

ESTUDIO DE SITUACIÓN ACTUAL
DE LA COMPUTACIÓN CON
**TECNOLOGÍAS
CUÁNTICAS**


ESTRATEGIAS Y PROPUESTAS DE FUTURO
E IMPACTO EN EL DESARROLLO
DE NUEVAS COMPETENCIAS PROFESIONALES.



Índice

ESTUDIO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA COMPUTACIÓN CON **TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS**

Pag. 007	1 Resumen ejecutivo.
Pag. 015	2 Geoestrategia de la revolución cuántica.
Pag. 019	3 Tecnologías cuánticas.
Pag. 031	4 Impacto en sectores económicos.
Pag. 049	5 Quién es quién en tecnologías cuánticas.
Pag. 069	6 eQosistema actual en España.
Pag. 083	7 Propuesta para el desarrollo de una estrategia cuántica.
Pag. 093	8 Impacto de las tecnologías cuánticas en el desarrollo de nuevas competencias profesionales.
Pag. 101	9 Conclusiones y propuestas de formación a corto plazo.
Pag. 121	10 Anexos.



Estudio de la situación actual de la computación con
TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

Estrategias y propuestas de futuro e impacto en el desarrollo
de nuevas competencias profesionales.

Estudio completado en enero 2020

2020 Gobierno de La Rioja

Edita: Centro Nacional de Formación en Nuevas Tecnologías
Gobierno de La Rioja

Financia:

Ministerio de Educación y Formación Profesional.
Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social
Servicio Público de Empleo Estatal

Depósito legal: LR 163-2020

Impreso en España - Printed in Spain

Reservados todos los derechos.

PRÓLOGO

El Centro Nacional de Formación en Nuevas Tecnologías, Think-TIC, fue calificado en el año 2015 como Centro de Referencia Nacional de Sistemas Informáticos y Telemática en el ámbito de la Formación Profesional. Dentro de sus objetivos está el de observar la evolución y las necesidades de cualificación del sistema productivo y contribuir a la actualización y desarrollo de la formación de los profesionales para adaptarla a dichas necesidades.

Desde este punto de vista, se vienen realizando diferentes acciones y estudios, entre los que se destacan los realizados en seguridad informática en las empresas riojanas, disponibles en la página web del Gobierno de La Rioja. La finalidad de estas actuaciones es seguir experimentando y actualizando los contenidos formativos del Centro para mantenerse actualizados a las demandas actuales del tejido productivo.

En esta ocasión se da un paso más, con un nuevo reto que abre nuevas expectativas y oportunidades a los más inquietos y teniendo como antecedentes el Quantum Flagship que la Unión Europea presentaba en Viena el año 2018, donde se dotó de un presupuesto de 1.000 millones de euros para financiar desde Europa la investigación e innovación a gran escala. El objetivo no es otro que transferir la investigación sobre física cuántica del laboratorio al mercado. Un reto ambicioso para conseguir, en los próximos 10 años, situar a Europa a la vanguardia de la segunda revolución cuántica que empieza a vivirse en todo el mundo. Una segunda revolución que será un largo recorrido, lleno de oportunidades, desafíos y uso de nuevas aplicaciones con dichas tecnologías cuánticas todavía por descubrir. Algunas de ellas ya se pueden vislumbrar, como todas aquellas que pasan por la concepción de nuevas estrategias que salvaguarden la seguridad digital y física de los dispositivos y artefactos en general y las personas en particular.

La Consejería de Desarrollo Autonómico es consciente de la transformación digital que se está viviendo en la sociedad y las empresas independientemente del tamaño y sector. Así, se presenta el siguiente estudio de la computación cuántica con el objetivo de que sirva de base para explorar un campo formativo de vanguardia, junto con la búsqueda de las herramientas más viables, el conocimiento de los procedimientos y prácticas más adecuadas y el desarrollo de una estrategia de divulgación y comunicación para todo el tejido productivo.

Esta actuación está alineada con el V Plan Riojano de I+D+I que identifica en su línea estratégica "Sociedad innovadora" la necesidad de que la sociedad mantenga una alta cualificación en ciencia y tecnología, incrementar la formación continua en las empresas convirtiéndola en factor de competitividad y lograr una sociedad conectada utilizando las TIC como herramienta básica de la comunicación y de actividad económica. Dentro de esta línea se definen varios programas de trabajo que reflejan explícitamente los tres ejes verticales propuestos en la Agenda Digital de La Rioja en los que también se potenciará la vigilancia tecnológica y competitiva para analizar necesidades de formación en las empresas.

Se quiere destacar el trabajo conjunto realizado por los expertos en tecnologías cuánticas de Entanglement Partners y el Think-TIC en la realización de dicho informe y el apoyo del Consejo Social del Centro de Referencia Nacional. Esta acción está financiada por el Servicio Público de Empleo Estatal dentro del plan de trabajo 2017-2018 del Centro de Referencia Nacional de Sistemas y Telemática fruto del convenio de colaboración entre el SEPE, el Ministerio de Educación y Formación Profesional con la Comunidad Autónoma de La Rioja.



1

Resumen ejecutivo

El **Centro Nacional de Formación en Nuevas Tecnologías, Think-TIC**, certificado en el año 2015 como **Centro de Referencia Nacional de Sistemas y Telemática** en el ámbito de la Formación Profesional, tiene entre sus objetivos observar la evolución y las necesidades de cualificación del sistema productivo y contribuir a la actualización y desarrollo de la formación profesional para adaptarla a dichas necesidades. Con estas premisas, entre las diversas acciones de divulgación sobre nuevas tendencias tecnológicas, destacamos dos jornadas que suscitaron un interés inusitado entre los profesionales riojanos, *“la Computación Cuántica... o cómo revolucionar los negocios de hoy”* y *“acércate a las tecnologías frontera, ¿vas a perderte el futuro? Oportunidades de las tecnologías cuánticas”* del año 2017 y 2018 respectivamente. Dado el carácter experimental de dichas tecnologías cuánticas y teniendo en cuenta la rápida evolución de las mismas se consideró oportuno elaborar el presente estudio. Se debe ser consciente de que es un documento vivo ya que día a día hay nuevos avances en un campo donde la evolución tecnológica en general parece acercarse al mundo cuántico confirmando que estas tecnologías han venido para quedarse.

Este documento pretende cumplir tres objetivos fundamentales: ayudar a la **difusión del estado actual** de esta tecnología y sus impactos reales, establecer principios claros para conformar una posible **estrategia de inmersión** en esta disciplina y realizar **propuestas formativas** concretas para comenzar a trabajar en ella. Propuestas para mejorar en lo posible las actuaciones actuales y las que sin duda se afrontarán en los próximos años para no quedar fuera de la

evolución imparable de una de las tecnologías verdaderamente disruptivas y que cambiarán significativamente el entorno: la ciencia y tecnologías cuánticas. Entre otras propuestas, se recomienda el impulso de nuevos programas formativos que ayuden a los profesionales a acercarse a estas tecnologías y adquirir las competencias necesarias para poder trabajar en uno de los mercados que se prevén con mayor potencial de expansión en los próximos años.

El documento se divide en capítulos que ayudan desde el principio a entender las tesis y propuestas que se desarrollan. Una descripción geoestratégica de la revolución cuántica en el mundo y de las iniciativas de organismos internacionales que ponen el foco en la utilización de las tecnologías cuánticas con fines pacíficos. Descripción detallada de los tipos de tecnologías cuánticas actuales y los principios científicos en las que se sustentan. Impacto actual y prospectivo en diferentes sectores económicos. Descripción de la situación actual y su evolución prevista en todos los países de referencia y las colaboraciones internacionales que se han establecido. Una detallada descripción de la situación actual en España que se complementa con un capítulo que desarrolla diferentes propuestas en la implantación de estrategias en ámbitos nacionales para este tipo de tecnologías cuánticas. Un capítulo dedicado al impacto de las tecnologías cuánticas en el desarrollo de nuevas competencias profesionales desde la óptica de estudios reglados y formación técnica profesional. Para finalizar, una propuesta de cinco programas de formación. Se añaden anexos que contienen la información necesaria para definir las tesis y propuestas del documento.

Premisas y consideraciones previas.

Los aspectos más relevantes del documento se comentan brevemente a continuación. Se parte del hecho de que existe una carrera en el conocimiento y aprovechamiento de las tecnologías cuánticas y algunos hablan de ciberguerra entre la República Popular China y EEUU, donde China se encuentra tomando ventaja. Las tecnologías cuánticas y en especial la ciberseguridad y encriptación se convierten en un arma estratégica. La teoría dice que si se dispone de un ordenador cuántico lo suficientemente potente (1.500 qubits), este podría factorizar números primos utilizando el algoritmo cuántico de P. Shor y sería capaz de descifrar documentos encriptados con el protocolo RSA, que actualmente son la mayoría, accediéndose a información confidencial y tomando provecho de la misma.

Los tiempos de adopción para el mercado de las tecnologías cuánticas se están reduciendo drásticamente gracias a las grandes inversiones gubernamentales de algunos países como los mencionados y grandes corporaciones multinacionales. Analistas y consultoras como Gartner, IDC, Boston Consulting Group o McKinsey sitúan **los tiempos de adopción entre 5 y 10 años como media entre las diferentes áreas y tecnologías.**

¿Cómo afectaría a la privacidad de la ciudadanía? Para dar con una correcta respuesta a esta pregunta y sus implicaciones han de implicarse muchos agentes y organizaciones internacionales para velar por el secreto y privacidad de los ciudadanos de todo el mundo. A su vez es una buena oportunidad para fomentar la utilización de las tecnologías cuánticas en la resolución de los problemas existentes en asuntos relacionados con el cambio climático, los recursos alimenticios, la salud y la mejora de la vida.

Actualmente se está de lleno en la **tercera “revolución cuántica”**. La **primera** tuvo lugar a finales del s.XIX y principios del s.XX. Puso

las bases teóricas para construir un nuevo paradigma científico; la mecánica cuántica. La **segunda** revolución se sitúa en la segunda mitad del s.XX, con la utilización de algunos principios de la mecánica cuántica para crear nuevos productos. El láser es un buen ejemplo que permitió crear los lectores de CD. ¿Qué ha pasado en los inicios del s.XXI para que todo se precipite? La comunidad científica ha conseguido “parar” una partícula tal y como dicen los físicos teóricos; de forma “*astuta y elegante*”.

Con este logro científico -astuto y elegante- de primera magnitud y que ha pasado desapercibido para el gran público, combinado con los principios de la mecánica cuántica como el de superposición y entrelazamiento, muchas instituciones, organismos y empresas se han lanzado en una loca carrera para construir un ordenador cuántico. En la actualidad, se puede afirmar que los ordenadores cuánticos ya han alcanzado a los superordenadores en algunas cuestiones concretas. Es el efecto que se conoce como “**supremacía cuántica**”.

Para construir ordenadores cuánticos se están explorando numerosas tecnologías entre las que se destacan: trampa de iones, circuitos superconductores, partícula de Majorana, circuitos topológicos, adiabáticos, fotónicos, de diamante.

Algunas de las más importantes empresas y laboratorios que están desarrollando ordenadores cuánticos y programas para su funcionamiento son: QUIKit-IBM, Forest-Rigetti, Quantum Development Kit-Microsoft, Circ-Google, Qbsolv-D-Wave, Strawberry Fields-Xanadu, Qibo-Quilimanjaro.

Todavía es pronto para ver qué tecnologías y programas serán los que dominen el mercado en los próximos años. Es de esperar que dos o tres tecnologías se impongan a las demás y se inicie una cierta estandarización que facilite su adopción por parte del mercado.



¿Cómo van a impactar estas tecnologías en los diferentes sectores económicos?, ¿cómo van a mejorar la vida?

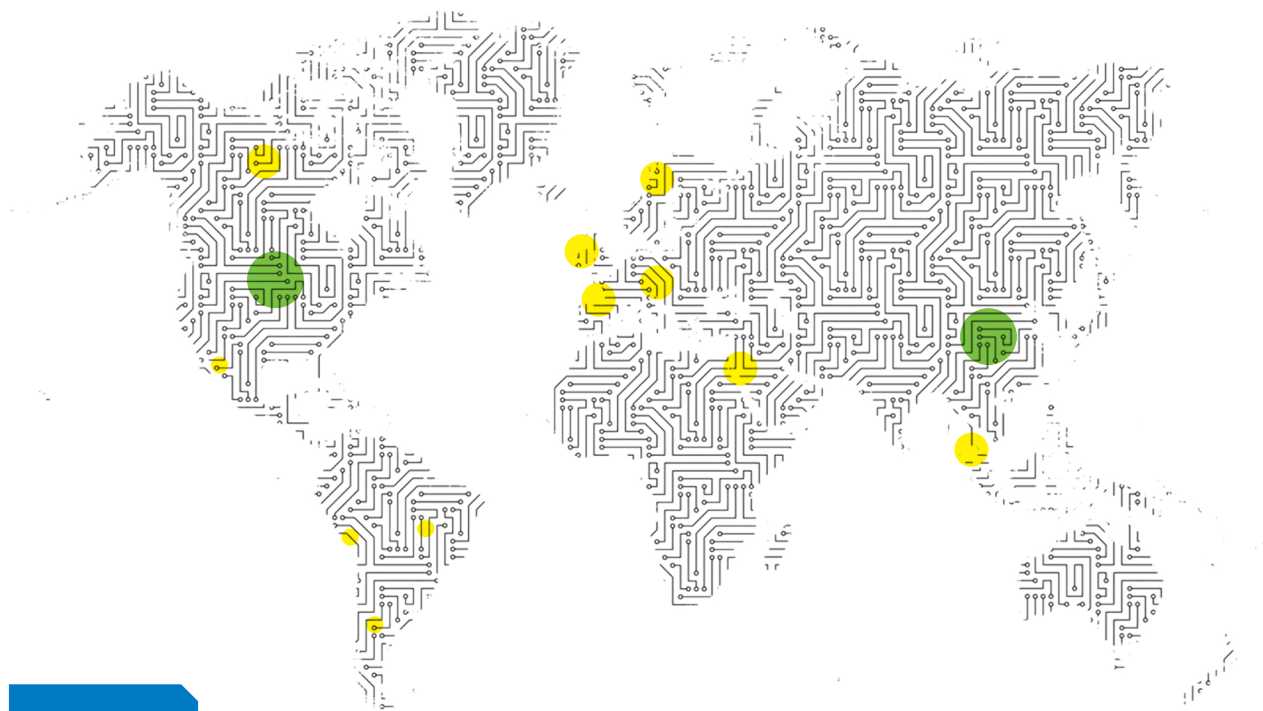
Las actividades que se verán sensiblemente afectadas por la incorporación de las tecnologías cuánticas en los diferentes sectores económicos son inmensas; se pueden resumir en las siguientes: sensores, telecomunicaciones, ciberseguridad-criptografía, química, medicina, finanzas-banca, farmacéutica, biotecnología, transporte y automoción, aeronáutica, aeroespacial, energía y utilities, manufacturing, inteligencia artificial, blockchain, IT, fotolitografía y educación. Continuamente, se están definiendo nuevas aplicaciones y los especialistas están de acuerdo en que lo más importante es que, como pasó con Internet, **sólo se conoce el 5% del impacto de las tecnologías cuánticas en los diferentes sectores de actividad económica.**

Para el desarrollo del mercado de estas tecnologías se necesita una demanda fuerte de los diferentes sectores económicos que se ven afectados y de empresas que empiecen a utilizarlas en su actividad. Todavía, los responsables de estos sectores económicos y

de sus empresas no conocen suficientemente el impacto que van a producir estas tecnologías en su actividad y negocio.

Es importante la labor de divulgación en todos los niveles, como así se pretende en este mismo documento del Centro Nacional de Formación en Nuevas Tecnologías de La Rioja, Think-TIC, donde también destacamos el trabajo de divulgación del Think Do Tank Barcelonaqbit-bqb. Por otro lado está la propuesta de jornadas no sólo científicas, que ya las hay y muy relevantes, sino empresariales, que faciliten la difusión de las buenas prácticas y casos de éxito de los sectores y empresas que ya empiezan a utilizar las diferentes tecnologías cuánticas en sus negocios.

Se están creando y consolidando organizaciones empresariales “cuánticas” que incluyen entre sus miembros a las empresas de oferta y demanda. La Quantum World Association (QWA) en Barcelona o el grupo cuántico de AMETIC (AMETIQ) en Madrid son buenos ejemplos para España.



¿Cuáles son los países que están más implicados en el desarrollo de estas tecnologías y qué están haciendo?

Los dos países que dominan la cuántica en la actualidad son EEUU y China. Son los únicos que desarrollan actividades de forma significativa en toda la cadena de valor: investigación fundamental, investigación aplicada, industrialización y llegada al mercado.

Por el contrario, en Europa existe un gran talento y un importante esfuerzo en investigación, pero un programa insuficiente para la industrialización y puesta en el mercado de estas tecnologías. Es cierto que con la puesta en marcha del **flagship sobre tecnologías cuánticas**, Europa intenta paliar esta realidad, pero, con la escasa financiación propuesta, es difícil competir con las primeras potencias en este campo.

Aparte de la República Popular China, EEUU y Europa como región, hay diferentes países que están haciendo progresos significativos: **Canadá, Reino Unido, Australia, Alemania, Francia, Holanda, Dinamarca, Austria, Suiza, Singapur e Israel.**

Latinoamérica está iniciando este camino, países como Argentina, Chile, Brasil y México, están organizando grupos cuánticos en sus universidades y organizaciones gubernamentales. Entre otros movimientos, en este año 2019 está la puesta en marcha del *“Observatorio de tecnologías cuánticas de España y Latinoamérica”* por parte de Barcelonaqbit-qbq.

Con todo ello, en el escenario europeo es pertinente una mayor coordinación entre países, instituciones, universidades y empresas, con la necesidad de un sector empresarial europeo más involucrado. El diseño y construcción de software es un proceso muy complejo que requiere gran cantidad de capital y organizaciones globales. Aun así, Europa tiene capacidad y solvencia para competir en el desarrollo de algoritmos, programas y aplicaciones cuánticas para los diferentes sectores económicos.



¿Dónde está y qué papel ocupa España dentro del concierto internacional cuántico?

El capítulo preparado en este documento sobre España es un estudio completo y exhaustivo actualizado hasta la fecha. Contiene información detallada del eQosistema español y relata las actividades en universidades, laboratorios, empresas, startups y entidades non profit. Es interesante observar la intensa actividad que se está desarrollando en España, sobre todo en los últimos tres años.

Como aspectos positivos se destaca un relevante grupo de profesionales con proyección internacional que hacen del talento cuántico uno de los principales activos nacionales. Trabajan en los centros de investigación españoles y en la diáspora.

El **ICFO, líder mundial de centros de ciencia fotónica**, ha sido capaz de atraer talento internacional y liderar proyectos muy relevantes del flagship. Un imparable desarrollo de nuevas entidades privadas para la difusión y creación de mercado: **barcelonaqbit-bqb** (el Think Do Tank líder mundial en difusión de tecnologías cuánticas con más de 10.000 contactos cualificados), el grupo cuántico de AMETIC (**AMETIQ**) y la Quantum World Association (**QWA**).

España también cuenta con un incipiente grupo de startups centradas básicamente en Barcelona: **Quside, Entanglement Partners, Metempsey, Multiverse Computing, Quantum2Business, Qilimanjaro y VLH Photonics**. Dos de las cuales han sido capaces de colocarse en un cuadro que contiene las empresas cuánticas internacionales de referencia en el último estudio del pasado mes de noviembre de 2018 sobre tecnologías cuánticas, realizado por la consultora estratégica Boston Consulting Group (BCG). Este informe está dirigido a los principales ejecutivos de las grandes multinacionales, actores gubernamentales y a toda la comunidad cuántica internacional. Es un reconocimiento importante del esfuerzo que se está realizando.

También hay que destacar el inicio incipiente de actividades en el sector cuántico de grandes multinacionales con sede fundamentalmente en Madrid como **Telefónica, GMV, Huawei, IBM, Microsoft, Fujitsu o Accenture**.

Por otro lado, al igual que en Europa, no existe por el momento una estrategia nacional de coordinación y financiación para estas tecnologías, ni fondos de inversión especializados en las mismas.

¿Qué estrategias nacionales se podrían diseñar y ejecutar para impulsar definitivamente la ciencia y tecnologías cuánticas y no quedarse fuera?

La respuesta no es nada sencilla. En este estudio se ha diseñado una propuesta estratégica que surge de un análisis DAFO de España sobre tecnologías cuánticas. Se han marcado las acciones prioritarias a implementar en función de las que se han tomado en otros países de referencia que tienen la intención de liderar estas mismas tecnologías. Esta estrategia se conforma en unos pocos **ejes de actuación**: Estructura y coordinación, talento, oferta, creación de mercado, financiación y posicionamiento y participación internacional.

Se define una primera propuesta de **objetivos estratégicos de ámbito nacional** dirigidos a mejorar las estructuras actuales y la coordinación entre ellas. Es una propuesta de máximos. Para alcanzar dichos objetivos será necesario empezar poco a poco, desarrollando y mejorando cada actuación, siendo estas: Una “Ley española de ciencia y tecnologías cuánticas”, un “Consejo asesor y Oficina nacional de coordinación de las tecnologías cuánticas”, la creación de “Institutos de ciencia y tecnologías cuánticas experimentales (transnacionales) y de ciberseguridad” y un “Consortio para el desarrollo económico de las tecnologías cuánticas”.

¿Cómo se abordaría uno de los problemas más relevantes que se tendrán en pocos años: La falta de talento cuántico especializado para los nuevos retos?

En un primer capítulo sobre talento y formación, se abordan los estudios reglados: grados y másters. Se describen con detalle los objetivos de los programas, la propuesta de contenidos y sus salidas profesionales. Sería un embrión para la primera “ingeniería cuántica” reglada e impartida en las universidades públicas. Pero este proceso puede tardar años, entre cuatro y siete, por su complejidad administrativa y de aprobación por las administraciones competentes. Así, se propone en paralelo hacer un análisis de las posibilidades de impulsar programas con titulaciones propias de postgrado o de especialización profesional que sirvan de ariete para no quedarse atrás.

Se proponen cinco programas de formación que se pueden organizar e iniciar en un máximo de seis meses. Tres programas de capacitación de técnicos y dos de técnicos especialistas.

En la elección de los programas más apropiados, se analizó la evolución temporal de las tecnologías cuánticas, las necesidades actuales de diferentes perfiles profesionales en estas tecnologías (se analizó la tipología de los actuales profesionales que están contratando las empresas cuánticas, así como las ofertas de empleo de estas empresas a lo largo del año pasado) y la tendencia y tipología de nuevas contrataciones. Esto llevó a definir las necesidades de formación actuales que pueden ser abordadas a corto plazo.

Estos cinco programas son:

1. Técnico en gestión, negocio y creación de startups sobre tecnologías cuánticas.
2. Técnico en programación de ordenadores y simuladores cuánticos.
3. Técnico en tecnologías cuánticas aplicadas a las finanzas.
4. Técnico especialista en sensores cuánticos.
5. Técnico especialista en telecomunicaciones encriptadas cuánticamente.

El informe se completa con los anexos que complementan las tesis que se formulan. Es una información que en algunos casos ha sido compleja de recapitular, pero puede ser de gran interés para los lectores del informe ya que les puede ayudar a proponer nuevas estrategias y acciones concretas en sus diferentes ámbitos profesionales: AAPP, universidades, centros tecnológicos, entidades non profit, empresas de oferta y demanda y centros de formación superior o profesional.

Los anexos son:

- **Anexo 1.** Mapamundi de patentes sobre tecnologías cuánticas. Las patentes ofrecen una información absolutamente objetiva sobre qué temas exactos, quiénes y dónde están sucediendo las cosas.
- **Anexo 2.** Listado de universidades y laboratorios sobre ciencia y tecnologías cuánticas de todo el mundo. Nos da verdadera información sobre quiénes y dónde se está realizando la investigación fundamental y experimental.
- **Anexo 3.** Listado de startups cuánticas aparecidas en los últimos dos años. Nos da mucha información de cómo se está conformando el mercado y qué necesidades futuras de profesionales habrá. También nos ha dado la pauta para realizar las búsquedas de los profesionales para poder analizar sus roles actuales. Cada semana se crean en todo el mundo dos o tres startups. Esta lista se tiene que ir actualizando continuamente.
- **Anexo 4.** Demandas de empleo cuántico. Una exhaustiva recopilación de demandas de empleo de universidades, centros tecnológicos y

empresas del último año. La tendencia es creciente y de forma espectacular. Este anexo nos da muchas pistas de las necesidades de formación y nuevos roles profesionales que se están demandando.

- **Anexo 5.** Un listado de empresas cuánticas y los 3.498 profesionales que actualmente trabajan en ellas. Es un importante documento que nos ofrece información muy valiosa de la foto actual y de la evolución futura de los roles profesionales.
- **Anexo 6.** Listado de los roles actuales de los profesionales que trabajan en empresas cuánticas.
- **Anexo 7.** Gráfico elaborado con la información del anexo 5 y 6 que representa los porcentajes de las posiciones de los 3.498 contactos estudiados.
- **Anexo 8.** Recopilación de las acciones de formación en ciencia y tecnologías cuánticas más relevantes que se están llevando a cabo en la actualidad. Nos da muchas pistas y análisis comparativo para elaborar nuestras propuestas.

Para la elaboración de la información contenida en los anexos, ha sido inestimable la colaboración del Think do Tank barcelonaqbit-bqb, que ha ayudado a trabajar en diferentes bases de datos, en particular en LinkedIn. También dar las gracias a la asociación empresarial Quantum World Association -QWA, que ha proporcionado datos y contactos muy relevantes para la elaboración del presente documento.

Por último, se agradece especialmente a los componentes del grupo de trabajo: Dr. Enrique Lizaso, Dr. Francisco Guillén, Dr. Daniel Franco y a Ilustrísimo D. Eduard Martín y, a todos los socios de Entanglement Partners que han hecho posible la elaboración de este informe.

Centro Nacional de Formación en Nuevas Tecnologías de La Rioja

(Gobierno de La Rioja)



2

Geoestrategia de la revolución cuántica

La Computación Cuántica en el sentido amplio del término es un sector tecnológico estratégico en diferentes capacidades. En la criptografía, la soberanía está en juego con el desafío de proteger las comunicaciones sensibles. La Computación Cuántica también es responsable de aplicaciones críticas que ampliarán el campo digital más allá de lo que es factible en la actualidad, particularmente en el campo de la salud, el medio ambiente y la inteligencia artificial tomado en una definición amplia.

En términos de madurez, **la criptografía cuántica y post-cuántica son campos con actores y soluciones económicas más consolidados**, incluso la estandarización de la criptografía post-cuántica, sin ser completa, contiene pocas incógnitas científicas fundamentales.

Los ciberataques a escala mundial son una realidad, se llega a hablar incluso ciberguerra. Como muestra, los numerosos ataques continuos de grupos de “*hackers malos*”. **En el panorama internacional hay dos grandes potencias que se disputan el dominio del ciberespacio: EEUU y la República Popular China.** Hay una carrera para obtener el ordenador cuántico capaz de romper **los protocolos RSA** mediante el algoritmo de Shor (factorización en números primos) y ganar la primera posición.

El ordenador cuántico podría ser en el S.XXI como la bomba atómica lo fue para el S.XX; Se quien lo tenga el primero, dominará el tablero geoestratégico mundial. Por ello no es de extrañar que cuando se habla de geoestrategia cuántica existan propuestas de índole opuesta como una “**Quantum Commission for Peace**”.

En este escenario aparecen grandes inversiones en talento y financieras. **DARPA, Lockheed Martin, NASA Jet Propulsion, Los Álamos... pero también Microsoft, IBM, Google, HP, Intel...** en EEUU. El complejo científico en **Hefei y Alibaba, Baidu o Huawei** en China.

Los grandes fondos de inversión (**Goldman Sachs, Quantum Investment, In-q-tel...**) que dirigen sus miradas a todo lo que tiene un apellido cuántico.

Volkswagen, Airbus, Bosch, ATOS, etc, están inmersos en proyectos sobre tecnologías cuánticas en Europa.

La Unión Europea por su parte ha puesto en marcha un **flagship de un billón de euros**.

Aparecen nuevas variables que se han de considerar como la propia ciberseguridad de los ciudadanos y la protección de sus derechos como tales: Ética, paz, transparencia, verdad, privacidad, desarrollo... que se detalla en apartados posteriores.

“Lo que se conoce como superposición, sin equivalencia en el mundo clásico. Significa que un qubit puede estar en ambos estados, simultáneamente”

● 2.1. El papel de España en el contexto internacional de las tecnologías cuánticas.

¿Dónde juega España en el contexto internacional de la geoestrategia cuántica?

Se tienen tres grandes bazas estratégicas:

1. Una cantidad de **talento cuántico** considerable, internacional y de alta calidad. Hay una gran cantidad de talento cuántico español por todo el mundo. Por ejemplo, **Darío Gil**, VP de RD y proyectos cuánticos de IBM.
2. La posibilidad de impulsar la **Quantum Commission for Peace** con sede en nuestro territorio.
3. Contamos con un **centro fotónico** número uno a nivel mundial; **el ICFO**. También contamos con el **supercomputador del BSC** o universidades con importantes departamentos de física cuántica y proyectos cuánticos asociativos o empresariales como: **barcelonaqbit-bqb**, **Quantum World Association-QWA** o la primera empresa consultora española y latinoamericana especializada en tecnologías cuánticas: **Entanglement Partners SL**.

Hace unos meses, en una conferencia del Dr. Ignacio Cirac, uno de los científicos más relevantes del mundo en tecnologías cuánticas, consejero de Telefónica y director del área cuántica del instituto Max Planck, comentaba: “*Yo pensé que no lo vería...hace unos pocos años pensé... que 20 años y ahora, no más de 10*”.

Se está inmerso de lleno en la segunda revolución cuántica. Esto lleva a una **primera conclusión**, la carrera por el dominio del ciberespacio, *que otros llaman ciberguerra*, ha acelerado espectacularmente el proceso y, se va **hacia la tercera revolución cuántica**. La pregunta ahora ya no es cuándo, sino quién... y si se estará en el grupo de cabeza.

Bajo el término genérico de “**Información cuántica**”, se engloban áreas muy diferentes de tecnología, de estrategias comerciales ‘go to market’ y oportunidades de negocio. Una clasificación de estas áreas se decidiría en: **Simuladores, computadores y telecomunicaciones cuánticas, sensores, criptografía y algorítmica cuántica**.

Una **segunda conclusión**, partiendo de que no todo es lo mismo es que España puede ser una **potencia en el desarrollo de algorítmica cuántica**.

Habrán ordenadores capaces de romper los sistemas de seguridad actuales. El sector financiero, la administración y grandes operadoras ya se encuentran tomando medidas esta línea. Empresas multinacionales españolas como Telefónica, bancos globales como el Grupo Santander y BBVA, podrían liderar proyectos cuánticos globales en especial los referidos a ciberseguridad cuántica y post cuántica, tecnologías cuánticas para los quants y blockchain.



“Prof. Dr. J. Ignacio Cirac (11 de octubre de 1965) físico español investigador en los campos de la computación cuántica y óptica cuántica. Ha sido premiado en 2018 con la Medalla Max Planck por sus contribuciones extraordinarias en Física teórica. Actualmente es director de la División Teórica en el Instituto Max-Planck para Óptica Cuántica en Garching, Alemania.”

Por otro lado, tanto la mejora sustancial de la capacidad de cálculo, los nuevos materiales, la inteligencia artificial, quantum blockchain, la planificación de recursos (scheduling) constituyen magníficas herramientas para el sector de la energía.

La tercera y última conclusión, casi todo está por imaginar y España tiene algunos ingredientes muy relevantes que le permitirían no quedarse al margen de la geoestrategia cuántica mundial.

● 2.2. Tecnologías cuánticas para la paz

Las tecnologías cuánticas pueden constituirse como un arma de este siglo como lo fue la energía atómica en el siglo pasado.

Por ello es importante la creación de un organismo internacional para que las tecnologías cuánticas sean utilizadas para la paz y el bienestar ciudadano.

Un programa de RSC-Responsabilidad Social Científica, tal como se constituyó la Organización Internacional de la Energía Atómica, ahora es necesario constituir un organismo internacional que vele para que las tecnologías cuánticas sean utilizadas para la paz.

El objetivo principal de la comisión sería procurar acelerar y aumentar la contribución de las tecnologías cuánticas a la paz, salud, seguridad, cambio climático y en general al bienestar, seguridad, privacidad y prosperidad del mundo entero.

Se asegurará en lo posible que la asistencia que preste no sea utilizada para contribuir en fines militares.

Sus funciones principales serían:

1. Fomentar las investigaciones, el desarrollo y la aplicación práctica de las tecnologías cuánticas con fines pacíficos.
2. Proveer de materiales, servicios, equipos e instalaciones necesarios para cumplir los fines que le son propios.
3. Promover el intercambio de información científica y técnica en materia de tecnologías cuánticas para fines pacíficos.
4. Establecer y aplicar salvaguardas destinadas a asegurar que las tecnologías cuánticas, se utilizan para mejorar la libertad y privacidad de la información de los ciudadanos.
5. Promover una legislación internacional que regule proactivamente en favor de los objetivos y fines de la comisión.
6. Procurar la inclusión y participación de las áreas de conocimiento en las que trabajan los científicos e ingenieros (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas conocido por sus siglas en inglés como STEM- Science, Technology, Engineering and Mathematics) en la política y las instituciones.
7. Impulsar la ética de la tecnología, los derechos y soberanía digitales.



3

Tecnologías cuánticas

Los principios básicos

En computación clásica, el bit es la unidad mínima. Bien es 0, bien es 1, signifique lo que signifique en cada caso. En Computación Cuántica se dispone de los equivalentes qubits, que se representan usualmente con una notación especial, $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Una cadena de qubits se suele escribir como $|0\rangle|0\rangle|1\rangle|0\rangle\dots$, o de manera más simplificada $|0010\dots\rangle$. Hasta aquí, todo como habitualmente ocurre en la computación clásica.

El primer elemento diferente que se encuentra en la Computación Cuántica es lo que se conoce como **superposición**, sin equivalencia en el mundo clásico. Significa que un qubit puede estar en ambos estados, simultáneamente -al menos, hasta que se decida medirlo, en cuyo caso nos dará una respuesta, $|0\rangle$ o $|1\rangle$, aleatoriamente, sin que se pueda predecir, con un 50% de probabilidades¹. Aleatoriedad pura, que se encuentra en lo más profundo de la naturaleza.

Una segunda característica importante que presentan los qubits es la **interferencia**. Cuando estamos aplicando una operación cuántica (una “puerta”) sobre un (o unos) qubits en superposición, los resultados pueden ser perfectamente diferentes para cada estado del qubit. Pero la operación se ejecuta sobre todos los estados del qubit -simultáneamente. Una manera de considerar este fenómeno es como un caso extremo de paralelismo.

Si adicionalmente, en lugar de un único qubit, o dos, se comienza a considerar un número elevado de qubits, los posibles estados de todos esos qubits en superposición se disparan exponencialmente (hasta 2^n qubits). Volviendo a imaginarse aplicando una serie

de operaciones cuánticas simultáneamente sobre todos estos posibles estados, al mismo tiempo, y se tendrá una idea de la potencia de la Computación Cuántica.

Por ejemplo, imaginando que se tiene un problema que involucre a n participantes se podría asignar un qubit a cada uno. Entonces, utilizando puertas cuánticas (el equivalente cuántico de las puertas tradicionales AND, XOR, etc.), se podría diseñar un programa de una manera astuta de tal forma que las soluciones incorrectas al problema se cancelaran las unas a las otras (**interferencia destructiva**), o haciendo que la solución correcta apareciera más frecuentemente que las incorrectas (**interferencia constructiva; “amplitude amplification”** en el argot), o ambas cosas. Así, cuando al final se midiera la salida del algoritmo, se obtendría con mayor probabilidad la **respuesta correcta que la incorrecta**². **Una respuesta probable, diferente a la determinista a la que están acostumbrados en la computación clásica.**

Haciendo las cosas bien, si existe un algoritmo que se puede utilizar, el resultado se puede obtener en menos operaciones -exactamente en una reducción drástica de operaciones de tipo exponencial o polinómica. En la práctica esto significa que **problemas que anteriormente resultaban intratables** -que no se podían resolver en un tiempo razonable (tanto como antes de que finalice el universo)- **ahora podrían resolverse.**

No se escapa que en comparación con los algoritmos tradicionales utilizados en computación clásica, en la Computación Cuántica se utilizan algunos algoritmos más complejos y extraños a la práctica habitual.

