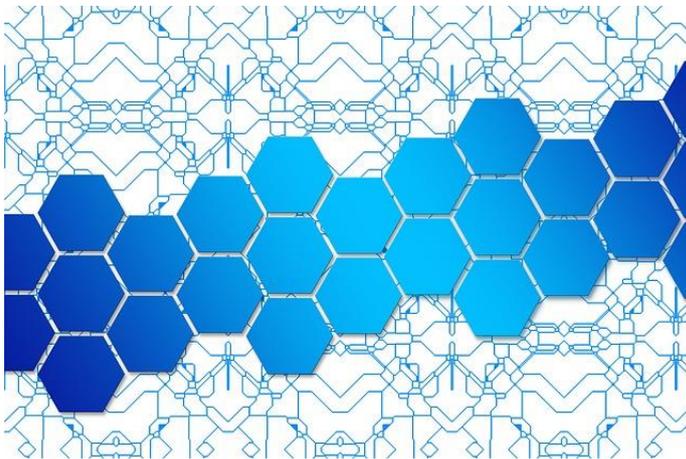
Por otra parte, el **plan estratégico** ha de preparar a la organización para los cambios y oportunidades que van a llegar en los siguientes años. Hay que estar al corriente de las evoluciones técnicas que están sucediendo y van a suceder en breve, y entender el panorama de ayudas, legal y de mercado donde nos vamos a mover en esos plazos. Todo con las miras puestas en aprovechar las tecnologías como ventaja competitiva para la evolución y crecimiento del negocio. Es decir, la clave de este plan es una continua actualización de la contextualización del mercado y la tecnología para no perder ninguna ventaja competitiva. Con estos objetivos recomendaríamos definir y lanzar las siguientes iniciativas:

1. La primera recomendación está muy relacionada con la última anterior: el diseño de una hoja de ruta estratégica que incluya los planes a corto descritos anteriormente con un punto de vista más estratégico para la compañía. Este plan incluirá asimismo la evaluación de potenciales socios, de oportunidades nuevas de negocio, la decisión sobre la exploración de nuevas tecnologías emergentes, el diseño y la supervisión de los planes definidos a corto, la aprobación de las acciones propuestas y los proyectos singulares a lanzar, la definición de las políticas de comunicación interna y externa, la formación de la organización, el despliegue y transformación de los procesos de negocio impactados, las inversiones a realizar, y un largo etcétera.

2. Todo esto nos lleva igualmente a la identificación de un comité de personas que supervisen la ejecución de los planes y reporte los resultados a los líderes de la organización. La participación de personas relevantes y de reputación dentro de la organización es clave para asegurar el éxito de la iniciativa. Negocio, tecnología y dirección deberían estar representados en este comité.
3. Finalmente, la última sugerencia de este plan estratégico sería la búsqueda de la aplicación de múltiples tecnologías cuánticas para asegurar que sus distintas evoluciones se aprovechan en la construcción de soluciones basadas en computación cuántica. Esto implica la definición de una estrategia de arquitectura técnica para la organización, que permita integrar las distintas tecnologías existentes con el objeto de aprovechar las distintas características y evoluciones de estas tecnologías a través de una capa de abstracción sobre los distintos modelos de computación cuántica. De este modo, los casos de uso se podrán implementar en el negocio teniendo en cuenta las distintas herramientas que se disponen en el mercado, y así poder elegir la opción más eficiente y adecuada para cada caso, o incluso combinarlas.

El papel de AMETIC

AMETIC es la patronal representante del sector de la industria tecnológica digital en España. Está formada por empresas asociadas de todos los tamaños e incluyen grandes empresas globales de Tecnologías de la Información, Telecomunicaciones, Electrónica, Servicios y Contenidos Digitales y empresas líderes en transformación digital, así como otras asociaciones tecnológicas adheridas a AMETIC. Este gran conjunto de empresas constituye una palanca real de desarrollo económico sostenible que genera empleo de calidad, incrementa la tasa nacional de exportación, revaloriza a nuestro país y a su industria y contribuye a incrementar la



competitividad de otros sectores. Las colaboraciones de AMETIC con asociaciones sectoriales de otras industrias, como automoción, aeronáutica, sector agrícola y de alimentación y bebidas, sanidad, turismo, sector financiero, manufacturero, etc., son cada vez más frecuentes y un claro indicativo de la tendencia a la digitalización de los principales segmentos económicos del país.

