

FOCUS

TECNOLÓGICO DE ESPAITEC

Escenario Actual en Computación Cuántica



UJI UNIVERSITAT
JAUME I
Fundació General · FUGEN

espaitec
15 anys
Parc Científic i Tecnològic

Development /

iale
TECNOLOGIA

 GENERALITAT
VALENCIANA

 **AVI** AGÈNCIA VALENCIANA
DE LA INNOVACIÓ

 **UNIÓN EUROPEA**

Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

Actuación cofinanciada por
la Unión Europea a través del
Programa Operativo del Fondo
Europeo de Desarrollo Regional
(FEDER) de la Comunitat Valen-
ciana 2014-2020

Contenidos

Presentación	1
Panorama tecnológico	1
Últimos desarrollos tecnológicos (Patentes publicadas).....	2
Tendencias.....	3
Principales solicitantes.....	4
Principales centros de investigación con desarrollos patentados	5
Evolución de la actividad de los principales titulares	5
Principales países	6
Principales áreas tecnológicas	7
Evolución de las principales áreas tecnológicas	10
Principales contenidos patentados	11
Principales palabras en las patentes sobre Computación Cuántica publicadas entre 2018-2022	11
Principales áreas temáticas tratadas (co-ocurrencia de palabras) en las patentes sobre Computación Cuántica	13
Palabras más correlacionadas en las patentes sobre Computación Cuántica	14
Clústeres temáticos (topic clusters)	15
Principales áreas de especialización	17
Colaboraciones.....	19
Mercado de la Computación Cuántica	21
Principales empresas:.....	23
En America:.....	23
En Asia:.....	24
En Europa:.....	24
Centros de referencia:.....	26
En América:.....	26
En Asia:	26
En Europa:.....	27
Algunas conclusiones	28
Referencias	30

FOCUS Tecnológico

Escenario Actual en Computación Cuántica

IALE Tecnología

Diciembre de 2022

Presentación

Actualmente, las dos tecnologías de cúbits más avanzadas son los bits cuánticos superconductores y las trampas de iones, pero esto no significa que sean el único camino que podemos seguir en la búsqueda de un ordenador cuántico plenamente funcional. De hecho, algunos grupos de investigación están trabajando con iones implantados en macromoléculas o átomos neutros por su interesantísimo potencial. Lo realmente importante es encontrar la forma de producir cúbits de la máxima calidad posible, así como desarrollar tecnologías que favorezcan el escalado de los bits cuánticos para permitir la fabricación de procesadores que aglutinen no ya miles, sino millones de cúbits. Y en este contexto es crucial dar con nuevos materiales cuyas propiedades no solo permitan a los científicos poner a punto cúbits de más calidad; también es esencial desarrollar sistemas que permitan a los ordenadores cuánticos comunicarse entre ellos de la forma más eficiente posible.

El presente **FOCUS TECNOLÓGICO** es un estudio de *Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva* cuyo objetivo es mostrar un panorama de los últimos avances tecnológicos y la situación a nivel competitiva y de mercado en relación a un ámbito determinado, en este caso, la **Computación Cuántica**.

Panorama tecnológico

Inicialmente se ha realizado un estudio de los principales desarrollos tecnológicos a partir de **información de Patentes**, obtenida mediante la consulta a bases globales de patentes de las principales oficinas de PI en el mundo: Patentscope, de la OMPI, la Oficina Mundial de la Propiedad Industrial; Espacenet, de la EPO, la Oficina Europea de Patentes y la bases de datos a texto completo de la USPTO, la Oficina de Patentes de los Estados Unidos.

La información de patentes revela aspectos estratégicos relacionados con la identificación de actores que están actualmente destinando recursos de R+D a proteger nuevas tecnologías e invenciones en este ámbito y, por tanto, pueden desarrollar potencialmente productos que incorporen esas tecnologías al mercado en unos años; asimismo el análisis de los contenidos

tratados en las patentes permite detectar temas de interés y su evolución, si éstos son sostenidos en el tiempo o emergentes.

Para la realización de este estudio **IALE Tecnología** ha usado herramientas propias de búsqueda y monitoreo de la información y herramientas open source de análisis estadístico de los datos (principalmente R y Python), que incluyen librerías y algoritmos de Aprendizaje automático (ML), Procesamiento del Lenguaje Natural (NLP), así como herramientas para la visualización de los datos.

Últimos desarrollos tecnológicos (Patentes publicadas)

El ámbito de búsqueda se focalizó en los desarrollos e invenciones recientes en Computación Cuántica publicadas en los últimos 5 años (entre el año 2018 y 2022).

Delimitar un campo de estudio tan amplio como la computación cuántica -que abarca partes de vastas áreas de conocimiento como la nanotecnología y la electrónica- es de por sí, un reto no menor. Se ha pretendido llevar a cabo una búsqueda objetiva, muy centrada en computación cuántica y que se incluyera, por tanto, en lo que algunos autores han llamado “la segunda revolución cuántica”, más relacionada con la capacidad de controlar y manipular objetos cuánticos para conseguir ciertas ventajas, como por ejemplo, en el caso de la criptografía cuántica.

Las clasificaciones de patentes -IPC y CPC- permiten delimitar la búsqueda por áreas tecnológicas, si bien clasificar nuevas invenciones en estas áreas implica solapamientos inevitables ¹.

Clasificaciones consideradas en la búsqueda:

Computación cuántica (Go6N10); Criptografía cuántica (Ho4L 9/0852 y Ho4L 9/0855)

Las búsqueda a partir de las clasificaciones se complementa con algunas palabras clave que permiten, en combinación con las primeras, una mejor delimitación del ámbito de estudio. Se ha tratado de hacer foco particular en tecnologías que usan nuevos materiales para conseguir mejorar la calidad y la escalabilidad de los cúbits cuánticos. Las palabras usadas fueron:

(quantum AND (materials OR material OR photonics OR sensors OR qubits OR computing OR computation OR memory OR qkd OR “quantum key distribution” OR

¹ Por ejemplo, aunque la búsqueda se ha centrado en computación cuántica (ML, procesadores, circuitos cuánticos, templos cuánticos, realizaciones físicas, dispositivos de memoria, corrección de errores, etc.), es inevitable -y también significativo- que se recuperen patentes también relacionadas con el área de la comunicación cuántica (computación distribuida, interfaces, canales cuánticos, redes cuánticas, repetidores cuánticos, etc.)

superconducting OR photonic OR solid-state OR trapped-ion OR Rydberg-atom OR simulations OR scalable OR control OR “hybrid classical” OR “noisy intermediate scale” OR communication OR “machine learning” OR imaging OR sensing OR biology OR fault-tolerant OR “shor’s” OR cybersecurity OR algorithm* OR “currency arbitrage” OR credit OR scoring OR “portfolio optimization” OR complexity)

Los resultados de la búsqueda han permitido identificar principales actores y áreas de aplicación.