1. Esto es solo si el qubit está en superposición equiprobable que no siempre es así.

2. Esto no incluye la existencia de algoritmos deterministas en la teoría de la computación cuántica.

Queda todavía otra característica de la mecánica cuántica que aparece de manera natural en los computadores cuánticos, aunque su aplicación más habitual se corresponde con las comunicaciones. Es el **entrelazamiento**, donde dos partículas correlacionan sus estados, por apartadas y lejanas que estén.

En el siguiente apartado se procede a revisar las tecnologías de hardware que permiten este tipo de computadores. Más adelante se revisa el panorama del software -o más exactamente los lenguajes- más en vigor en estos momentos.

El Hardware

La construcción de un ordenador cuántico funcional requiere de la fabricación y manejo de sus unidades teóricas lógicas fundamentales, los qubits. La implementación física real de un qubit puede realizarse a través de diferentes tecnologías en este momento y, aunque hay algunas que parecen más adelantadas que otras en su desarrollo, todavía es un campo que dista mucho de estar cerrado.

En un sentido abstracto, un qubit consiste en una unidad de información que puede contener simultáneamente dos estados lógicos, 0 y 1, o en la **notación bra-ket**, más usual en tecnología cuántica, $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Por lo tanto, cualquier sistema natural que permita este tipo de comportamiento podría servir de base para la construcción de un qubit. Ahora bien, no todas las aproximaciones al mismo son iguales.

A continuación se comienza por las que ahora mismo parecen las plataformas más avanzadas y populares en estos momentos, y que dan base a los computadores cuánticos que existen en la actualidad: **trampas de iones y circuitos superconductores**.

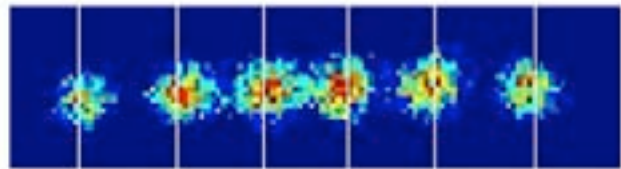
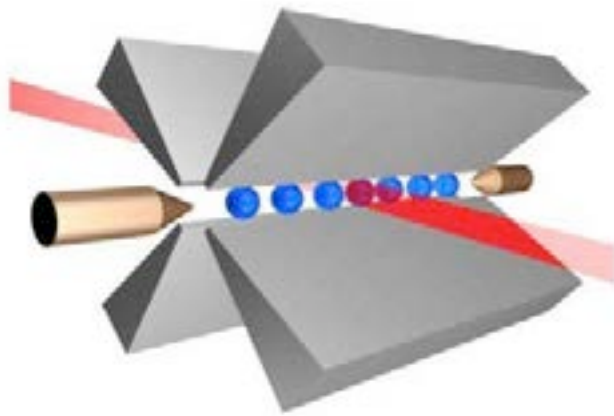
Las Trampas de Iones

La mecánica cuántica se desarrolló en gran parte para describir cómo los átomos absorben y emiten luz o radiación. No es sorprendente por tanto que los átomos sean buenos candidatos para construir computadores cuánticos.

Para entender cómo pueden funcionar los átomos como qubits, primero se repasarán las nociones básicas de física. Se sabe que un átomo consiste en un núcleo cargado positivamente en el centro, y un conjunto de electrones cargados negativamente orbitando centrados sobre él. La fuerza electromagnética mantiene unido este sistema, de manera similar a la gravitación en el sistema solar.

El gran cambio de paradigma a comienzos del pasado siglo XX -liderado por físicos como **Max Planck, Niels Bohr, y Albert Einstein** - fue el darnos cuenta de que los electrones solamente pueden orbitar el núcleo de unas formas limitadas. Si se pudiera trazar la trayectoria de un electrón se vería que su movimiento está restringido a un conjunto de patrones específicos. Cada uno de estos patrones tiene una energía característica, y todos ellos constituyen un **conjunto discreto (cuantizado) de valores**. Generalmente se habla de los orbitales simplemente como "**niveles de energía**", y esquemáticamente se acostumbra a representar como una serie de líneas como en la figura adjunta, donde hay tres niveles. Las referencias situadas entre las líneas indican la diferencia de energía entre los niveles.





Un buen símil es el musical. Como en el caso del piano, pulsando un Do, un Re, un Mi..., se notarían claramente las diferencias tonales entre ellos. Pero el piano no reproduce la infinitud de posibles tonos que hay entre dos notas sucesivas. Reproduce un conjunto discreto de notas. De idéntica manera, los niveles de energía de los electrones son discretos.

Así, para utilizar los átomos como qubits se podría simplemente tomar el nivel más bajo de energía del electrón más alejado (comúnmente referido como “estado base” o “ground state”) para representar un $|0\rangle$, y el siguiente nivel más bajo de energía (conocido como “primer estado excitado” o “first excited state”) para representar un $|1\rangle$.

El siguiente paso es poder trabajar con varios de estos átomos. Los sistemas más al uso lo hacen con **iones** -átomos cargados eléctricamente-, **a los cuales se les ha retirado un electrón para darle al átomo una carga positiva neta**. Esto hace que sea posible mover, empujar, arrastrar el ion utilizando campos magnéticos y eléctricos. El nivel de control que se ha llegado a tener sobre dichos átomos es lo suficientemente bueno como para poder situar a dichos átomos en posiciones predefinidas. Y no solo uno, sino decenas de átomos en configuraciones espaciales altamente ordenadas, como la

cadena mostrada en la figura adjunta. Esta es precisamente la **arquitectura básica** de los computadores cuánticos basados en **trampas de iones**.

Una vez obtenidos y localizados espacialmente los iones, hay que trabajar con ellos. Si el ion está en el estado base $|0\rangle$, ¿cómo se hace para que pase al estado excitado $|1\rangle$? y ¿cómo se crea la superposición de ambos estados, lo que viene a ser de alguna manera $|0\rangle$ y $|1\rangle$ a la vez?

La manera de operar con iones es a través del uso de **pulsos de láser**, que es una fuente de luz monocromática estable y coherente, lo que significa que puede producir un único, y bien definido, tono.

Se comienza con un ion en un estado $|0\rangle$, y se expone a un láser cuya frecuencia está ajustada a la energía necesaria para llevar el estado a $|1\rangle$. Si la duración del pulso de luz es la suficiente, se puede cambiar el $|0\rangle$ inicial a $|1\rangle$. Y para superponer estados, se hace la duración del pulso más corta.

Finalmente, queda por resolver cómo se implementan **puertas lógicas** (gates) que actúen sobre dos qubits, siendo **capaces de modificar arbitrariamente el estado de un ión (el qubit target) basándose en el estado de otro ion (el qubit de control)**.

Hay varias propuestas para ello. La primera y conceptualmente más simple, es la conocida como **Puerta (gate) Cirac-Zoller**, que lleva el nombre de los dos físicos que la idearon. El truco utilizado es utilizar el **movimiento colectivo de toda la cadena de iones**, permitiendo que la información sea transmitida entre los elementos de control y target de la puerta.

En un primer paso, se ilumina el qubit de control con un pulso láser. Dicho pulso está diseñado de tal manera que si el qubit se encuentra en un estado $|0\rangle$ no pasa nada, pero si se encuentra en el estado $|1\rangle$, el ión comienza a agitarse. Al tratarse de una partícula cargada, este ion que hace de control arrastra y empuja a los otros iones de la cadena con él, de derecha a izquierda, y al revés. Finalmente, se ilumina con un láser el qubit target. De nuevo, este pulso de láser está diseñado de tal manera que si el qubit está en movimiento, su estado cambia, pero si el qubit está parado, su estado permanece inmutable.

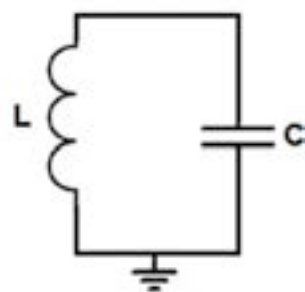
Hay evoluciones recientes interesantes del esquema que se acaba de presentar. Sin entrar en detalles adicionales, cabe mencionar la posibilidad de utilizar no ya iones, sino **átomos eléctricamente neutros en disposiciones 3D**. La manipulación de los mismos se realiza mediante haces láser. La posibilidad de empaquetar en estructuras tridimensionales un gran número de átomos es atractiva de cara a la obtención de un mayor número de qubits.

Los Circuitos Superconductores

Aunque per se la mecánica cuántica se asocia principalmente con átomos, moléculas y fotones, desde hace aproximadamente 20 años los físicos han estado trabajando para construir **circuitos que imiten el comportamiento de átomos**, y poderse utilizar estos en computadores cuánticos. Este enfoque es el que se utiliza hoy día con más frecuencia para fabricar qubits, con compañías como **IBM³, Rigetti, Google, Intel, y Alibaba** inyectando recursos en la construcción de chips cada vez mejores y más grandes.

Como en otros campos, aquí también hay una variedad importante de maneras de construir esta clase de qubits. Nos enfocaremos principalmente en una descripción general que permita entender las partes más importantes.

Para entenderlo correctamente, se comienza con un circuito que los ingenieros eléctricos conocen bien, el **oscilador LC** (ver figura adjunta), que consiste en un inductor (L) y un condensador (C). En este circuito, la energía se intercambia y desplaza de manera oscilante entre dichos elementos: en el condensador la energía se almacena como un campo eléctrico, mientras que en la bobina se almacena como un campo magnético.



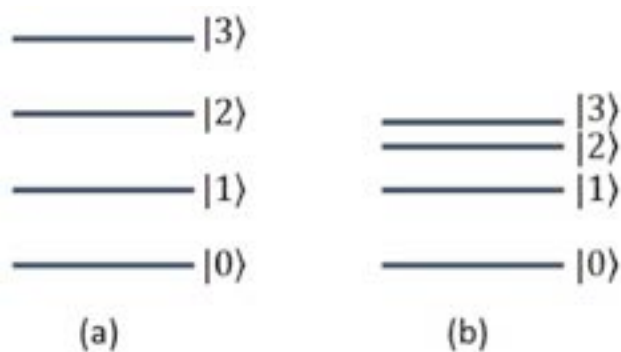
Si se reduce el tamaño de los elementos del circuito lo suficiente (hasta llegar a **alrededor de un micrómetro** normalmente) comenzaría a aparecer un **comportamiento mecano cuántico**. De una manera análoga a como los electrones ocupan en átomos reales un conjunto discreto de niveles de energía, la energía total almacenada en el circuito que hemos descrito también está cuantizada. Únicamente se puede incrementar dicha energía si se añade la cantidad precisa para saltar al nivel superior. De aquí surge de manera natural la idea de utilizar estos niveles de energía como base para codificar qubits.

Para que esto funcione en la práctica se necesita algo más que reducir el tamaño del circuito. Adicionalmente se necesita que el circuito sea superconductor, de tal manera que el flujo de corriente ocurra sin ningún tipo de resistencia

3. En los procesadores cuánticos de IBM se usan transmon qubits, estos consisten en un capacitor lineal hecho del superconductor niobio ($T_c=9.2K$) y de un inductor no-lineal que es la union Josephson. En la union Josephson el superconductor es aluminio ($T_c=1.2K$) y el material aislante entre las dos capas de superconductor es oxido de aluminio, (fuente IBM). Como se aprecia las temperaturas son muy bajas y la utilización masiva de estos qubits pasará por el desarrollo de nuevos materiales superconductores a más altas temperaturas.

eléctrica a la misma. Esto requiere enfriar todo el sistema por debajo de una **temperatura crítica**. De esta manera **la información codificada en los niveles de energía del circuito no resulta alterada involuntariamente**.

La **superconductividad** también juega como un **segundo factor** en este tipo de qubits. Los niveles de energía de un circuito LC como el anterior, forman una especie de escalera, con los peldaños igualmente espaciados. La energía necesaria para saltar de $|0\rangle$ a $|1\rangle$ es la misma que la necesaria para saltar de $|1\rangle$ a $|2\rangle$, y sucesivamente. Esto es algo que normalmente hay que evitar si se quiere construir un qubit.



Para entender por qué hay que ver primero cómo hacer que un circuito como (a) cambie de $|0\rangle$ a $|1\rangle$. Esto se consigue mediante pulsos eléctricos, de manera análoga a los pulsos de láser del modelo anterior. La superposición se consigue por mecanismos similares a la alteración de la duración del pulso de láser del modelo anterior.

El problema surge por el hecho de que la energía necesaria en este tipo de circuitos para saltar de $|0\rangle$ a $|1\rangle$ es la misma que para saltar de $|1\rangle$ a $|2\rangle$, y sucesivos. Si un pulso eléctrico contiene dos fotones, algo que puede suceder (normalmente conocemos únicamente el número promedio de fotones), entonces podría ocurrir que se estuviera provocando una doble transición de niveles de energía simultánea, primero de $|0\rangle$ a $|1\rangle$ y luego de $|1\rangle$ a $|2\rangle$. Pero el qubit no tiene un estado $|2\rangle$ con el que se pensara trabajar.

Aquí es donde entra el **segundo efecto de la superconductividad**. Sustituyendo el circuito simple LC por lo que se llama una **Unión Josephson** (dos piezas de superconductor separadas por una lámina muy estrecha de aislante) se consigue que los niveles de energía del circuito estén espaciados de una manera no idéntica (ver la figura “b” anterior). Técnicamente esta distribución de niveles se conoce como inarmónica (a diferencia de la armónica).

Así el circuito, suponiendo que el sistema está en estado $|0\rangle$ y el primer fotón lo lleva al estado $|1\rangle$, si llega un segundo fotón con idéntica energía para forzar el paso de $|0\rangle$ a $|1\rangle$, simplemente no podrá hacer nada, porque la energía requerida para pasar de $|1\rangle$ a $|2\rangle$ es diferente de ésta. El qubit tendrá por lo tanto dos estados únicamente, $|0\rangle$ y $|1\rangle$.

Factores que hay que tener en cuenta de cara a la calidad de los qubits

Una consideración importante es cómo de susceptibles son los qubits a los errores. Por ejemplo, los cambios de $|0\rangle$ a $|1\rangle$ o al revés pueden ocurrir espontánea e incontroladamente, ya que los sistemas cuánticos resultan afectados muy fácilmente por el entorno que los rodean. Campos eléctricos o magnéticos imprevistos, variaciones o errores en las señales electromagnéticas que se utilizan para controlar los sistemas, o incluso la radiación del espacio exterior pueden proporcionar la energía necesaria para un cambio de nivel imprevisto de esta naturaleza.

Para cualquier tipo de qubit hay un tiempo característico, denominado **“tiempo de coherencia”**, pasado el cual se puede estar bastante seguro de que habrá ocurrido algún error. Este factor es importante porque establece un límite superior al tiempo que

se puede utilizar un qubit para realizar un cálculo, y por esto mismo también establece un límite a la longitud y duración del programa que se desee utilizar. Para la tecnología de *Trampa de Iones*, dicho tiempo es bastante largo, y puede alcanzar los cientos de segundos. Los qubits *superconductores* son bastante más susceptibles al ruido, y su tiempo de coherencia normalmente se sitúa en la escala de los 100 microsegundos, bastantes órdenes de magnitud por debajo de la otra tecnología.

Una segunda consideración es cuántas **operaciones de puerta lógica** (*logic gate*) se pueden ejecutar en un qubit. A mayor número de operaciones, mayor complejidad posible en las operaciones a realizar, y por tanto, mayor sofisticación en los programas que se puedan llegar a escribir. La situación es radicalmente diferente a la anterior aquí: en un sistema de entrelazamiento Trampa de iones, una *gate* puede operar en unos 20 microsegundos, mientras que en unos *circuitos superconductores* el tiempo para actuar una *gate* puede bajar hasta los 100 nanosegundos.

Un tercer punto es **cómo de buenas son las operaciones de puerta en sí mismas**. Para *trampas de iones*, las operaciones en qubits simples pueden ser exactas hasta un 99.999%. En los *circuitos superconductores* (se pueden consultar estas características por ejemplo en la página de IBM), esta cifra puede bajar hasta un 99.9% (una de cada mil operaciones de puertas es errónea).

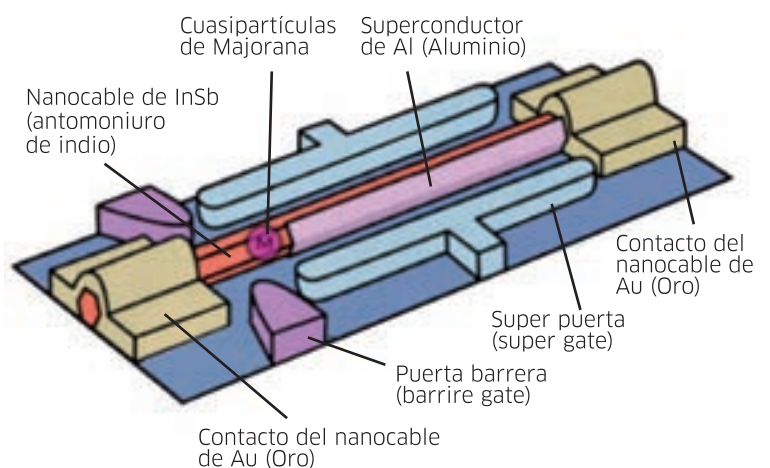
Hay multitud de otros factores que se deben tener en cuenta a la hora de determinar que plataforma será la más adecuada para construir un ordenador cuántico. El factor más obvio es quizás la **posibilidad de escalar el equipo a tamaños más grandes**. En este sentido, los qubits *superconductores* son más sencillos de escalar que las *trampas de iones*, gracias a las técnicas desarrolladas para la industria de la microelectrónica. Aunque, por otra parte, por su propia naturaleza de “*fabricados*”, no hay dos circuitos superconductores idénticos (a diferencia de los átomos, idénticos entre sí),

y por lo tanto pequeñas imperfecciones en la fabricación pueden llevar a rendimientos alterados más adelante.

Otros tipos de tecnologías posibles para construir un computador cuántico

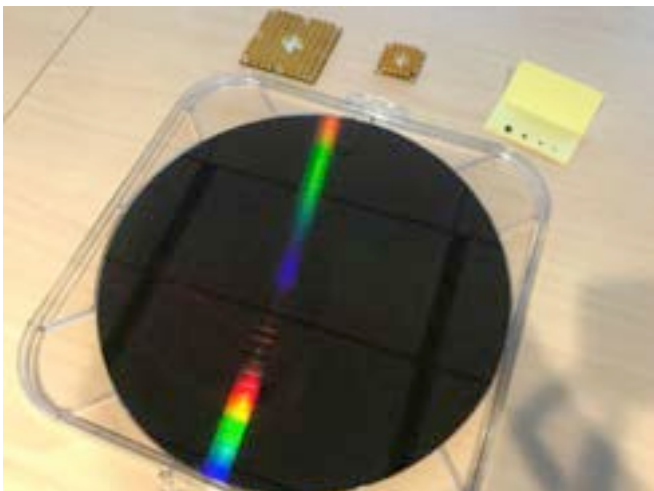
Existen otros tipos de tecnologías posibles que, aunque no figuren como las principales en este momento, dadas las empresas que se encuentran detrás de ellas conviene al menos conocer.

La primera de ellas corresponde a la tecnología soportada por **Microsoft**, las conocidas como **cuasipartículas de Majorana**. Obviando los detalles más teóricos, la idea es conseguir que manipulando un cable superconductor en un campo magnético, este aparezca como la mitad de un electrón a cada lado (o más exactamente, como una partícula que está a medio camino entre ser un electrón y no serlo). La ventaja de un constructo como este es su importante insensibilidad al ruido ambiente. Se necesitan al menos cuatro de estas cuasipartículas para efectuar Computación Cuántica. En estos momentos dicha tecnología todavía debe demostrar experimentalmente algunos aspectos críticos para ser viable (en concreto, el entrelazamiento “braiding”). Así mismo dichas cuasipartículas no parecen ser capaces de desarrollar todas las capacidades que las anteriores tecnologías poseen.



Intel por su parte ha perseguido una doble aproximación. Aparte de seguir la senda de los qubits superconductores, simultáneamente ha comenzado a trabajar en **spin qubits**. En estos qubits la diferencia entre $|0\rangle$ y $|1\rangle$ descansa en el espín de un electrón que está orientado hacia abajo o hacia arriba. Naturalmente, se ha de aislar un electrón individual para constituir un qubit. En la práctica lo que hacen es crear una especie de transistor donde está atrapado un único electrón. Estas estructuras pueden escalarse con técnicas microelectrónicas, lo que ha llevado a Intel a afirmar que disponen de la capacidad de fabricar cinco obleas de silicón semanales conteniendo hasta 26 chips cuánticos (de hasta 26 qubits). Contemplan la **viabilidad de esta técnica hasta los 1.000 qubits**. Aparte de situarse como el productor de mayor capacidad en este momento, dichos chips adolecen de problemas comunes a los de los circuitos superconductores: el control es extraordinariamente difícil, dadas las diferencias finales en el control de cada punto (dot) cuántico que contiene el electrón; y **necesitan emplear temperatura extremadamente bajas**, en el rango de mili kelvins.

Xanadú es una startup interesante que utiliza un tipo de tecnología diferente. En



lugar de utilizar qubits como los anteriores, utilizan directamente fotones, que ofrecen comportamientos genuinamente mecano cuánticos como la interferencia, sin mostrar en principio sensibilidad al ruido ambiental. Los **chips, fotónicos** en lugar de puramente electrónicos, ofrecerían un tiempo de coherencia muy superior a la de los otros sistemas. Dentro de los chips se añaden los componentes electrónicos necesarios de control y de lectura de los fotones.

Finalmente podemos citar el caso de la utilización de **diamantes** para elaborar qubits. En concreto, la utilización de diamantes con imperfecciones conocidas y localizadas dentro de la malla de carbono que exhiben comportamientos mecano cuánticos. Haciendo interactuar las imperfecciones cercanas entre ellas se podrían conseguir los elementos básicos para efectuar computación cuántica. Está por determinar la escalabilidad y practicidad de esta tecnología, que en estos momentos se encuentra lejos de las anteriores y no dentro de las corrientes principales.

La corrección de errores como elemento clave, y alternativas.

Para poder llevar a cabo una computación cuántica en condiciones, generalmente se piensa en que es necesario algún sistema de corrección de los errores que aparecen en la misma, al estilo de los algoritmos que se utilizan para la corrección de errores en las comunicaciones digitales que se tiene hoy en día. Este tipo de algoritmos, no obstante, parece que requieren un número de qubits adicionales inusitado, pudiendo multiplicar hasta por 1.000 los requerimientos iniciales (por ejemplo, si se estima que pueden ser necesarios 1.500 qubits lógicos para romper una clave criptográfica RSA, los requerimientos adicionales de corrección de errores elevarían dicha cifra hasta los 1.500.000 qubits).

Actualmente se conoce como **NISQ** (*Noisy Intermediate Scale Quantum*) a aquella tecnología, o computadores cuánticos, que

comenzarán a estar disponibles en los próximos años, con **dos características limitativas: no tendrán corrección de errores, y como mucho tendrán cientos -o mil- qubits**. Supondrán un paso intermedio en el camino hacia un ordenador cuántico general, fiable, robusto y de tamaño relevante.

La pregunta que surge inmediatamente es si este tipo de computación cuántica es útil para algo. Si se recuerda el concepto de tiempo de coherencia -aquel que pasado el cual estamos casi seguros de que ha ocurrido un error- podemos ver una salida a esta situación. Aquellos algoritmos que utilicen relativamente pocas operaciones -pocas puertas cuánticas-, y por tanto tengan un tiempo de ejecución inferior, deberían también presentar tasas de errores inferiores. Estos algoritmos podrían sin embargo continuar siendo superiores a sus contrapartidas clásicas.

Este tipo de algoritmos han comenzado a aparecer, combinando técnicas clásicas y cuánticas, **en ámbitos de optimización y en ciertos cálculos matemáticos matriciales muy comunes a multitud de problemas**. La combinación entre computación clásica y cuántica permite visualizar que en un futuro próximo el rol de los procesadores cuánticos se aproximarán al de un coprocesador cuántico (matemático).

La primera compañía en fabricar procesadores cuánticos fue la canadiense **D-Wave**, que en 2007 lanzó un quantum annealer de 16 qubits. En los últimos modelos ha llegado hasta los 2000 qubits. D-Wave utiliza circuitos superconductores. Otra compañía con annealers (aunque con tecnología diferente, fotónica) es la japonesa **NTT**.

Una palabra de advertencia. **Un annealer** es un tipo de ordenador cuántico muy especial, que **se utiliza para resolver problemas de optimización**. No es un computador cuántico de propósito general (por ejemplo, no puede ejecutar el equivalente del algoritmo cuántico más famoso -el de Shor- que factoriza en

números primos). Pero hay multitud de problemas que pueden reducirse a problemas de optimización, y gran cantidad de ellos son de interés muy elevado.

IBM fue la primera compañía en ofrecer un procesador cuántico universal, en 2016, de 5 qubits. En 2017 anunciaron el de 50 qubits. El de 5 qubits y un intermedio de 16 qubits están disponibles online para quien los desee utilizar. IBM utiliza circuitos superconductores.

Google se subió al carro más tardíamente, pero en 2018 anunciaron un sistema de 72 qubits. También basado en circuitos superconductores.

Rigetti Computing es una startup americana con financiación privada. Comenzó con 19 qubits, pero en los últimos meses hablan de una escalabilidad a 128 qubits para ejecutar algoritmos híbridos (clásicos y cuánticos). Igualmente utiliza circuitos superconductores.

El Software - en concreto, los Lenguajes

Como ocurre con los computadores clásicos, se necesita algún tipo de lenguaje para enviar instrucciones hacia un computador cuántico, y recibir las respuestas de este. Y como en ese ámbito, hay diferentes tipos y niveles de soluciones, desde los ensambladores hasta los lenguajes de alto nivel.

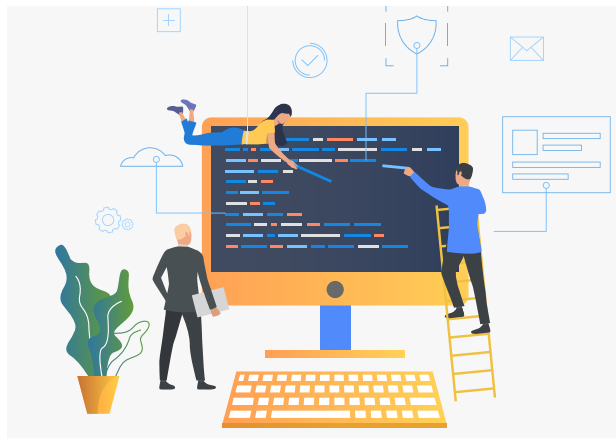
Se ha de comprender que un computador cuántico se compone de una parte cuántica, y de otra clásica. Los lenguajes son los referidos a la parte clásica. Se verán algunos de los más extendidos actualmente.

● **IBM** ha desarrollado el “*Quantum Information Software development Kit*” (**QISKit**), que es una librería completa para escribir, simular y ejecutar programas cuánticos. La ha dividido recientemente en cuatro partes: *Terra*, que permite programar a nivel de puertas cuánticas y pulsos; *Aqua*, correspondiente a un nivel superior para poder ejecutar algoritmos utilizados en química cuántica, optimización e inteligencia artificial; *Ignis*, para determinar y mejorar los errores y la implementación de puertas cuánticas; y *Aer*, para estudiar los límites de la computación cuántica utilizando simulaciones en computadores clásicos. **QISKit** traduce los programas cuánticos a un nivel intermedio denominado QASM, que se corresponde con un ensamblador.

● **Rigetti** ha creado **Forest**, un entorno integrado para escribir y ejecutar programas cuánticos. Sus procesadores se programan con una **librería Python denominada pyquil**, que realiza la traducción de los programas escritos en forma de puertas cuánticas a un lenguaje de bajo nivel denominado **quil**. Así mismo han desarrollado una librería llamada **Grove**, que incluye algoritmos de utilidad general como el VQE o el QAOA, utilizados en cálculos matriciales y en problemas de optimización.

● **Microsoft** tiene publicado el **Quantum Development Kit**, que incluye un simulador, librerías de algoritmos cuánticos y un lenguaje específico denominado **Q#**, que se puede integrar con Visual Studio. De todos, es el único lenguaje que no es open-source.

● **D-Wave** dispone de su propio lenguaje denominado **qsolv**, centrado en traducir los problemas de optimización QUBO que pueden resolver sus annealers gracias a la arquitectura interna de sus ordenadores (Chimera). Así mismo disponen de librerías específicas para implementar algunos problemas de optimización (QSage y ToQ). Terceras partes han desarrollado un macro-ensamblador para D-Wave denominado QMASM (Los Alamos National Lab.).



● **Google** dispone de **Cirq**, una librería Python para usar con este lenguaje y escribir y ejecutar programas en computadores cuánticos. Está en uso por otras compañías. Disponen de otras librerías más enfocadas a química cuántica.

● **Xanadu** ha desarrollado su propia librería orientada a la computación de variables cuánticas continuas (**Strawberry Fields**). Utilizan su propio lenguaje ensamblador (**Blackbird**) para los procesadores ópticos que fabrican.

● Para completar el paisaje, aún quedan por exponer algunos productos que intentan ser multiplataforma. Uno de ellos es **ProjectQ**, que puede utilizarse tanto para programar computadores cuánticos de IBM como de Google. Otro diferente es el ofrecido por **XACC**, que es una librería que puede utilizarse para programar computadores cuánticos tanto de IBM, como de Rigetti como de D-Wave.

Al igual que no está claro que solución o soluciones técnicas se impondrán en el Hardware, tampoco está claro cuál será el estándar que imperará en la parte de lenguajes. Al igual que los procesadores, ellos mismos están en desarrollo. No obstante, parece claro que, sean cuales sean las soluciones victoriosas, estas tendrán mucho que ver (o serán librerías preparadas para) con lenguajes como **Python**. **Aquí se produce una confluencia de conocimiento -colateral- entre los requerimientos en Computación Cuántica y en otras áreas de alto interés actual como la inteligencia artificial.**



Un resumen de la situación actual

ORGANIZACIÓN	ADIABATIC	SUPERCONDUCTING	TRAPPED ION	NEUTRAL ATOM	SPIN/QUANTUM DOT	PHOTONIC	NV DIAMOND	TOPOLOGICAL
Alibaba/CAS		X						
Alpine Quantum Technologies			X					
Archer Exploration					X			
Atom Computing				X				
Bleximo		X						
CEA-IETI/Inac					X			
Centre for Quantum Computation & Communication Technology					X	X		
Chalmers University of Technology		X						X
ColdQuanta				X				
Duke University			X			X		
D-Wave	X							
EeroQ				X				
Google	X	X						
Griffith Univ./Univ. Of Queensland						X		
Honeywell			X					
IBM		X						
ID Quantique						X		
Institut d'Optique				X				
Intel		X			X			
IonQ			X					
IQM Finland		X						
Korea Institute of Science & Technology							X	
MDR	X	X						
Microsoft								X
MIT Lincoln Lab	X	X	X				X	
MIT/Univ. of Innsbruck			X					
NEC	X							
NextGenQ			X					
Niels Bohr Institute								X
Nokia Bell Labs								X
Northrop Grumman	X							
NQIT			X					
NTT/Japan NII/Univ. of Tokyo						X		
ORCA Computing						X		
Origin Quantum Computing		X			X			
Oxford Ionics			X					
Oxford Quantum Circuits		X						
Oxford University		X	X			X	X	
Pasqal				X				
Penn State University				X				
Photonic					X	X		
PsiQuantum						X		
Quilimanjaro	X							
Quantic		X						
Quantum Circuits Inc		X						
Quantum Factory			X					
Quantum Motion Technologies					X			
Qubitekk						X		
QuEra Computing				X				
QuiX						X		

Fuente: Quantum Computing Report . "Cuadro de mandos en tecnología qubit" a 6 de enero de 2020 (enumera competidores de hardware de Computación Cuántica, QC)



4

Impacto en sectores económicos

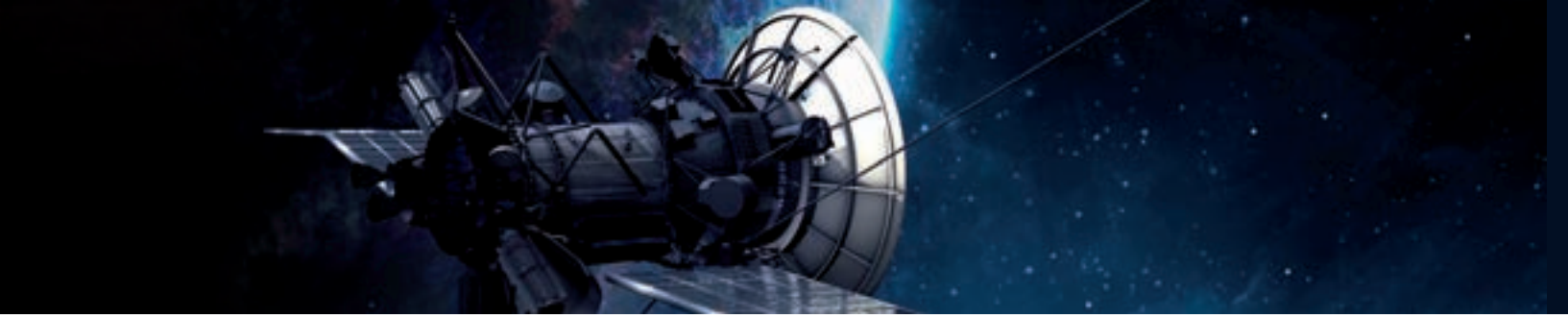
En general, el impacto de las tecnologías cuánticas (entre las que se incluye la Computación Cuántica) es enorme: por poner un ejemplo, la Government Office for Science del Reino Unido estimó recientemente que estas darían lugar a una industria cuántica en sí misma de tamaño similar al del conjunto de la electrónica de consumo, a nivel mundial. Estimaciones superiores existen.

Por países, depende mucho del grado de implicación de cada uno de ellos en las tecnologías cuánticas. Por ejemplo, Canadá, que está haciendo un esfuerzo por situarse a la cabeza, planea tener unos ingresos en concepto de estas tecnologías de \$142.000 millones en el 2040 (3,4% del PIB; 229.000 trabajadores). Si añadiésemos EEUU, China y la UE se puede superar de largo el billón

(en notación española que supone un trillón americano) de euros.

Las previsiones del sector específico de la Computación Cuántica también son relevantes. Según un informe reciente de Market Research Media, **el mercado de la Computación Cuántica superaría el medio billón de dólares** (en notación española que suponen 500 billones en notación estadounidense).

En cualquier caso, estas cifras no incluyen los impactos que tendrán estas tecnologías en la productividad de otras ramas de la economía, que multiplicarán las cifras anteriores de la misma manera que los ordenadores clásicos han multiplicado la productividad de otras ramas de la economía.



LOS IMPACTOS PROVOCADOS POR LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS VERSUS LOS PROVOCADOS POR LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Como se comentaba anteriormente, hay que aclarar que las tecnologías cuánticas incluyen campos muy diferentes más allá de la pura Computación Cuántica, alguno de los cuales será mucho más temprano en el tiempo (y algunos de hecho ya han llegado).

Aunque no entran dentro del objetivo central de la revisión del impacto de la Computación Cuántica, por su importancia se revisan brevemente:

- **Los cambios relacionados con una medición más precisa del tiempo.**

Los relojes atómicos existen desde finales de la década de 1960, y se basan en las oscilaciones de los electrones de ciertos átomos. El principal impacto de una mejora en la parte de sensores que la tecnología cuántica aportará, se centra en los **sistemas de navegación**, que pueden pasar a ser mucho más precisos. La manufactura de este tipo de sensores requerirá también de la aplicación de nuevas técnicas (probablemente de litografía, que se verá más adelante), que pueden a su vez generar nuevos impactos en industrias diversas.