Estas relaciones cada vez más estrechas entre oferta y demanda tecnológica se manifiesta no solo en las relaciones comerciales y el interés por la adquisición y uso de las tecnologías maduras disponibles, sino también en consorcios para la realización de proyectos de I+D+i en los que los usuarios finales juegan un papel crucial en los nuevos desarrollos.

El Grupo de Trabajo de Información, Computación y Ciberseguridad Cuánticas creado en el seno de la Comisión de innovación de AMETIC es la respuesta de la patronal TIC a la importancia creciente de las tecnologías cuánticas y que pretende complementar el enfoque científico de las mismas con la componente de aplicación en mercado.

A nivel nacional, AMETIC es miembro del Grupo Director en Tecnologías Cuánticas impulsado por la Agencia Estatal de Investigación y la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. A nivel europeo, AMETIC es miembro del *Strategic Advisory Board for the Quantum Technology* de la Comisión Europea. Esta posición permite a AMETIC actuar como triple bisagra en la defensa de los intereses de nuestras empresas: por una parte, entre oferta y demanda tecnológica; por otra parte, entre entidades públicas y sector privado; y, finalmente, entre las estrategias nacionales y europeas. Así, se maximiza la capacidad del Grupo de Trabajo de Información, Computación y Ciberseguridad Cuánticas en la difusión del potencial de las tecnologías cuánticas y en la contribución a las estrategias y acciones necesarias para su desarrollo en los ámbitos de I+D y de mercado. Compartimos el objetivo de hacer avanzar el tejido empresarial español hacia una posición de liderazgo en tecnologías cuánticas. Este liderazgo debe contemplar la doble componente de aplicación (mejorar la competitividad de las empresas en sectores como banca, automoción, sanidad, farmacéutico, aeronáutica, etc. gracias a la adopción de soluciones basadas en tecnologías cuánticas) y de oferta (aumentar las empresas proveedoras de estas tecnologías, así como su catálogo).

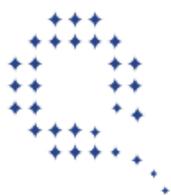
Vías de financiación de las tecnologías cuánticas

El Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación (PEICTI) desarrolla la Estrategia Española de Ciencia y Tecnología y de Innovación, que a su vez está alineada con la estrategia europea, a través de diferentes programas y ayudas. Aunque el actual PEICTI (2017-2020) no recoge expresamente las tecnologías cuánticas, sí que éstas tienen cabida tanto en el Programa Estatal de Generación de Conocimiento y Fortalecimiento Científico y Tecnológico del Sistema de I+D+i, donde cabría desarrollar la componente más científica, como en el Programa Estatal de Liderazgo Empresarial en I+D+i, en tanto que las tecnologías cuánticas pueden actuar como tecnologías habilitadoras.

En nuestro entorno europeo, incluyendo estados miembros y asociados, varios países cuentan con programas de apoyo específicos para cuántica: Israel, Reino Unido, Austria, Dinamarca, Alemania, Francia y Holanda. El resto de países, incluido España, las oportunidades para cuántica se reducen a programas más generalistas o a esquemas *bottom-up*. En algunos casos, entre los que se encuentra nuestro país, se está estudiando la posibilidad de crear un instrumento de apoyo específico a la I+D+i en cuántica. Es destacable el caso de Reino Unido y su Programa Nacional de Tecnologías Cuánticas, que ha invertido 400 millones de libras en el periodo 2014-2019 y planea una siguiente fase orientada a la comercialización de estas tecnologías. Con respecto a España, se estima que en el periodo 2015-2017 se han invertido unos 20 millones de € en proyectos relacionados con tecnologías cuánticas; aunque es una cifra difícil de evaluar al tratarse de un agregado de proyectos de distintas convocatorias generalistas, sí supone una buena orientación sobre el orden de magnitud de esta inversión.

Convocatorias europeas en tecnologías cuánticas

A nivel europeo, destacan la red **QuantERA**¹⁶ y el **Quantum Flagship**¹⁷ como instrumentos de apoyo dirigidos específicamente a tecnologías cuánticas.