De entre los 6378 documentos de patente recuperados, 3811 son solicitudes de patentes y 2567 han sido concedidas.

Tendencias

El recuento del número de patentes -agrupadas por familias (todos los documentos asociados a una misma invención)- publicadas en los últimos 5 años muestra una clara evolución creciente, que deja constancia del interés suscitado y de los esfuerzos crecientes en R+D y protección de nuevas tecnologías al respecto.

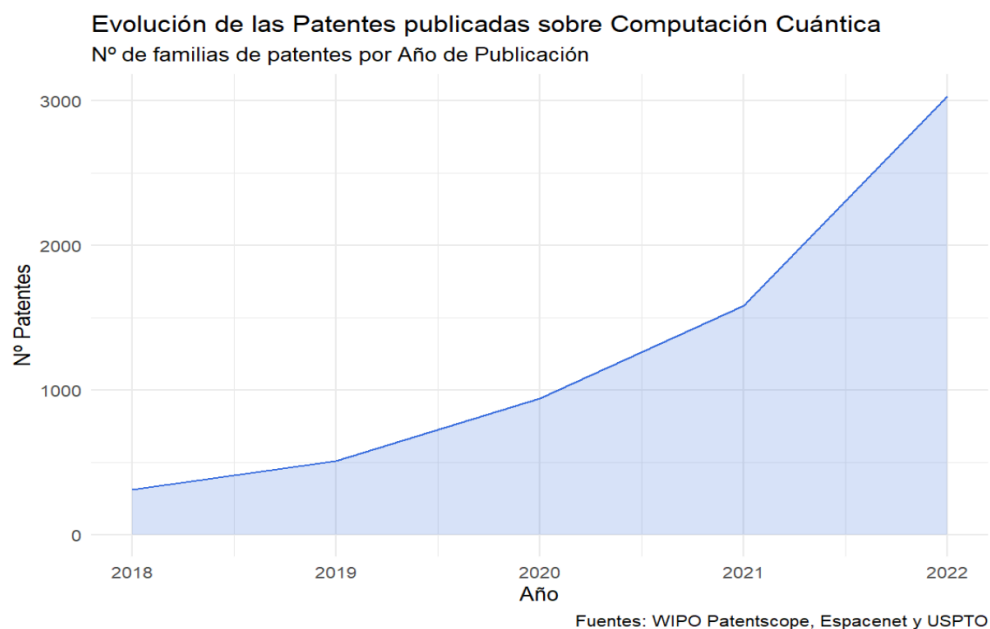


Figura 1.1. Evolución de las patentes sobre Computación Cuántica

Principales solicitantes

Las principales instituciones -empresas y centros de investigación- con desarrollos e invenciones protegidas por medio de patentes en Computación Cuántica son **IBM**, que lidera desde hace años los desarrollos en esta área, seguido de otras grandes empresas tecnológicas como **Microsoft**, **Google** y la china **Origin Quantum**, el centro chino **CTEK** y la canadiense **D-Wave**.

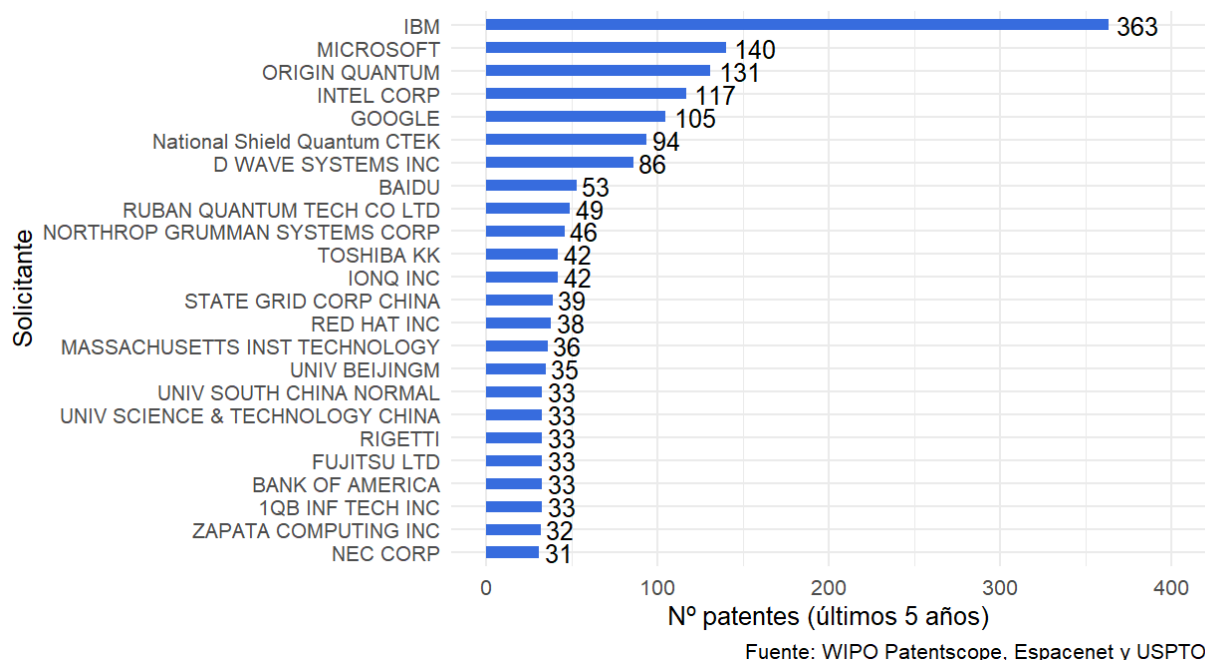


Figura 1.2. Principales solicitantes

La compañía tecnológica **IBM** es el principal líder en cuanto a nuevos desarrollos patentados en computación cuántica. Patenta invenciones relacionadas principalmente con fabricación de componentes que exhiben superconductividad y dispositivos con efecto Josephson. A principios de Noviembre de este año IBM anunció un hito importante², el desarrollo de un nuevo procesador que alcanza los 433 cúbits.