Así mismo, existen un buen número de **redes físicas o lógicas que requieren que sus nodos estén perfectamente sincronizados, y que dicha sincronización no pueda ser suplantada por terceros**. Por ejemplo, las redes de Telecomunicaciones (se detalla más adelante). Pero así mismo en las redes de comunicaciones del sector financiero, donde por ejemplo, en Europa se requiere una sincronización global que no pueda ser alterada maliciosamente, y que en algunos escenarios debería ser capaz de funcionar sin fuentes de sincronización externa por periodos muy prolongados de tiempo.

- **Los cambios relacionados con sensores basados en tecnologías cuánticas**

Probablemente este será uno de los campos donde los impactos pueden ser mayores y en un plazo de tiempo menor. Los sensores pueden ser tanto eléctricos, magnéticos o gravitatorios. En general, esta mayor precisión y unos menores requerimientos operativos en cuanto a consumo y rango de temperaturas de trabajo, conducirán a unas nuevas generaciones de equipamiento diagnóstico y exploratorio muy diferentes de las actuales. Algunos ejemplos para ayudar a aclararlo son:

- **Nuevos sistemas de posicionamiento inerciales.**

A diferencia del GPS y otros sistemas de posicionamiento basados en el tracking de satélites, los sistemas inerciales, más antiguos, llevan un registro detallado de los movimientos, velocidades y otros parámetros del propio vehículo, sin necesitar referencias internas. Desafortunadamente, la exactitud es muy limitada (por ejemplo, en el campo marino un buen equipo inercial puede llegar a cometer un error de casi 2km cada tres días de navegación. No se escapa el interés de este tipo de navegación, complementaria o sustitutoria, en casos de mala cobertura o de supresión de satélites (defensa).

- **Nuevos sensores magnéticos para diagnóstico médico,** por ejemplo, que no requieran equipos de refrigeración y puedan utilizarse en equipos más pequeños, de menor consumo, y que puedan usarse para observar en directo el comportamiento funcional de órganos como el cerebro (alzheimer, etc.) -una especie de resonancia magnética funcional portátil.

- **Sensores gravimétricos más precisos,** que permitan detectar anomalías gravitatorias más precisas en el subsuelo, producidas por ejemplo por tuberías, túneles, objetos enterrados, bolsas de productos minerales de interés, petróleo, gas, etc. Se ha de tener en cuenta que estos sensores no tienen por qué estar cercanos al suelo, sino que dependiendo de la sensibilidad y precisión,

“mayor precisión y unos menores requerimientos operativos en cuanto a consumo y rango de temperaturas de trabajo”

en algunas aplicaciones podrían estar ubicados incluso en satélites. Así mismo, su uso en controles de paquetes cerrados (aduanas, contenedores) puede revolucionar el tipo de control, ya que no hay manera de esconderse de este tipo de sensores (al contrario de lo que ocurre con los sensores electromagnéticos actuales).

- **Nuevos sensores 3D**, donde la detección de la profundidad se conseguiría gracias a la determinación del tiempo en que un fotón se toma antes de alcanzar el receptor.
- **Ghost-imaging**: un efecto puramente cuántico. Se **usan fotones entrelazados**, de los cuales uno interacciona con el objeto, pero nunca con la cámara, y el otro interacciona con la cámara pero nunca con el objeto (a diferencia de una cámara tradicional, donde los fotones son reflejados por el objeto y alcanzan la cámara). Este tipo de imagen tiene interés militar evidente, pero también, al requerir unas intensidades muy débiles, en la generación de imágenes en medicina o biología que no dañen (por irradiación) los tejidos o muestras.
- Quedan también más posibilidades en el campo de la visión, como la utilización de **superficies rugosas como espejos**, que permitan visualizar evitando obstáculos a la visión directa del objeto.
- Se deja para el final uno de los impactos más inmediatos y que más relacionado está con la mecánica cuántica: la posibilidad de establecer **comunicaciones seguras** con este tipo de tecnologías. Sin entrar en profundidad, la mecánica cuántica permite saber si una comunicación ha sido interceptada por alguien que está escuchando en el medio (de hecho, hay protocolos específicos para ello). Este tipo de comunicación se utiliza hoy día para comunicar al inicio de las claves que se encriptarán y utilizarán en el resto de la comunicación (lo que se conoce como **Quantum Key Distribution, QKD**). Hay ciertas limitaciones no obstante en estos momentos que hay que tener en cuenta, como el hecho

de que los fotones que se utilizan -o su equivalente en otros sistemas- no se pueden copiar (no-cloning theorem), por lo que la utilización de repetidores (relays) como ocurre en las comunicaciones tradicionales no es posible (hay sistemas alternativos en estudio). Por ello estas comunicaciones descansan, bien en cableado directo, bien en satélites (donde por ejemplo China es la potencia en estos momentos). En cualquier caso, estos sistemas ya se encuentran en comercialización activa y todo hace suponer que se incorporarán poco a poco en un mayor número de las redes de comunicaciones actuales -aunque hasta que no exista una alternativa viable de repetidores (relays) no se podrá hablar de una verdadera “Internet cuántica”.

- Igualmente, hay otro tipo de aportación de la mecánica cuántica que, aunque en sí mismo no parece afectar a sectores económicos actuales, sí que permitirá un desarrollo efectivo de otros nuevos. En concreto, al azar y **la generación de números aleatorios verdaderos**.

El problema es el siguiente: todos los sistemas de encriptación actuales necesitan de un ingente volumen de números aleatorios para su implementación real. Esta necesidad se incrementa enormemente con la aparición de lo que se conoce como Internet of Things -IoT-, que requerirá algún tipo de encriptación en las comunicaciones entre los dispositivos. Pero los sistemas de generación de números aleatorios lo que hacen es generar números pseudo-aleatorios con algún tipo de valor semilla inicial lo más aleatorio posible. En la medida en que crece el volumen de estos, se hace más fácil determinar la secuencia de estos, ayudando así a descifrar el mensaje.

La mecánica cuántica ayuda aquí porque en su ser más profundo, la naturaleza es aleatoria, puro azar. Podemos generar números aleatorios reales, sin correlaciones entre ellos, tantos como se desee. De hecho, hay compañías con chips cuánticos dedicados a tal efecto en comercialización.

UN ESQUEMA CONCEPTUAL PARA ANALIZAR LOS CAMBIOS ESPECÍFICOS PROVOCADOS POR LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Por importantes que sean, los impactos asociados a las tecnologías cuánticas diferentes a la computación (como los vistos en la anterior sección), pueden palidecer cuando se confrontan con los que vendrán asociados a la Computación Cuántica, aunque en estos momentos no estén claros aún. Se pueden comparar -salvando las distancias- con la aparición del primer transistor: revolucionó las comunicaciones, pero resulta difícil afirmar que -desde el punto de vista de impacto- la computación (basada en ordenadores basados en transistores) haya tenido menos impacto que otros sectores electrónicos que no necesiten de ordenadores (radios analógicas, TV, etc...).

Conviene tener un esquema conceptual simple que ayude a entender cuáles son los sectores que resultarán influenciados, y cómo.

Para ello en primer lugar conviene recordar el punto clave que introduce la Computación Cuántica, a través de la superposición sin cuántica, podemos atacar algunos problemas en un tiempo razonable que, hasta hoy, eran sencillamente imposibles de abordar. Hay tres ámbitos importantes hoy día que se deben tener en cuenta al analizar sectores específicos:

- La **simulación de sistemas físicos o químicos**, mediante la asignación de qubits para simular electrones individuales de manera más natural.
- Los **procesos de optimización matemática**, que incluyen, pero no se limitan al entrenamiento de redes neuronales.
- Los **procesos de búsquedas** en grandes volúmenes de información.
- Y en el futuro, aquellos ligados a temas de **seguridad de la información y encriptación**.



CRIPTOGRAFÍA

Este es uno de los primeros ámbitos en los que se piensa al hablar de Computación Cuántica. Existen algoritmos específicos (como el de **Shor** de 1994) que garantizan que, si se dispone de un ordenador cuántico de capacidades suficientes, se puede proceder a factorizar un número en un tiempo "polinómico" (muy inferior a lo que se requeriría con ordenadores clásicos -en definitiva, convierte este problema en factible).

En el momento de disponer de este tipo de ordenadores, un buen número de sistemas de encriptación usados regularmente se convertirán en vulnerables. Entre ellos, **los algoritmos más famosos y de especial rele-**

vancia son los de RSA y los basados en Curvas Elípticas, que se emplean en multitud de comunicaciones financieras y no financieras.

Curiosamente hay que señalar que los sistemas basados en curvas elípticas, aunque más recientes y más seguros frente a un ataque de un ordenador clásico, parecen ser más sensibles al ataque de un ordenador cuántico que los sistemas basados en RSA, más antiguos.

Los requerimientos de un ordenador cuántico para poder realizar esto se han estimado en algunas fuentes sobre los **1.500 qubits**. Sin embargo, estos son qubits lógicos (que no presentan errores), y que cuando se apliquen

técnicas de corrección de errores (ver sección de fundamentos tecnológicos) pueden crecer hasta en un factor de 1.000 o más, llevando los requerimientos totales hasta el millón y medio de qubits físicos, o más. Esto no es viable hoy día, pero pudiera darse en los próximos años dependiendo del grado de avance de algunas soluciones tecnológicas.

No obstante, existe la preocupación natural de que, aunque hoy no se puedan descriptar estas comunicaciones, en algún momento del futuro si se podrán descriptar comunicaciones pasadas, si se han almacenado en algún sitio -en otras palabras, las comunicaciones encriptadas que hemos mantenido hoy nos las podrán leer mañana terceras partes. Esto ha desencadenado el nacimiento de un nuevo concepto denominado “**Postquantum**”, que trata del diseño, desarrollo e implantación de sistemas de encriptación que sean resistentes a ataques de ordenadores cuánticos. En un plazo cercano se espera que la NIST americana recomiende algunos tipos de algoritmos específicos, que habrá que implantar en los sistemas de comunicaciones. Este es un sector que ya está creciendo, y donde han aparecido proyectos y startups.

En cualquier caso, parece claro que todos los temas relacionados con la criptografía deberán revisarse con la idea de un posible ataque de un ordenador cuántico. Hasta cierto punto, no deja de ser un tema de gestión de riesgos y daños de incumplimiento (*Compliance Risk Management*) el saber que puede pasar con las bases de datos actuales en un futuro cuántico.



Post-Quantum, ejemplo de Startup de \$10M que se inició con Barclays



QUÍMICA

La Computación Cuántica en la química es un campo en sí mismo, en el que se ha pensado desde el mismo momento en que la posibilidad de un ordenador cuántico fue definida. Los impactos económicos pueden ser muy relevantes.

El mayor impacto se anuncia en la **simulación de procesos y reacciones químicas**, y regularmente se pone como ejemplo la fijación del nitrógeno atmosférico para dar lugar a Amoniaco, base de la elaboración de fertilizantes, que a su vez son básicos para la producción de alimentos vegetales. El proceso para su elaboración industrial es el proceso de Haber, que requiere elevadas presiones y temperaturas, además de catalizadores caros. **Alrededor de un 2% de la energía consumida en el mundo anualmente se dedica a esta reacción concreta.** En cambio, de manera natural, la enzima Nitrogenasa puede realizar esta misma tarea. Si de alguna manera se pudiera simular el trabajo de esta enzima, y ajustar de manera consecuente el **proceso de Haber**, los ahorros energéticos serían considerables.



Planta de Fertilizantes actual



Más general sería el caso de la simulación de comportamientos de moléculas o biomoléculas complejas. Este es un campo que no está en absoluto resuelto por la computación clásica, y donde la Computación Cuántica puede marcar una referencia importante. Es de esperar por lo tanto que este será uno de los campos donde la Computación Cuántica brille. Los impactos globales son difíciles de infravalorar: cualquier proceso químico, de generación de energía, reducción del consumo de esta, baterías, medio ambiente, etc. son susceptibles de verse afectados. En el campo concreto de las baterías se puede citar la aplicación al diseño de estas por parte de **Volkswagen**, al que se refiere la imagen adjunta.



De hecho, hay señales indirectas de que esto es así. Hay un número específico de librerías (por ejemplo, OpenFermion de Google para Python, o Aqua-chemistry de QISKit, también de IBM para Python) que están específicamente enfocadas a este tema. Por otro lado, algunos de los fundadores de compañías de Computación Cuántica de referencia son químicos como el fundador de Zapata Computing, Alan Aspuru-Guzik, que abandonó Harvard para establecer su propia compañía de Computación Cuántica.



MEDICINA

El impacto de la Computación Cuántica en medicina -sin incluir el provocado en el diseño de nuevos fármacos analizado en un apartado posterior-, vendrá mediado probablemente por la mejora que la Computación Cuántica proporciona a la Inteligencia Artificial.

En efecto, uno de los factores que más limitan el desarrollo de algunas aplicaciones de IA es el entrenamiento de redes neuronales, y en otros modelos de separación-clasificación como SVM (*Supporting Vector Machines*), el cálculo masivo sobre grandes volúmenes de datos. El primero de ellos puede concebirse como un problema de optimización (optimizar una red neuronal para que ajuste más las respuestas ante un conjunto de entradas), trasladable a un problema de Computación Cuántica. **Los cálculos masivos (especialmente cálculos matriciales) también son susceptibles de aceleración con computadores cuánticos.**

ENTROPICA LABS



Quantum computing for bioinformatics and genomics

At Entropica Labs we are closing the gap between research and real-world applications of quantum computing.

Our mission is to develop quantum software for the life sciences, with the goal of accelerating precision medicine.

Un campo de la medicina donde la aplicación de estas técnicas puede ser relevante es la investigación en genómica, dada la masiva cantidad de información y las necesidades de procesamiento que se requiere. Por ejemplo, Entropica Labs, es el caso de una compañía que ha comenzado a trabajar en esta área.

Adicionalmente, hay campos de menor impacto económico en medicina como la **Radioterapia**. La Computación Cuántica ayudaría a mejorar la aplicación de la misma disminuyendo los daños a tejidos sanos, pero manteniendo o incrementando la dosis en los tejidos cancerosos. En este caso el poder de la Computación Cuántica reside en la posibilidad de optimizaciones mejores y más rápidas para calcular las dosis.

Así mismo, como se comentaba al inicio, hay otras aplicaciones más ligadas al desarrollo de sensores cuánticos con mejores prestaciones que los actuales. Como ejemplo se tiene el proyecto **MetaboliQs**, financiado por el Flagship europeo, orientado a proporcionar imágenes cardíacas multimodales de mejor precisión para el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares.

Otras aplicaciones como desarrollo de fármacos se analizan a continuación.



FINANZAS

La aplicación de la Computación Cuántica probablemente se basará en las capacidades de optimización que nos proporcionan este tipo de ordenadores. En general, hay un buen número de problemas financieros que se pueden mapear como un caso de optimización, como por ejemplo:

- Optimización de **carteras de inversión** (estática y dinámica).
- **Trading**: trayectorias óptimas de entrada y salida.

Adicionalmente hay dos campos donde la Computación Cuántica puede ser especialmente efectiva:

- En todos aquellos modelos financieros que descansen sobre una base de Inteligencia Artificial, como los **sistemas de scoring (comerciales o riesgo)**. Recordemos que la Computación Cuántica ayuda en la Inteligencia artificial al considerar el entrenamiento de redes neuronales (como las usadas en Deep learning) como un problema de optimización.

Quantum computing for finance: overview and prospects

Roman Orús, Samuel Morup, Erezee Lasser

We discuss how quantum computation can be applied to financial problems, providing an overview of current approaches and potential prospects. We review quantum optimization algorithms, and expose how quantum annealers can be used to optimize portfolios, find arbitrage opportunities, and perform credit scoring. We also discuss deep learning in finance, and suggestions to improve these methods through quantum machine learning. Finally, we consider quantum amplitude estimation, and how it can result in a quantum speed-up for Monte Carlo sampling. This has direct applications to many current financial methods, including pricing of derivatives and risk analysis. Perspectives are also discussed.

Submitted 10 Jul 2018 to *Quantum Physics* (quant-ph)

Published 12 Jul 2018

Author comments: 12 pages, 3 figures

<http://arxiv.org/abs/1807.02893>

<http://dx.doi.org/10.1101/358893>

<https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2018-07-02893>

- **La modelización y control del riesgo**. La Computación Cuántica es especialmente interesante cuando se trata de ver los posibles resultados de una cartera, inversión o incluso la totalidad de una entidad financiera, ante multitud de escenarios diferentes, gracias al intenso paralelismo implícito en sus bases. Quizás un ejemplo práctico de ello sea la valoración de precios y riesgos de derivados financieros como las opciones. En un gran número de casos estos instrumentos financieros se valoran mediante el **método de Montecarlo**, que requiere un elevado poder de computación no siempre disponible. El uso de algoritmos cuánticos para este caso permite no sólo acelerar la valoración (proporcionando mejores y más rápidas oportunidades de negocio) sino en muchos casos simplemente hacerlo posible.

Un ejemplo de lo que se puede realizar en finanzas con la Computación Cuántica se puede encontrar en la revisión realizada por la QWA en 2018, ilustrado más arriba.

Quizás el uso más revolucionario de la Computación Cuántica, no ya en finanzas sino en economía, se da en la simulación de modelos del sistema financiero para ver su comportamiento en situaciones de estrés, o frente a cambios monetarios o fiscales. Un caso extremo es utilizar la Computación Cuántica como medida de predicción de crisis financieras, o de la probabilidad de padecerlas. Curiosamente, los requerimientos técnicos no son especialmente exigentes, ya que -como en otras áreas de finanzas- estos problemas pueden ser abordados con los denominados **quantum annealers** (ver la sección de descripción técnica de los ordenadores cuánticos de este mismo documento).

Forecasting financial crashes with quantum computing

Roman Orus, Samuel Mugel, Enrique Lizaso

(Submitted on 16 Oct 2018)

A key problem in financial mathematics is the forecasting of financial crashes: if we perturb asset prices, will financial institutions fail on a massive scale? This was recently shown to be a computationally intractable (NP-Hard) problem. Financial crashes are inherently difficult to predict, even for a regulator which has complete information about the financial system. In this paper we show how this problem can be handled by quantum annealers. More specifically, we map the equilibrium condition of a financial network to the ground-state problem of a spin-1/2 quantum Hamiltonian with 2-body interactions, i.e., a Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO) problem. The equilibrium market values of institutions after a sudden shock to the network can then be calculated via adiabatic quantum computation and, more generically, by quantum annealers. Our procedure can be implemented on near-term quantum processors, providing a potentially more efficient way to predict financial crashes.

Comments: 5 pages, 2 figures

Subjects: General Finance (q-fin.GN); Quantum Physics (quant-ph)

Cite as: arXiv:1810.07690 [q-fin.GN]

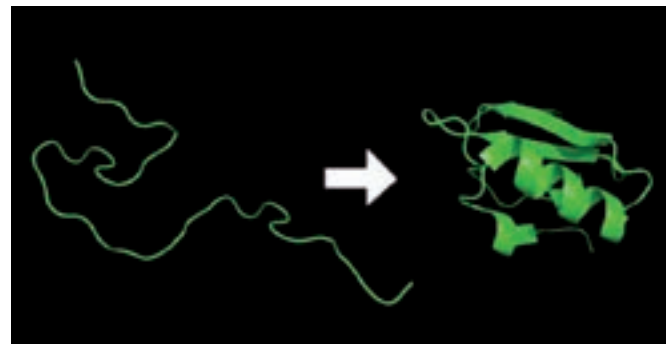
(or arXiv:1810.07690v1 [q-fin.GN] for this version)



FARMACOLOGÍA Y BIOTECNOLOGÍA

El uso de la Computación Cuántica en los sectores farmacéutico y de biotecnología se apoya en dos grandes ramas, de manera similar a otros sectores:

- De un lado, la utilización de los computadores cuánticos para acelerar y potenciar otras tecnologías como la Inteligencia Artificial, que a su vez se usan para diferentes tareas: **predecir posibles fármacos**, ahorrando así una parte de los tests previos en los procesos de descubrimiento de nuevas moléculas de interés; o en la búsqueda de posibles targets para fármacos existentes; o, como se cita en la sección de medicina, para **explorar el código genético** en busca de genes, alteraciones, targets, etc. que puedan ayudar a prevenir o curar enfermedades.



- De otro lado, tal como ocurre en la química, se puede utilizar la Computación Cuántica para predecir **cómo se 'doblan' las proteínas**. El problema es el siguiente: en medicina se suele conocer con buena aproximación la estructura de aminoácidos de una cadena proteica, bien determinándola directamente, o bien a través de los ácidos nucleicos que la codifican en origen o actúan de intermediarios. Sin embargo, una vez sintetizada la proteína dentro de las células por los ribosomas, esta se pliega por sí misma adquiriendo una estructura tridimensional específica que muestra sitios activos (que catalizan reacciones enzimáticas) y sitios de control (que activan desactivan o inhiben) la proteína, además de sitios de unión a otras proteínas o componentes esenciales (glúcidos, lípidos, otros compuestos) del cuerpo. Si no se conoce la estructura tridimensional es difícil predecir el comportamiento de la proteína, o cómo actuar sobre ella. El problema es computacionalmente irresoluble por los ordenadores clásicos actuales, pero aparentemente no por los ordenadores cuánticos, mediante técnicas similares a las explicadas en el apartado de química de esta sección (ver el ejemplo de la nitrogenasa). Esta utilización dispararía inmediatamente el ritmo de descubrimiento de nuevos fármacos, además de hacerlos extraordinariamente más precisos.

Como en las secciones anteriores, hoy día ya existen algunas empresas que empiezan a caminar por este campo. Entre otras, se podría citar para este caso la asociación entre **Biogen, Accenture y 1Qbit**.

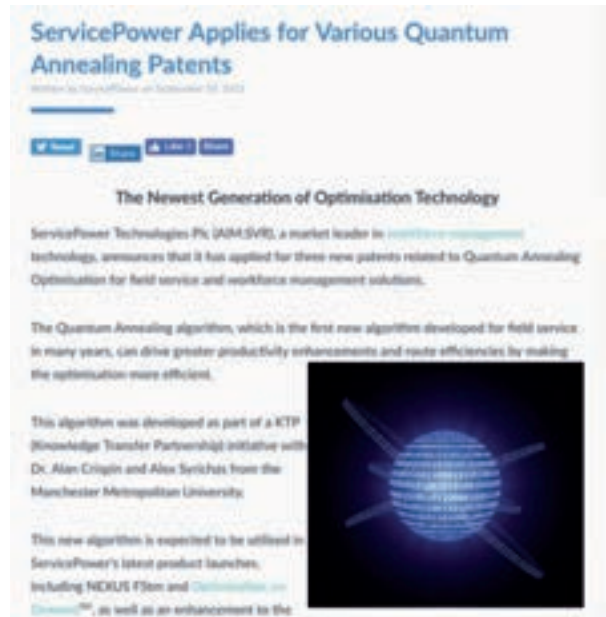


TRANSPORTE-AUTOMOCIÓN

El transporte es una industria global superior a los \$4 billones (españoles -trillones americanos). La determinación de las rutas más eficientes para el transporte es un problema clásico de optimización que no se resuelve adecuadamente en ordenadores clásicos por los tiempos que llega a requerir. Establecer las rutas óptimas en sí mismo es un problema difícil, pero **establecer las rutas óptimas dinámicamente, en función de la situación real del tráfico** es muchas veces imposible. Por ejemplo, para una ruta de 10 puntos el número de combinaciones posibles puede llegar a los 3 millones. Aunque aplicando técnicas heurísticas se pueda reducir, no siempre es factible obtener el resultado cuando se necesita.

Como en otros campos, ya han aparecido compañías que trabajan específicamente en transporte. Una de ellas desarrolló un algoritmo para compañías logísticas, **Service Power Technologies PLC**. En estos momentos tienen 3 solicitudes de patentes en este campo, según sus propias declaraciones.

Por otra parte, uno de los ejemplos que tradicionalmente se ponen es la alianza que se estableció entre **Volkswagen y Google** para trabajar en Computación Cuántica, y que comenzó con el **uso de un D-Wave para simular el tráfico habitualmente congestionado de**



Beijing. Se estableció un modelo simplificado del tráfico que pudiera optimizarse para reducir el número y volúmenes de atascos, y permitiera de esta manera mejorar la calidad del aire en una de las ciudades más contaminadas del planeta.

A partir de la experiencia de Volkswagen, las grandes marcas de automoción han ido creando divisiones de Computación Cuántica para afrontar **problemas de optimización, diseño, optimización de baterías eléctricas y creación de nuevos materiales.**





ELÉCTRICAS Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

La distribución de energía en la red eléctrica en un entorno donde el consumo va en aumento y las pautas de comportamiento varían y requiere, en la medida de lo posible, de una planificación compleja. La situación será probablemente aún más complicada en el futuro, dado el impulso que tienen las energías renovables, algunas de las cuales dependen de factores externos más difíciles de prever y que hacen que la **planificación y respuesta a las diferentes situaciones sea cada vez más compleja**. En este panorama, se ha planteado que la Computación Cuántica puede ayudar, principalmente mediante la aplicación de algoritmos de optimización, o bien mediante el uso de técnicas de Inteligencia Artificial, específicamente en redes neuronales, donde la aplicación de la Computación Cuántica en el entrenamiento de éstas permita tenerlas a disposición de una manera más rápida y eficaz.

No obstante, existe otro campo dentro de la distribución de energía que ha surgido como elemento de debate, y es el **uso de técnicas criptográficas protegidas cuánticamente para proteger la red contra posibles ciberataques** de esta, ataques que pueden resultar devastadores como se ha podido ver en los últimos conflictos bélicos en Europa. Este es un tema recurrente que puede extenderse no



sólo a la electricidad, sino a cualquier red de *utilities* (agua, gas, petróleo, etc.).

Finalmente, también se puede destacar como en un futuro entorno donde los consumidores pueden ser también productores de electricidad, las técnicas de criptografía resistentes a ataques por un ordenador cuántico resultan especialmente atractivas.



INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Como se comenta repetidamente en otros ámbitos de esta sección, **la Computación Cuántica potencia significativamente a los algoritmos de Inteligencia Artificial** principalmente mediante dos líneas: una, **considerando el entrenamiento de redes neuronales como un problema de optimización** que se resuelve más rápidamente mediante el uso de un computador cuántico; y dos, **la aplicación de algoritmos de cómputo cuántico como el HHL para cálculos numéricos (y especialmente matriciales)** sensiblemente más rápidos que los que se utilizan en ordenadores clásicos.



Algunos ejemplos de logros realizados hasta la fecha en proyectos piloto son:

1. Reconocedores compactos y eficientes de objetos y situaciones.
2. Manejo de datos de entrenamiento corrompidos, donde una gran parte de los datos de entrada contienen etiquetas erróneas.
3. Reconocimiento de objetos en imágenes (como Google, D-Wave).
4. Reconocimiento óptico de caracteres.
5. Etiquetado automático de datos.
6. Compresión de vídeo eficiente.

Por descontado, hay diferentes startups fundadas para desarrollar este tipo de aplicaciones. Una de las más recientes es **Qindom**, fundada en Toronto en el último año por profesores de su universidad.



BLOCKCHAIN

Es difícil considerar al Blockchain como un sector en sí mismo. No obstante, la importancia del mismo no se puede desdeñar. La presencia de las criptomonedas, a pesar de la volatilidad intrínseca que han mostrado en el pasado, es cada vez más relevante como medio de pago de transacciones, de servicios, o como puro sistema de inversión en sí mismo. Pero además el **Blockchain como tecnología de DLT** (*registros contables distribuidos, de sus siglas en inglés Distributed Ledger Technology*) es algo que se irá imponiendo en los años venideros en diferentes sectores, y especialmente en aquellos interesados bien en **disminuir los costes de procesamiento**, bien en **incrementar la seguridad luchando contra las falsificaciones**, bien ambas, o en otros campos.

El problema subyacente consiste en que las encriptaciones que protegen la información dentro de cada bloque están basadas en Curvas Elípticas, que son susceptibles en el futuro a ataques por computadores cuánticos. Parece ser, en cambio, que la encriptación que encadena los bloques, simétrica, es más resistente a este tipo de ataques. Por ello, necesariamente la criptografía del blockchain debe variar para asegurar su viabilidad en un mundo cuántico.

Hay otras potenciales aplicaciones de la mecánica cuántica en el blockchain, como las propuestas de sustituir las comunicaciones basadas en Internet actuales por otras basadas en tecnología cuántica que proporcionarían mayor rapidez y privacidad. Estas propuestas se engloban dentro de lo que sería un campo más global de **"Internet Cuántica"**.

Business Impact

First Quantum-Secured Blockchain Technology Tested in Moscow

Quantum computers pose a significant security threat to cryptocurrencies such as Bitcoin. Now a team of Russian scientists has worked out how to secure blockchains using quantum mechanics.

by Emerging Technology from the arXiv · June 6, 2017



AEROESPACIAL

De nuevo, los algoritmos de optimización adecuados para correr en ordenadores cuánticos son la parte más interesante en estos momentos. El referente en 2016 fue el uso de D-Wave por parte de la compañía **Lockheed Martin**.

Estos algoritmos de optimización no solamente pueden aplicarse para el **diseño de estructuras físicas, motores**, etc. También pueden aplicarse, modificándolas adecuadamente, para la **detección de errores y alternativas de optimización del software** que corre dentro de los aviones modernos. De idéntica manera a lo que pasa en otros campos, la utilización de técnicas de inteligencia artificial reforzadas por un computador cuántico es una alternativa adicional.

Estos cambios son meramente introductorios, ya que en el futuro la aparición de ordenadores cuánticos “full” (no únicamente annealers como la experiencia de Lockheed Martin) permitirá este tipo de soluciones, pero con unas prestaciones muy superiores.

Otra empresa que anunció la utilización de la Computación Cuántica en el diseño y fabricación de aeronaves es **Airbus**. En este caso, uno de los posibles usos estudiados es en **la simulación**, donde gracias a las capacidades de los ordenadores cuánticos se puede pensar en el futuro reemplazar túneles de viento y pruebas de estrés por meros cálculos desarrollados por este tipo de computadores. Como en el caso de Lockheed Martin, este tipo de pruebas se han realizado con *annealers*, aunque se puede prever con seguridad que la llegada futura de ordenadores cuánticos “full” aumentará la calidad y cantidad de soluciones disponibles en el mercado.



Airbus's quantum computing brings Silicon Valley to the Welsh Valleys

Aerospace giant Airbus hopes to harness immense power of 'spooky' quantum computing to speed up aircraft research



Wind tunnel tests could be a thing of the past thanks to quantum computing



TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

El impacto de la Computación Cuántica en la industria TI (**Tecnologías de la Información**) es naturalmente muy importante. El uso de los nuevos ordenadores cuánticos requiere de unos algoritmos sensiblemente diferentes de los que se utilizan actualmente, y el paradigma de que estos algoritmos son probabilísticos también hace cambiar las maneras y modos utilizados. Los lenguajes actualmente utilizados en las TI ya incorporan aquellos que se están utilizando como interfaz para Computación Cuántica.

Aparte de eso, la propia Computación Cuántica se puede usar para la comprobación del software y eliminar algunos de los posibles errores que este puede contener, antes de distribuirlo a los clientes. Un ejemplo de esto se ha visto en el apartado anterior por parte de la empresa Lockheed Martin. La idea básica es que los **errores de programación**, cuando no son triviales, pueden requerir meses o más tiempo para que se dé la correcta combinación de circunstancias para que aparezcan. Un ordenador cuántico, que puede examinar simultáneamente todas las posibles combinaciones (sujeto a ciertas limitaciones explicitadas por los algoritmos) serviría para aflorar estos errores en la fase de pruebas.



FOTOLITOGRAFIA

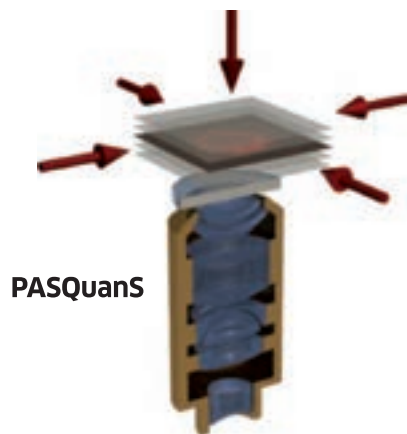
Aunque las técnicas para desarrollar chips cuánticos superconductores están heredadas de la fotolitografía tradicional, **hay una serie de chips cuánticos que se basan en la utilización de señales luminosas con los efectos cuánticos asociados a ellas**. Las técnicas para procesar señales de este tipo obligan a un diseño y una fabricación diferente a lo utilizado con los chips electrónicos tradicionales.

Quizás el ejemplo de una compañía de reciente creación y que está avanzando por este campo es **Xanadu**, una compañía canadiense creada en 2016, y que se dedica tanto a la parte de hardware como a la de software.

Desde el punto de vista de la complejidad de diseño, y dejando de lado los procesos de fabricación de este tipo de chips lumínicos, una vez fabricado este no hace falta tener la complejidad de mantener un entorno a una temperatura ultra-baja. **Xanadu anuncia sus chips como capaces de trabajar a temperatura ambiente**, lo que simplifica la operación, y aumenta el tiempo de coherencia, que es un parámetro que limita el posible tiempo de ejecución de un algoritmo cuántico, y por ello también la longitud del programa que pueda ejecutarse en un computador cuántico.

XANADU





IT - SIMULACIÓN

La simulación de ordenadores cuánticos es una rama de la Computación Cuántica que está en pleno auge actualmente, aunque comienza a presentar limitaciones. La idea es la siguiente: los ordenadores cuánticos “puros” (o “full”) tardarán aún un tiempo en poder llegar al mercado. Sin embargo, los programas que correrán en ellos ya podrían probarse siempre y cuando se dispusiera de **un simulador -un ordenador clásico que emule a un ordenador cuántico en cuanto a capacidades, que no en velocidad**. En el momento en que lleguen los ordenadores cuánticos, solamente habría que pasar los programas del simulador al ordenador cuántico real.

Appliance	Power	Software Kit	CPU	Memory
Atos QLM-30	30 Qubis	AQASM	2	1T
Atos QLM-35	35 Qubis	AQASM	4	3TB
Atos QLM-38	38 Qubis	AQASM	8	6TB
Atos QLM-39	39 Qubis	AQASM	16	12TB
Atos QLM-40	40 Qubis	AQASM	16	24TB

Una compañía que se ha especializado en este tipo de hardware es la multinacional francesa **ATOS**. Para hacernos idea de las enormes capacidades de memoria que deben contener estos simuladores, podemos mirar la tabla adjunta, donde se observa que simplemente para simular un computador cuántico de 40 qubits, se necesitan nada menos que 24TB de memoria. Aunque han aparecido algunos avances teóricos para disminuir los recursos necesarios, la cifra límite de qubits que puede ser simulada por una de estas máquinas parece situarse por debajo de los 50 qubits.



Cuando se habla de simuladores, hay otro concepto que también se denomina así, pero corresponde a **otro tipo de aproximación. Consiste en la simulación, mediante sistemas mecano-cuánticos, de procesos de interés para la industria o la investigación**. A tal efecto, una vez establecido el sistema mecano-cuántico concreto, este se comportaría como el sistema real que se desee emular. Por ejemplo, en la primera convocatoria de ayudas del instrumento Flagship Europeo para tecnologías cuánticas, hay varios proyectos que encajan en este tipo de descripción, como **PASQuaS** (imagen de arriba), o **PhoQuS**. Esta rama de la simulación tendrá gran importancia en el futuro, e impactará previsiblemente en un gran número de sectores.

Y finalmente un campo específico de la simulación de procesos mediante el uso de ordenadores y tecnología cuántica, y que ahora se realiza mediante ordenadores clásicos, es la predicción. En concreto se prevé un uso intensivo de la Computación Cuántica en **la predicción meteorológica**, especialmente en el entorno del calentamiento global y los cambios meteorológicos que padecemos asociados a él.