El esquema ERA-NET europeo está diseñado para fomentar la cooperación y coordinación entre los estados en materia de investigación. España ha participado

y participa en un buen número de ellas, abarcando muy diversos ámbitos: biodiversidad, cambio climático, astronomía, TIC, biotecnología, salud, materiales, física nuclear y un largo etcétera). **QuantERA** es una red ERA-NET formada por 26 países que da soporte a proyectos de investigación internacionales en tecnologías cuánticas. QuantERA ha puesto en marcha dos convocatorias, ambas ya cerradas, pero con ejecución por delante, la primera en 2017 y la segunda en 2019.

La primera convocatoria QuantERA ha financiado 26 proyectos por un importe total de 32 millones de €. Seis de estos proyectos cuentan con participación española. La segunda convocatoria prevé movilizar 20 millones de €.

¹⁶ <https://www.quantera.eu/>

¹⁷ <https://qt.eu/>



Las Iniciativas de Investigación Emblemáticas de las Tecnologías Futuras y Emergentes (o FET Flagships en inglés) abordan grandes retos científicos y tecnológicos de futuro, de carácter

interdisciplinario a gran escala, y requieren la colaboración y participación de grupos de investigación interdisciplinares. La Comisión Europea ha puesto en marcha iniciativas FET Flagship en grafeno, cerebro humano y, desde finales de 2018, en tecnologías cuánticas: la Quantum Flagship. Abarca una ventana temporal de 10 años y prevé la puesta en juego de 1.000 millones de €. La primera convocatoria (2018) ha supuesto 132 millones de € repartidos en 20 proyectos, y se espera una próxima convocatoria para 2020. Con respecto a los resultados de la primera convocatoria, España se sitúa en quinto lugar, con un retorno ligeramente superior a los 8 millones de €.



En 2019, EUREKA¹⁸ ha lanzado una nueva convocatoria de proyectos en Inteligencia Artificial y Tecnologías Cuánticas¹⁹. EUREKA es una red intergubernamental de cooperación internacional que apoya proyectos de I+D orientados a mercado. Aunque por lo general apoya proyectos en consorcio formados por varios

países, la financiación que obtiene cada empresa es nacional. En el caso de España, CDTI es la principal agencia financiadora EUREKA. La convocatoria responde por lo tanto al instrumento de financiación CDTI, basado en crédito parcialmente reembolsable. La convocatoria está abierta hasta el 1 de julio de 2019.

Oportunidades nacionales

El desarrollo de un instrumento de apoyo a la I+D+i en Tecnologías Cuánticas a nivel nacional sería deseable para el desarrollo del ecosistema en nuestro país, su alineamiento y el aprovechamiento de las capacidades disponibles en la parte científica y en la empresarial, tanto en oferta tecnológica como en demanda y potencial de aplicación en sectores claves de nuestro país. Dentro de los instrumentos actuales de apoyo a la I+D+i pueden tener cabida, con distinta orientación y rango de TRL, existe un amplio abanico de opciones que, en cualquier caso, requieren un estudio detallado para asegurar su adecuación:

- **Proyectos de I+D de CDTI (PID).** Instrumento de apoyo empresarial a la I+D de amplio espectro temático, basado en créditos parcialmente reembolsables.

¹⁸ <https://www.eurekanetwork.org/>

¹⁹ <https://www.eurekanetwork.org/content/call-project-ai-and-quantum-technologies-10-countries>

- **NEOTEC de CDTI.** Instrumento orientado a startups de reciente creación y altamente tecnológicas, que ofrece unas condiciones de financiación muy favorables basadas en subvención a fondo perdido.
- **Convocatoria de Tecnologías Habilitadoras Digitales (THD).** Gestionadas por la Secretaría de Estado de Avance Digital, se trata de un programa exclusivamente orientado a las tecnologías digitales. Incluye varios ámbitos susceptibles de proponer desarrollos basados en cuántica, como blockchain o bases de datos distribuidas, supercomputación o ciberseguridad, entre otras.
- **FEDER Interconecta:** instrumento gestionado por CDTI, de carácter regional. Tiene por objetivo potenciar la generación de capacidades innovadoras en las regiones menos desarrolladas a través de la financiación de proyectos de desarrollo experimental realizados por consorcios empresariales.
- **Retos-colaboración:** dentro del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad, financia proyectos en cooperación entre empresas y organismos de investigación, con el fin de promover el desarrollo de nuevas tecnologías, la aplicación empresarial de nuevas ideas y técnicas, y contribuir a la creación de nuevos productos y servicios.