Microsoft con 140 invenciones en el periodo, relacionadas con computación cuántica y , en particular, con circuitos lógicos usando dispositivos superconductores, así como métodos de reconocimiento de patrones y clusterización usando teoría de grafos y métodos de encriptación mediante funciones hash.

² IBM Unveils 400 Qubit-Plus Quantum Processor and Next-Generation IBM Quantum System Two
<https://newsroom.ibm.com/2022-11-09-IBM-Unveils-400-Qubit-Plus-Quantum-Processor-and-Next-Generation-IBM-Quantum-System-Two>

Google, con más de 100 nuevas invenciones sobre computación cuántica, es de las empresas más activas recientemente.

La principal institución asiática es la china **Origin Quantum**, que trabaja en nuevos algoritmos de control de circuitos cuánticos, entre otros. Otros players relevantes en China son las organizaciones **Quantum Ctek** <http://quantum-info.com/> y **Ruban Quantum** -vinculada al grupo de inversión de empresas tecnológicas de Juangsu *Tus Holdings* <http://www.tusholdings.com/>- que desarrolla ordenadores cuánticos y equipos para comunicación cuántica, así como la corporación estatal **State Grid Corp**.

El fabricante norteamericano de equipos aeroespaciales y productos avanzados de ciberseguridad **Northrop Grumman (NG)** investiga varias aplicaciones de la QKD y tiene un centro de I+D en el Virginia Tech.

La canadiense **1QB** <https://1qbit.com/> fundada en 2012, ofrece nuevos métodos de optimización, sistemas de control y arquitecturas de software y hardware para computadores cuánticos y ha trabajado en colaboración con los principales actores occidentales en el ámbito de los desarrollos cuánticos.

Otros actores muy activos son la spinoff de la Universidad de Maryland **IONQ INC** <https://ionq.com/>; **Psiquantum** <https://psiquantum.com/>, otra de las empresas que está construyendo el ordenador cuántico mediante la fotónica desde Palo Alto; **Arqit** <https://arqit.uk/>, empresa británica especializada en métodos de encriptación para garantizar la seguridad en el futuro mundo cuántico; la china **CAS QUANTUMNET** spinoff propiedad de Pan Jianwei, miembro de la Academia de Ciencias de China (CAS) <https://www.cas.cn/>, centrada en cifrado de claves cuánticas; **Coldquanta** <https://coldquanta.com/>, innovadora empresa de Boulder, Colorado, que ofrece dispositivos cuánticos y máquinas para uso en sistemas y aplicaciones cuánticas, mediante tecnología basada en manipulación láser de células de vidrio UHV y **Bull sas (Atos)** <https://atos.net/> (Francia), empresa informática especializada, comprada por la consultora Atos en 2014 y que aparece como un de los líderes europeos.

Principales centros de investigación con desarrollos patentados

Con respecto a principales centros de investigación que presentan mayor actividad inventiva en el periodo, destacan el **MIT**, la **Universidad de Maryland** y el **Harvard College** en EE.UU. y el **Shandong Institute of Quantum Science and Tech Co Ltd (SIQST)** <http://www.quantum-sd.com/>, así como las universidades de **Tsinghua** <https://www.tsinghua.edu.cn/>, la Universidad de **Pekín**, la **Universidad de South China Normal** y la de **Nanjing** en China.