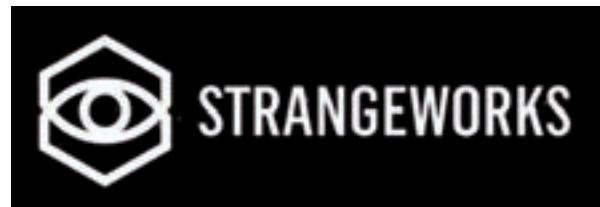
EDUCACIÓN

Este informe contiene un mayor detalle y apartados específicos en cuanto al impacto de las tecnologías cuánticas -y en concreto la Computación Cuántica- en la educación. Por lo tanto, solamente se esbozan dos ideas que se desarrollarán con más en detalle en otros apartados de este mismo documento.

La primera idea es que, al igual que la electrónica y la informática cambiaron los contenidos de una multitud de áreas del conocimiento, la aparición de las tecnologías cuánticas afectará igualmente. En aras de una adaptación a estas nuevas tecnologías que han venido a quedarse, los contenidos de los programas educativos, las competencias necesarias que tendrá un estudiante al finalizar los estudios, en un futuro próximo, se irán completando con estas nuevas tecnologías. Al igual que en un pasado no existía el grado de Ingeniero Informático se espera muy probable y conveniente que aparezcan grados específicos de ingeniería en tecnologías cuánticas. Este punto se desarrollará en el resto del informe.

Por otra parte, la presencia de la Computación Cuántica de manera indirecta, a través de los procesos de optimización y de Inteligencia Artificial asistida por computadores cuánticos se dejará notar nuevamente en la educación. No únicamente en los contenidos de los programas educativos, sino probablemente también como un sistema de asistencia para ayudar a determinar **trayectorias educativas personalizadas** (en la línea de algunas *startups* que aplican AI al diseño de programas de formación personalizados).

Finalmente, aunque la relación con la educación es más lejana, conviene mencionar también la disponibilidad de recursos online para la programación específica de



computadores cuánticos. Quizás el ejemplo más extremo es la compañía americana Strangeworks, que intenta proporcionar formación y recursos específicos a los programadores cuánticos.



TELECOMUNICACIONES

Las telecomunicaciones son uno de los sectores que ya están notando el impacto de las tecnologías cuánticas, de al menos tres maneras diferentes: como elemento **para dar una mayor seguridad** a las mismas; como elemento **para descifrar mensajes** y por lo tanto atacar la seguridad; y por último como elemento de ayuda a la **planificación de las redes y servicios**. Se verán cada uno de los diferentes aspectos por separado.

- **En el caso de dar una mayor seguridad a las comunicaciones**, esto es algo que en estos momentos ya está en marcha. Normalmente lo que se hace es distribuir las claves criptográficas necesarias para mantener una comunicación segura a través de canales cuánticos, en lo que se conoce como **Quantum Key Distribution - QKD**. Hay compañías europeas que se dedicaban a ello, como la suiza **idQuantique** (que fue adquirida por la surcoreana **SK Telecom**). Estos sistemas de distribución de claves pueden así mismo realizarse por satélite (campo donde la pericia corresponde a China).

Cabe señalar también los esfuerzos que se están realizando para establecer una verdadera **red de Internet cuántica**. Por ejemplo, uno de los proyectos financiados por el Flagship Europeo para tecnologías cuánticas es la **Quantum Internet Alliance**. Este proyecto, dentro de sus intenciones, contempla el desarrollo de repetidores cuánticos, factor que en este momento limita la posibilidad de aplicación de las comunicaciones cuánticas seguras a conexiones directas (esto es, sin repetidores). Recordemos -ver la descripción teórica de los computadores cuánticos- que el teorema de no-clonado evita que puedan hacerse copias de estados cuánticos, lo que impide la aplicación de repetidores tal como los conocemos hoy día.

- La segunda área donde las tecnologías cuánticas tendrán un impacto relevante en las telecomunicaciones es paradójicamente en la aplicación de la Computación Cuántica para **desencriptar mensajes**, y por lo tanto hacerlos menos seguros. El algoritmo de Shor de 1994 nos enseñó cómo -de una manera teórica- se puede romper una clave criptográfica, con especial aplicación a la RSA y Curvas Elípticas que tienen la consideración de ser actualmente las más seguras. Aunque este tipo de aplicación está lejos de las

capacidades reales de los ordenadores cuánticos actuales, en el futuro la situación puede cambiar sensiblemente. Esto obliga a sustituir los sistemas criptográficos actuales por otros que sean resistentes a ordenadores cuánticos ("**Postquantum**", como se vio en apartados anteriores).

- Finalmente, queda la aplicación de la Computación Cuántica a los **procesos de planificación de redes y servicios de los operadores y grandes carriers** de telecomunicaciones. Este proceso es complejo, y más cuándo se hace de manera dinámica, donde se tiene en cuenta la situación de la red en un momento determinado. Aquí la Computación Cuántica puede ayudar de las dos maneras principales como se ha adelantado anteriormente: de una parte, por el uso de **técnicas de optimización** especiales, mediante el uso, bien de ordenadores cuánticos "full" en el futuro, bien por el uso de computadores cuánticos annealers ahora. La segunda manera es por la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial -principalmente **redes neuronales** que hayan sido entrenadas por un ordenador cuántico. Cabe señalar que una vez se dispongan de ordenadores cuánticos "full", éstos podrán aplicar este tipo de técnicas directamente.







5 Quién es quién en tecnologías cuánticas

JUGADORES INTERNACIONALES

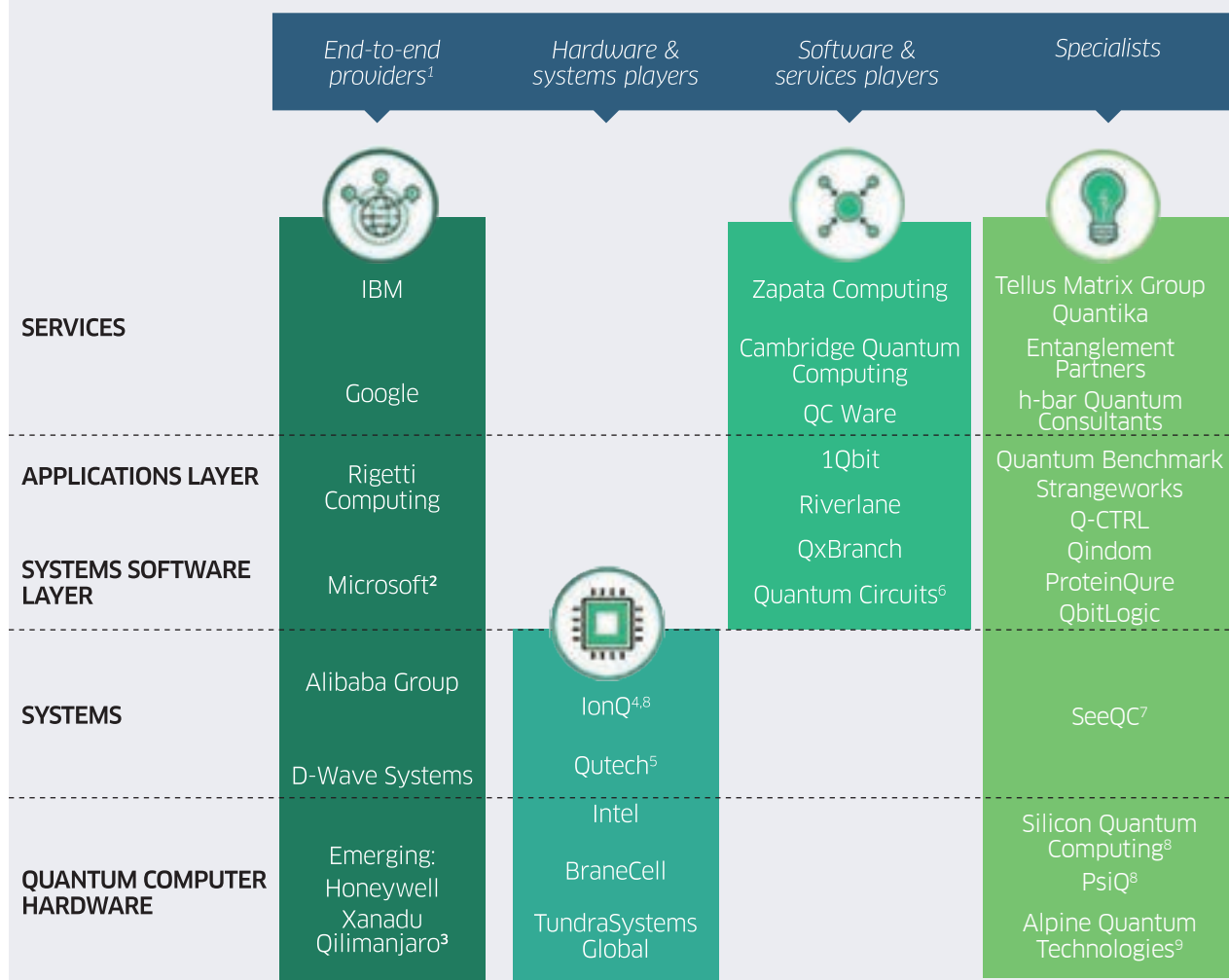
Para introducir este capítulo del informe se incluirán los siguientes cuadros de la consultora **Boston Consulting Group (BCG)** publicados en un documento del 20 de Noviembre de 2018 y dirigido a empresarios y ejecutivos. Este documento, se está convirtiendo en un referente internacional.

Empresas de oferta

En esta figura se destaca notablemente **Entanglement Partners** donde BCG lo incluye a su cuadro de empresas de oferta “cuánticas” como una de las consultoras internacionales de referencia.

En un anexo se listan las startups surgidas en los tres últimos años que cada vez son más, en más países y con más amplitud sobre tecnologías cuánticas.

EXHIBIT 1. Companies Assume Four Roles Across Layers of the Stack in the Quantum Computing Ecosystem



Sources: Quantum Computing Report (quantumcomputingreport.com); BCG analysis.

¹Based on player's ambition with varying levels of maturity and service activities.

²Multiple technologies in the labs with focus on topological qubits.

³Qilimanjaro is a spinoff from the University of Barcelona.

⁴AWS is invested in IonQ.

⁵QuTech was founded by TU Delft and TNO, and has collaborations with Intel and Microsoft.

⁶Quantum Circuits (QCI) is a spinoff from Yale University.

⁷SeeQC is a subsidiary of Hypres.

⁸Vision to become end-to-end provider.

⁹Alpine Quantum Technologies (AQT) is a spinoff from University of Innsbruck.

Sectores y empresas de demanda






Se está ante uno de los cuadros más importantes de este informe: las empresas que están demandando tecnologías cuánticas, lo que se conoce como el mercado. Cada vez más sectores de demanda están trabajando en impulsar dentro de sus empresas verdaderos equipos cuánticos.

Empresas tecnológicas, sector industrial, químico farmacéutico, finanzas y energético. Las aplicaciones de los avances científicos y

tecnológicos se están adoptando de forma rápida y contundente en los sectores que los necesitan.

Poco a poco, se está creando un verdadero mercado de tecnologías cuánticas. Es el inicio, en pocos años nuevos sectores entrarán a utilizar esta nueva tecnología de forma masiva. Esto indica que harán falta nuevos profesionales que puedan gestionar estos nuevos departamentos de las empresas de demanda.

EXHIBIT 2. Multiple Potential Use Cases for Quantum Computing Exist Across Sectors

INDUSTRIES	SELECTION OF USE-CASES	ENTERPRISES (EXAMPLES)	
 High-tech	<ul style="list-style-type: none"> Machine learning and artificial intelligence, such as neural networks. Search Bidding strategies for advertisements Cybersecurity Online and product marketing Software verificación and validación 	IBM Alibaba Google Microsoft	Telstra Baidu Samsung
 Industrial goods	<ul style="list-style-type: none"> Logistics: scheduling, planning, product distribution, routing Automotive: traffic simulation, e-charging station and parking search, autonomous driving Semiconductors: manufacturing, such as chip layout optimization Aerospace: R&D and manufacturing, such as fault-analysis, stronger polymers for airplanes Material science: effective catalytic converters for cars, battery cell research, more-efficient materials for solar cells, and property engineering uses as OLEDs 	Airbus NASA Northrop Grumman Daimler Raytheon	BMW Volkswagen Lockheed Martin Honeywell Bosch
 Chemistry and Pharma	<ul style="list-style-type: none"> Catalyst and enzyme design, such as nitrogenase Pharmaceuticals R&D, such as faster drug discovery Bioinformatics, such as genomics Patient diagnostics for health care, such as improved diagnostic capability for MRJ 	BASF Biogen Dow Chemical	JSR DuPont Amgen
 Finance	<ul style="list-style-type: none"> Trading strategies Portfolio optimization Asset pricing Risk analysis Fraud detection Market simulation 	J.P. Morgan Commonwealth Bank	Barclays Goldman Sachs
 Energy	<ul style="list-style-type: none"> Network design Energy distribution Oil well optimization 	Dubai Electricity & Water Authority	BP

Source: BCG analysis.

Principales inversiones

Los fondos de inversión están invirtiendo grandes cantidades de dinero en las grandes empresas tecnológicas que desarrollan tecnologías cuánticas pero, lo más importante, es que también se está apostando por invertir en startups que necesitan estas inversiones para fundarse, consolidarse e internacionalizarse.

En el anexo dedicado a las inversiones, podemos ver con gran exactitud estas inversiones.

Cabe destacar que estas inversiones conocidas y públicas son sólo la punta del iceberg de los ingentes fondos que invierten los países en

agencias gubernamentales discretas o en sus complejos militares-industriales. En este caso sólo hay cifras globales en China (\$ 10.000 millones) y EEUU (\$ 6.000 millones).

También las grandes multinacionales están invirtiendo grandes sumas de dinero pero no trascienden más que algunos titulares y cifras globales. En China, **Alibaba Cloud** anuncia inversiones en quantum de \$ 15.000 millones, **Tencent** \$ 10.000 millones, **Huawei** \$ 6.000 millones. Las empresas **GAF**A y otras americanas han sido más discretas en sus titulares de inversión.

EXHIBIT 3. Funding for Startups Has Increased in Recent Years

Startup	Total (US\$ millions)	Most recent funding	
D-Ware Systems	205	June 1, 2018	US\$10.15 million of grant funding in a deal led by the Canadian Government
Rigetti Computing	119	March 28, 2017	Announced further US\$40 million in its series B round of funding
PsiQ	65	Undisclosed	Undisclosed
Silicon Quantum Computing	60	August 2017	AU\$87 million venture funded by: New South Wales Government (AU\$9 million), University of New South Wales (AU\$25 million), Commonwealth Bank of Australia (AU\$14 million), Telstra (AU\$10 million over two years), and the Australian Government (AU\$25 million over five years)
Cambridge Quantum Computing	50	August 26, 2015	US\$50 million of development capital
1QBit	35	November 28, 2017	CA\$45 million of development capital in Series B funding
IonQ	22	February 24, 2017	US\$20 million of Series B venture funding
Quantum Circuits	18	November 13, 2017	US\$18 million of Series A venture funding
Alpine Quantum Computing	12	February 8, 2018	€10 million of grant funding
QC Ware	8	July 5, 2018	US\$7 million of Series A venture funding
Optalysys	8	September 21, 2017	£3 million of seed funding from undisclosed investors
Nextremer	5	August 8, 2017	JPV500 million of venture funding
Oxford Quantum Circuits	3	September 8, 2017	£2 million of venture funding

Sources: Crunchbase; Pitchbook; BCG analysis.

Previsiones de mercado para los próximos años

Un estudio de **Morgan Stanley 2017** estima el tamaño del mercado de los ordenadores cuánticos en \$ 10B en el 2028 que, comparado con las previsiones del mercado de consumo de TI (\$ 590B, la integración de PCs, teléfonos inteligentes y tabletas) y corporativo (\$ 185B) es ciertamente todavía incipiente. Lo importante es la tendencia claramente al alza.

El mercado de la Computación Cuántica es mucho menos maduro que el mercado de la criptografía cuántica. La computadora cuántica es incierta y con un horizonte temporal de 10 a 20 años. Esto explica la inversión en paralelo de casi todos los países en la Computación Cuántica, la criptografía cuántica y la metrología

cuántica, teniendo este último un mercado objetivo muy profesional.

Los estados están invirtiendo grandes sumas de dinero en tecnologías cuánticas por razones estratégicas: descifrar las telecomunicaciones existentes o pasadas en el marco de la actividad de sus servicios de inteligencia y proteger el secreto a través de la criptografía cuántica. Por lo tanto, las tecnologías cuánticas son en este momento una clara herramienta geoestratégica que puede hacer inclinar la balanza entre China o EEUU.

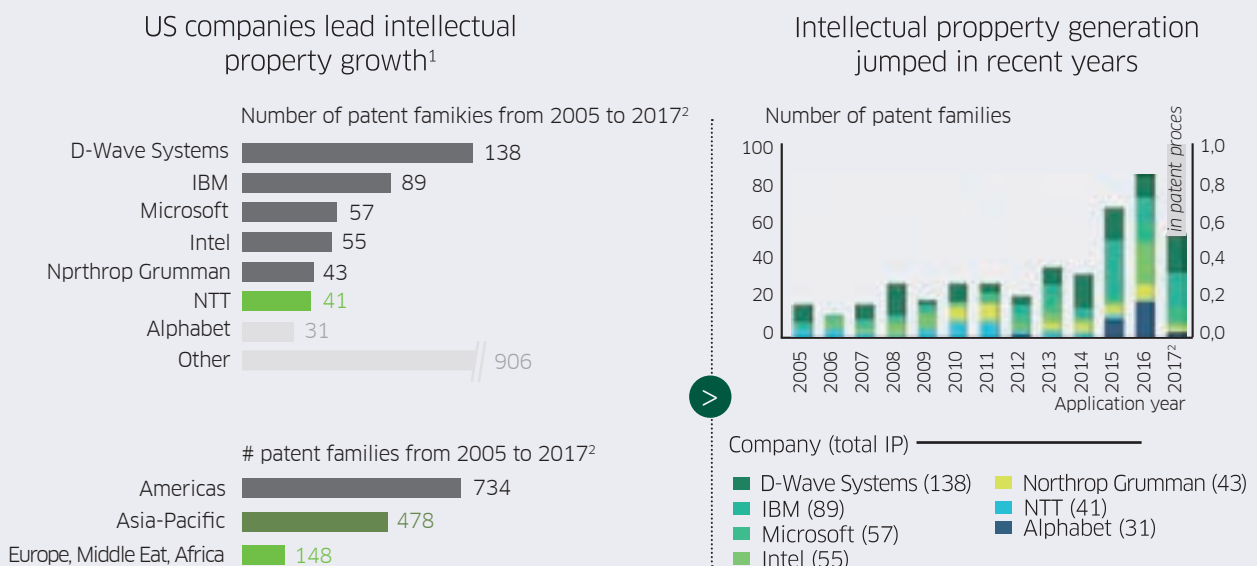
La “cuántica” se ha transformado en una verdadera carrera de supremacía geopolítica .

Modelos y mercados de patentes

Siguen incrementándose las patentes sobre tecnologías cuánticas de forma continua y exponencial.

Se hace un repaso por países sobre lo que está sucediendo y sorprende comprobar la intensa actividad que se está desarrollando entorno a las tecnologías cuánticas.

EXHIBIT 4. Quantum Computing Patents Are Increasing Quickly



Sources: Derwent Innovation; BCG Center for Innovation Analytics.

Note: Analytics based on approximately 250,000 patent families related to quantum technology filed since 2005; total IP patent families; patent activity does not reflect companies that pursue a “trade secrets” approach to protecting their IP.

¹Only showing the top patent owners.

²Patent data for 2017 is incomplete due to publication delays

EEUU



En los Estados Unidos, el complejo militar industrial (DARPA, IARPA, NSA, NASA Jet Propulsion, Los Alamos, Lockheed Martin, Raytheon...) está trabajando intensamente pero de manera discreta, superando a la inversión pública europea.

En la actualidad, **EEUU, ha promulgado una ley sobre ciencia y tecnología cuántica que ordena los recursos, los agentes involucrados, objetivos, e inversiones que despolitizan este nuevo reto geoestratégico.**

Se ha organizado el cluster de las tecnologías cuánticas en el que participan tanto las AAPP, universidades, centros tecnológicos, empresas multinacionales y startups. Es un esfuerzo de coordinación, priorización y foco.

Estados Unidos, está centrando sus esfuerzos en computación y simulación cuántica. En los últimos años y por la presión china, también está focalizando esfuerzos en telecomunicaciones y ciberseguridad cuántica.

El estado federal financia proyectos de investigación iniciales con fondos del programa SBIR, uno de los componentes del famoso Small Business Act.

Los laboratorios públicos que invierten en Computación Cuántica están presentes en casi todo el complejo militar-industrial federal con investigación interna o investigación financiada externamente sobre convocatorias de proyectos.

Algunos de estos proyectos son:

- **DARPA** financia tres grandes programas cuánticos: comunicaciones cuánticas de larga distancia, metrología cuántica aplicada a la creación de imágenes y diagnósticos de traumas neurológicos. Los fondos se destinan a financiar proyectos liderados por universidades, startups y compañías multinacionales.

- **IARPA (Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación de Inteligencia)** se ha centrado en financiar proyectos sobre computación y algorítmica cuántica aplicados, sobre todo a las redes neuronales profundas. Tiene un programa dedicado a la mejora de la calidad de los qubits; LogiQ. También financia programas liderados por universidades y empresas multinacionales americanas.
- **NSA** ha focalizado sus inversiones en ciberseguridad cuántica y post cuántica. Uno de sus objetivos principales es el proyecto que desarrolla la implementación del algoritmo de Shor que factoriza en números primos y permitiría descifrar los protocolos RSA. Sus proyectos son confidenciales pues entran en la categoría de geoestratégicos. Como todos estos organismos también subcontratan proyectos a universidades, y empresas multinacionales.
- **La Fuerza Aérea de los EEUU**, ha centrado sus esfuerzos en telecomunicaciones cuánticas y proyectos de ciberseguridad cuántica del tipo QKD. También desarrolla proyectos de investigación aplicados a tecnología para desarrollar qubits a través de superconductores. Tienen una unidad de algorítmica cuántica para aplicarlos a sus investigaciones.
- **La Oficina de Investigación Naval (ONR)** focaliza sus investigaciones en telecomunicaciones cuánticas y sistemas QKD así como los algoritmos que los soportan.
- **La Oficina de Investigación del Ejército** tiene su propio programa de investigación cuántica con foco en todas sus áreas: computación, telecomunicaciones, ciberseguridad, algorítmica y sensores.
- **La NASA** creó en 2013 el Laboratorio de Inteligencia Artificial Cuántica junto con Google y el centro de investigación AMES. Compraron uno de los primeros ordenadores cuánticos adiabáticos de D-Wave.
- **Los Álamos (LANL)** creó un instituto cuántico (QI) en 2002. Invierten en computación,

telecomunicaciones y criptografía cuántica junto con la UNSW australiana y la Universidad de Maryland. Esta institución, está financiada por el Departamento de Energía de los EEUU que también financia los laboratorios nacionales SANDIA que tienen proyectos en todos los campos de las tecnologías cuánticas.

- **La NSF** financia varios proyectos de investigación en tecnologías cuánticas y tiene el programa “iniciativa nacional de fotónica” del 2013 y el programa sobre “iniciativa cuántica nacional” desplegado en el 2017 con fondos federales solicitados por investigadores con un importe de 500 millones de dólares. La comunidad científica americana, está muy preocupada de perder el liderazgo sobre las tecnologías cuánticas en favor de China que ha puesto en marcha un proyecto financiado con grandes cantidades de fondos públicos y con el objetivo de superar a USA en tecnología en general, y especialmente en IA y cuántica en el 2050.

Esta preocupación se ve reflejada en la actividad del Senado y Congreso norteamericano para incrementar los presupuestos de investigación federal a expensas de las políticas de recortes presupuestarios en ciencia y tecnología existentes. En este caso, el Congreso de Estados Unidos, aumentó los presupuestos en investigación de las agencias descritas anteriormente para que pudiesen continuar y aumentar sus proyectos en tecnologías cuánticas.

Estados Unidos, se ha tomado muy en serio los avances chinos en este campo y ha promulgado la ley de “Iniciativa Cuántica Nacional” que organiza, regula y dota de presupuestos públicos a los diferentes organismos y proyectos estratégicos en torno a las tecnologías cuánticas.

Se tienen entre otros antecedentes, cuando el 26 de junio de 2018 se introdujo en la Cámara de representantes la **Ley Nacional de iniciativa cuántica (HR 6227)** que tiene como objetivo resolver los objetivos, las responsabilidades y los recursos públicos alrededor de la ciencia y las tecnologías cuánticas. En la misma fecha

una propuesta equivalente fue presentada en el Senado.

La Ley de Iniciativa Cuántica Nacional propone la creación de una “**Oficina Nacional de Coordinación Cuántica**” dentro de la Oficina de Política Científica y Tecnológica. Está redactando un plan cuántico nacional a 10 años con independencia de los ciclos electorales.

El plan cuántico nacional, se está redactando con todos los agentes involucrados de EEUU, incluidos complejos industriales de defensa y empresas multinacionales tecnológicas. Hay un verdadero interés en que otros países, como China, no se encuentren tecnológicamente por delante, en especial en aquellos asuntos que atañen a la ciberseguridad cuántica.

Canadá



Canadá es uno de los países de relevancia, la influencia del sector cuántico en el ámbito internacional tanto en investigación básica como en negocios, es significativamente mayor que el peso económico del país.

Canadá se distingue por una fuerte inversión en investigación básica en Computación Cuántica, incluyendo la Universidad de Waterloo, cerca de Toronto y la de Sherbrooke, cerca de Montreal.

En su tejido empresarial, en cabeza cuenta con la empresa **D-Wave** y el especialista en software cuántico 1QBit.

La Universidad de Waterloo recibió un presupuesto de \$ 120 millones en 2017 para sus diversos institutos de investigación cuántica. Sorprendentemente, también obtuvo fondos australianos por \$ 53 millones de UNSW, Telstra y el Commonwealth Bank of Australia.

En cuanto a inversión privada cabe destacar significativamente al propietario de la empresa BlackBerry de Waterloo, en concreto su presidente Michael Lazaridis.

Cuando Steve Jobs lanzó el iPhone one, Michael Lazaridis tiene conciencia de haber perdido su posición dominante en el mercado de móviles para empresa que tenía con los modelos de BlackBerry (donde llegó a controlar el 80% del mercado). Lazaridis, decide poner en marcha una estrategia arriesgada pero de futuro: invertir en ciencia y tecnologías cuánticas.

Inicialmente invierte \$ 150 millones en fundar **Perimeter**; un centro prestigioso de física teórica. Posteriormente funda el **CQC en la Universidad de Waterloo**, invirtiendo otros \$ 150 millones. Para acabar invirtiendo \$ 300 millones en un vehículo de inversiones en empresas de tecnologías cuánticas: **Quantum Valley Investment**.

Estas tres importantes inversiones, abarcan el conjunto de todo el sistema de innovación cuántica: Física teórica, física experimental e ingeniería y un fondo de inversión para crear nuevas empresas que lleven investigaciones y prototipos al mercado. Todo ello ha propiciado que a nivel institucional se hayan realizado cuantiosas inversiones por la gran presión del sector privado.

Otra nueva e interesante es Creative Destruction Lab que desarrolla proyectos sobre aprendizaje automático (machine learning), IA y tecnologías cuánticas. Muchas de las startups “cuánticas” canadienses salen de esta incubadora que poco a poco se está convirtiendo en referente internacional para los fondos de inversión que quieren invertir en cuántica. Los fondos de inversión tienen como referencia para invertir a las empresas que salen de esta incubadora.

Australia



Australia es un país que también apuesta por las tecnologías cuánticas. La agenda del Plan Nacional de Innovación y Ciencia lanzó 24 iniciativas y \$ 820 millones en fondos en 2015 de los cuales, se destinaron \$ 19 millones al Centro de Computación Cuántica (**CQCCT**) por un periodo de 5 años para desarrollar proyectos en Computación Cuántica.

Existe una labor muy importante entre las asociaciones público-privadas para el desarrollo de proyectos nacionales y la colaboración activa en proyectos con otros países.

Como ejemplo claro de esta **colaboración público-privada**, la **UNSW** (Universidad de Nueva Gales), **Commonwealth Bank of Australia** y el **operador de telecomunicaciones Telstra** están financiando \$ 52 millones para crear un procesador cuántico.

En cuanto a la colaboración con otros países, Australia colabora estrechamente con Singapur, EEUU y Francia.

La UNSW junto con la Universidad de Singapur trabajan juntos para la creación de satélites de telecomunicaciones cuánticos. La UNSW también colabora y son socios del programa francés CEA-LETI. Esta colaboración se firmó el pasado año de 2018 entre el primer ministro francés y el primer ministro australiano.

La Universidad de Sydney participa en un consorcio internacional integrado en el programa LOGIQ de IARPA-USA.

En los últimos años, se han creado nuevas empresas australianas en el campo de la cuántica: QuintessenceLabs participada por el grupo bancario Westpack, QxBranch, Silicon Quantum Computing y “h-bar” que tiene importantes conexiones con el prestigioso centro tecnológico japonés Riken. “h-bar” es socio fundador de la Quantum World Association-QWA.

Reino Unido



El Reino Unido, fue de los primeros en movilizarse en Europa y por la situación desencadenada por el Brexit, han intensificado su política de inversiones en ciencia y tecnologías cuánticas.

Ya en el 2013, impulsó el plan nacional sobre tecnologías cuánticas. El plan del Reino Unido se dirige a todos los mercados cuánticos usuales: metrología, computación, seguridad y específicamente en el campo de imágenes médicas.

El gobierno inglés se preocupa principalmente por la transferencia de tecnologías desde laboratorios a empresas. Sus esfuerzos se centran en impulsar un mercado de oferta y demanda y muy activamente en la creación de planes de formación que pongan en este nuevo mercado a los nuevos profesionales.

El plan inicial era invertir £ 270 millones en 5 años con el objetivo de aumentar el valor de la investigación en empresas nuevas lo más rápido posible. Poco a poco van incrementando los fondos para financiar el plan y, en estos momentos rondan los £ 1.000 millones que se acercan a los fondos de toda la UE en el impulso de la ciencia y las tecnologías cuánticas.

El **plan de Reino Unido** incluye la creación de una red de centros de innovación en tecnologías cuánticas, con los temas habituales: **Metrología** (con las universidades de Birmingham, Glasgow, Nottingham, Southampton, Strathclyde y Sussex), **comunicaciones cuánticas y Computación Cuántica**.

En cuanto al área de la investigación, muchos laboratorios están involucrados en la investigación cuántica, incluyendo grupos de investigación de la universidad de Oxford (con proyectos como **NQIT**, en el cálculo y la seguridad y la iniciativa **QuOpal** - Optimización y Aprendizaje Automático cuántico financiado por Nokia y Lockheed Martin).

La universidad de Cambridge, ha creado un centro de Información cuántica, que está trabajando en la parte matemática de la ciencia cuántica. La universidad de Glasgow tiene un grupo cuántico especializado en imagen. La universidad de York trabaja en el campo de las telecomunicaciones cuánticas y encriptación QKD. La universidad de Bristol se ha especializado en la formación de talento cuántico desarrollando cursos de doctorado en ingeniería cuántica muy focalizado en ciencias fotónicas.

Han apoyado la creación de varias empresas cuánticas como Oxford Instruments (criogenia), Quantum circuits (qubits superconductores), Quantum Motion Technologies (qubits CMOS), Cambridge Quantum Circuits (algorítmica cuántica y servicios), Tundra Systems (qubits fotónicos) y River Lane Research (software).

Ninguna gran empresa del Reino Unido parece estar especialmente involucrada en la Computación Cuántica aunque Toshiba está desarrollando junto con varias universidades de UK sistemas y equipos de telecomunicaciones y encriptación QKD.

Suiza



Suiza está trabajando intensamente en torno a las telecomunicaciones y criptografía cuánticas con la importante participación de la Universidad ETH de Zurich, que trabaja estrechamente con IBM.

La iniciativa Quantum Science and Technology (**QIST**) con un presupuesto de \$ 120 millones se está desarrollando con la colaboración de varias universidades: ETH de Zurich, Universidad de Basilea, Universidad de Ginebra y EPFL de Lausanne.

Empresarialmente, Suiza cuenta con el líder mundial de fabricación de equipos QKD y generación de números aleatorios cuánticos para las telecomunicaciones y encriptaciones cuánticas. Su capital inicial es ruso pero en el 2017 la coreana SK Telecom tomó una participación significativa de la empresa que se ha visto reforzada con la participación en el 2018 de la multinacional alemana de telecomunicaciones Deutsche Telekom.

ID Quantique es partner de la consultora Entanglement Partners para el mercado español y latinoamericano y es **socio fundador de la Quantum World Association-QWA**.

UE



Históricamente, los científicos europeos se han encontrado entre los más relevantes del mundo. Un ejemplo fue el proyecto Manhattan que, contrató a los mejores físicos europeos, especialmente alemanes, y que fueron el embrión para el futuro desarrollo de la física en las universidades y centros tecnológicos en EEUU.

En la actualidad, y respecto a la ciencia y tecnologías cuánticas lo siguen siendo. De los cien científicos más relevantes del mundo en este tema, se podría decir que la gran mayoría provienen de países europeos, incluido España. Por contra, Europa carece de una cuántica común, de un fuerte sector industrial de defensa y de fuertes empresas de tecnologías globales a nivel mundial. Es el caso de la dependencia tecnológica con las empresas de microprocesadores de EEUU o las grandes empresas americanas que desarrollan programas en computación y telecomunicaciones cuánticas.

Con el objetivo de paliar esta situación, en el 2016, la Comunidad Europea se moviliza

impulsando un documento de referencia para toda la comunidad científica y tecnológica europea: “**Quantum Manifesto**”. En la redacción de este documento, colabora de forma fundamental el científico español **Dr. Ignacio Cirac donde se exponen las bases y estructura de una política comunitaria en ciencia y tecnologías cuánticas**.

En 2018, Europa aprueba un importante proyecto: El **flagship europeo sobre tecnologías cuánticas**. El flagship nace para financiar la investigación colaborativa entre países, centros tecnológicos, universidades, laboratorios, grandes y pequeñas empresas en todos los sectores de la información cuántica: la metrología, las comunicaciones, la informática y simulación cuántica.

El flagship, está dotado con € 1,2 mil millones para los programas de desarrollo y difusión de tecnologías cuánticas, distribuidos en 10 años. El grueso de presupuesto se centra principalmente en la investigación de las capas físicas fundamentales de la Computación Cuántica. Contradice un poco, que el programa no tenga casi en cuenta las áreas de algorítmica y de software de la Computación Cuántica, que son en las que Europa podría destacarse.

El enfoque europeo se centra de manera tradicional en la financiación de programas de investigación fundamental y con una importante carga de estructura administrativa y de control de los proyectos.

Otra característica importante del eQosistema europeo es que las grandes empresas americanas colaboran con los centros científicos y tecnológicos europeos dotándolos de financiación y recursos. Esto tiene sus pros y sus contras a la hora de la independencia tecnológica europea y a la gestión del escaso talento cuántico internacional.

Esta dependencia de las empresas americanas está directamente relacionada con la diferencia tradicional entre investigación y empresas. La ausencia de importantes actores digitales en Europa capaces de tomar el relevo de la investigación y su llegada al mercado.

Desde el año 2018, la oferta de algunas empresas europeas como Atos y Telefónica y otras de demanda como Airbus o Volkswagen están tomando posiciones de forma muy interesante y participando en los proyectos financiados por el flagship.

El tejido de las nuevas empresas (startups) no está correctamente financiado ni en recursos ni en plazos; no existen fondos privados europeos que inviertan con un horizonte temporal a largo plazo en comparación a como lo están haciendo los fondos de inversión de América del Norte (EEUU y Canadá) donde las inversiones estratégicas son de horizontes temporales entre 10 y 15 años.