Además de estos y otros instrumentos de financiación, los programas de apoyo a la incorporación de doctores como el Torres Quevedo resulta de interés para los proyectos en cuántica, con un alto requerimiento en la componente de talento. También son un pilar importante los esquemas de deducciones fiscales a la I+D+i aplicables en España.

Recursos cuánticos: posibilidades para experimentar

A lo largo de los últimos años, muchas grandes compañías (IBM, Microsoft, Google, etc.) han invertido importantes cantidades para competir en la carrera por la mejor o más exitosa tecnología cuántica. Por supuesto, muchas otras startups y pequeñas compañías (Rigetti, IonQ, IDQuantique...) se han creado alrededor del boom sobre las tecnologías cuánticas.

Por ello, y debido a la escasez de profesionales en este sector, muchas de estas compañías ponen a disposición de los profesionales y la Academia algunas de las herramientas y recursos que van creando, con objeto de fomentar el conocimiento y ayudar a crear una comunidad de interés, especialmente de desarrolladores, que acelere la adopción y extensión de las tecnologías cuánticas.



A continuación, se detallan algunas de estas compañías (en orden alfabético), junto con los recursos y materiales que ofrecen:

- ⚗ **DWAVE - Ocean:** D-WAVE, además de comercializar el ordenador cuántico adiabático más grande del planeta (2048 qubits), también pone a disposición de los usuarios su software Ocean. Se trata de un framework que realiza minimizaciones de funciones QUBO. Para ello se basa en el teorema adiabático y el efecto túnel cuántico (los principios en los que se sustentan los adiabatic quantum computers). En él se pueden formular funciones Ising que luego se minimizarán para resolver un problema de negocio real. *Más información:* <https://ocean.dwavesys.com/>
- ⚗ **ETH Zurich - ProjectQ:** Componente software, con lenguaje de programación propio, con un nivel de abstracción superior a la mayoría de los descritos y con vocación de desplegar el circuito construido en distintos hardwares y softwares, como puede ser Qiskit o Cirq. *Más información:* <https://projectq.ch/>
- ⚗ **Fujitsu:** esta compañía opta por realizar el mismo cálculo que realiza un ordenador cuántico adiabático, pero a través de un circuito digital clásico (Digital Annealer). *Más información:* <http://www.fujitsu.com/global/digitalannealer/>
- ⚗ **Google - Cirq:** Google propone una API capaz de construir circuitos cuánticos y simularlos en procesadores cuánticos de corto plazo (Noisy Intermediate Scale Quantum computers – NISQ). También apuesta por Quantum Chemistry como principal área de

aplicación. Muestra de ello es el módulo complementario OpenFermion donde tiene ya diversos algoritmos químicos implementados. *Más información:* <https://ai.google/research/teams/applied-science/quantum-ai/>

✿ **IBM - Qiskit:** IBM propone un ordenador de puertas cuánticas (gate-model quantum computer), Dispone de una arquitectura de desarrollo con distintos módulos donde cada uno tiene una función:

- **Terra:** módulo enfocado a la creación de circuitos cuánticos.
- **Aer:** módulo específico para el simulador cuántico de alto rendimiento.
- **Aqua:** algoritmos cuánticos ya implementados a los cuales se pueden modificar los parámetros característicos.
- **Ignis:** se encarga de corrección de errores (ya que cuando la coherencia aumenta, será más importante mitigar los errores que se producen intrínsecamente en los cálculos).

Más información en: <https://qiskit.org/>

✿ **Microsoft - Q#:** Q Sharp es el lenguaje de programación que ha creado Microsoft como propuesta para entornos cuánticos. Aun no dispone de un ordenador físico, pero han creado un simulador cuántico de alto rendimiento capaz de simular localmente más de 30 qubits, y en su nube, más de 40 qubits. *Más información:* <https://www.microsoft.com/en-us/quantum/development-kit>