Evolución de la actividad de los principales titulares

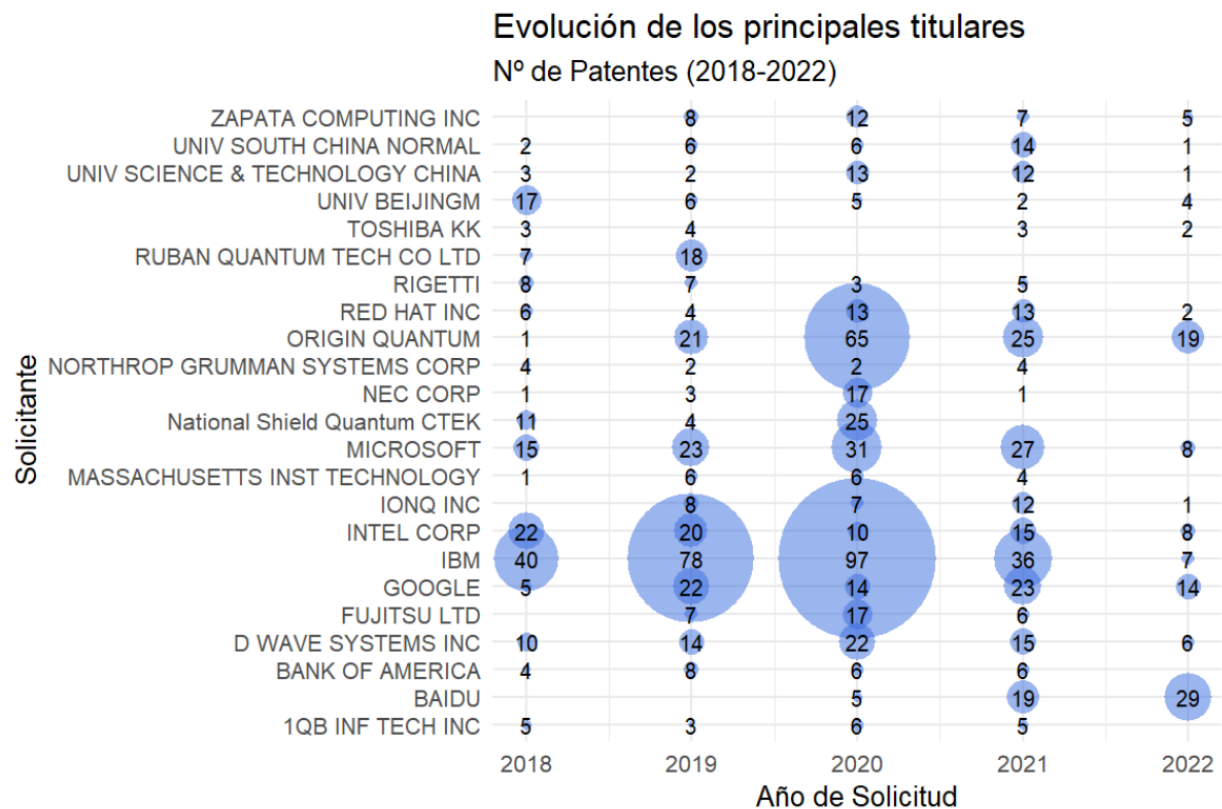


Figura 1.3. Evolución de los principales solicitantes

La evolución en el patentamiento de los principales titulares muestra que Google y Origin Quantum figuran entre las empresas actualmente más activas en cuanto a nivel de nuevos desarrollos patentados. Como uno de los fuertes “entrantes” destaca la gran compañía tecnológica china **Baidu** (con 29 nuevas invenciones sólo el último año).

El pionero y hasta ahora hegemónico IBM, en cambio, parece moderar su actividad en los últimos años.

Otra startup china a tener en cuenta es **TURINGQ** <https://www.turingq.com/> (que usa como nombre de titular *Shanghai Tailingwishi Calculation Quantum*) y ha registrado 25 nuevas solicitudes sólo el último año de sus invenciones sobre computación cuántica para aplicaciones de seguridad incluyendo el campo de la epidemiología.

Principales países

La carrera por la “supremacía” cuántica (conseguir ordenadores cuánticos más rápidos que los tradicionales) esta en marcha desde hace varios años y Estados Unidos y China son los

países que se están disputando los primeros puestos en desarrollo de nuevas tecnologías y mejoras que lo hagan posible; China parece, hoy por hoy, la ganadora, destacando de forma significativa como el principal país en cuanto a volumen de desarrollos patentados en Computación Cuántica en los últimos años.

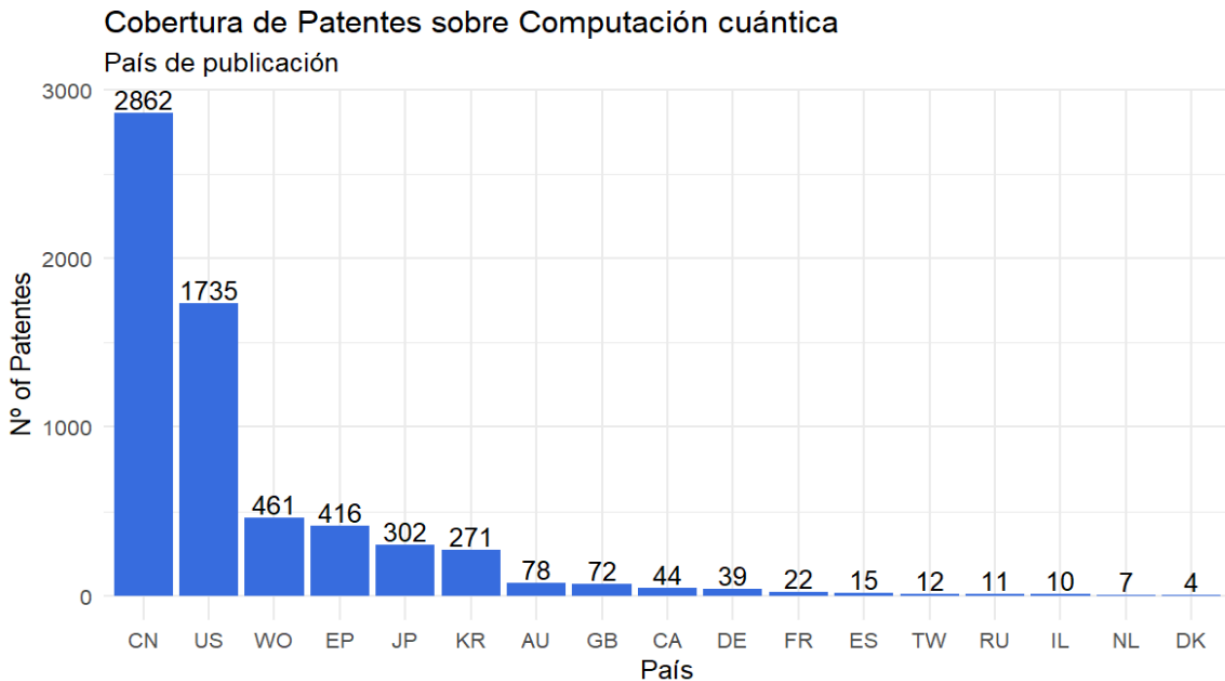


Figura 1.4. Principales países

Principales áreas tecnológicas

Las clasificaciones de patentes permiten la identificación de principales subáreas tecnológicas en desarrollo dentro de la Computación Cuántica.

La principal área tecnológica se asocia genéricamente con:

- **Computación cuántica** (Go6N 10/00 *Quantum computing, i.e. information processing based on quantum-mechanical phenomena*)

Más específicamente, las áreas más relevantes dentro de los desarrollos actuales en computación cuántica se relacionan con:

- **Criptografía cuántica** (H04L 9/0852 Quantum cryptography (transmission systems employing electromagnetic waves other than radio waves, e.g. light, infra-red; wavelength-division multiplex systems))
- **Comunicación cuántica** (H04B 10/70 Transmission systems employing electromagnetic waves other than radio-waves, e.g. infrared, visible or ultraviolet light, or employing corpuscular radiation, e.g. quantum communication)
- **Nanotecnología para procesamiento de información (lógicas de un solo electrón)** (B82Y 10/00 Nanotechnology for information processing, storage or transmission, e.g. quantum computing or single electron logic)
- **Procesadores y manipulación y control de cúbits** (G06N 10/40 Physical realisations or architectures of quantum processors or components for manipulating qubits, e.g. qubit coupling or qubit control)