En resumen, se podría hablar de un escenario bastante clásico con una excelencia investigadora europea que se transforma en productos a través de los principales actores estadounidenses.

Por otro lado, Europa es muy activa en la organización de conferencias científicas sobre Computación Cuántica. Con algunos ejemplos como: la conferencia QIP en enero de 2018 en la Universidad de Delft en los Países Bajos, seguida de la conferencia Quantum Europe 2018 los días 17 y 18 de mayo de 2018, también en los Países Bajos. Otras conferencias de Computación Cuántica 2018 y 2019 que se han celebrado en Suiza, Portugal y España. Aun siendo esto positivo, siempre es recomendable ser capaces de conseguir retener el conocimiento científico dentro de las fronteras europeas.

En relación con España y el flagship europeo, el MINECO organizó en el 2016 unas reuniones periódicas a la que acuden fundamentalmente representantes de los centros científicos “cuánticos” españoles liderados por el **ICFO**. En estos encuentros, la administración responsable de la política de programas y fondos europeos, informa a todos los asistentes de las actividades que se están realizando y de los puntos de interés para poder acceder a los fondos del flagship.

En las primeras reuniones no se encontraban las empresas del sector que pudiesen aportar la visión del mercado que, poco a poco, se han ido incorporando. Entre otras las representadas a través del grupo de trabajo cuántico (**AMETIQ**) de la patronal de tecnología AMETIC. Este grupo de carácter empresarial participa activamente en estas reuniones y ha solicitado formalmente su incorporación como representante de España en la comisión empresarial del flagship en Bruselas.

En el capítulo relativo a España, se enumeran los proyectos del Flagship que se están liderando o participando.

Alemania



Alemania publicó en el año 2018 un importante informe sobre **el inventario de Computación Cuántica** en todo el mundo (**Entwicklungsstand Quantencomputer**) por parte de la agencia federal que protege los sistemas de información en el país. El informe se ha centrado en cuestiones de ciberseguridad. Este informe ha sido redactado por grandes especialistas en física teórica, matemáticas y ciberseguridad de las universidades de Saarland en Saarbrücken y de Florida en EE.UU.

Alemania cuenta con dos grandes laboratorios prestigiosos internacionalmente como el **Instituto Max Planck** (a cuyo frente en el departamento de óptica cuántica está el Dr. Ignacio Cirac uno de los científicos de referencia internacional en estos momentos) y el **Institut für Quanteninformation de Aquisgrán** especializado en qubits superconductores.

En cuanto empresas, destacan muy especialmente las que demandan tecnologías cuánticas y sobre todo las del sector de la automoción: **Volkswagen, Bosch o BMW**.

En Alemania no destacan las empresas de oferta siendo dos las que se han identificado: InfiniQuant (criptografía QKD) y PicoQuant (contadores de fotones). Tampoco cuentan con empresas de Computación Cuántica aunque **sus centros de supercomputación están trabajando junto a otros centros de supercomputación europeos**, entre ellos el **BSC** de Barcelona, **en diseñar un chip europeo clásico y un prototipo de un chip cuántico**.

Francia



Francia cuenta con una importante tradición en físicos cuánticos como **Alain Aspect y Serge Haroche**, premio Nobel de física en el año 2012 por sus trabajos en óptica lineal. También cuenta con relevantes científicos cuánticos en la diáspora: **Michel Devoret o Philippe Grangier**.

En cuanto a los laboratorios trabajando en tecnologías cuánticas se pueden destacar el **CEA, CNRS, INRIA, y (LaBRI)**. En el CEA, el equipo Quantronics de Saclay de Daniel Estève está trabajando en qubits superconductores. Colaboran estrechamente con la Universidad de Yale en EEUU.

El equipo Maud Vinet en CEA-LETI en Grenoble es el origen de la tecnología FD-SOI utilizado por STMicroelectronics para producir componentes electrónicos con bajo consumo. El CEA lanzó en 2018 una asociación con la UNSW Australia y nueva empresa de Silicon quantum computing (SQC) un CMOS para crear procesadores cuánticos.

El **INRIA** liderado por Maziar Mi Rahimi, está trabajando en el desarrollo de qubits superconductores.

El **SIRTEQ**, se centra en su lado en la investigación en tecnología de comunicaciones cuántica.

El **CNRS** colabora con el grupo de trabajo Quantum Computing, que está trabajando fundamentalmente en algorítmica. También hay un grupo del Centro de París para Quantum Computing (**PCQC**) liderado por Philippe Grangier, colaboran desde 2017 con el IQOQI austríaco en el envío de claves cuánticas por satélite en el **proyecto Nanobob**.

Finalmente, el ANR cerró en febrero de 2018 una convocatoria de proyectos de investigación, lanzada como parte de un acuerdo de investigación con Japón (CREST). Hay otra colaboración internacional sobre cuántica que involucra a Francia, los Países Bajos (QuSoft) y Letonia.

Empresarialmente sólo destaca la multinacional Atos. Como startups cuentan con algunas iniciativas como Muquans, CryoConcept o Qandela.

Atos, está centrando la política, estrategia y proyectos sobre tecnologías cuánticas en Francia. Su estrategia lanzada en 2016 pasa por convertirse en un player internacional en Computación Cuántica en el cloud y desarrollar software propio como el lenguaje **aQasm** que puede funcionar en cualquier computadora cuántica presente o futura.

Atos ha desarrollado y vende con gran éxito un simulador cuántico en servidores basados en Intel; el Atos Quantum Learning Machine. Atos como parte de su estrategia internacional y de comunicación, ha organizado un consejo científico en el cual participan Cédric Villani, Alain Aspect, Serge Haroche, Daniel Esteve, David Di Vincenzo (IBM) y Artur Ekert (inventor de QKD).

Airbus, una de las empresas de aeronáutica más relevantes del mundo, ha anunciado importantes inversiones en tecnología y profesionales para trabajar en proyectos que incorporan tecnologías cuánticas.

La banca también muestra interés y está iniciando programas en especial sobre ciberseguridad cuántica.

Holanda



Holanda, es un país que, aunque de dimensiones pequeñas, está muy activo en ciencia y tecnologías cuánticas. La Universidad de Delft (TU Delft) es uno de sus principales activos en este campo.

El gobierno holandés, lanzó en 2015 un plan para la creación de un ordenador con una inversión de € 135 millones. La inversión se realizó en **QuTech, el centro de investigación cuántica de TU Delft**. QuTech trabaja junto con Intel y Microsoft que aportan importantes presupuestos a las investigaciones.

Holanda, como muchos países europeos, tiene importantes científicos cuánticos en la diáspora, sobretudo en empresas de EEUU.

QuTech ha lanzado junto con el ICF de Innsbruck (Austria) y el Centro de París para Computación Cuántica un importante proyecto europeo que está financiado por el programa Flagship de la UE o programas en tecnologías cuánticas de la UE 2020.

Holanda, cuenta con una interesante startup que es spin off de TU Delft: **Delft Circuits**, especializada en la fabricación de circuitos superconductores.

Austria



La inversión de Austria en tecnologías cuánticas se concentra en Innsbruck con el **IQOQI**. Trabajan, entre otras cosas, en el diseño de qubits basados en trampas de iones. El resultado es la spin off **Alpine Quantum Technologies**, creada por Rainer Blatt del IQOQI que basándose en la tecnología de

iones atrapados comercializan ordenadores cuánticos de trampas de iones.

Austria tiene una especial singularidad basada en una historia personal entre dos científicos: el austriaco Anton Zeilinger y el Chino Jian Wei Pan. Pan es hijo de tesis de Zeilinger y entre los físicos teóricos es una cuestión de relevancia. Sin este dato personal no se entiende la estrecha colaboración de Austria en el desarrollo de la ciencia y tecnología cuánticas de China que lidera Pan. **Las experiencias de Zeilinger sobre teletransporte cuántico en la isla canaria de La Palma han sido la base de la primera transmisión de claves cuánticas con el satélite chino "Micius"**.

Dinamarca



La investigación cuántica en Dinamarca se organiza en torno al Centro de Dispositivos Cuánticos (QDev) del Instituto Niels Bohr de la Universidad de Copenhague. Están especializados en qubits topológicos y colaboran estrechamente con Microsoft Research que también ha optado por este tipo de tecnología.

Dinamarca no parece que haya podido desarrollar un incipiente tejido de startups. A pesar de ello, no deja de ser un país con mucho interés.

Rusia



Es importante destacar que Rusia por el momento, no se tiene constancia, de que haya entrado en la carrera geoestratégica de las tecnologías cuánticas que involucra especialmente a EEUU y la República Popular China. Rusia cuenta con importantes empresas de ciberseguridad como Kaspersky o Positive technologies pero no se tiene constancia de que estén desarrollando programas en torno a tecnologías cuánticas.

Tampoco se han dado a conocer experiencias empresariales en forma de startups en este país.

Hay una excepción y es la inversión de Sergei Belusov (propietario de la empresa Paralell) en los inicios de la empresa Suiza de telecomunicaciones cuánticas QKD ID Quantique.

Rusia cuenta con una importantísima tradición en los campos de la física y la ingeniería. Con la caída del muro de Berlín, científicos rusos emigraron hacia otros países, especialmente EEUU pero también hacia universidades como Barcelona en España. Este núcleo de **físicos teóricos rusos** tuvo mucho que ver en el avance tan significativo que **hace que las facultades de física de Barcelona se cuenten entre las más prestigiosas del mundo**. Los físicos teóricos españoles, especialmente en Barcelona, tienen un gran prestigio internacional y son referentes para los equipos de trabajo experimentales.

En el año 2012 se creó el **Russian Quantum Center (RQC)**, un centro de investigación dedicado a los diferentes campos de aplicaciones de la Computación Cuántica y la criptografía cuántica: superconductores, fotónica y metrología cuántica. Colaboran con organizaciones internacionales de investigación en los Estados Unidos (MIT),

Canadá (Universidad de Calgary), Alemania (Instituto Max Planck de Óptica Cuántica), Reino Unido (Universidad de Bath), etc.

En el RQC aparecen importantes científicos europeos, pero no parece conseguirse atraer el talento internacional. No se considera que Rusia se autoexcluya en la carrera por la computación o ciberseguridad cuánticas siendo como es un tema geoestratégico. Con el tiempo se podrá apreciar si las empresas rusas de ciberseguridad evolucionan hacia tecnologías cuánticas.

En cuanto a los países asiáticos se destacan a Japón, Corea del Sur, Singapur.

Japón



En Japón, la estrategia a largo plazo pasa por la implicación de las grandes corporaciones industriales japonesas de tecnología como **Fujitsu, NEC, NTT, Toshiba o Hitachi** y por la puesta en marcha de un fondo de inversión de \$ 1B por parte de **Softbank** con un objetivo claro de invertir en alta tecnología y por supuesto en ciencia y tecnologías cuánticas.

En cuanto a laboratorios estatales, Japón cuenta con los Institutos Nacionales de Ciencias y Tecnología Cuántica y Radiológica (**QST**) creados en abril de 2016 con un presupuesto anual de \$ 487 millones.

En 2017, el Instituto Nacional de Tecnologías de la Información y la Comunicación (**NICT**) llevó a cabo una demostración de telecomunicaciones cuánticas utilizando un microsatélite. En este tema, Japón compite con China por el despliegue de una red de satélites de telecomunicaciones cuánticas.

El JFLI es un laboratorio con una gran tradición en colaboraciones internacionales. Fundado

en el 2009 y con sede en Tokio, trabajan con investigadores de la Universidad de Tokio, Keio, con universidades francesas y australianas. Este equipo multidisciplinar y claramente internacional, aborda temas que van desde la física fundamental a la algorítmica y estudia la viabilidad de la computación y criptografía cuántica a gran escala.

En el sector privado, los principales grupos industriales japoneses se centran principalmente en las telecomunicaciones cuánticas y la criptografía, al igual que en China y Corea del Sur.

No obstante, el segundo semestre de este año, NTT y Fujitsu han anunciado con gran revuelo internacional, la posibilidad de acceder a sus simuladores cuánticos de forma remota y en abierto.

Este anuncio, se ha traducido en España en un substancial incremento de la actividad comercial de Fujitsu y de posibles colaboraciones con importantes centros científicos y de supercomputación para desarrollar tecnología y proyectos en torno a la ciencia y tecnología cuántica. **Fujitsu, participa en el grupo cuántico de AMETIC; AMETIQ.**

NTT cuenta con cuatro laboratorios de investigación aplicada en tecnologías cuánticas, muy enfocados en telecomunicaciones y criptografía cuántica. En Noviembre de 2017, se anunció el desarrollo **QNNcloud**, un ordenador cuántico utilizando líneas ópticas (fones). En Septiembre del 2018, NTT anuncia que pone en modo cloud accesible a su ordenador cuántico.

Con la reciente compra de Everis por parte de NTT, habrá que seguir muy de cerca cómo evoluciona la implicación de Everis/NTT en este mercado. En el último encuentro internacional de emprendedores y startups focalizadas en tecnologías frontera, Everis/NTT invitó a participar a la consultora de tecnologías cuánticas Entanglement Partners.

Toshiba Corporation e Hitachi, tienen una amplia experiencia en colaboraciones con la universidad de Cambridge en UK. Están trabajando en el desarrollo de equipos para la transmisión de claves cuánticas (QKD) y en experiencias reales en telecomunicaciones cuánticas en UK y Japón.

NEC también está trabajando en claves cuánticas (QKD).

Corea del sur



En Corea del Sur, el operador de telecomunicaciones **SK Telecom** junto con la tecnológica global **Samsung**, han impulsado la “**Quantum Alliance**” con el objetivo de crear estándares en telecomunicaciones cuánticas y encriptación QKD. En esta alianza, también participan la Suiza ID Quantique, la Sueca (Microsoft) Nokia y la Alemana Deutsche Telekom.

Este año, SK Telecom ya apareció junto a ID Quantique en el MWC18 ya que había tomado posiciones de inversión en el 2017. Deutsche Telekom también ha invertido en ID Quantique y estaremos muy atentos a lo que sucede en la Quantum Alliance y como se visualiza en el MWC19.

También está por ver qué sucede con la empresa de servicios tecnológicos T-Systems, participada por Deutsche Telekom y qué estrategia adopta en cuanto al desarrollo de servicios o tecnologías cuánticas. En España, T-Systems (especialmente en Barcelona), tienen una importante presencia.

Singapur



Singapur es un excelente ejemplo sobre cómo un pequeño país cree verdaderamente en que la ciencia y la tecnología es uno de sus pilares de bienestar presente y futuro. Encajado entre grandes economías necesita potenciar el recurso del conocimiento y talento para poder sobrevivir.

Singapur tiene un gran dinamismo económico y empresarial y es un gran atractor de talento internacional. La política de desarrollo de ciencia y tecnologías cuánticas se desarrolla en la Universidad de Singapur **NUS** y en su Centro de Investigación de Tecnologías Cuánticas **CQT**. Están investigando en computación y criptografía cuánticas.

Singapur lanzó en 2015 su nanosatélite Galassia-2U, creado por el CQT y utilizado para probar comunicaciones cuánticas encriptadas QKD. Esta experiencia facilitó la creación de la startup S-Fifteen Space Systems.

En los últimos meses, del CQT están surgiendo spin off bien financiadas por fondos de inversión orientales. Como ejemplo podemos citar Entrópica Labs con una fuerte vinculación a la Quantum World Association-QWA y al eQosystem de Barcelona ya que el **Dr. José Ignacio Latorre**, socio de las startups de Barcelona Entanglement Partners y Qilimanjaro es profesor asociado en la Universidad de Singapur y el CQT.

China




China ha expresado con claridad que para el 2050 quiere liderar el mundo como la primera potencia tecnológica en todos los campos y, en especial en aquellas tecnologías que tienen un alto componente estratégico y de seguridad nacional como la súper computación (clásica y cuántica), IA, telecomunicaciones y ciberseguridad cuánticas, data science, blockchain...

En los cinco últimos años, ha desarrollado un **completo programa en tecnologías cuánticas en todas sus áreas: criptografía, telecomunicaciones, simulación y Computación Cuántica.**

El presidente Xi Jinping, ha movilizado ingentes recursos públicos y ha puesto a trabajar al complejo industrial-militar chino al servicio del desarrollo de las tecnologías cuánticas. La Computación Cuántica se integró en las prioridades del 13er plan que cubre el período 2016-2020. Una hoja de ruta cuántica China, que data de 2016.

El proyecto más ambicioso es el anuncio de un centro de investigación cuántica con una inversión prevista de \$ 10.000 millones para poner en marcha el **Laboratorio Nacional de Ciencias de la Información Cuántica**, que se encuentra en **Hefei**. Este laboratorio se enfocará en Computación Cuántica y metrología, tanto para aplicaciones militares como civiles.

Desde el punto de vista científico, la Universidad de Ciencia y Tecnología de China (**USTC**) de la Academia de Ciencias de China (**CAS**) está liderando el programa con Jian Wei Pan al frente. Recordemos que fue el doctorando del científico austriaco Anton Zeilinger. **El equipo de Pan tiene previsto llegar a los 50 qubits en al 2022.**



“China y España, han firmado un acuerdo de colaboración con el objetivo de participar en el Gran Telescopio de Canarias (GTC) y evaluar la posibilidad de construir un nuevo telescopio”

De Pachango - Trabajo propio, CC BY-SA 3.0.

Las universidades chinas, está colaborando en el área de Computación Cuántica con universidades y centros tecnológicos de Singapur, UK y Australia.

Una de las empresas más relevantes de China y ahora del mundo, **Alibaba Cloud**, está colaborando con las universidades Chinas y el equipo de Pan en desarrollar un laboratorio de computación y criptografía cuántica en Shanghai. El objetivo es desarrollar encriptación cuántica para mejorar la ciberseguridad de las transacciones de comercio on line y las redes de centros de datos. Alibaba puso en el cloud, con un modelo similar al de IBM Q un ordenador cuántico de 11 qubits y un simulador cuántico de 22 qubits.

Todavía China no supera a USA en cuanto a Computación Cuántica pero sí en cuanto a telecomunicaciones (terrestres y satélites) y criptografía cuánticas.

En estos momentos China cuenta con varias ciudades cableadas con fibras ópticas dedicadas y dotadas de tecnologías de claves cuánticas QKD para la ciberseguridad. Es verdad que son instalaciones de uso militar y para infraestructuras críticas. Pero, poco a poco tanto el sector empresarial como el financiero utilizarán estas infraestructuras absolutamente seguras.

El laboratorio de Pan, lanzó un satélite (**Micius**) con capacidad de generar claves cuánticas entre las ciudades de Beijing y Viena. En estos momentos **los equipos de Pan y Zeilinger están estudiando la posibilidad de lanzar un satélite que cubra los casi 9.000 km entre Beijing y la isla canaria de La Palma.** Como hemos mencionado en el apartado de Austria,

Anton Zeilinger tiene un equipo destacado en el observatorio astro-físico del Roque de los Muchachos en La Palma.

Durante este año el Presidente de la Academia de Ciencias de China visitó el observatorio astrofísico de Canarias dependiente del IAC y el Gran Telescopio de Canarias GTC (situado a 2.400 m de altitud en el Roque de los Muchachos en la isla canaria de La Palma y con una dimensión de su lente (de momento, la más importante del mundo, de 10.5m de diámetro). **China y España, han firmado un acuerdo de colaboración con el objetivo de participar en el Gran Telescopio de Canarias (GTC) y evaluar la posibilidad de construir un nuevo telescopio que pudiera ser el más grande y potente del mundo.**

En cuanto al lado empresarial, China cuenta con las telcos **Huawei** y **ZTE** y las startups **Quantum CTek** y **Qasky Science** especializadas en criptografía cuántica.

Alibaba Cloud y Tencent han anunciado inversiones millonarias en desarrollar tecnologías cuánticas en los próximos años.

En el 2017, Huawei instaló en Munich un centro de tecnologías cuánticas con un importante programa de atracción de talento.

La carrera cuántica entre USA y China es intensa y hace que se inviertan grandes cantidades de fondos públicos y privados en ambos países acortando los plazos de adopción de estas tecnologías. La historia se repite con la carrera nuclear, armamentística o espacial. Es una auténtica guerra y no se parará hasta que alguna de las dos superpotencias la gane pues su liderazgo mundial depende de ello.

OTROS PAÍSES

Israel



Se están produciendo avances significativos en Israel que entiende las telecomunicaciones y ciberseguridad cuánticas como un elemento estratégico y están financiando varios proyectos pero de forma muy discreta.

Empresas de referencia en ciberseguridad israelíes están iniciando experiencias en el campo de la post cuántica y la seguridad.

Podemos destacar la startup creada hace unos meses: Quantum Machines.

India



El gobierno Indio acaba de lanzar un fondo para investigar sobre telecomunicaciones cuánticas y construir un computador. De momento, centran sus esfuerzos en grupos científicos de universidades de referencia en la India.

En cuanto a empresas, estamos esperando a ver que hace Tata en este campo y suponemos que se incorporarán en breve a las experiencias que otras empresas de automoción están desarrollando.

PAÍSES AMÉRICA LATINA

En Latinoamérica hay un incipiente desarrollo de grupos de investigación en Chile, Argentina, Colombia, Brasil y México.

La Universidad federal de Río de Janeiro o la de Natal en Brasil, CONICET en Argentina o CONYCIT en Chile y el Tecnológico de Monterrey en México.

Barceloanqbit-bqb está trabajando en crear el observatorio de tecnologías cuánticas de España y Latinoamérica para poner en valor las actuaciones que se están realizando y coordinar una estrategia común en la región.



Merece la pena 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 al que llamaremos “**eQosystem**”.

En España, existe una importante comunidad científica cuántica especializada en investigación fundamental pero no tanto, una comunidad científica experimental ni tampoco, un ecosistema empresarial de oferta y menos de demanda. Esta comunidad científica, surge de estrategias Bottom up y han estado financiadas por programas públicos estatales o autonómicos.

Las decisiones estratégicas sobre ciencia y tecnologías cuánticas han sido muy limitadas y, excepto con la creación del **ICFO**, no ha habido un programa nacional sobre ciencia y tecnologías cuánticas.

Hasta este año 2018, no se inició una política estratégica de impulso de un tejido empresarial tanto de oferta como de demanda y ha sido por la presión del sistema empresarial: empresas españolas multinacionales con algún interés en tecnologías cuánticas, multinacionales “cuánticas” con sede en España y grupos empresariales “cuánticos” fundados durante el 2017 como son **AMETIQ** y la **Quantum World Association-QWA**.

A corto plazo, la estrategia española se centra en el flagship cuántico de la UE. La participación española en los proyectos europeos financiados por el flagship será más

importantes si se incide en los aspectos con ventajas competitivas que tiene España y es su importante capacidad de investigación fundamental. Es verdad que una política “competitiva” de concentración de los recursos en pocos centros europeos, penalizarían a España por lo que es importante adoptar las medidas de presión que minimicen esta posibilidad.

En estos momentos no hay otra estrategia de las AAPP para financiar nuevos proyectos. Es, por tanto, muy complicado que España reciba fondos suficientes para no quedar relegada en Europa ya que los fondos del flagship están directamente relacionados con los fondos que aporta cada Estado.

Otro de los aspectos a resolver a corto plazo es que las tecnologías cuánticas están inmersas en una verdadera “guerra de talento” internacional. En el mundo habrá en torno a 100 personas que saben realmente de esto de la cuántica.

Es imprescindible crear verdaderos “centros de excelencia cuántica” que sean capaces de atraer el mejor talento internacional, y lo más importante, atraer al talento español en la diáspora. El caso más relevante es el ICFO.

España es una auténtica potencia en cuanto a talento. Científicos españoles como el Dr. Ignacio Cirac, Director en el Max Planck, Dr. Dario Gil, CVP en IBM, Dr. Jordi Ribas, GPV en Microsoft, Dr. Sergio Boixo en Google o el Dr. Borja Peropadre en Zapata Computing y muchos otros.



La diáspora española de “talento cuántico” es interminable. Una verdadera “fuga de cerebros”. A muchos de ellos, les gustaría volver a España, pero necesitan proyectos de investigación y/o empresariales solventes y con proyección temporal de por lo menos cinco años.

Sería necesario construir nuevos modelos empresariales y financieros para impulsar grandes proyectos de país con la intervención del sector público y privado a largo plazo que puedan superar los ciclos políticos y el de las inversiones de fondos a corto plazo.

El talento cuántico que reside en España es muy relevante y muy reconocido en ámbitos internacionales. Entre otros, se podría citar a: **Dr. José Ignacio Latorre, Dr. Juan José García Ripoll, Dr. Vicente Martín Ayuso, Dr. Pol Forn-Díaz, 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. Adan Cabello, Dr. Fernando Luis Vitalla, Dr. David Pérez García y, un largo etcétera de grandes científicos.**

Esta es solo una pequeña muestra de algunos de los científicos en estas disciplinas que están liderando algunos de los grupos que desarrollan ciencia y tecnología cuántica en España.

En cuanto al medio y largo plazo se busca impulsar un “programa nacional estratégico” que incida de forma explícita en el apoyo a las tecnologías cuánticas. Permitiría la financiación de proyectos de investigación experimentales y daría viabilidad a futuros proyectos empresariales.

Las tecnologías cuánticas son absolutamente estratégicas para la seguridad nacional, seguridad de infraestructuras críticas y para el desarrollo de importantes sectores industriales.

Si analizamos algunas políticas de las grandes potencias cuánticas todas cuentan con iniciativas estratégicas nacionales que incluyen un conjunto de medidas relevantes: Ley sobre tecnologías cuánticas, impulso de una oficina estatal de coordinación de la estrategia cuántica y la creación de un Consejo Nacional de tecnologías cuánticas compuesto por las administraciones públicas, los centros científicos y la industria.

Hay que abordar de forma inmediata cuatro desafíos estratégicos: la coordinación entre el gobierno y las instituciones públicas y privadas, el desarrollo de la fuerza laboral especializada, conexiones intercomunitarias entre disciplinas, y mantener una cultura de descubrimiento.

El 29 de Octubre, el Dr. Ignacio Cirac manifiesta en La Vanguardia:

“¿Y España?”

Se está quedando al margen. Me gustaría que no fuese así. Que hiciese una apuesta firme en este campo que puede ser clave en el futuro. Ahora es el momento de invertir si no nos queremos quedar detrás. Hace falta hacerlo a tiempo si queremos mantenernos al nivel de Alemania, Francia o UK. Ya se que es difícil, pero hay que potenciar los equipos que tienen posibilidad de competir.”

El mensaje de Ignacio Cirac es muy claro: Ahora es el momento de invertir y no fiarlo todo a los fondos del flagship.

‘El talento cuántico que reside en España es muy relevante y muy reconocido en ámbitos internacionales’

En los últimos dos años, han surgido varias iniciativas “privadas” - sobre todo en Barcelona y Madrid - que están conformando un incipiente eQosistema en torno al think tank barcelonaqbit-bqb, AMETIC y a unos de los centros fotónicos más relevantes del mundo, sino el primero; el ICFO.

Las grandes multinacionales españolas como Telefónica, Indra, GMV, entidades financieras, etc, todavía no están participando activamente, han empezado desarrollando algunos pilotos o PoCs.

Por otro lado, por primera vez en la historia del IBEX35, un físico teórico, el Dr. Ignacio Cirac, está en su consejo. Son indicios de un cambio muy interesante.

Las grandes multinacionales de oferta, ven en España un mercado muy incipiente como para tomar verdaderas posiciones. Quizás **IBM, ATOS y ACCENTURE** son las que tiene más avanzado su roadmap de despliegue de su oferta cuántica en España.

MICROSOFT, ha tomado una posición relevante instalando en Barcelona uno de sus “**Design Center & Quantum Lab**”. Esta iniciativa, sitúa a Barcelona definitivamente como un hub cuántico internacional.

FUJITSU está pensando invertir en España para construir un chip cuántico.

ATOS está muy activo comercializando su simulador cuántico.

HUAWEI ha participado junto con la UPM y Telefónica en el piloto del despliegue de una red comercial encriptada cuánticamente.

Es muy interesante la toma de posiciones de Deutsche Telekom en el accionariado de la

empresa de ciberseguridad cuántica suiza ID Quantique. Habrá que seguir muy de cerca lo que hace T-Systems en España.

El último informe de Gartner con destino 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 permita a las empresas de demanda considerar en sus planes estratégicos el valor de estas tecnologías emergentes.

Gartner deja claro que las tecnologías cuánticas no son un tema de veinte o treinta años. Se espera que entre cinco y siete. No es mucho tiempo para aprender, comprender todo ello y adoptar medidas sobre todo en lo que se refiere a los aspectos de ciberseguridad y telecomunicaciones.

Quiero destacar, la valentía y visión de futuro de tres entidades no científicas que han liderado la difusión internacional de las tecnologías cuánticas: **el think tank barcelonaqbit-bqb** y a las dos asociaciones empresariales que se han atrevido a liderar grupos de empresas de oferta y demanda con interés en la creación de un mercado de las tecnologías cuánticas en España; con sede en Barcelona la **Quantum World Association-QWA** y con sede en Madrid y bajo el paraguas de AMETIC - la patronal de empresas tecnológicas de España - que ha apostado por organizar un grupo de trabajo cuántico en su comisión de innovación: **AMETIQ**. Son iniciativas privadas que están liderando la creación del mercado cuántico de España.

Las empresas que tienen su negocio entorno a las tecnologías cuánticas o las que las tienen que utilizar para la mejora estratégica de su negocio, se pueden clasificar en empresas de oferta y de demanda. Las empresas de oferta pueden ser consultoras, de software,

hardware, inversiones, tecnologías auxiliares, telecomunicaciones o ciberseguridad cuántica - “cyberseQurity”.

Las primeras empresas o startups que surgen en España lo hacen alrededor de dos núcleos: uno de innovación y científico, el otro empresarial.

El polo surgido del venture builder de la ingeniería de software Opentrends en Barcelona; The Carrot Cake que participó decididamente en la creación del Think Tank barcelonaqbit-bqb, la primera consultora sobre tecnologías cuánticas de España y Latinoamérica; Entanglement Partners SL y la asociación empresarial Quantum World Association -QWA. Así mismo desde Entanglement Partners se participó muy activamente en la creación de AMETIQ.

De este polo empresarial, a parte de Entanglement Partners, han surgido las empresas Qilimanjaro, Multiverse Computing o Quantum 2 Business.

El polo surgido del ICFO en Barcelona que ha lanzado dos spin off: Quside y Keysight.

En la siguiente figura se pueden apreciar las startups creadas en Barcelona en el último año.

La creación de startups es muy relevante para alimentar el eQosystem. La creación de una estrategia de tecnologías cuánticas únicamente sustentada en grandes multinacionales no funcionaría.



En esta foto, se aprecian a los CEOs de las startups del cuadro anterior. En Barcelona, hay un evidente deseo de estas startups de colaborar entre ellos y potenciar la creación de nuevas empresas. También esta iniciativa es absolutamente privada.

A continuación se enumeran y describen la actividad, la filiación y el máximo responsable en España de las empresas, entidades non profit y centros científicos de España que tienen su foco en la ciencia y tecnologías cuánticas.

- A)** Startups.
- B)** Empresas multinacionales españolas.
- C)** Empresas multinacionales con sede en España.
- D)** Empresas de demanda.
- E)** Entidades non profit.
- F)** Entidades científicas y centros tecnológicos.
- G)** Otras iniciativas.

QuantumBarcelona Qosystem















A. Startups

1. Entanglement Partners SL.

Con sede en Barcelona, Madrid, San José de California y Kerala en la India.

Es la primera empresa consultora “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 a relevantes científicos de la información cuántica. Entre sus partners principales, están la ingeniería de software Opentrends y la empresa Suiza ID Quantique/SK Telecom/ Deutsche Telekom.

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 en la patronal de tecnología AMETIC.

La preside el Dr. Josep M. Vilà, cuenta como CEO a D. Alfonso Rubio-Manzanares y como director científico al Dr. José Ignacio Latorre.

Los 15 integrantes de Entanglement Partners son socios.

2. Metempsy SL

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. Metempsy, puede ser el núcleo inicial del centro de investigación en tecnologías cuánticas que Microsoft quiere instalar en la Torre Agbar.

Su CEO es el Dr. Toni Juan.

3. Zapata computing

Startup 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.

Según anuncian en su web: “Desarrollamos software y algoritmos de Computación Cuántica para resolver problemas críticos de la industria. Sus oficinas principales, están en The Engine, la incubadora de empresas de inicio del MIT en Cambridge, MA. El CEO es Christopher Savoie y su Director científico es el Dr. Alan Aspuru.

4. Sygnadine/keysight

Con sede en Barcelona.

Es una spin off del ICFO.

Empresa manufacturera electrónica que produce módulos de generación de frentes de onda y digitalizadores utilizando tecnología FPGA programable. Fue adquirida por la multinacional Keysight para desarrollar módulos de control y lectura de sistemas cuánticos para Computación Cuántica.

El CEO es Marc Almendros.

5. QuSide

Con sede en Castelldefels, Barcelona.

Es una spin off del ICFO.

Diseñan y comercializan tecnologías cuánticas para alimentar todos los dispositivos conectados con componentes de la más 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.

El Dr. Carlos Abellán es el CEO.

6. Qilimanjaro

Con sede en Barcelona.

Ofrecen un servicio de Computación Cuántica abierta. Desarrollan computadoras cuánticas prácticas. “Nuestro 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 puedan guiarse a través de este nuevo paradigma que cambia el juego”. Han puesto en el mercado internacional el primer ICO cuántico del mundo para realizar sus proyectos.

El responsable es el Dr. Pol Forn.

7. Quantum2Business - qb

Con sede en Barcelona.

Empresa de consultoría estratégica y agencia internacional de marketing digital especializada en servicios para la ciencia, tecnología y gestión del talento en torno a tecnologías disruptivas: Quantum, IA, Blockchain...

Cuentan como CEO a Albert Gil.

8. Multiverse Computing

Con sede en Barcelona

Multiverse Computing se dedica a la aplicación de la Computación Cuántica a los problemas imposibles de resolver con 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 a 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...).

Los fundadores son: Dr. Roman Orus, Dr. Sam Mugel y Dr. Enrique Lizaso. Son autores de dos de los artículos más consultados en Computación Cuántica aplicada del último año: 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.

9. VLC Photonics

Con sede en Valencia.

Es una Spin Off de la UPV.

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.

Cuentan como CEO a Iñigo Artundo, por el momento único representante español en el grupo de trabajo de empresas del flagship europeo.

Agosto 2019, Xanadu and Multiverse Computing sign a partnership agreement. The two startups will collaborate towards devising financial applications of optical quantum computing.

B. Multinacionales españolas

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

1. Telefónica

Con sede principal en Madrid.

Han 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 pasado año 2018.

2. GMV

Con sede principal en Madrid.

Cuenta con un importante departamento de ciberseguridad y telecomunicaciones. Están trabajando en soluciones de ciberseguridad cuántica y post cuántica.

Es miembro fundador del grupo de trabajo AMETIQ.

Su Director General es Luis Fernando Alvarez.

C. Multinacionales no españolas con sede en España

1. ACCENTURE

Con sede principal en España en Madrid.

ACCENTURE es líder global y local en servicios profesionales de Estrategia, Consultoría, Digital, Tecnología y Operaciones. Con más de 442.000 empleados en todo el mundo y más de 11.000 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.

Accenture es miembro fundador del grupo de trabajo AMETIQ.

El responsable de tecnologías cuánticas es Ulises Arranz.

2. 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.

Darío Gil, un español que ostenta el cargo de Director Mundial de IBM Research. A su cargo tiene tres mil científicos de doce laboratorios en seis continentes compaginando el liderazgo de los proyectos de inteligencia artificial y de computación cuántica.

3. MICROSOFT

Con sede en la Torre Agbar de Barcelona.

La multinacional americana MICROSOFT, ha abierto en Barcelona un "Design Center and Quantum Lab".

Su responsable es Toni Juan.

4. ATOS

Con sede principal en Madrid.

Comercializan un interesante simulador cuántico.

Su responsable es Albert Trill.