✿ **Rigetti - Forest:** Rigetti propone su software Forest para la implementación de circuitos cuánticos. Éste se compone principalmente de dos frameworks: pyQuil, su compilador propio; y su Quantum Virtual Machine, simulador cuántico local. Dispone de un entorno capaz de simular e ir midiendo la función de onda del circuito, así como también ejecutar el sistema como si se tratara de un ordenador cuántico real. *Más información:* <https://rigetti.com/forest>

Acabamos de nombrar los softwares cuánticos más posicionados en el mercado actual. No obstante, en el mercado hay muchos otros que también pueden ser prometedores, han publicado algunos recursos y pueden ser de interés:

- ✿ **PennyLane – Xanadu** (<https://pennylane.ai/>);
- ✿ **QuTip** (<http://qutip.org/>);
- ✿ **Raytheon** (<https://github.com/BBN-Q>);
- ✿ **Quantum Inspire – QuTech** (<https://www.quantum-inspire.com/>);
- ✿ **Qulacs – Kyoto University** (<https://github.com/qulacs/qulacs>);

Esta corta lista no es ni extensiva, ni completa, ni lo pretende. Cada día aparecen nuevas compañías, universidades o grupos de interés publicando materiales, herramientas, descubrimientos, inventos o desarrollos.

Para aquellas personas interesadas en estas nuevas áreas técnicas, estar en los círculos en los que se publican estos nuevos recursos, así como una atenta escucha a las últimas novedades publicadas, es más importante que en otras áreas de la computación, por el especial momento que se está viviendo en el mercado, y el nivel de inmadurez de estas disciplinas.

Recomendaciones

Como colofón a la panorámica expuesta de la España cuántica en este informe, y con el objetivo de crear un entorno favorable para el desarrollo de estas tecnologías y de su impacto en nuestra industria y economía, recopilamos una serie de recomendaciones que, desde AMETIC, consideramos necesarias y abordables.

Se proponen las siguientes recomendaciones para la Administración:

- ✿ **Incluir las tecnologías cuánticas de manera específica en la Estrategia Estatal de I+D+i** para el nuevo periodo 2021-2027, tanto en su vertiente científica como en su componente de desarrollo industrial y de innovación y aplicación para los sectores usuarios. En particular, sería deseable contar con un **programa de apoyo a las tecnologías cuánticas** siguiendo el modelo de otros países como Reino Unido.
- ✿ **Crear un programa español de talento cuántico**, que contribuya a localizar al talento cuántico español en la diáspora internacional y atraerlos a proyectos en España, así como a fijar a los ingenieros, matemáticos y físicos que ya trabajan en nuestro país. Este programa debe avanzar, también, en la inclusión en los planes de estudios superiores de una **ingeniería cuántica**, tal y como ya se dispone en otros países. Por último, el programa debe realizar acciones para **incentivar las vocaciones STEM** en los niños y jóvenes, incluyendo las tecnologías cuánticas.
- ✿ Considerar el nuevo paradigma que abren las tecnologías cuánticas en la **ley de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación**, de manera que pueda actuarse con agilidad en caso de requerir adaptaciones para garantizar un impulso sin trabas para el desarrollo de las tecnologías cuánticas y sus aplicaciones.
- ✿ **Fomentar la formación del ecosistema cuántica nacional** incluyendo administraciones, científicos, tecnólogos y empresarios. Mantener un canal de comunicación abierto entre los distintos actores con el objetivo de construir y ejecutar juntos las estrategias país relativas al desarrollo de la cuántica y a su impacto.

Para el sector privado, compañías de oferta tecnológicas y empresas en los diferentes sectores de aplicación, recomendamos:

- ✿ Conformar y mantener actualizado un **catálogo de oferta de soluciones innovadoras en tecnologías cuánticas**.
- ✿ Contribuir a la creación del **ecosistema de la España cuántica y de su mercado**.
- ✿ **Mantenerse actualizado sobre las oportunidades de financiación pública** nacional y europea en los diferentes programas, como el Quantum Flagship, y maximizar su aprovechamiento.
- ✿ **Mantenerse actualizado sobre la oferta disponible** y aplicable a distintos sectores usuarios, de manera que las empresas de banca, farmacia, aeronáutica, automoción, comunicaciones, seguridad, etc., puedan aprovechar estas soluciones para mejorar su competitividad.



Con la colaboración de:



Únete al grupo de Tecnologías Cuánticas de AMETIC

Escríbenos a innovacion@ametic.es