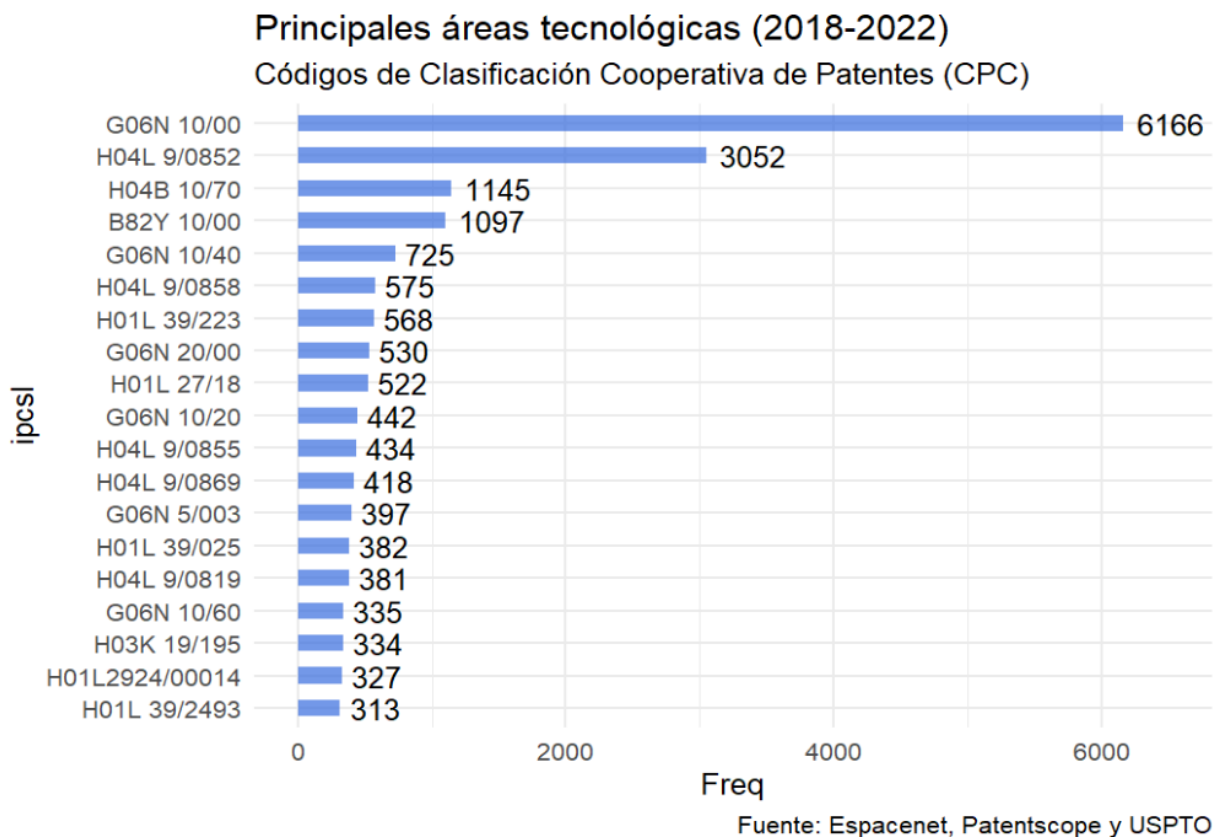


Figura 1.5. Principales áreas tecnológicas

Otras áreas relevantes, se encuentran dentro del área de la criptografía y se relacionan con la **destilación o codificación de claves**, por ej. la **reconciliación**, la **corrección de errores**, la **amplificación de privacidad**, el **codificado de polarización o de fase** (H04L 9 0858).

Son también temas ampliamente tratados el diseño de **dispositivos de efecto Josephson** (H01L 38/223) o de **dispositivos con múltiples conductores que incluyen componentes superconductores** (h01l 27/18); Finalmente, los algoritmos de **aprendizaje automático** (g06n 20) es otra de las áreas clave en los nuevos desarrollos patentados.

Las áreas cubiertas se relacionan genéricamente con los campos técnicos mostrados en la figura 3.5, obtenida representando todas las clasificaciones de las patentes y los grupos principales a los que pertenecen.



Figura 1.6. Principales áreas tecnológicas (Según la Clasificación Cooperativa de Patentes)

Evolución de las principales áreas tecnológicas

Observando detalladamente la evolución de las áreas tecnológicas podemos clasificarlas por aquéllas que muestran un interés sostenido en el tiempo, aquellas que emergen en los últimos años (sin apenas actividad previa) y aquéllas que muestran cierto decrecimiento:

Son áreas de interés sostenido en los últimos 5 años:

- G06N 10/40 **Realizaciones físicas o arquitecturas de procesadores cuánticos o componentes para manipulación de cúbits, p.ej. acoplamiento de cúbits o control de cúbits**
- G06N 10/20 **Circuitos cuánticos**
- H01L 27/18 **los chips semiconductores con componentes que usan materiales superconductores**
- G06N 3/08 **Métodos de aprendizaje** y G06N 3/0454 **Combinaciones de Redes Neuronales**
- G06F 17/16 **Computación de matrices**

Sobre todo desde los últimos 4 años:

- G06N 10/70 **Corrección de errores cuánticos**, p.ej. surface codes or magic state distillation
- G06N 10/60 **Algoritmos cuánticos**, p.ej. basados en optimización cuántica, transformaciones cuánticas de Fourier o Hadamard