Fujitsu, Everis/NTT y Huawei están iniciando su puesta en escena en España. De momento hay muy poca información de sus actividades en este campo.

D. Empresas 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 las empresas de demanda para que empiecen a interesarse por estas tecnologías.

Cabe destacar la utilización incipiente de tecnologías cuánticas en los sectores de la automoción, aeronáutico, bancario y farmacéutico como los más relevantes en la adopción de estas tecnologías.

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.

E. Entidades non profit

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

1. 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 4 Quants, Quantum 4 Business, Quantum Art Lab y tres más en preparación: Quantum Commission for Peace, Quantum IA-Machine Learning y Quantum sensors.

Entre sus miembros institucionales podemos destacar a ISACA Barcelona Chapter, la red de Blockchain ALASTRIA, MWCcapital, barcelonaqbit - bqb o Quo Artis.

Su Presidente es Oscar Sala y el Coordinador general es Toni Velamazán.

2. AMETIQ

Con sede principal en Madrid.

Grupo de trabajo cuántico de AMETIC. Pertenece a la comisión de innovación de AMETIC y está trabajando, entre otras cosas, en la redacción de informes de carácter empresarial, acciones de formación y difusión para el impulso de la demanda y de un mercado "cuántico" en España. Participan como representantes del sector empresarial en el grupo de trabajo del flagship liderado por el MINECO.

Han solicitado su entrada en el grupo empresarial que lidera el flagship cuántico de la UE.

Son miembros de AMETIQ entre otros, empresas como Entanglement Partners, ACCENTURE, GMV, Microsoft, Fujitsu...

Su coordinador es Alfonso Rubio-Manzanares.

F. Entidades científicas y centros tecnológicos

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:

1. Barcelonaqbit - bqb

Con sede en Barcelona.

“The Quantum Information & CiberseQurity Think Tank”. Es el Think Tank más relevante del mundo centrado en tecnologías cuánticas 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 “cualificados” en información cuántica.

Recoge, analiza, elabora y difunde información relevante para los distintos actores del ‘eQosystem’ internacional.

Barcelonaqbit-bqb ha creado el **“Observatorio de tecnologías cuánticas de España y Latinoamérica - OTC Es&LATAM”**.

Barcelonaqbit-bqb también acoge al **“Grupo cuántico de Ribes”** #QuantumSPRibes que, hace divulgación en torno al arte, ciencia, tecnología y negocio cuánticos. Este grupo lo forman tres vecinos de Sant Pere de Ribes, municipio de

15.000 habitantes en Barcelona. Lo componen Alfonso Rubio-Manzanares, Presidente de barcelonaqbit-bqb, Dr. José Manuel Berenguer, Presidente de la Quantum Art Lab, comisión de la asociación internacional “Quantum World Association - QWA” y el australiano Dr. Robert Sewell, coordinador académico de programas en el Instituto de ciencias fotónicas - ICFO.

2. 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.

3. Observatorio de tecnologías cuánticas de España y Latinoamérica.

Con sede en Madrid.

Es una iniciativa de barcelonaqbit-bqb.

Entre sus funciones tiene: Recoger, analizar, elaborar y difundir 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.

Su Director general es Pau Velando.

4. RITCE hbar

Con sede en Madrid.

Una iniciativa del MINECO 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.

Su coordinador es Juan José García.

5. QUITEMAD

Con sede en Madrid.

El proyecto, es un esfuerzo de coordinación de cinco grupos de investigación en cinco centros de investigación (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) de la Comunidad de Madrid. Su objetivo es desarrollar nuevos modelos de computación, simulación y comunicación basados en Computación Cuántica y criptografía.

6. Centro de ciencias de Benasque Pedro Pascual

Tiene su 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.

Su director es José Ignacio Latorre.

7. QbitInstitute

Tiene su sede en Barcelona.

Es una asociación sin ánimo de lucro cuyo objetivo es potenciar la formación profesional no universitaria centrada en tecnologías cuánticas.

Realizan labores de difusión, formación y comunicación en torno a las tecnologías cuánticas. Están elaborando materiales formativos.

Lo preside David Arcos.

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

1. En Andalucía

Grupo de la U. Sevilla, el grupo de física atómica y molecular de la U. Granada.

2. En Aragón

Los grupos UniZar-ICMA-CSIC-ARAID.

3. En Baleares

IFISC-CSIC.

4. 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, el IFAE y el BQMCG de la UPC.

5. En Galicia

QG de la U. Vigo.

6. En Madrid

Grupos de investigación asociados a QITEMAD, 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 QITEMAD Research Consortium, IMDEA Nanociencia Quantum NanoDevices, IFIMAC-UAM Carlos Tejedor, Condensed Matter Physics Institute.

Darío Gil, director mundial de IBM Research, y la presidenta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Rosa Menéndez anunciaron el 13 de junio de 2019 un acuerdo para impulsar en España la computación cuántica, que promete disparar la capacidad de procesamiento actual y tener una gran aplicación en la resolución de problemas en la medicina, la ciencia de los materiales, los riesgos financieros o en la optimización de la logística.

7. En Murcia

QMBS Quantum Many Body Systems de U. Cartagena.

8. En el País Vasco

Diferentes grupos de investigación de UPV/EHU - Ikerbasque y de DIPC.

H. Otras iniciativas

El CSIC, está organizando un grupo “formal” sobre tecnologías cuánticas.

Hay que destacar los proyectos QUANTIC, 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 - liderados por José Ignacio Latorre y Pol Forn-Díaz.

También hay que destacar el proyecto del ICMA en Aragón que se posiciona también en la carrera mundial por el primer ordenador cuántico. Los Investigadores del ICMA han creado un consorcio europeo y consiguen financiación de la UE. Lo han hecho gracias a un equipo aragonés, liderado por Fernando Luis, investigador del ICMA (Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, instituto mixto del CSIC y la Universidad de Zaragoza).

El MINECO, organiza un encuentro con el sector científico y ahora empresarial en el que participan varias empresas y el grupo de trabajo cuántico de la patronal AMETIC a través de AMETIQ. En este importante foro, se debaten las acciones a tomar en torno al flagship de la UE.

La participación de España en la estrategia cuántica de la UE expresado en el flagship, pasa por la colaboración en la redacción de un importante documento sobre el futuro

en Europa de estas tecnologías; QUANTUM MANIFESTO en el que participó el Dr. Ignacio Cirac y la participación de España liderado por el ICFO en dos importantes proyectos financiados por el flagship.

En un año ha aprobado un flagship sobre tecnología cuántica dotado con 1.2B de € y ha lanzado el programa QUANTERA.

En la reunión celebrada en Viena a finales de Octubre de 2018, el flagship ha asignado recursos a 20 proyectos.

Algunos de los proyectos más relevantes son:

- **Proyecto Asteriqs** que aprovechará defectos en los diamantes para crear sensores de campo magnético para la industria de la automoción, biomedicina o telecomunicaciones. Este proyecto se enmarca en el área de sensores cuánticos y será liderado por la empresa Thales.
- **Proyecto Quantum Internet Alliance** que creará una hoja de ruta hacia un internet cuántico para toda Europa y hará una demostración experimental.

Este proyecto está liderado por la Universidad de Amsterdam.

- **Proyecto Open SuperQ** construirá un ordenador cuántico de hasta 100 qubits.

Estará liderado por la Universidad de Saarland.

España liderará dos importantes proyectos desde el ICFO:

- **Proyecto CiViQ.** El único proyecto del flagship orientado a desarrollar redes de comunicación seguras. Estas redes utilizarán las propiedades de la mecánica cuántica para ser absolutamente seguras.

En este proyecto participan operadores de telecomunicaciones como Telefónica, Orange y Deutsche Telekom. También participarán Nokia y Huawei.

Estará liderado por Valerio Pruneri del ICFO.

- **El otro proyecto está orientado a desarrollar dispositivos de dos dimensiones** que se puedan integrar en redes de telecomunicaciones cuánticas. Es un proyecto de ciencia básica para demostrar que la tecnología de dos dimensiones funciona.

Estará liderado por Dimitri Efetov.

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-bab 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 el que se anunció la formación de la Quantum Blockchain Alliance o el importante simposio internacional celebrado en Bilbao el año 2018.

Uno de los principales objetivos del *eQosistema* cuántico de España es impulsar la creación de una "ingeniería cuántica" así como disponer países punteros en estas tecnologías como USA, Canadá o UK.

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 y UPC School y Entanglement Partners SL. IBM y la ETSE-U. Valencia imparten sobre "Introducción a la Computación Cuántica con IBM Q Experience".

En este informe, se aportan cinco completos programas de formación (negocio, programación, finanzas, sensores y encriptación cuánticas) que pueden pasar al fondo de programas del SEPE y por supuesto, a impartirse en los próximos meses desde los centros de referencia que lo soliciten.

Entre algunas de las publicaciones y libros de divulgación sobre ciencia y tecnologías cuánticas, cabe destacar “CUÁNTICA” 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.

Las noticias más relevantes ocurridas en España durante el 2018 - con un incuestionable impacto internacional - sobre tecnologías cuánticas son:

“Microsoft elige Barcelona para abrir un laboratorio de cuántica”. *La Vanguardia.*

“Telefónica, Huawei y la UPM prueban la aplicación de criptografía cuántica en redes ópticas comerciales”. *Europa Press.*

“El instituto de ciencias fotónicas - ICFO ha conseguido situar dos de sus proyectos entre los veinte seleccionados por la Unión Europea” *La Vanguardia.*

“Volkswagen planea probar en Barcelona un algoritmo que organiza el tráfico de forma inteligente” *Europa Press.*

Durante el año 2019 destacamos **“El primer chip cuántico de España”** *Quantic/BSC.*

Se podría concluir, que en los últimos años se ha desarrollado en España un *eQosistema* cuántico incipiente en cuanto a empresas/Startups focalizado en Barcelona, Madrid, País Vasco y Valencia y más consolidado pero, excesivamente fragmentado, en cuanto a centros de investigación, universidades y sus grupos “cuánticos”.

Se tiene la oportunidad de crear un ecosistema de profesionales de algorítmica y paquetes de software cuántico que puedan crear nuevas empresas que focalicen su actividad en el desarrollo y aplicaciones comerciales. Para esto, serán necesarios matemáticos, físicos, ingenieros y una nueva generación de desarrolladores que tendrán que aprender

tecnología de control de la óptica, criogenia, producción de semiconductores, algorítmica y desarrollo de software...

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 la participación en el flagship europeo.

Se espera que este apartado del informe sobre el estado actual de la ciencia y las tecnologías cuánticas en España, se 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 científicas, 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.

Se ha pasado por varias “olas tecnológicas” expresadas mediante letras: e- i- s- y, ahora, sin duda se está en la era q-.

Porque, no habría que olvidar que; **“el mundo es cuántico”.**



7

Estrategia y propuestas de actuación en España sobre tecnologías cuánticas

1. DAFO.
 - a. Fortalezas (Ventajas competitivas).
 - b. Debilidades (Desventajas competitivas).
 - c. Amenazas.
 - d. Oportunidades.
2. Estrategia.
 - 2.1. Ejes estratégicos.
 - 2.2. Objetivos estratégicos.
3. Propuestas de actuación y coordinación.
4. Descripción de las propuestas de actuación para impulsar el sector cuántico de España.

1. DAFO

a. Fortalezas (Ventajas competitivas)

- Se cuenta con una sólida comunidad de científicos teóricos con gran relevancia internacional creada esencialmente mediante estrategia bottom up y financiada por las AAPP.
- España es un país atractivo para vivir. Se atrae talento en general y se puede atraer talento cuántico internacional.
- El talento es atraído configurándose escenarios de excelencia académicos y infraestructuras óptimas para la investigación.
- Se dispone de una magnífica red de universidades con potentes facultades de física, matemáticas e ingeniería.
- El ICFO es líder mundial. Un centro de ciencia básica que tiene excelentes grupos experimentales.
- Se cuenta con una importante red de laboratorios de física y química de estado sólido y física de bajas temperaturas que en la actualidad no se focalizan en tecnologías cuánticas pero que contribuyen de forma muy competitiva en ámbito nacional e internacional en tecnologías posibilitadoras de las tecnologías cuánticas.
- Se cuenta con empresas multinacionales globales que tienen mucho que decir en tecnologías cuánticas: Telefónica, Indra, GMV, BBVA Banco de Santander, etc.
- Se cuenta con grupos privados muy activos, entusiastas, creativos y “activistas”: barcelonaqbit-bqb, QWA y AMETIQ.

- Se cuenta con una excelente red de escuelas de negocio globales y en las primeras posiciones del ranking mundial: IESE, IE, ESADE, etc.
- Existen en España grupos científicos, tecnológicos y empresariales para desarrollar el área de sensores cuánticos.
- Se dispone de un importante sector empresarial de industria auxiliar para la ciencia y la tecnología que se puede reconducir hacia el sector cuántico.
- Se cuenta con gran talento y grupos de investigación teórica que puede desarrollar una importante área de algorítmica cuántica.
- Existe un interesante sector industrial potencial usuario de tecnologías cuánticas: Telecomunicaciones, automoción, biomédico, aeronáutico, farmacéutico y financiero.

b. Debilidades (Desventajas competitivas)

- El déficit más importante en España es el desarrollo de tecnologías y productos cuánticos que son los que producen mayores retornos socioeconómicos.
- No existe una estrategia concreta y a largo plazo a pesar del éxito en la creación del ICFO.
- No hay un grupo formal conocido y representante de los diferentes players del sector que asesore a las AAPP.



- Las iniciativas con socios empresariales son muy puntuales y se centran en el área de la Ciberseguridad cuántica.
- Se cuenta con una comunidad de científicos experimentales muy limitada ya que las tecnologías cuánticas requieren técnicas experimentales muy exigentes tanto en talento muy especializado y equipos e infraestructura de laboratorios muy cara.
- Falta evidente de financiación pública y privada en tecnologías cuánticas.
- No se cuenta con fondos de inversión en tecnologías.
- Hay una enorme distancia entre los grupos científicos y tecnológicos con las empresas de oferta y mucho mayor con las empresas de demanda.
- La oferta científico técnica está muy fragmentada. Interesarían políticas de agregación en institutos tecnológicos con temáticas próximas.
- Una utilización de las infraestructuras locales de apoyo a la investigación y creación de comunidades más potentes y atractivas para el desarrollo de la actividad del investigador.
- No se cuenta con formación específica en tecnologías cuánticas como una ingeniería cuántica o postgrados especializados.
- Se confía la financiación de grandes proyectos tractors al Flagship de la UE.
- No se cuenta con un sector industrial de hardware que pueda desarrollar grandes proyectos en computación o simuladores.
- Otros países cuentan con complejos militares industriales que ejercen tracción en la industria.
- El mercado cuántico de demanda es casi inexistente. Se centra en algunas PoC en el sector financiero.

c. Amenazas

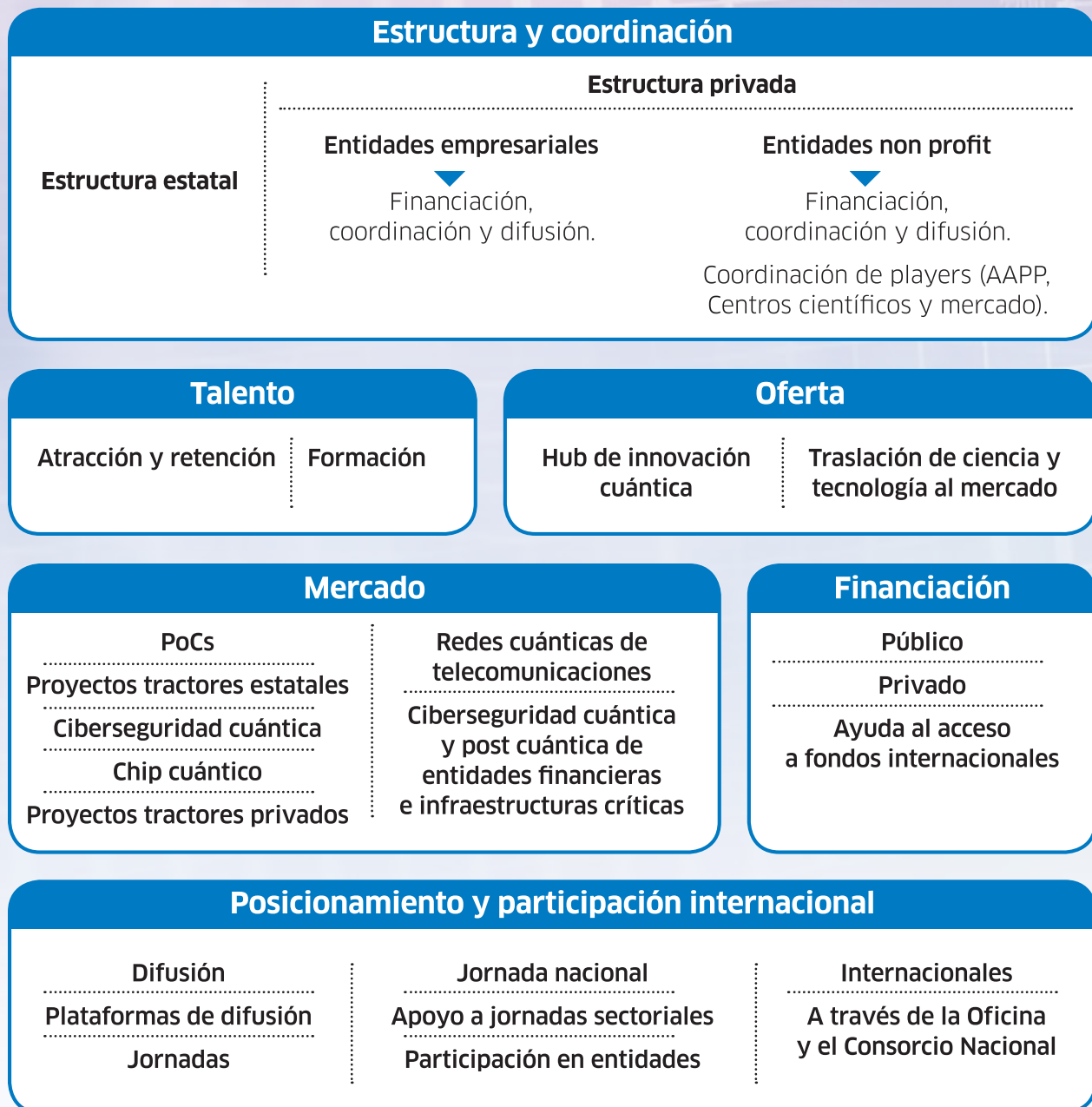
- Se está en medio de una ciberguerra entre China y USA. Los complejos militares industriales de las superpotencias (especialmente China y USA) trabajan en proyectos cuánticos con grandes presupuestos y atrayendo talento internacional.
- Las grandes corporaciones empresariales multinacionales están haciendo grandes inversiones y atrayendo gran parte del talento internacional.
- La UE no es especialmente relevante en la geoestrategia mundial.

d. Oportunidades

- En la actualidad, la UE ha puesto en marcha un proyecto Flagship sobre tecnologías cuánticas con financiación de 1.2B€. La participación de España en esta iniciativa europea es una gran oportunidad que puede paliar la baja capacidad para el desarrollo de tecnologías y productos cuánticos. No obstante, para maximizar la participación en los proyectos es necesaria una mayor financiación de las AAPP españolas.
- Grupos internacionales de tecnología experimental utilizan a los grupos teóricos españoles que se constituyen en sus puntos de referencia para el diseño conceptual e interpretación de sus dispositivos cuánticos.
- Hay grandes fondos de inversión que están muy interesados en invertir en todo tipo de proyectos cuánticos a medio y largo plazo.
- Es necesario una asociación empresarial cuántica internacional.
- Es necesario una plataforma de colaboración e información internacional.
- Es necesario una entidad que actúe con las tecnologías cuánticas hacia posiciones de paz.

2. PLANTEAMIENTO ESTRATÉGICO

Ejes estratégicos



Objetivos estratégicos

Fijados los objetivos -que deben ser jerarquizados, cuantificados, reales y consistentes-, se diseñan las propuestas de actuación para llegar a ellos.

- A** Apoyar, seguir, consolidar y difundir los tres grandes proyectos cuánticos en España:
 - Proyecto Telefónica, UPM y Huawei en Madrid.
 - Proyecto R+D+I Microsoft en Barcelona.
 - Proyectos Flagship UE liderados por el ICFO en Barcelona.
- B** Crear 10 startups cuánticas en 3 años.
- C** Crear estructura legislativa y organizativa estatal.
Leyes, programas, plataformas, jornadas, planes de actuación, consorcios, institutos, hubs...
- D** Impulsar 4 proyectos tractores sobre tecnologías cuánticas en España.
2 públicos y 2 privados.
- E** Crear un fondo de 100M € para financiar proyectos cuánticos.
- F** Crear una ingeniería cuántica.
- G** Crear 5 centros de referencia (Ciberseguridad, telecomunicaciones, computación, simulación y algorítmica) con los correspondientes institutos dedicados y centros de apoyo.
- H** Facilitar el acceso a grupos experimentales de institutos integradores, como los de las OPIS especializados en microelectrónica, a centros tecnológicos e instalaciones científicas singulares.

3. PROPUESTAS DE ACTUACIÓN Y COORDINACIÓN

Estructuras y coordinación

Estructura pública

- “Ley nacional de ciencia y tecnología cuántica”.
- “Oficina nacional de coordinación y participación cuántica”.
- “Instituto español de ciencia y tecnologías cuánticas”.
- “Instituto español de ciberseguridad cuántica”.
- “Consortio para el desarrollo económico de tecnologías cuánticas”.
- “Consejo asesor de ciencia y tecnologías cuánticas”.

Estructura privada

- **Entidades empresariales**
 - Financiación, coordinación y difusión.
- **“Plan de coordinación de entidades empresariales cuánticas”**
 - Quantum World Association - QWA.
 - AMETIQ.
- **Quantum Banking Alliance:**
 - Quantum Blockchain.
 - Quantum cybersecurity.
 - Otras.

Entidades non profit

Financiación, coordinación y difusión

- “Plan de actuación de entidades non profit cuánticas”.
- “Quantum art lab”.
- “Quantum Commission for Peace”.
- Otras.

Talento

- Atracción y retención.
- “Programa español de talento cuántico”.
- Formación.
- “Plan nacional para la formación en ciencia y tecnologías cuánticas”.
- “Ingeniería cuántica”.
- “Asignaturas específicas en los estudios de FP”.

Mercado

- PoCs.
- Proyectos tractores estatales:
 - Ciberseguridad cuántica.
 - Chip cuántico.
- Proyectos tractores privados:
 - Redes cuánticas de telecomunicaciones.
 - Ciberseguridad cuántica y post cuántica de entidades financieras e infraestructuras críticas.
- Traslación de ciencia y tecnología al mercado:
 - “Centro traslacional de ciencia y tecnologías cuánticas”.

Financiación

- Pública:
 - “Fondo financiero público/privado especializado en tecnologías cuánticas”.
- Privada:
 - Acceso a fondos internacionales.

Posicionamiento y participación internacional

● Difusión

Plataformas de difusión:

- “barcelonaqbit-bqb”.
- “Observatorio de ciencia y tecnología cuántica de España y Latinoamérica”.
- “Jornada anual sobre ciencia, tecnología y mercados cuánticos”.
- Jornadas sectoriales.

● Participación

Participación en entidades internacionales:

- A través de la Oficina y el Consorcio Nacional.

Oferta

- Hub de innovación cuántica.
- Hub empresarial de tecnologías cuánticas.

4. DESCRIPCIÓN DE LAS PROPUESTAS DE ACTUACIÓN PARA IMPULSAR EL SECTOR CUÁNTICO DE ESPAÑA

1 Promover y ayudar a redactar la “Ley española de ciencia y tecnología cuántica”

Ley estatal para regular el impulso de entidades y coordinación de actuaciones. Como referencia la ley de EEUU al respecto.

Con el concurso de un Consejo asesor que permita una visión de estrategia a medio y largo plazo.

2 “Consejo asesor de ciencia y tecnologías cuánticas”

Un consejo compuesto por profesionales científicos, de AAPP, empresas de demanda y oferta, medios de comunicación y difusión. Tendría como objeto, proponer estrategias y políticas sobre tecnologías cuánticas.

3 Crear la “Oficina nacional de coordinación cuántica”

Su misión principal sería la de coordinar todas las acciones de las diferentes AAPP (UE, estatales y CCAA). En la medida de lo posible liderada por la Presidencia del Gobierno.

4 Crear el “Instituto español de ciencia y tecnologías cuánticas experimentales”

Un único centro de excelencia de investigación experimental y de tecnologías aplicadas. Podría estar en el entorno del CSIC.

Deberá coordinar la estrategia global, políticas y actuaciones, financiación y ejecución de proyectos de todos los centros de investigación y tecnología aplicada en torno a tecnologías cuánticas.

5 Incluir una sección del Instituto Nacional de Ciberseguridad donde tenga cabida la ciberseguridad cuántica

Que vele por la ciberseguridad del estado y las infraestructuras críticas.

Que desarrolle tecnología propia de telecomunicaciones y ciberseguridad cuántica y post cuántica.

Que impulse proyectos tractores de ciberseguridad y haga difusión a las AAPP y la industria.

Que se coordine internacionalmente con entidades similares de entorno.

6 Crear el “Consortio para el desarrollo económico de tecnologías cuánticas”

Entidad que agrupe y coordine a todos los players: AAPP, Científicos y empresarios.

Un órgano de coordinación de grandes proyectos tractores, de ejecución de la estrategia cuántica, de aportación de financiación privada y de representación internacional.

Que impulse políticas y proyectos tractores tanto en ámbito estatal como regional.

7 Redactar el “Plan de coordinación de entidades empresariales cuánticas”

Apoyo a instituciones empresariales cuánticas como en el caso de la “Quantum World Association - QWA” o la recién creada “AMETIQ”. Ambas ya disponen de su documento fundacional, de una estrategia, de su presentación corporativa y su puesta en marcha.

8 Crear la “Quantum Banking Alliance”

- Quantum Blockchain (Ya existe un documento fundacional y de puesta en marcha).
- Quantum cybersecurity.
- Otras.

Bancos internacionales como el BBVA y Santander, podrían liderar proyectos cuánticos globales. Podrían ayudar al impulso, e incluso liderar la creación de la “Quantum Banking Alliance”.

9 Crear el “Observatorio de tecnologías cuánticas de España y Latinoamérica”

Que ponga en valor y contacto todo lo que se está realizando en España y ayude en su estudio y difusión.

Ya existe un documento fundacional.

10 Redactar el “Programa español de talento cuántico”

Con el objetivo de promover y atraer el talento cuántico: talento cuántico español en la diáspora y al talento cuántico internacional y atraerlos a proyectos en España.

Atraer a los ingenieros, matemáticos y físicos a cursos especializados en tecnologías cuánticas.

Promover un programa en los institutos para que los niños quieran hacer ingeniería cuántica.

11 Redactar el “Plan nacional para la formación en ciencia y tecnologías cuánticas”

- Creación de inmediato una “ingeniería cuántica”.
- Promover “Itinerarios, especialidades y asignaturas específicas en los estudios de FP”.

12 Crear un “Hub empresarial de tecnologías cuánticas”

Centro de creación de nuevas startups.

13 Crear un “fondo financiero público/privado especializado en tecnologías cuánticas”

Apoyo decidido tanto institucional como financiero a las iniciativas empresariales actuales especialmente las startups.

14 Crear un “Centro traslacional de ciencia y tecnologías cuánticas”

Acercar a los científicos a las empresas.

Redactado el documento fundacional.

15 Apoyar

- “barcelonaqbit-bqb”.
Primer think tank internacional en torno a negocio de las tecnologías cuánticas. En marcha hace 3 años y líder internacional.
- “Observatorio de ciencia y tecnología cuántica de España y Latinoamérica”.
Redactado documento fundacional.
- “Jornada anual sobre ciencia, tecnología y mercados cuánticos”.
En el entorno de un gran evento tecnológico como el MWC.

16 Crear la “Quantum Commission for peace”

Está redactado el documento fundacional.

Apoyar a la “Quantum Art Lab”

Está redactado documento fundacional, plan estratégico y realizadas las primeras actuaciones:

- Jornada de creación de obra de arte.
- Producción de obra de arte.

Apoyar proyectos tractores de multinacionales españolas

- Sería el caso de operadores globales de telecomunicaciones, como Telefónica, que podrían liderar proyectos cuánticos globales.



8

Impacto de las tecnologías cuánticas en el desarrollo de nuevas competencias profesionales

La Formación y Desarrollo de Capacidades en Física Cuántica

Los principios de la física cuántica se caracterizan por ser unos conceptos abstractos y técnicamente difíciles. Esto hace que su enseñanza signifique un reto que obliga incluso a los alumnos más capaces a un esfuerzo continuado para fijar con seguridad incluso los conocimientos más básicos.

Esta formación se complica por la diversidad de los estudiantes en lo que hace a sus conocimientos y capacidades para la resolución de problemas y autoaprendizaje. También las motivaciones y objetivos para participar en estos programas suelen ser muy distintas. Y esto se agrava con unas clases que no tiene en cuenta las deficiencias en conocimientos de los alumnos, sino que se han estructurado pensando en un determinado nivel de experiencia ya bien establecido. Finalmente, los principios de la mecánica cuántica responden a un paradigma significativamente distinto del de la mecánica clásica que ya traen bien establecido los alumnos.

La tarea no es sencilla. Abandonar los anteriores conceptos y principios para poder predecir y explicar los conceptos de los fenómenos cuánticos obliga a construir una

estructura de conocimiento nueva desde la base. Los nuevos conceptos no tienen análogos en la mecánica clásica, aunque se utilicen términos similares en ambas, como posición, momento, energía, momento angular, etc. Tampoco es una garantía para un buen aprendizaje el disponer de una sólida base de conocimientos matemáticos.

El aprendizaje ha de construirse, a su vez, de manera gradual, para evitar una sobrecarga de conocimientos y lograr la capacidad de aplicar esos conceptos en el contexto adecuado. Y ha de asegurarse que los estudiantes disponen de una base sólida de capacidades para la resolución de problemas, de razonamiento y deductivas, además de la necesaria motivación para aprender.

Los alumnos, incluso los más expertos en mecánica clásica, han de realizar esfuerzos notables para adquirir los nuevos conocimientos y acomodar las nuevas ideas. Han de corregir, reorganizar y ampliar su estructura de conocimientos de manera significativa para alcanzar el nivel de experto en este nuevo campo y poder resolver problemas más complejos.



El desarrollo de un currículo específico para la formación en la mecánica cuántica debería tener en consideración los siguientes elementos con el fin de atender a los problemas antes mencionados y orientar en el diseño de unas estrategias de enseñanza y aprendizaje eficaces:

- Desarrollar un currículo basado en la investigación. Trabajar mediante un modelo pedagógico de experimentación permite construir unas bases más sólidas al conectar adecuadamente conceptos matemáticos y físicos, y aprender a aplicarlos en distintas situaciones para explicar y predecir los fenómenos.
- Construir andamiaje de apoyo para el aprendizaje. Se le ha de dar la oportunidad a los alumnos de enfrentarse a la solución de problemas y emplear conocimientos previos antes de las clases, para que éstas sirvan como oportunidad de aprendizaje. De este modo se les ayuda a aprender activando sus conocimientos previos y trabajando con ellos.
- Utilizar metodologías docentes como las sesiones tutoriales, aprendizaje entre pares, solución de problemas en equipo, y aprendizaje por ordenador. De este modo se les facilita a los estudiantes la oportunidad de asimilar y acomodar nuevas ideas a la vez que construyen y organizan estos nuevos conocimientos.
- Guiar a los estudiantes en el desarrollo de su autoaprendizaje. Más que la presentación de soluciones cerradas, esta tutorización le ha de ayudar a desarrollar las capacidades de resolución de problemas, razonamiento y asociación de ideas.
- Emplear estrategias de aprendizaje reflexivo. Centrar los sistemas docentes no tanto en la memorización de conceptos y la aceptación de la autoridad del profesor sino en el aprendizaje mediante el descubrimiento del sentido de las cosas. Esto se produce mejor mediante el trabajo en grupo y abordando problemas en contextos interesantes y prácticos.
- Utilizar sistemas de evaluación que estimulen el desarrollo de una comprensión funcional. La disponibilidad de unas buenas capacidades matemáticas puede enmascarar una falta de comprensión de conceptos fundamentales de física. De ahí la necesidad de no limitarse a evaluar la resolución de problemas cuantitativos y asegurarse de la adquisición de conocimientos funcionales, de su interconexión y de la capacidad de razonamiento.



Algunas características de los centros de formación

Los departamentos de física cuántica han de ofrecer un entorno vivo en internacional en el que estudiantes profesores e investigadores trabajen en estrecha colaboración. Los estudiantes habrán de ser supervisados por un profesorado internacional y reconocidos por sus contribuciones a la especialidad.

ESTUDIOS DE GRADO

OBJETIVOS

Estos estudios han de llevar a los estudiantes al conocimiento más actualizado en los campos de la aplicación de la política en la computación, comunicaciones, desarrollo de sensores, y simulación. Los nuevos dispositivos que se desarrollen han de ser capaces de superar las tecnologías actuales mediante la aplicación de los fenómenos mecánicos cuánticos. Los futuros ordenadores cuánticos resolverán problemas que no están al alcance de los algoritmos y equipos actuales. Las comunicaciones cuánticas utilizarán esquemas de encriptación infranqueables.

Estos programas de tecnología cuántica deberán proporcionar al estudiante las capacidades para desenvolverse de manera destacada en un sector industrial emergente y creciente. El abordaje ha de ser multidisciplinar, incorporando distintas tecnologías como la nanofísica, ingeniería informática e ingeniería eléctrica.

Mediante el seguimiento del programa, los alumnos serán capaces de:

- Aprender los fundamentos de la física cuántica y comprender sus aplicaciones tecnológicas en el mundo real.
- Adquirir las competencias matemáticas y de física teórica necesarias para comprender el mundo cuántico desde una perspectiva tecnológica.
- Ser capaz de desarrollar experimentos sobre sistemas cuánticos y diseñar itinerarios que posibiliten el desarrollo de aplicaciones tecnológicas futuras.
- Conocer cómo desarrollan algoritmos Y programas de ordenador que sean capaces de sacar partido a los principios de la mecánica cuántica.

A lo largo de los estudios, los alumnos deberán adquirir unos conocimientos sólidos de matemáticas, física, informática e ingeniería eléctrica. A la conclusión del programa habrán de ser capaces de abordar retos industriales que implique la aplicación de la física cuántica y de desarrollar tecnologías para el bien de la sociedad.

CONTENIDO DEL PROGRAMA

Las asignaturas fundamentales han de introducir los estudiantes a la ciencia y tecnología cuántica, a los fundamentos físicos desde la termodinámica al electromagnetismo, así como a las necesarias herramientas analíticas y numéricas de las matemáticas. Los cursos electivos han de cubrir temas avanzados como el procesamiento de la información cuántica, computación, comunicaciones, ciencia de los materiales, todos ellos necesarios para el desarrollo de tecnologías cuánticas.

El núcleo del programa de tecnología cuántica deberá incluir los siguientes temas:

- Dispositivos cuánticos para tecnologías avanzadas.
- Algoritmos para el proceso de la información y comunicación cuántica.
- Sensores y simuladores cuánticos.
- Nano-fabricación de circuitos y procesadores cuánticos.
- Física y ciencia de los materiales a bajas temperaturas para la ingeniería cuántica.
- Definición teórica y comprensión de sistemas cuánticos.

ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

El programa debería organizarse según los esquemas de grado europeos, preferentemente entre 180 créditos ECTS, distribuidos de la siguiente manera:

- 65 ECTS para estudios de matemáticas, programación, ingeniería industrial, idiomas, seminarios y trabajo fin de grado.
- 20-25 ECTS para cursos de especialización.
- 25-30 ECTS para materias opcionales.

El programa debería impartirse preferentemente en inglés para asegurar la empleabilidad de los estudiantes.

SALIDAS PROFESIONALES

El título de grado en tecnología cuántica ha de proporcionar oportunidades en las tareas que requieran un buen conocimiento de la ciencia cuántica y la disposición de capacidades analíticas. Los graduados podrán emplearse en un amplio número de sectores y centros de investigación, en empresas tecnológicas dedicadas a la computación, comunicaciones, otras tecnologías basadas en la física cuántica.

Entre los posibles puestos de trabajo se incluirán:

- Técnicos en investigación y desarrollo.
- Especialista en tecnología cuántica.
- Especialista en Computación Cuántica.
- Programador de software para aplicaciones cuánticas.
- Consultor de tecnología cuántica.
- Banca y finanzas.

ESTUDIOS DE MASTER

Este tipo de programas están particularmente indicados para aquellos alumnos interesados en materias como la física de partículas, la física de la materia condensada o la óptica cuántica. Han de permitir la oportunidad de trabajar con teorías, experimentos y simulaciones por ordenador.

Los alumnos han de aprender el lenguaje y las técnicas de la mecánica cuántica avanzada, la información y la Computación Cuánticas, así como la implantación más avanzada de sistemas de materia condensada y óptica cuántica.

OBJETIVOS

Los alumnos de estos programas de especialización en física cuántica habrán de adquirir unas competencias avanzadas en:

- Planificación y ejecución de proyectos de forma independiente en el ámbito de la física cuántica.
- Configurar modelos analíticos o numéricos relevantes para un sistema físico cuántico, y utilizar datos experimentales para análisis y verificación de esos modelos.
- Trabajar de forma independiente en asuntos de física cuántica.
- Explicar y comunicar su conocimiento especializado de la nanotecnología, a nivel atómico y subatómico, tanto de forma oral como por escrito.

CONOCIMIENTOS

Los alumnos habrán de obtener conocimientos especializados en:

- Disciplinas, métodos, teorías y conceptos clave de física cuántica, incluidos los fenómenos de la física del estado sólido, física atómica y física subatómica.
- Los vínculos entre la física cuántica y otras disciplinas científicas.
- Métodos tecnológicos avanzados en experimentos de física cuántica.

ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

Preferentemente, el programa deberá tener una carga lectiva de 180 créditos ECTS y estructurarse, de manera tentativa, en módulos principales u obligatorios (45 créditos), módulos opcionales (45 créditos) y un proyecto de investigación (90 créditos).

El programa se organizará mediante una combinación de conferencias y seminarios, además del estudio individual, y deberá incluir tanto la evaluación crítica de temas de investigación actuales como el desarrollo de las habilidades de investigación correspondientes. La evaluación se habrá de realizar a través de una combinación de problemas, exámenes escritos, informes sobre estudios de casos y presentaciones, así como la disertación final del proyecto de master.

MÓDULOS OBLIGATORIOS

Todos los estudiantes deberían cursar unos módulos principales como estos:

- Física del átomo y del fotón.
- Teoría cuántica avanzada.
- Comunicación cuántica y computación.

MÓDULOS OPCIONALES

Estos módulos pueden organizarse de tal forma que puedan orientar hacia determinadas especializaciones temáticas que se trabajen en profundidad. Algunas posibles especializaciones podrán ser las siguientes:

- Experimentos con la materia condensada.
- Teoría de la materia condensada.
- Teoría de alta energía y cosmología.
- Física de altas energías.
- Óptica cuántica.

No obstante, debe darse la posibilidad de personalizar el programa con una combinación de cursos y proyectos que sean relevantes para los intereses del estudiante.

CURSOS

Entre los posibles cursos a ofrecer para personalizar la especialización de los alumnos podrían incluirse los siguientes:

- Teoría de la Relatividad y Cosmología.
- Magnetismo cuántico.
- Óptica cuántica.
- Teoría de la materia condensada.
- Física de la Materia Condensada.
- Experimentos de Materia Condensada.
- Física de partículas y origen del universo.
- Física de partículas elementales.
- Estadística aplicada.
- Teoría de la información cuántica.
- Óptica cuántica.
- Detectores de partículas y aceleradores.
- Física experimental de rayos X.
- Introducción a la teoría de cuerdas.
- Magnetismo y materiales magnéticos.
- Nanoelectrónica cuántica.
- Teoría cuántica de campos.
- Nanofotónica cuántica.
- Fenomenología de la física de partículas.

- Física de partículas en la frontera energética.
- Dispersión de neutrones.
- Temas avanzados en la teoría de la materia condensada.
- Información cuántica.
- Métodos modernos para la dispersión de partículas.
- Física matemática avanzada.
- Programación aplicada.
- Dispositivos fotónicos avanzados.
- Dispositivos nanoelectrónicos.
- Procesamiento a nanoescala para dispositivos avanzados.
- Transmisión óptica y redes.
- Orden y excitaciones en materia condensada.
- Física y Óptica de Nanoestructuras.
- Investigación en computación con C ++.
- Investigación de Ingeniería de Software con Python.



El programa debería impartirse preferentemente en inglés para asegurar la empleabilidad de los estudiantes.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIO DE CASOS

El programa Master ha de culminar en un proyecto de tecnologías cuánticas y estudio de casos. Los estudiantes deberían presentar estudios de casos relacionados con las tecnologías cuánticas, así como un proyecto de investigación independiente (experimental o teórico), que habrá de ser objeto de una presentación y una disertación de entre 10,000-15,000 palabras. Los tutores habrán de proporcionar temas que permitan a los alumnos hacer contribuciones a la investigación en el campo de la especialización elegida.

SALIDAS PROFESIONALES

El programa ha de preparar a los alumnos para desarrollar una carrera profesional en sectores de aplicación de la tecnología cuántica emergentes y que desempeñarán un papel cada vez más importante en: comunicación segura; detección y metrología; la simulación de otros sistemas cuánticos; y, en la Computación Cuántica de propósito general. Los alumnos también saldrán bien preparados para desarrollar investigaciones al más alto nivel en grupos que desarrollen tecnologías cuánticas y trabajar en centros de investigación.



9

Conclusiones y propuestas de formación a corto plazo en tecnologías cuánticas

Cuando se pensó en diseñar una propuesta de formación en tecnologías cuánticas para España, se pensó rápidamente en que había que contar con los mejores especialistas en formación, en tecnologías cuánticas, en el ecosistema de formación de España y el eQosistema cuántico internacional y español.



El equipo

Con las anteriores premisas se pidió a Entanglement Partners conformar el siguiente equipo de especialistas para afrontar este interesante reto: diseñar un plan de formación en tecnologías cuánticas para España.

La otra premisa que se marcó es que en parte, fuesen posibles y realizables sus acciones formativas en un plazo de 6-9 meses.

El equipo requería de un especialista en tecnologías cuánticas y sus aplicaciones concretas en la industria internacional y España.

Se contó para ello con el Dr. Enrique Lizaso.

También se debía contar con un especialista en eQosistemas y estrategia tanto internacionales como de España.

Se contó con Alfonso Rubio-Manzanares uno de los profesionales con más conocimientos de los eQosistemas, es el Presidente de Barcelonaqbit-bqb, el Think Do Tank de referencia internacional que gestiona una base de datos de más de 10.000 contactos cualificados en tecnologías cuánticas.

También eran necesarios profesionales que tuviesen exhaustivos conocimientos de las estructuras formativas internacionales y españolas muy focalizadas en tecnologías e ingeniería.

Para ello se contó con las inestimables colaboraciones del Dr. Francisco Guillén que, es el impulsor y fue rector de varias universidades en España así como del Dr. Daniel Franco que es el Decano de las facultades de ingeniería de la Universidad Autónoma de Barcelona-UAB.

También se necesitó un especialista en todo lo que respecta a los profesionales de la ingeniería y en especial, a la ingeniería en informática.

Para ello se contó con la colaboración de Ilustrísimo Eduard Martín, Decano del Colegio Oficial de ingeniería en informática de Cataluña-COEINF. El COEINF junto con los colegios de ingeniería de Cataluña han creado una institución para la acreditación de las competencias profesionales de los ingenieros; la AQPE donde se tiene previsto incorporar programas formativos en tecnologías cuánticas cuyos itinerarios puedan ser acreditados por dicha institución.

Estos cinco profesionales, celebramos una intensa jornada de trabajo en el Think-TIC de La Rioja a la que también asistieron expertos de esta institución y del Gobierno de La Rioja:

Elena López, jefa del Servicio de Innovación del Gobierno de La Rioja, Elena Jiménez, responsable de formación del Think-TIC y Ernesto Rodríguez, del observatorio y sistema de vigilancia tecnológica del Think-TIC.

Las fuentes

Uno de los quebraderos de cabeza para elaborar estudios, informes y propuestas sobre un determinado sector tecnológico y un país concreto son el determinar que información es necesaria y que fuentes son accesibles y fiables.

¿Qué información se iba a necesitar y que fuentes se podría utilizar?

1. Ecosistemas cuánticos

- Factores externos e internos de la evolución de las tecnologías cuánticas.
- Tipos de tecnologías cuánticas y su evolución prevista en el mundo y España.
- Impacto de las tecnologías cuánticas en los diferentes sectores industriales y su evolución.
- Ecosistema sobre tecnologías cuánticas en el mundo y España, estrategia y su evolución a medio y largo plazo.
- Estrategia a corto, medio plazo de España en tecnologías cuánticas.
- Ecosistema de formación en tecnologías cuánticas internacional y España.

Para esta parte se contó con las fuentes que se han utilizado en la elaboración de la primera parte del informe.

2. Benchmarking internacional

- Iniciativas concretas en formación en tecnologías cuánticas internacionales y en España.

No hay muchas iniciativas pero se han listado en uno de los anexos las más relevantes.

3. Necesidades de perfiles profesionales

Ofertas de empleo internacionales:

- Ofertas de universidades y centros tecnológicos.
- Ofertas de empresas y startups.

Se ha añadido (en dos anexos a este documento) un exhaustivo listado de las ofertas de empleo de universidades y centros tecnológicos básicamente europeos.

Esta información se encuentra diseminada entre diversas listas de distribución de información sobre empleos en tecnologías cuánticas.

Se han recopilado las ofertas de empleo de empresas que trabajan en o con tecnologías cuánticas del último año. Nuevamente, esta información se haya en diferentes listas de distribución, a la información proporcionada por barcelonaqbit-bqb y la Quantum World Association-QWA.

4. Perfiles actuales y potencial evolución

- Perfiles y roles de los profesionales que trabajan actualmente en empresas que están focalizadas.

Se ha utilizado fundamentalmente LinkedIn para recopilar las empresas que trabajan con o en tecnologías cuánticas (se han listado las startups que ha surgido en el último año y se han incluido como anexo) y se han extraído información de los perfiles y roles de los profesionales que trabajan en estas empresas.

(También incluido como anexo).

Análisis de situación de partida y de necesidades de formación

1. Evolución temporal de la ciencia y tecnologías cuánticas

Creemos muy relevante en la propuesta el hacer un análisis de la evolución temporal de las tecnologías cuánticas con la siguiente hipótesis de los tres parámetros:

- a) Corto plazo: hasta 1 año.
- b) Medio plazo: de 1 a 3 años.
- c) Largo plazo: más de 3 años.

2. Desarrollo temporal del mercado

Otro parámetro importante para establecer necesidades de formación es el desarrollo temporal del mercado (Empresas de oferta y demanda), startups y laboratorios de desarrollo de ciencia y tecnologías cuánticas.

3. Demanda de perfiles y roles profesionales

También describir los tres tipos de roles profesionales que se están demandando actualmente (corto plazo) o que se demandarán entre tres o más años (medio y largo plazo).

4. Necesidades de formación

Es muy importante distinguir entre los profesionales que ya tienen competencia profesional y necesitan especialización y los nuevos perfiles profesionales que todavía no existen.





Analicemos toda la información:

Evolución temporal de la ciencia y tecnologías cuánticas

Telecomunicaciones, ciberseguridad y encriptación

- 15 años. **Desarrollo de conceptos teóricos.**
- 10 años. **Prototipado de equipos para la transmisión de claves cuánticas QKD.**
- 8 años. **Diseño y fabricación de productos.**
- 7 años. **Go to market.**
 - ID Quantique
 - Toshiba
 - Huawei
 - QuSky
- 5 años. **Venta, instalación, mantenimiento y gestión.**

Sensores

- 10 años. **Desarrollo de conceptos teóricos.**
- 8 años. **Prototipado de equipos de sensores cuánticos.**
- 5 años. **Diseño y fabricación de productos.**
- 4 años. **Go to market.**
 - Adcon Telemetry GmbH (Austria)
 - AOSense, Inc. (U.S.)
 - Apogee Instruments (U.S.)
 - Biospherical Instruments Inc. (U.S.)
 - Cryogenic Limited
 - Decagon Devices, Inc. (U.S.)
 - GWR Instruments Inc.(U.S.)
 - Impedans Ltd (U.S.)
 - Irradian Ltd
 - LI-COR, Inc
 - M-Squared Lasers Limited (U.K)
 - Mesotech International
 - Microsemi Corporation (U.S.)
 - Muquans (France)
 - Oscilloquartz (Switzerland)
 - Radixx International, Inc. (U.S.)
 - Sea-Bird Scientific
 - Skye Instruments Ltd. (U.K)
 - Spectrum Technologies, Inc. (U.S.)
 - Supracon AG
 - ThomasNet (U.S.)
 - Virtual Electronics Company (U.S.)
- 2 años. **Venta, instalación, mantenimiento y gestión.**

Annealers y simuladores

- 30 años. **Desarrollo de conceptos teóricos.**
- 15 años. **Prototipado de equipos de simulación y annealers.**
- 10 años. **Diseño y fabricación de productos.**
- 5 años. **Go to market.**
 - Fujitsu - D-Wave Systems
 - Atos - NTT
- 2 años. **Venta, instalación, mantenimiento y gestión.**

Computación

- 30 años. **Desarrollo de conceptos teóricos.**
- 10+10 años. **Prototipado de computadores cuánticos.**
- 6+10 años. **Diseño y fabricación de productos.**
- 1+10 años. **Go to market.**
 - IBM - Google
 - Microsoft - Rigetti
 - NTT - Xanadu - Qilimanjaro
 - Computadores que están desarrollándose en universidades y laboratorios de USA, EU, China, Israel, Canadá, Singapur y Australia.
(se dispone de poca información del estado y avance de dichas tecnologías)
- 1+10 años. **Venta, instalación, mantenimiento y gestión.**

Algorítmica y programación

- 10 años. **Desarrollo de conceptos teóricos.**
- 5 años. **Prototipado de programas.**
- 2 años. **Diseño y encapsulación de programas.**
- +1+10 años. **Go to market.**
 - IBM, QUIKit. - Rigetti, Forest
 - Google, Circ - Microsoft, Quantum Development Kit
 - D-Wave, Qbsolv - Xanadu, Strawberry Fields
 - Qilimanjaro, Qibo
- +3+10 años. **Desarrollo, instalación, mantenimiento, programación de aplicaciones para áreas específicas...**

Desarrollo temporal del mercado

- -30+X Universidades y laboratorios.
- -10+X Empresas de oferta.
- -3+X Startups. (Se han listado las startups sobre tecnologías cuánticas en los últimos años) Desde que recopilación nos consta que se han creado 8 startups nuevas).
- -2+X Empresas de demanda. (Se destaca el cuadro de este informe que hace referencia a los sectores y empresas que empiezan a demandar tecnologías cuánticas).

Demanda de perfiles y roles profesionales.

- **Demanda de científicos y tecnólogos con muy alta cualificación.**

-30+X Doctores Físicos, matemáticos e ingenieros.

-10+X Ejecutivos de negocio muy especializados.

- **Demanda de técnicos.**

-5+X Físicos, matemáticos e ingenieros.

-3+X Ejecutivos de negocio.

- **Demanda de técnicos especializados.**

-1+X Ingenieros, FP y profesionales con experiencia contrastada.

-3+X Técnicos especialistas en negocio.

Evaluando la evolución temporal de las tecnologías, mercado y perfiles profesionales, se puede hacer un cuadro con las necesidades de formación de los próximos años en ciencia y tecnologías cuánticas y por lo tanto, realizar una propuesta de acciones formativas concretas para los próximos años en España.

Necesidades de formación

1. Profesionales con un alto grado de formación:

Doctores, doctorandos o grados e ingenieros con alta cualificación.

Formación técnica específica

- Física teórica. Elaboración de los conceptos y teorías sobre la que se sustentan los prototipos de equipos, algorítmica y programación cuánticas.
- Física experimental. Construcción de prototipos de equipos cuánticos. (QKD, sensores, simuladores y ordenadores).
- Ingeniería cuántica.

Es un nuevo perfil profesional que surge de los cursos de especialización de doctores o doctorandos en física, ingeniería o matemáticas) - construcción de prototipos y equipos cuánticos haciendo equipo con los físicos experimentales.

En estos momentos, el curso más interesante es el de la Universidad de Bristol.

En España, se cursa un grado de ingeniería-física que bien podría ser el embrión para una futura ingeniería cuántica que se impartiera en las universidades españolas.

Los ingenieros cuánticos serán los responsables de diseñar el hardware cuántico, sistemas, programación de lenguajes y aplicaciones específicas para los diferentes sectores económicos.

- Físicos, e ingenieros con alta cualificación CEOs, CTOs y gestores de empresas y laboratorios focalizados en ciencia y tecnologías cuánticas.
- Físicos, economistas e ingenieros con alta cualificación y conocimientos en ciencia y tecnologías cuánticas. CEOs de startups.

Estos perfiles profesionales deberán ser cada vez más especializados.

Sería necesario diseñar “formación técnica” específica para su especialización.

- Físicos, economistas e ingenieros que quieren trabajar en empresas de oferta, demanda o iniciar una startup con foco en tecnologías cuánticas.

Es otro nuevo perfil profesional. Requieren formación específica en tecnologías cuánticas, gestión o creación de startups.

Para formar a este nuevo perfil profesional se debería crear un programa específico de “formación técnica” que incluya una base en ciencia y tecnologías cuánticas y formación específica en gestión y/o creación de startups cuánticas.

- Matemáticos, físicos o ingenieros con alta cualificación en finanzas y experiencia en el sector bancario como quants.

Las tecnologías cuánticas, se van incorporando poco a poco a la actividad de los Quants. Entre dos y cinco años será habitual que desarrollen sus algoritmos para trabajar con simuladores cuánticos. En algunos años más con ordenadores cuánticos. Los “Quants” requieren una formación específica para incorporar como nuevas herramienta a las tecnologías cuánticas.

Se requiere un programa de “formación técnica” específico que les habilite para trabajar con tecnologías cuánticas.

- Matemáticos, físicos e ingenieros con alta cualificación en programación y desarrollo de algoritmos.

Los simuladores y ordenadores cuánticos, deben programarse. Para ello, las empresas que los construyen, están creando sus propios programas.

Para el diseño y creación de estos programas, están trabajando matemáticos y físicos teóricos muy especializados en algorítmica cuántica.

Una parte importante de los ingenieros cuánticos, deberá especializarse en crear paquetes y plataformas de programas para que puedan ser utilizados por los nuevos programadores de equipos cuánticos.

Hay que diseñar un programa de “formación técnica” que habilite a los ingenieros a diseñar programas y crear aplicaciones específicas para ser utilizados en simuladores y ordenadores cuánticos.

2. Profesionales técnicos especializados.

Como se ha podido ver en las secuencias temporales de la evolución de las tecnologías cuánticas tanto los equipos de encriptación QKD como los de sensores cuánticos ya empiezan aparecer en los mercados.

Para diseñar y programar estos equipos hacen falta perfiles profesionales muy especializados que ya están trabajando desde hace muchos años.

Con la llegada al mercado de estos equipos desde hace dos años y con la llegada masiva al mercado de estos equipos en tres o cuatro años, se va a requerir un nuevo perfil profesional especializado en la instalación, mantenimiento y gestión de estos equipos.

Es necesario diseñar programas de “formación técnica especializada” que dé respuesta a estas necesidades de nuevos profesionales para el mercado de equipos cuánticos.

3. Diseño de acciones de formación.

Con esta información de estudio de evolución de la tecnologías, profesionales y necesidades de mercado, se recomienda iniciar los trámites administrativos para crear la primera ingeniería cuántica en España. Podría ser una titulación propia en primera instancia para cuando se apruebe pasar a formar parte del catálogo de estudios formales en las universidades públicas.

También se han programado cinco acciones de formación con dos grados de acceso y capacitación profesional: **Técnico y técnico especialista.**

Se ha considerado interesante programar un módulo común a todas ellas y luego módulos de especialización.

No se tiene muy claro que cursar todos los programas ofrecidos en una misma titulación superior como Técnico en Tecnologías Cuánticas. Este planteamiento debe ser estudiado con más detenimiento.

Ha parecido interesante programar visitas de profesionales de empresas que hagan referencia a los distintos programas y visitas de los alumnos a los principales centros y laboratorios cuánticos de España.

Se han diseñado 5 programas de formación.

Tres de “técnicos” con unos requisitos de entrada más fuertes y dos de “técnicos especialistas” con unos requisitos de entrada muy concretos pero que incluyen a titulados en FP o profesionales con experiencia en los campos requeridos.

Programas de formación Técnicos:

1. Técnico en gestión, negocio y creación de startups sobre tecnologías cuánticas.
2. Técnico en programación de ordenadores y simuladores cuánticos.
3. Técnico en tecnologías cuánticas aplicadas a las finanzas.

Programas de formación técnicos especialistas:

4. Técnico especialista en sensores cuánticos.
5. Técnico especialista en telecomunicaciones encriptadas cuánticamente.

1 | Técnico en gestión, negocio y creación de startups sobre tecnologías cuánticas

- ▶ Empresa
- ▶ Negocio
- ▶ Gestión y creación de empresas



90 horas

Dirigido a:

Ingenieros, físicos, matemáticos, economistas / ADE, químicos y profesionales con experiencia en gestión de negocios y creación de startups tecnológicas interesados en conocer los fundamentos teóricos y las nuevas posibilidades de negocio de las tecnologías cuánticas.

Objetivos:

Al finalizar el programa se obtendrán:

- Conocimientos fundamentales científicos/técnicos sobre tecnologías cuánticas.
- Conocimientos fundamentales para trabajar en empresas de oferta o demanda con un departamento de información cuántica.
- Conocimientos para trabajar en startups focalizadas en tecnologías cuánticas.
- Capacidad para iniciar una startup en torno a estas tecnologías.

Metodología:

Activa participativa.

Presencial apoyada con herramientas telemáticas y participación de profesionales de referencia en ciencia y tecnologías cuánticas.

Descripción del curso:

El programa tiene cuatro partes:

- A. Fundamentos científicos de las tecnologías cuánticas.
- B. Aplicabilidad y fundamentos de “negocio” en torno a las tecnologías cuánticas.
- C. Realización de un proyecto de fin de curso:

Dos opciones:

1. Definición de un departamento o una startup que tenga las tecnologías cuánticas como negocio.
2. Desarrollo de una aplicación tecnológica.
- D. Visitas a las principales empresas/startups, centros tecnológicos y universidades de España que trabajan con tecnologías cuánticas.

Perfiles de los formadores:

El programa contará con formadores especializados en:

- Mecánica cuántica.
- Tecnologías cuánticas: Computación/simulación, telecomunicaciones, ciberseguridad, sensores y programación.
- Aplicaciones de negocio de las tecnologías cuánticas.
- Creación de startups.
- También contará con visitas y conferencias de los principales científicos y responsables de empresas/startups cuánticas.

Programa:

1. Introducción a la mecánica cuántica.
2. Teoría de la información cuántica.
3. Tecnologías cuánticas.
4. Estado del arte de la ciencia y tecnologías cuánticas internacional y en España.
5. Aplicaciones prácticas de las tecnologías cuánticas.
6. Computación y simulación cuánticas.
7. Telecomunicaciones y ciberseguridad cuánticas y post-cuánticas.
8. Sensores cuánticos.
9. Algorítmica y programación de computadores/simuladores cuánticos.
Práctica en ordenador y/o simulador cuántico.
10. Creación de una startup o departamento cuántico.
Proyecto final de programa, a realizar en grupo.

Dos posibilidades:

- A. Creación de startup (plan de negocio) o definición de un departamento cuántico en una empresa.
- B. Desarrollo tecnológico: teórico o experimental.

Visitas

Visitas a empresas y centros cuánticos, fuera de horario. Algunas opciones: CSIC, BSC, ICFO, Empresas y startups cuánticas.

2 | Técnico en programación de ordenadores y simuladores cuánticos

- ▶ Tecnología
- ▶ Informática
- ▶ Programación



90 horas

Objetivos:

Al finalizar el programa se obtendrán:

- A. Conocimientos fundamentales científicos / técnicos sobre tecnologías cuánticas.
- B. Conocimientos fundamentales sobre los lenguajes de programación en tecnologías cuánticas.
- C. Conocimiento para trabajar en empresas que utilicen y programen ordenadores o simuladores cuánticos.

Metodología:

Participación activa.

Presencial apoyada con herramientas telemáticas y participación de profesionales de referencia en ciencia y tecnologías cuánticas.

Sesiones presenciales teóricas de preparación de los conocimientos teóricos a adquirir, dirigidas por parte del profesorado. Las sesiones estarán apoyadas por herramientas telemáticas y la participación de profesionales de referencia en ciencia y tecnologías cuánticas.

Trabajos prácticos para realizar en grupos, principalmente de programación.

Trabajo individual por parte de los alumnos.

Descripción del curso:

El programa tiene cinco partes:

- A. Fundamentos científicos de las tecnologías cuánticas.
- B. Ordenadores, simuladores, programas y algorítmica cuántica.
- C. Fundamentos de programación de paquetes cuánticos.
- D. Realización de una práctica de fin de curso.
- E. Visitas a empresas y centros tecnológicos.

Perfiles de los formadores:

El programa contará con formadores especializados en:

- Mecánica cuántica.
- Tecnologías cuánticas: Computación/simulación, telecomunicaciones, ciberseguridad, sensores, algorítmica y programación.
- Especialistas en algorítmica, lenguajes de programación y paquetes especializados en Computación Cuántica.
- También contará con la visita de técnicos especialistas de las empresas que han creado programas para computadores y simuladores cuánticos.

Programa:

Fundamentos

1. Introducción a la mecánica cuántica.
2. Teoría de la información cuántica.
3. Tecnologías cuánticas: Computación, simulación, sensores, telecomunicaciones y encriptación cuántica.
4. Estado del arte de la ciencia y tecnologías cuánticas internacional y en España.
5. Aplicaciones prácticas de las tecnologías cuánticas.

Algorítmica cuántica

7. Principales algoritmos cuánticos.
8. Fundamentos y aplicaciones del ordenador y simulador cuántico.

Programación cuántica

9. Fundamentos de lenguajes y paquetes de Computación Cuántica.
 - IBM QISKit.
 - Forest de Rigetti.
 - Quantum Development Kit de Microsoft.
 - Circ de Google.
 - Qbsolv de D-Wave.
 - Strawberry Fields de Xanadu.
 - Qibo de Quilimanjaro.

Proyecto práctico

Programación de una aplicación práctica para ejecutar en un ordenador cuántico.

Visitas

Visitas a empresas y centros cuánticos, fuera de horario. Algunas opciones: CSIC, BSC, ICFO, Empresas y startups cuánticas.

3 | Técnico en tecnologías cuánticas aplicadas a las finanzas

- ▶ Economía
- ▶ Finanzas
- ▶ Tecnología



90 horas

Dirigido a:

Ingenieros, físicos, matemáticos, economistas /ADE, quants y profesionales de las finanzas interesados en conocer los fundamentos teóricos y prácticos de las tecnologías cuánticas aplicadas a las finanzas.

Objetivos:

Al finalizar el programa se obtendrán:

- Conocimientos fundamentales científicos/técnicos sobre tecnologías cuánticas.
- Conocimientos en algorítmica cuántica aplicadas a las finanzas.
- Conocimientos para trabajar en departamentos de finanzas que utilicen tecnologías cuánticas.

Metodología:

Participación activa.

Presencial apoyada con herramientas telemáticas y participación de profesionales de referencia en ciencia y tecnologías cuánticas.

Descripción del curso:

El programa tiene cuatro partes:

- A. Fundamentos científicos de las tecnologías cuánticas.
- B. Tecnologías cuánticas aplicadas a las finanzas.
- C. Realización de una práctica de fin de curso.
- D. Visitas a empresas y centros tecnológicos.

Perfiles de los formadores:

El programa contará con formadores especializados en:

- Mecánica cuántica.
- Tecnologías cuánticas: Computación / simulación, telecomunicaciones, ciberseguridad, sensores y programación.
- Finanzas cuantitativas.
- Algorítmica cuántica aplicada a finanzas cuantitativas.

Programa:

Fundamentos

1. Introducción a la mecánica cuántica.
2. Teoría de la información cuántica.
3. Tecnologías cuánticas: Computación, simulación, sensores, telecomunicaciones, ciberseguridad, algorítmica y programación cuántica.
4. Estado del arte de la ciencia y tecnologías cuánticas internacional y en España.
5. Aplicaciones prácticas de las tecnologías cuánticas.

Finanzas

6. Principales algoritmos cuánticos.
7. Finanzas cuantitativas.
8. Productos financieros derivados y el control del riesgo.
9. Fundamentos de Inteligencia Artificial.
10. Principales problemas en finanzas cuantitativas.
11. Problemas de optimización.
12. Problemas de aplicación de la inteligencia artificial.
13. Problemas de medición del riesgo.
14. Montecarlo y problemas asociados.
15. Fundamentos de lenguajes y paquetes de computación cuánticos.

Prácticas

Desarrollo práctico de un caso de optimización financiera aplicando tecnologías cuánticas.

Visitas

Visitas a empresas y centros cuánticos, fuera de horario. Algunas opciones: CSIC, BSC, ICFO, Empresas y startups cuánticas.

4 | Técnico especialista en sensores cuánticos

- ▶ Tecnología
- ▶ Metrología y sensores
- ▶ Equipos electrónicos



90 horas

Dirigido a:

Ingenieros, técnicos de FP y profesionales con experiencia en metrología y sensores interesados en conocer los fundamentos teórico-prácticos y las nuevas posibilidades de los sensores cuánticos.

Objetivos:

Al finalizar el programa se obtendrán:

- Conocimientos fundamentales científicos/técnicos sobre tecnologías cuánticas.
- Conocimientos sobre metrología y sensores cuánticos.
- Podrás efectuar instalación, calibración, mantenimiento y gestión de sensores cuánticos.
- Podrás trabajar en empresas que utilicen tecnologías cuánticas en sus equipos de sensores.

Metodología:

Participación activa.

Presencial apoyada con herramientas telemáticas y participación de profesionales de referencia en ciencia y tecnologías cuánticas.

Descripción del curso:

El programa tiene cinco partes:

- A. Fundamentos de las tecnologías cuánticas.
- B. Metrología y sensores.
- C. Equipos de sensores cuánticos.
- D. Realización de una práctica de fin de curso.
- E. Visitas a empresas y centros tecnológicos.

Perfiles de los formadores:

El programa contará con formadores especializados en:

- Mecánica cuántica.
- Tecnologías cuánticas: Computación/simulación, telecomunicaciones, ciberseguridad, programación y algorítmica cuántica.
- Especialistas en metrología y sensores cuánticos.
- El curso contará con visitas y conferencias de los responsables de empresas de sensores cuánticos.

Programa:

Fundamentos

1. Introducción a la mecánica cuántica.
2. Teoría de la información cuántica.
3. Tecnologías cuánticas: Computación, simulación, sensores, telecomunicaciones y encriptación cuántica.
4. Estado del arte de la ciencia y tecnologías cuánticas internacional y en España.
5. Aplicaciones prácticas de las tecnologías cuánticas.

Metrología y sensores

6. Principios y prácticas de la metrología y sensores.
Instalación, calibración, mantenimiento y gestión.
7. Equipos técnicos de sensores y actuadores cuánticos:
 - QRNG.
 - Posicionamiento inercial.
 - Sensores magnéticos para diagnóstico médico.
 - Sensores 3D.
 - Ghost-imaging.
 - Relojes cuánticos.
 - Acelerómetros cuánticos.
 - Gravitómetros cuánticos.

Prácticas

Los alumnos realizarán prácticas de instalación, calibración, mantenimiento y gestión de sensores cuánticos.

Visitas

Visitas a empresas y centros cuánticos, fuera de horario. Algunas opciones: CSIC, BSC, ICFO, Empresas y startups cuánticas.

5 | Técnico especialista en telecomunicaciones encriptadas cuánticamente

- ▶ Tecnología
- ▶ Telecomunicaciones
- ▶ Ciberseguridad
- ▶ Equipos electrónicos



90 horas

Dirigido a:

Ingenieros, físicos y FPII informática interesados en conocer los fundamentos teóricos y prácticos de las Telecomunicaciones encriptadas cuánticamente.

Objetivos:

Al finalizar el programa se obtendrán:

- Conocimientos fundamentales científicos/técnicos sobre tecnologías cuánticas.
- Conocimientos técnicos especializados en equipos QKD.
- Conocimientos fundamentales para trabajar en empresas que requieran la instalación, mantenimiento y gestión de equipos cuánticos QKD.

Metodología:

Participación Activa.

Presencial apoyada con herramientas telemáticas y participación de profesionales de referencia en ciencia y tecnologías cuánticas.

Descripción del curso:

El programa tiene cinco partes:

- Fundamentos científicos de las tecnologías cuánticas.
- Telecomunicaciones y encriptación cuántica.
- Equipos QKD: Instalación, mantenimiento y gestión.
- Realización de una práctica de fin de curso.
- Visitas a empresas y centros tecnológicos.

Programa:

Fundamentos

1. Introducción a la mecánica cuántica.
2. Teoría de la información cuántica.
3. Tecnologías cuánticas: Computación, simulación, sensores, algorítmica y programación cuántica.
4. Estado del arte de la ciencia y tecnologías cuánticas internacional y en España.
5. Aplicaciones prácticas de las tecnologías cuánticas.

TELECOMUNICACIONES Y ENCRIPCIÓN

6. Fundamentos de la encriptación clásica RSA/ECC.
7. Computación Cuántica. Amenazas en el ámbito de la criptografía.
8. Introducción al intercambio de claves cuánticas, QKD.
9. El modelo de encriptación simétrica AES en el ámbito de la cuántica.

EQUIPOS QKD

10. Equipos, sistemas y casos de uso.
11. Instalación, mantenimiento y gestión:
 - Introducción a los equipos.
 - Instalación y conectividad.
 - Validaciones de funcionamiento.
 - Integración con la infraestructura.
 - Realización de pruebas.

Con los equipos sin conectar, realizar una instalación donde se conectarán los equipos, se validará el funcionamiento, se integrarán dentro de dos redes distintas para la comunicación y se creará una red de management para su gestión.

Se hará un tapping de la fibra. Se interceptará un fichero compartido por samba sin encriptar y ver su contenido. Acto seguido se realizará la misma compartición con el fichero a través de la red encriptada. Por último realizar una videollamada punto a punto.

Prácticas

Proyecto final de programa, a realizar en grupo.

Instalación de equipos QKD de IDQuantique y realización de una videoconferencia encriptada cuánticamente.

Visitas

Visitas a empresas y centros cuánticos, fuera de horario. Algunas opciones: CSIC, BSC, ICFO, Empresas y startups cuánticas.

Perfiles de los formadores:

El programa contará con formadores especializados en:

- Mecánica cuántica.
- Tecnologías cuánticas: Computación/simulación, telecomunicaciones, ciberseguridad, sensores y programación.
- Profesionales especializados en telecomunicaciones, ciberseguridad y encriptación cuánticas.
- Especialistas en instalación, mantenimiento y gestión de equipos de telecomunicaciones y encriptación cuántica.
- También contará con la visita de técnicos especialistas de IDQuantique.