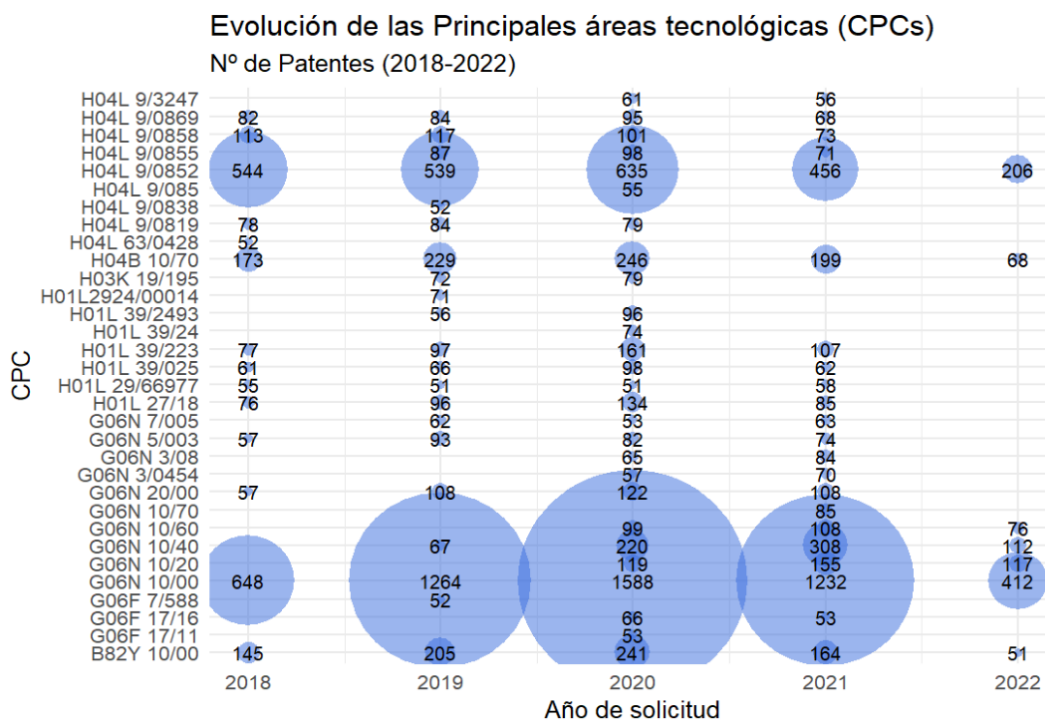


Figura 1.7. Evolución de las principales áreas tecnológicas

Son áreas emergentes o de interés creciente en los (dos) últimos años (y con menor o nula aparición en los anteriores):

- h04l 9/3239, **Uso de funciones hash criptográficas** (non-keyed hash functions, e.g. modification detection codes [MDCs], MD5, SHA or RIPEMD)
- G06N 10/80 **Computación cuántica en la nube** (Quantum programming, e.g. interfaces, languages or software-development kits for creating or handling programs capable of running on quantum computers; Platforms for simulating or accessing quantum computers)
- G06f 21/602 **Provisión de servicios criptográficos o infraestructuras criptográficas**
- G06f 21/64 **Protección de la integridad de los datos**, p.ej uso de checksums, certificados o firmas usando terceras partes
- G06n 3/006 **Computación basada en simulación de formas de vida** colectivas o individuales, p.ej. avatares, simulaciones sociales, mundos virtuales u optimización de enjambres de partículas (particle swarm optimisation)

En cambio, pierden cierto peso o no aparecen tanto en los últimos años algunas áreas tales como:

- Quantum box structures
- Los transistores unipolares tipo quantum wire FET, in-plane gate transistor [IPG], single electron transistor [SET], striped channel transistor, Coulomb blockade transistor, ..

Principales contenidos patentados

Procesamos el texto del abstract de todas las patentes y ordenamos los términos por frecuencia para obtener una visión de los principales conceptos patentados.

Principales palabras en las patentes sobre Computación Cuántica publicadas entre 2018-2022

La nube de etiquetas muestra los principales términos con tamaño en función de su frecuencia de aparición.

Nota: A efectos de claridad, se han eliminado las palabras genéricas de alta frecuencia “Quantum”, “Computing”, para permitir la observación temas más relevantes.

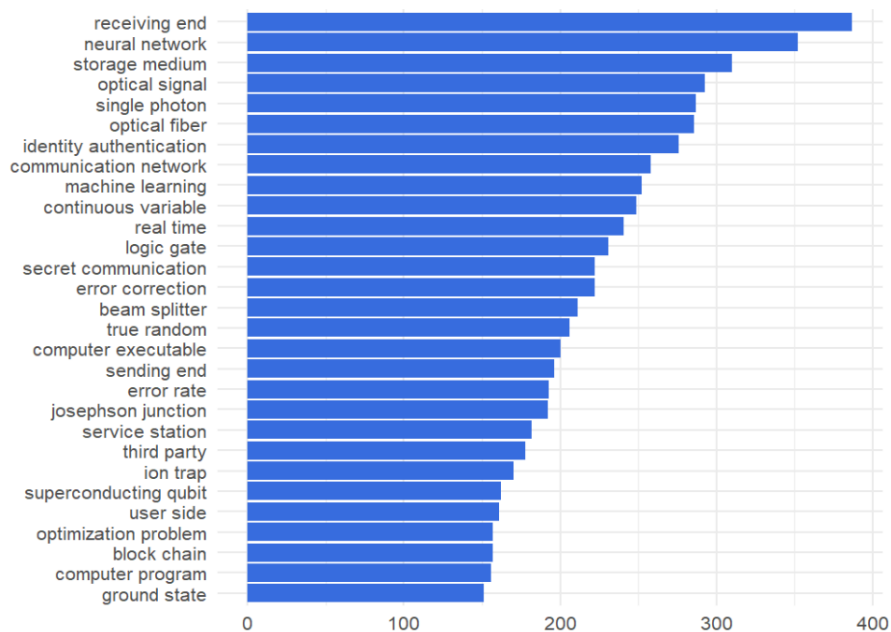


Fig 1.10. Principales conceptos (2 términos adyacentes - Bigrams)

Las trampas de iones es uno de los temas más tratados en las invenciones de los últimos 5 años. El Aprendizaje automático y el uso de algoritmos de IA basados en redes neuronales en la cuántica (QNN) es otro de los conceptos más frecuentemente tratados. Es significativo el peso de las redes de comunicación cuántica en las patentes recientes sobre computación cuántica, que estaría en línea con la necesidad de mejorar la eficiencia de las comunicaciones entre ordenadores cuánticos. La distribución cuántica de clave (Quantum key distribution, QKD) es otro concepto clave dentro de la criptografía cuántica, también la corrección de errores. La computación híbrida, implica un ordenador clásico y un ordenador cuántico trabajando juntos para la resolución de un problema, que es una forma común de operar a día de hoy.

Principales áreas temáticas tratadas (co-ocurrencia de palabras) en las patentes sobre Computación Cuántica

Para captar las principales áreas conceptuales asociadas con todas las invenciones recientes en Computación Cuántica, representamos en un grafo en red la co-ocurrencia de palabras - palabras que aparecen juntas en el texto de un documento- en las patentes.