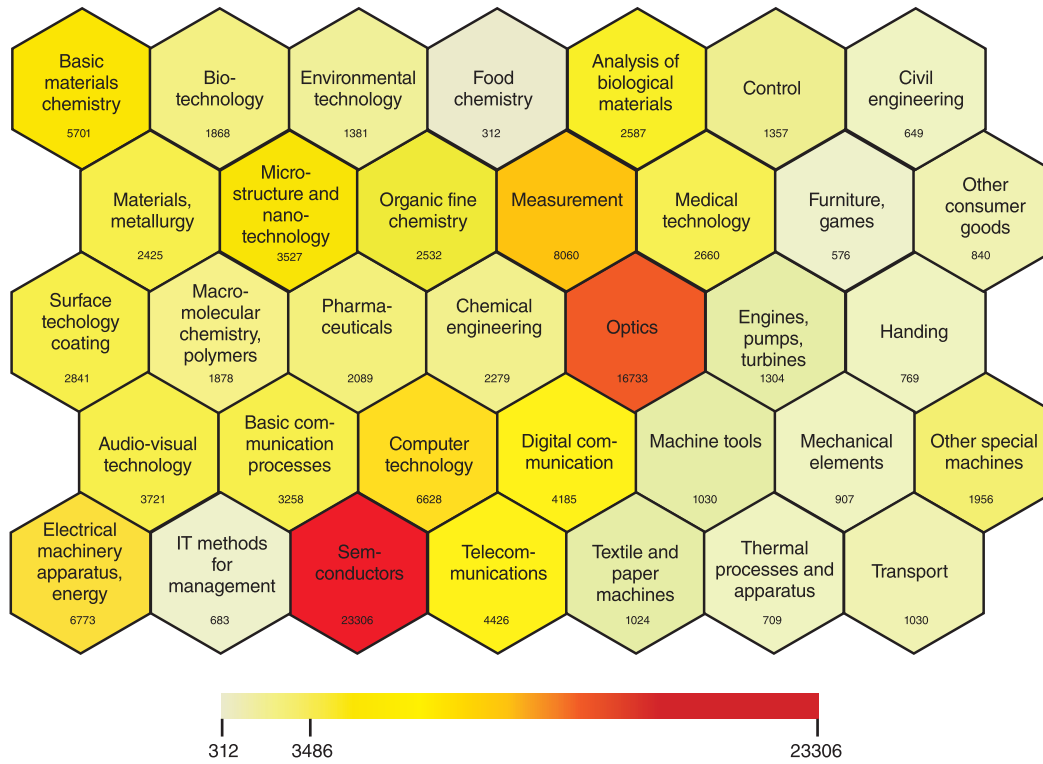
ANEXO 1

Quantum patents

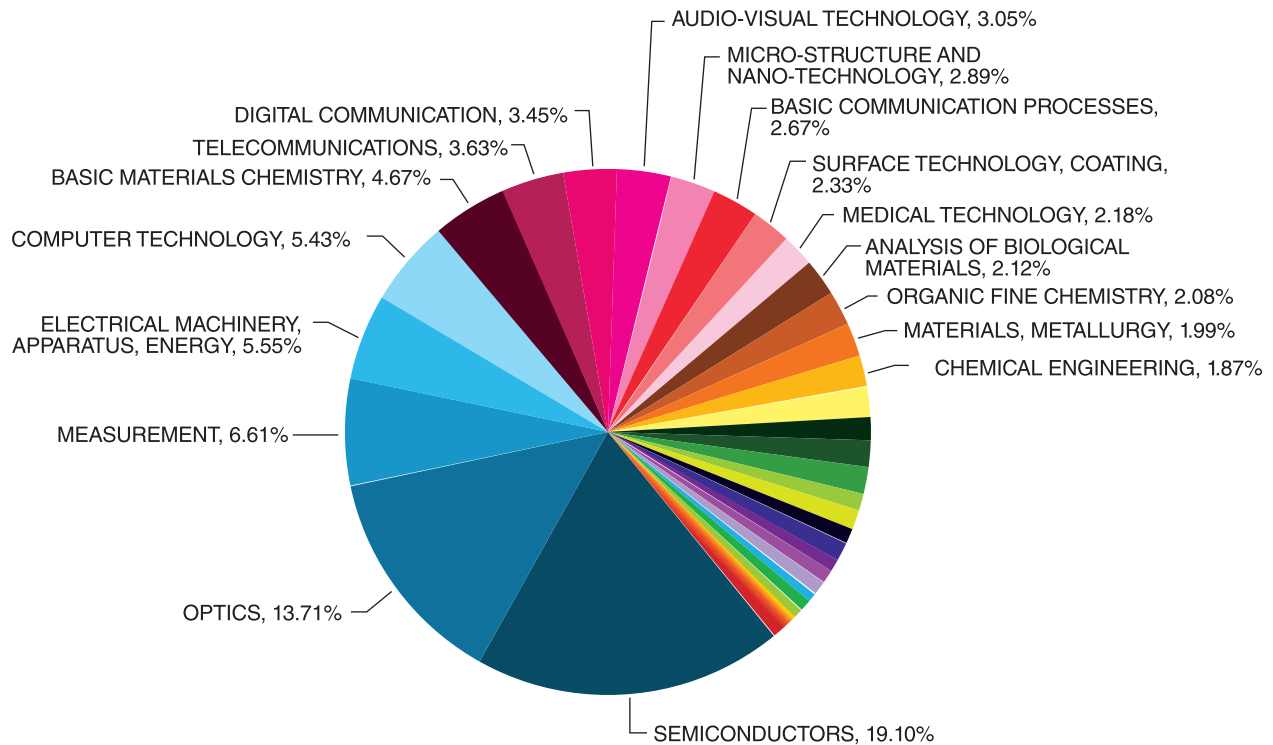
Fuente: Cabier Institute. Barcelona Patent Hub.

IPC	Title	Q-COMPUTING	Q-ENCRYPTION SECURITY	Q-TELECOMMS.	LASERS AND MASERS
B82Y10/00	Nano-technology for information processing, storage or transmission, e.g. quantum computing or single electron logic				
G06 + "Q"	Computing + "Q"				
G06N99/00	Quantum computers, i.e. information processing by using quantum superposition, coherence, decoherence, entanglement, nonlocality, teleportation				
H01S5/347	Lasers comprising quantum well or superlattice structures, e.g. single quantum well lasers [SQW-lasers], multiple quantum well lasers [MQW-lasers]				
H04B10"	Transmission systems employing electromagnetic waves other than radio-waves, e.g. infrared, visible or ultraviolet light, or employing corpuscular radiation, e.g. quantum communication				
H04B10/70	Photonic quantum communication				
H04L 9"	Arrangements for secret or secure communication				
H04L 12/873	Quantum based scheduling				

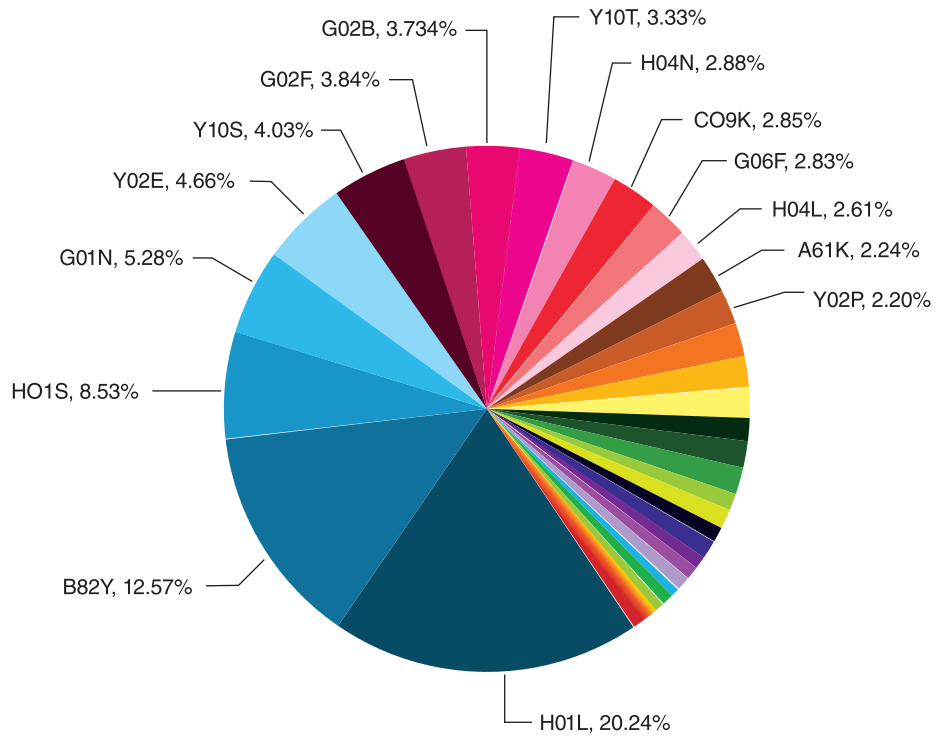
Distribution of search results by Technology domain



Distribution of search results by Technology domain



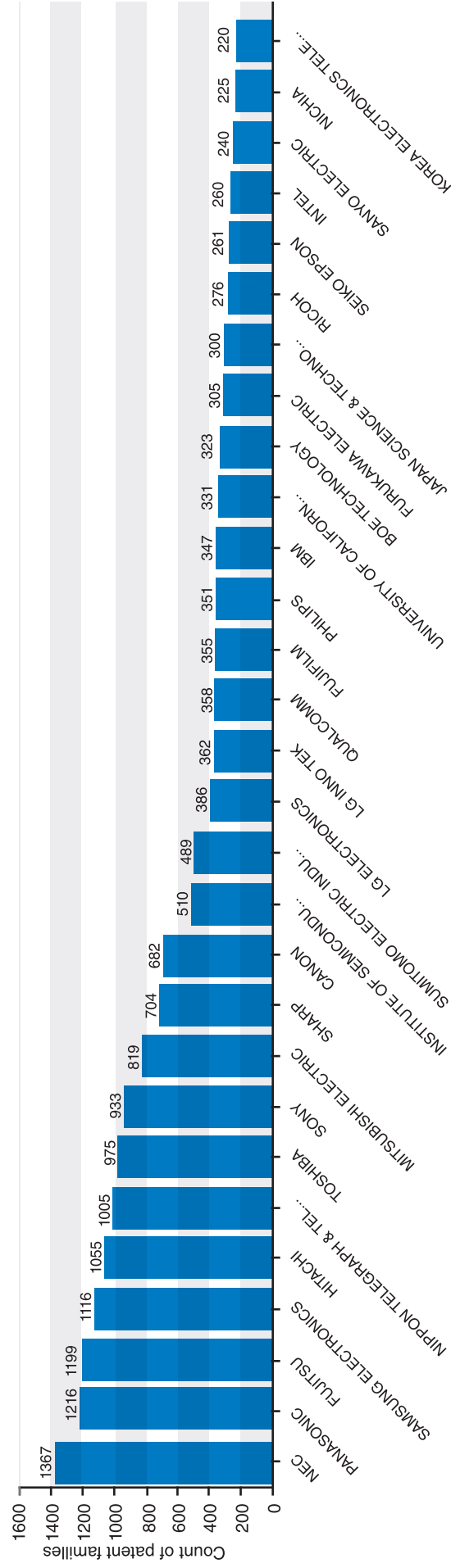
Quantum Tech - Main Technologies by CPU subclass

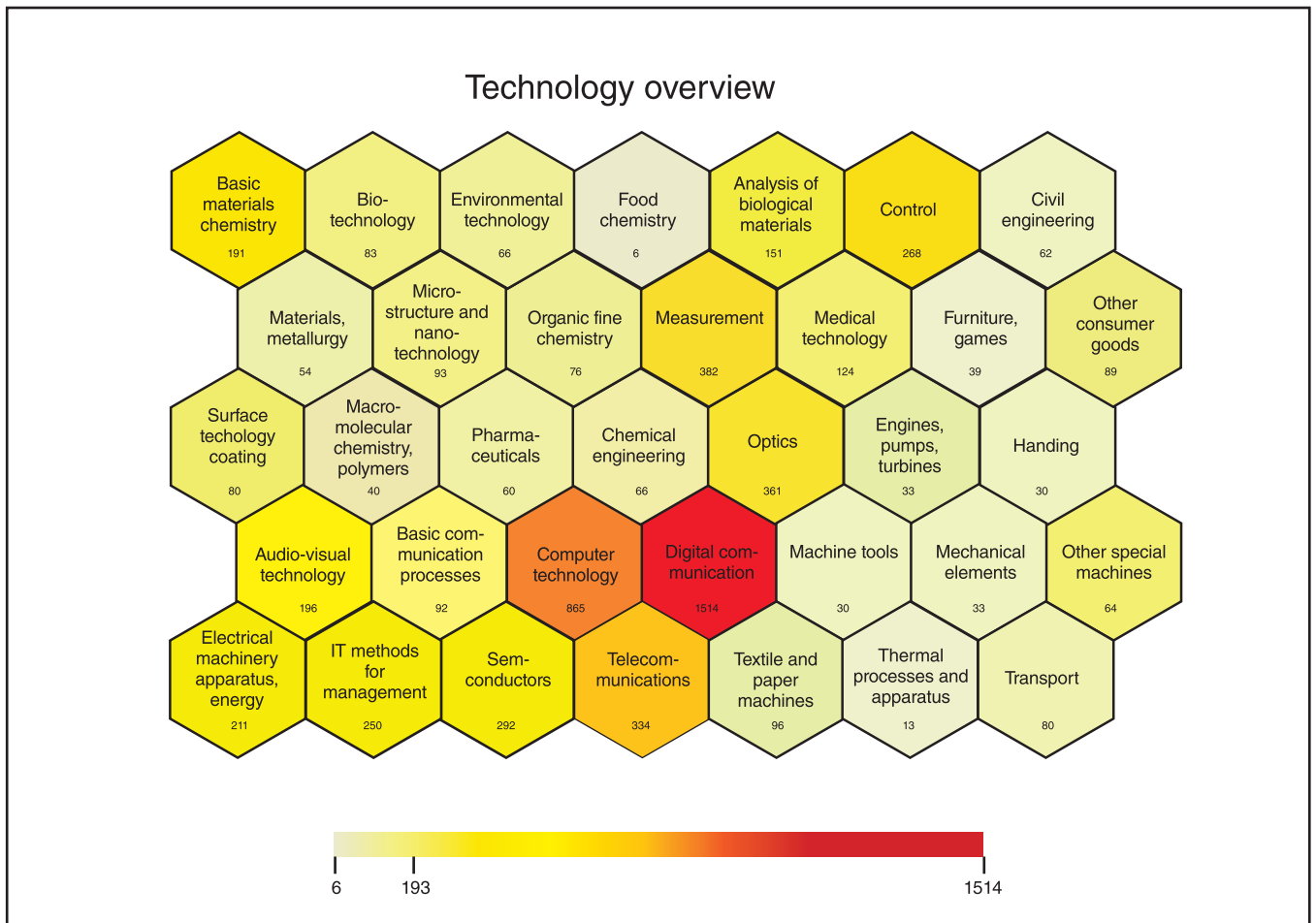


Patents on Sale / Patents under License (801)



Distribution of search results by Assignee





ANEXO 2

Quantum university

EP Quantum world universities

Universidades con departamentos de ciencia y tecnologías cuánticas.

Aalto University – Quantum Computing and Devices (QCD)

<https://www.aalto.fi/department-of-applied-physics/quantum-computing-and-devicesqcd>

Alexandria University (AleQCG)

<https://ayounes.page.tl/>

Austrian Academy of Sciences – Institute for Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI)

<https://iqoqi.at/en>

California Institute of Technology – Institute for Quantum Information and Matter (IQIM)

<http://iqim.caltech.edu/>

Center for Quantum Devices – Niels Bohr Institute – University of Copenhagen

<http://iqim.caltech.edu/>

Centre for Quantum Photonics (CQP) – University of Bristol

<http://www.bristol.ac.uk/physics/research/quantum/>

Centre for Quantum Technologies (CQT) – National University of Singapore

<http://www.quantumlah.org/index.php>

Chalmers University of Technology – Wallenberg Centre for Quantum Technology

http://www.chalmers.se/en/news/Documents/programme_description_WCQT_171114_eng.pdf

Chapman University – Institute for Quantum Studies

<http://www.chapman.edu/research-and-institutions/quantum-studies/>

Delft University of Technology and TNO – QuTech

<http://qutech.nl/>

Durham University – Joint Quantum Centre

<https://www.jqc.org.uk/>

ETH Zurich – Computational Physics Group

<http://www.comp.phys.ethz.ch/research/station-q-zurich.html>

Georgia Tech Research Institute – Quantum Systems Group

<http://quantum.gatech.edu/home.shtml>

Hebrew University of Jerusalem – Quantum Information Science Center

<http://qcent.huji.ac.il/>

Keio University – Advancing Quantum Architecture (Aqua) Group

<http://aqua.sfc.wide.ad.jp/>

Khalifa University of Science and Technology – Quantum Computing Research Group

<http://www.kustar.ac.ae/pages/quantum-computing-research-group>

Louisiana State University – Quantum Science and Technologies Group

<http://quantum.phys.lsu.edu/>

Massachusetts Institute of Technology – Engineering Quantum Systems Group

<http://equs.mit.edu/>

Michigan State University – Laboratory for Hybrid Quantum Systems

<https://www.hybridquantumlab.com/>

MIT Lincoln Laboratory – Quantum Information and Integrated Nanosystems

<http://www.ll.mit.edu/mission/electronics/qiin/qiin.html>

Newcastle University – Joint Quantum Centre

<https://www.jqc.org.uk/>

Oxford University

<http://oxfordquantum.org/>

Princeton University – Quantum Computer Architecture Research Group

<http://qarch.cs.princeton.edu/>

Purdue University

https://www.physics.purdue.edu/~ylyandag/QC_REU/QC_REU_LS.html

Saarland University – Quantum and Solid State Theory Group

<http://qsolid.uni-saarland.de/>

Simon Fraser University – Silicon Quantum Technology Lab

<http://www.sfu.ca/physics/siliconquantum/>

Skoltech – Quantum Complexity Science Initiative

<http://quamplexity.org/>

Southern Illinois University – Quantum Computing Group

<http://www.physics.siu.edu/qc/>

Stanford University – Yamamoto Group

<https://web.stanford.edu/group/yamamotogroup/research/research.html>

Stony Brook University

<http://qit.physics.sunysb.edu/new/>

Syracuse University – Plourde Research Lab

<http://plourdelab.syr.edu/>

Technion – Center for Quantum Science, Matter and Engineering

<https://www.technion.ac.il/en/2018/04/50-million-gift-names-the-helen-diller-center-for-quantum-science-matter-and-engineering/>

Texas A&M – Computational and Data Intensive Physics Group

<https://intractable.lol/>

Tokyo Institute of Technology (Tokyo Tech)

<http://www.stat.phys.titech.ac.jp/nishimori/>

Tulane University

<http://www2.tulane.edu/sse/pep/research/theoretical-research/>

Université de Sherbrooke – Institut quantique

<https://www.usherbrooke.ca/iq/en/>

University College London – Quantum Science and Technology Institute (UCLQ)

<http://www.uclq.org/>

University of Amsterdam – Quantum Matter & Quantum Information

<http://www.uva.nl/en/shared-content/zwaartepunten/en/quantum-matter--quantum-information/quantum-matter--quantum-information.html>

University of Barcelona/Barcelona Supercomputing Center – QUANTIC

<http://quantic.bsc.es/>

University of Basel

<https://www.physik.unibas.ch/news.html>

University of Bristol – Bristol Quantum Information Institute

<http://www.bristol.ac.uk/research/institutes/quantum/>

University of Bristol – Quantum Technology Enterprise Centre (QTEC)

<http://www.bristol.ac.uk/qtec/>

University of British Columbia – Advanced Materials and Process Engineering Laboratory (AMPEL)

<http://www.ampel.ubc.ca/research/qc/>

University of British Columbia – Quantum Information Science

<http://www.qi.ubc.ca/>

University of Calgary – Institute for Quantum Science and Technology

<http://www.iqst.ca/>

University of California Berkeley – Berkeley Quantum Information & Computation Center

<http://bqic.berkeley.edu/>

University of California at Santa Barbara – Center for Spintronics and Quantum Computation

<http://www.csqc.ucsb.edu/>

University of Chicago – Chicago Quantum Exchange

<http://quantum.uchicago.edu/>

University of Colorado Boulder – JILA

<https://jila.colorado.edu/research/quantum-information>

University of Copenhagen – Niels Bohr Institute

<http://www.nbi.ku.dk/english/>

University of Konstanz

<https://theorie.physik.uni-konstanz.de/burkard/>

University of Malta – Quantum Complexity Science Initiative

<http://quacomplexity.org/>

University of Maryland – Joint Center for Quantum Information and Computer Science (QIICS)

<http://quics.umd.edu/>

University of Maryland – Joint Quantum Institute (JQI)

<http://jqj.umd.edu/>

University of New Mexico – Center for Quantum Information and Control (CQUIC)

<http://physics.unm.edu/CQUIC/>

University of New South Wales (Member of CQC2T)

<http://www.cqc2t.org/>

University of Oregon – Oregon Center for Optical, Molecular and Quantum Science

<http://omq.uoregon.edu/>

University of Queensland

<http://quantum.technology/>

University of Southern California – Information Sciences Institute

http://www.isi.edu/research_groups/quantum_computing/home

University of Sussex – Ion Quantum Technology Group

<http://www.sussex.ac.uk/physics/iqt/index.html>

University of Sydney – Quantum Science Research Group

<http://sydney.edu.au/science/physics/research/quantum/>

University of Technology Sydney – Centre for Quantum Computation & Intelligent Systems (QCIS)

<http://www.uts.edu.au/research-and-teaching/our-research/quantum-computation-and-intelligent-systems>

University of Texas at Austin – Quantum Information Center

<http://www.cs.utexas.edu/~qic/>

University of Toronto – Centre for Quantum Information and Quantum Control

<http://cqiqc.physics.utoronto.ca/index.html>

University of Washington – Trapped Ion Quantum Computing Group

<http://depts.washington.edu/qcomp/index.html>

University of Wisconsin at Madison – Wisconsin Institute for Quantum Information

<http://wiqi.physics.wisc.edu/>

University of Waterloo – Institute for Quantum Computing

<https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/>

Vienna Center for Quantum Science and Technology (VCQ)

<https://vcq.quantum.at/>

Virginia Tech

https://vtnews.vt.edu/articles/2018/06/Science-quantum_research_physicsdept.html

Weizmann Institute

<https://www.weizmann.ac.il/complex/ozeri/research-activities>

Yale Quantum Institute

<http://quantuminstitute.yale.edu/>

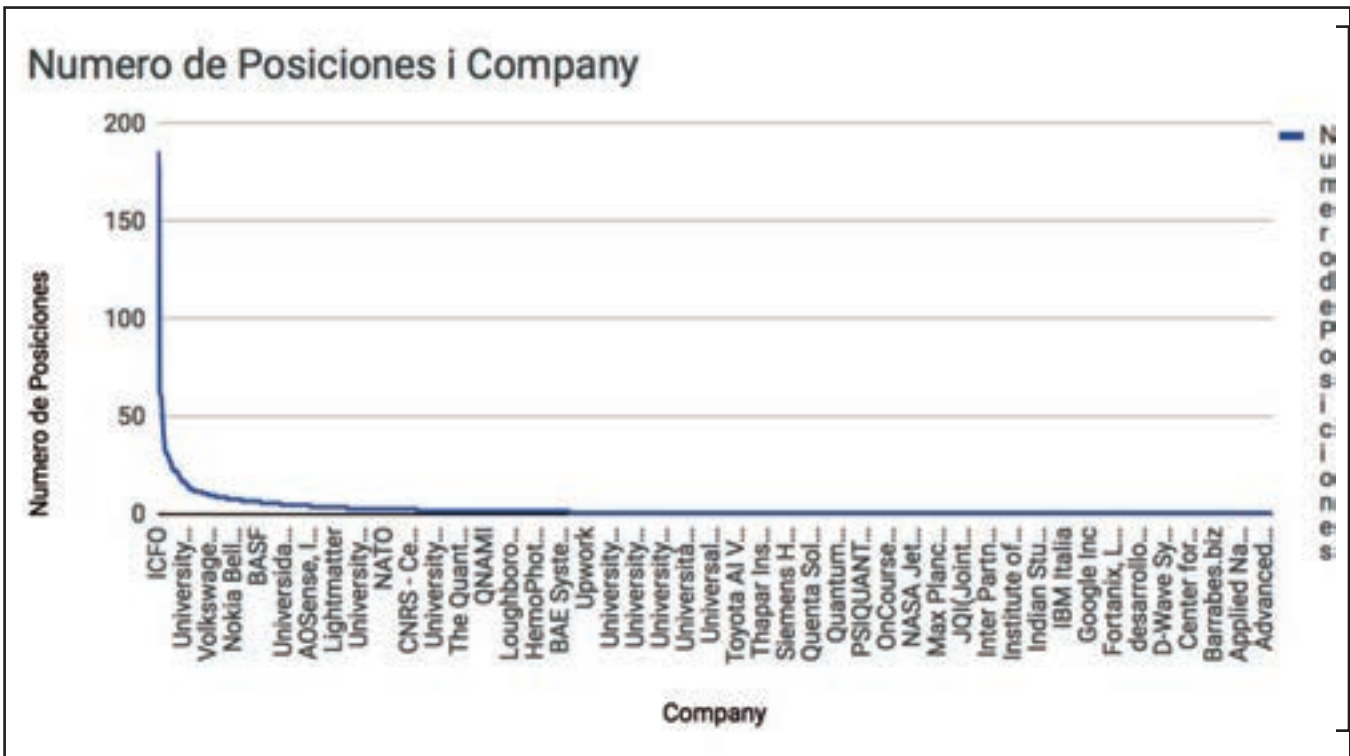
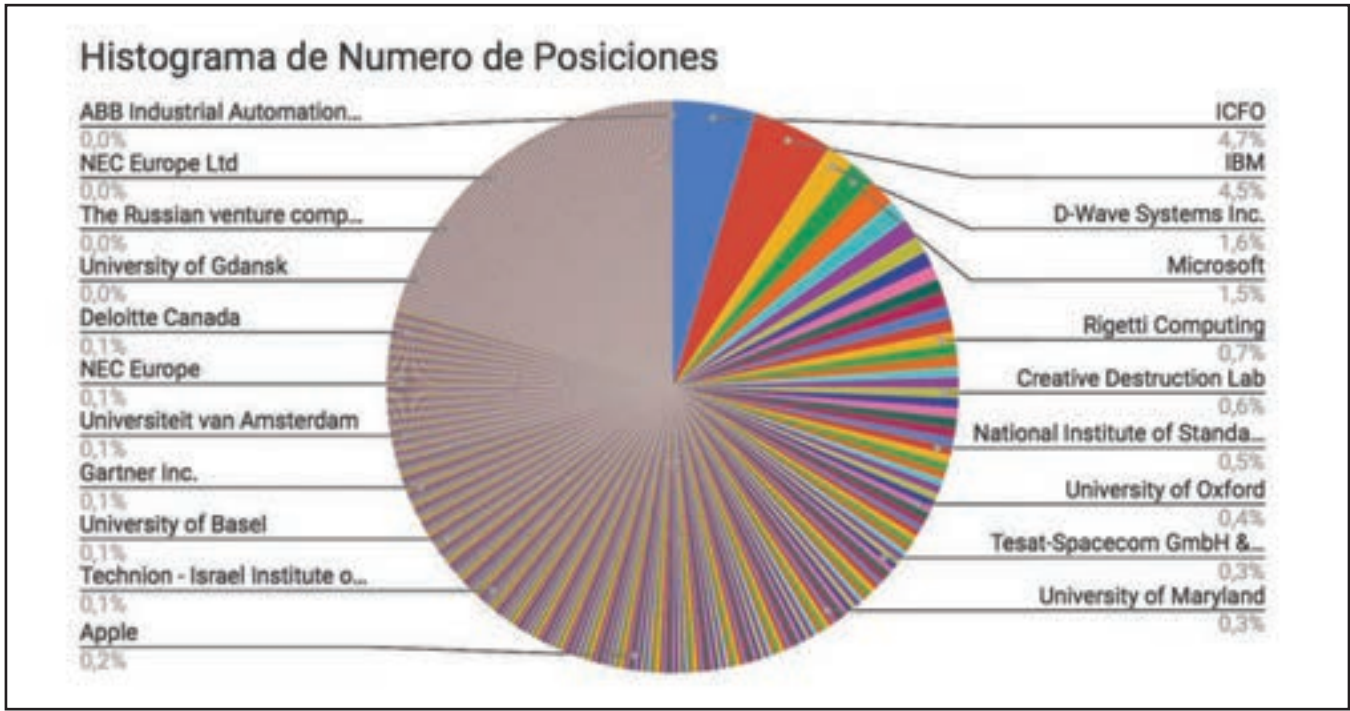
ANEXO 3

Word

Startups cuánticas
1QBit
ADVA
Alpine Quantum Technologies, GmbH Con
Anyon Systems Inc.
Arqit
Artiste-qb.net con
Atomionics
Áurea Technology
Atom Computing
BOHR[∞]
Black Brane Systems
Bleximo Corp
Bluefors
Boxcat
bra-ket science
BraneCell
Cambridge Quantum Computing Limited (CQC)
CipherQ
Cogisen
ColdQuanta
CryptaLabs
Crypto4A Technologies
CryptoExperts
Crypto Quantique
D-Wave Systems Inc.
Delft Circuits
e2V
EeroQ
Entanglement Partners
Entopica Labs
Everettian Technologies
evolutionQ
Fathom Computing
Freschfield
Gigaoptics
H-Bar Consultants
Heisenberg Quantum Simulations
Horizon Quantum Computing
HighQ
ID Quantique
InfiniQuant
Innovatus Q - The Quantum
Technology Company
Inside Quantum Technology
IonQ
ISARA
JoS Quantum
KETS Quantum Security
Laser Quantum
MagiQ
MDR
M Squared
Neutron Optics
Muquans
Netramark
Nordic Quantum Computing Group (NQCG)
OTI Lumionics
Oxford Quantum Circuits
Phase Space Computing
Post-Quantum (Soluciones PQ)
ProteinQure
PsiQuantum
Q & I
Qandi
Qasky
QbitLogic
Qrypt, Inc
Q-Ctrl
QC Ware
QEY net
Qilimanjaro Quantum Hub
Qindom
QLMTEC
Qnami
QSpice Labs
Qu & Co
Quandela
Quanticor-Security
Quantika
Quantonation
Quantum Base
Quantum Benchmark Inc.
Quantum Circuits, Inc.
Quantum Computing inc
Quantum Desing
Quantum Factory
QuantumCTek,
Quantum Fund
QuantumLaf Inc.
Quantum Motion Technologies
Quantum Phi
Quantum Impenetrable
Quantum Xange
QuantumX
Quantum Wise
Qubitekk
Qubitera, LLC. Fundada
Quintessence Labs
Qulab
Qunnect
QuNu Labs
Qunnect
QuNu Labs
QuSpin Technologies
QwidgetCo
QxBranch
RAL Space
Rigetti Computing
Ram Group
ReactiveQ
Rambus
River Lane Research
s-Fifteen
SeeQC - Una filial de Hypres
SecureRF
Silicon Quantum Computing
Single Quantum System
SoftwareQ Inc.
Sparrow Quantum
Strangeworks
Tokyo Quantum Computing (TQC)
TundraSystems Global LTD
Turing Inc
UQDevices
Vault cloud
Venaffi
Xanadu
Zapata Computing
Zhejiang Quantum Technologies (QTEC)
Ziroh Labs
Zuse Computer

ANEXO 4

Gráfico LinkedIn Quantum Positions



ANEXO 5

EP Quantum Learning

1. Una de las mejores fuentes formativas para iniciarse en los fundamentos de la computación cuántica es “Computing is Quantum Computing for the Determined” de Michael Nielsen. Consta de 22 videos cortos que tratan sobre las bases, la codificación superdensa, la teletransportación cuántica y los postulados de Mecánica Cuántica. Muy recomendable.
2. David Deutsch ha publicado seis vídeos de conferencias diseñadas como una introducción a la teoría de la computación cuántica.
3. The Perimeter Institute ha publicado una serie de conferencias de 14 horas de duración a cargo de Daniel Gottesman que tituló la Revisión de la Información Cuántica (Quantum Information Review). Esta serie de conferencias fue grabada en 2015 y pueden ser descargadas en múltiples formatos (MP4, MP3, y PDF).
4. Microsoft ha creado una serie de tutoriales llamados Katas Cuánticos. Estos tutoriales son un proyecto de código abierto que contienen un serie de ejercicios de programación utilizando el Lenguaje Q# que permite a los usuarios aprender a su propio ritmo. Se trabaja con el Microsoft Quantum Development Kit y consiste en una secuencia de tareas sobre computación cuántica que requieren que un usuario rellene un código concreto. Los katas utilizan un aprendizaje simple siguiendo unos principios entre los que se incluyen el aprendizaje activo, el aumento incremental de la complejidad y la retroalimentación. Para más información se puede leer la descripción del blog de Microsoft y descargar el código y las instrucciones de cómo instalarlo en GitHub (“computación cuántica con Quantum Katas”).
5. Caltech tiene en línea el material del curso para Física 219, Computación Cuántica. Este es un curso que ha evolucionado durante más de 10 años y ahora tiene más de 400 páginas de material en línea en nueve capítulos. Se puede encontrar este curso en: <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229/>.
6. UC Berkeley tiene un curso en línea titulado: Mecánica Cuántica y Computación Cuántica (Quantum Mechanics and Quantum Computation).

Lo describen como un simple introducción conceptual a mecánica cuántica y computación cuántica. Esta diseñado para una duración de 4/9 semanas entre 5-12 horas de esfuerzo por semana. Lo catalogan como nivel “intermedio” pero advierten de que es necesario conocimientos en profundidad de álgebra lineal. Se puede encontrar en el siguiente enlace la disponibilidad de los mismos: <https://www.edx.org/es/course/quantum-mechanics-and-quantum-computation>.
7. El MIT ofrece un currículo profesional cuántico donde se presentan dos series diferentes de cursos en línea. El primero se llama Fundamentos de la Computación Cuántica (Foundations of Quantum Computing) consistente en una serie de videoconferencias de Profesores del MIT con un conjunto de problemas asociados. No hay ningún coste para esta serie, pero el MIT ofrece un certificado opcional de terminación para aquellos que pasan el curso a una tarifa nominal. El segundo es un programa de cuatro cursos con coste denominados Aplicaciones de Computación Cuántica (Applications of Quantum Computing). Detalles tanto de estas series como de los enlaces para los cursos se pueden encontrar en la web del MIT <https://quantumcurriculum.mit.edu/>.

- 8.** Dr. James Wootton de la Universidad de Basilea ha desarrollado un blog llamado Decodoku (<https://medium.com/@decodoku>) con juegos dedicados al tema de la corrección de errores cuántica. Los puzzles de Decodoku se encuentran disponibles para su descarga tanto en IOS como en Android. El Dr. James traslada como jugar permite aprender y hacer investigación al mismo tiempo sobre la corrección de errores cuántica. Además, el blog tiene una serie de posts que proporcionan un buen tutorial sobre este tema.
- 9.** Por otro lado hay un conciso, pero muy comprensible resumen sobre el “recocido cuántico” (quantum annealing) por Brianna Gopaul. El documento describe cómo funciona el “recocido cuántico”, qué organizaciones están desarrollando “quantum annealers” y cuáles son las aplicaciones en las que puede ser utilizado. Se puede ver este resumen en: <https://www.linkedin.com/pulse/quantum-annealers-solving-worlds-optimization-problems-brianna-gopaul>
- 10.** La universidad de Bristol tiene una completa ingeniería cuántica. Quantum Engineering: <http://www.bristol.ac.uk/qtec/>

El primer curso impartido en España sobre Quantum Programming IBM Qiskit se realizó entre el 18 octubre y el 16 noviembre de 2019 en las magníficas instalaciones del Centro Nacional de Formación en Nuevas Tecnologías de La Rioja - ThinkTIC sito en Logroño (La Rioja). Dicho curso fue una introducción a los conocimientos fundamentales tanto científicos como técnicos de las tecnologías cuánticas y una aproximación a los lenguajes de programación en dichas tecnologías, en especial con el paquete IBM QISKIT. Qiskit es el lenguaje de programación del ordenador cuántico de IBM.