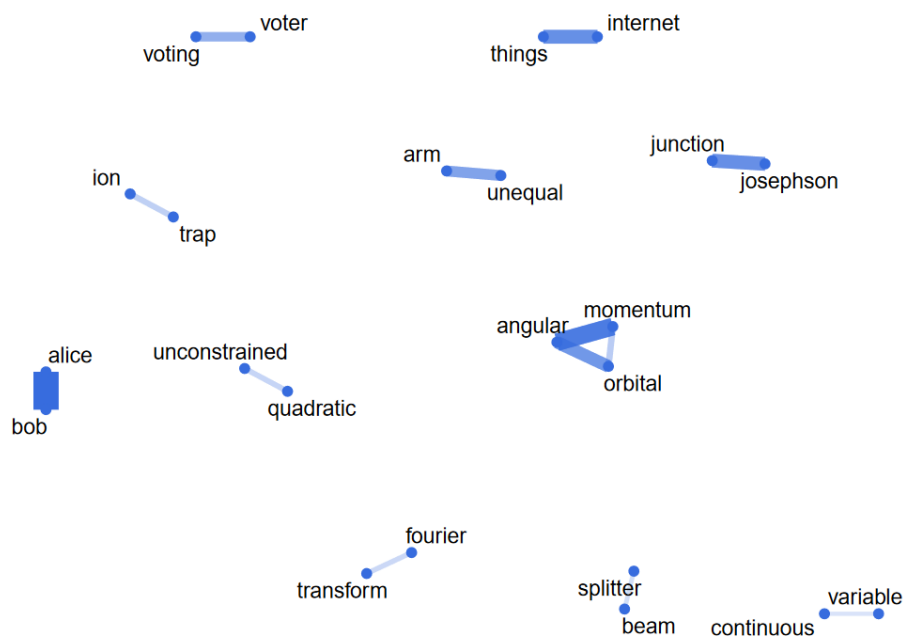


Figura 1.12. Palabras más correlacionadas

Aparecen algunos conceptos más comunes en la computación cuántica (efectos de josephson, transformaciones de fourier, las trampas de iones, la optimización binaria cuadrática sin restricciones, divisores de haz, interferómetros, acceso múltiple por división de momento angular orbital de la luz —OAM- y también algunas áreas de aplicación (IoT, voto electrónico³).

nota: Alice y Bob son personajes ficticios usados a menudo como ejemplos en sistemas de criptografía.

Clústeres temáticos (topic clusters)

Con el objetivo de detectar y visualizar grupos de contenido significativos en el conjunto de datos recuperados, aplicamos técnicas de *topic modeling*, esto es, técnicas estadísticas que nos permiten descubrir grupos semánticamente similares en el texto que describe las invenciones patentadas. Una de las técnicas de modelado que se usan para este propósito es el algoritmo [LDA, \(Latent Dirichlet allocation\)](#). En LDA básicamente se asume que cada documento es una mezcla de un pequeño número de tópicos y que cada palabra en un

³ Empresas chinas como Ruban, Qike Quantum <http://www.qudoor.com/>, así como varias universidades chinas, registran invenciones en este ámbito

documento (una patente, en nuestro caso) puede atribuirse a uno de estos tópicos; de este modo podemos especificar un número dado de tópicos o clústeres y usar LDA para generar grupos de tópicos y asignar palabras representativas de cada uno de estos tópicos. Con ello obtenemos una visualización de grupos temáticos representativos del conjunto de datos.

Visualizamos los principales (10) términos, que describen cada clúster mediante un gráfico de barras de frecuencias de cada grupo distintivo.

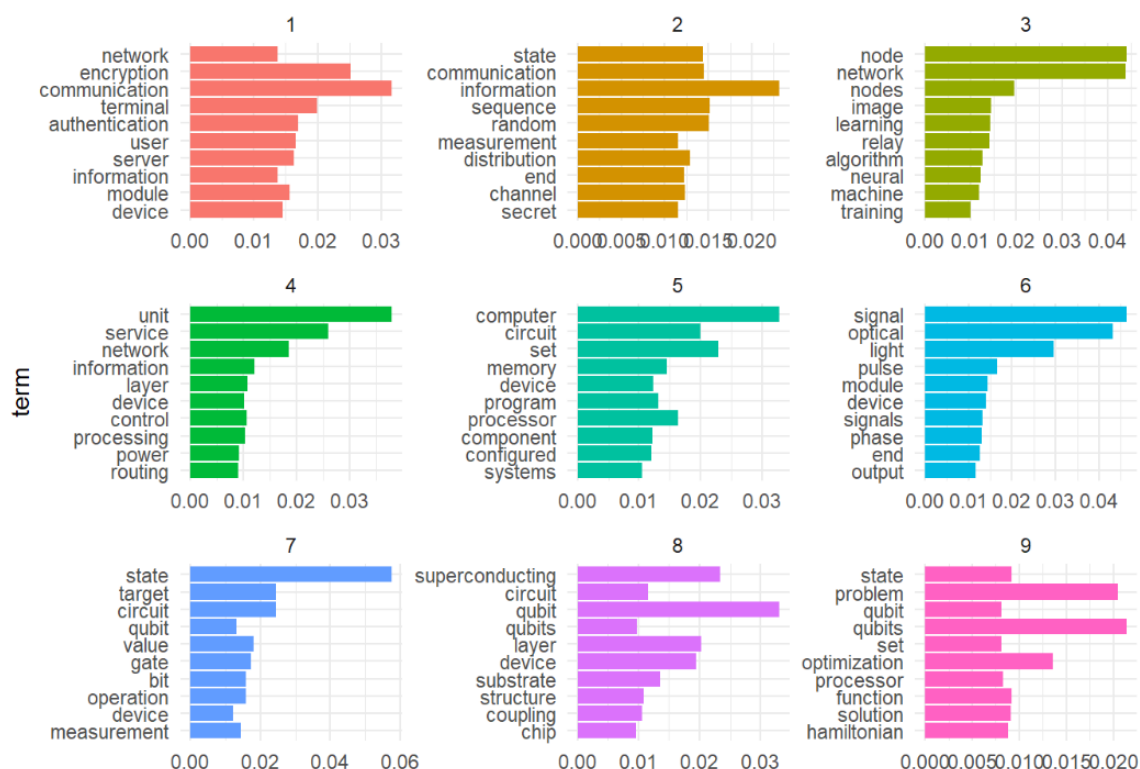


Figura 1.13. Principales clústeres temáticos

Se hace referencia a temas tales como los superordenadores cuánticos y la eficiencia de los cúbits. Algunos clústeres se asocian con métodos de computación y datos relacionados con encriptación de la información (1,2) y específicamente con algoritmos de redes neuronales (3) y métodos de optimización de parámetros de redes cuánticas; otros se refieren a transmisión de señales ópticas (6) o a desarrollos más relacionados con el hardware, tales como dispositivos y circuitos cuánticos (5) o chips con materiales superconductores (8).

Principales áreas de especialización

A continuación se muestran las principales organizaciones titulares de patentes y las temáticas relacionadas con sus invenciones patentadas.

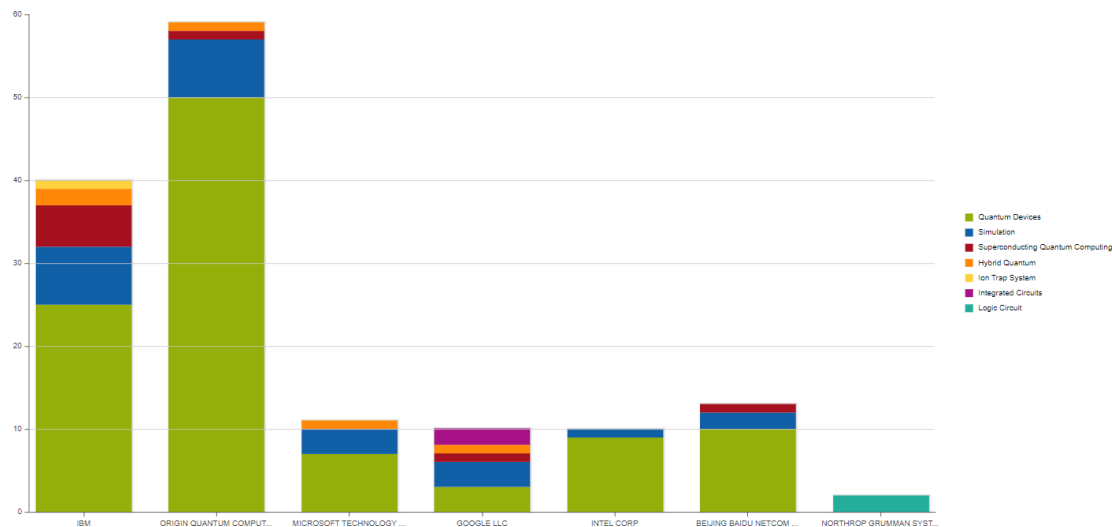


Figura 1.14. Líneas de especialización de las principales empresas titulares.

IBM, muy diversificado en cuanto a nuevos desarrollos en varios ámbitos, patenta desde dispositivos Josephson con materiales cerámicos de alta temperatura (H01L 39/2493) hasta chips compuestos de varios semiconductores en un mismo sustrato con superconductividad (H01L 27/18), entre otros. Se diferencia con mayor énfasis en sistemas de trampas de iones.

Google usa métodos basados en clasificadores automáticos para conectar y desconectar semiconductores (h01l 2924/00014), investiga en circuitos hamiltonianos y simulación de modelos semiónicos y en hardware, en dispositivos con efecto Josephson de alta conductividad térmica basados en metales de boro (h01l 39/223) y circuitos impresos dieléctricos con materiales poliméricos poliimida (H05K 2201/0154).

Intel ha patentado transistores de un solo electrón (Coulomb blockade devices) (H01L 29/7613) y otros dispositivos con efectos cuánticos (H01L 29/66977) por ejemplo, usando reflexión cuántica, difracción o efectos de interferencia tales como efectos Bragg- o Aharonov-Bohm.

El **MIT** por su parte ha desarrollado invenciones sobre el uso de aleaciones (H01L 2924/013) para conectar y desconectar semiconductores o cuerpos de estado sólido u otros materiales como Tin [Sn] (H01L 2924/0105)

Empresas como **Wells Fargo**, **Bank of America**, así como las asiáticas **CTEK** o **Toshiba** están desarrollando nuevos métodos de criptografía cuántica (H04L 9/0852). Este último más focalizado en comunicación cuántica fotónica (H04B 10/70).

La canadiense **IQB INF Tech** (1QBit) investiga en métodos de computación que usan modelos de conocimiento (técnicas de búsqueda dinámicas, heurística, árboles dinámicos para probaturas de teoremas automáticos (Go6N 5/003).

Northop Grumman aparece más focalizada en circuitos cuánticos.

La startup con sede en Irlanda y en Silicon Valley **Equal 1 Labs** <https://www.equal1.com/> se especializa en tecnología quantum-on-chip e integración silicon-quantum.

Ostendo <https://www.ostendo.com/>, histórica empresa tecnológica fundada en 1975 por Hussein S. El-Ghoroury y que ha recibido financiación del DARPA y el IARPA estadounidenses, desarrolla estructuras emisoras de luz para aplicaciones potenciales tales como gafas de realidad aumentada.

La startup finlandesa **IQM** <https://www.meetiqm.com/> ha recibido recientemente importante financiación europea para fabricación de ordenadores cuánticos.



Figura 1.15. Diagrama en red de las áreas de especialización de los principales titulares

Colaboraciones

El análisis del co-patentamiento -empresas que comparten titularidad en el registro de invenciones patentadas- nos permite detectar relaciones de cooperación en materia de desarrollo tecnológico.

Constatamos que en el sector de la computación cuántica se da una abundancia de colaboraciones publico-privadas entre empresas y centros de investigación.

La principal relación de colaboración se observa entre **Quantum Ctek** <http://quantum-info.com/>, <http://www.quantum-comm.com/>) y el Shandong Quantum Research Institute (**SIQST** <http://www.quantum-sd.com/>) que patentan en métodos de firma electrónica y métodos de sincronización de claves cuánticas basados en el algoritmo de Merkel, entre otros. En Japón la corporación **NEC** copatenta con el Instituto Tecnológico de Tokyo en desarrollo de aparatos aritméticos. Otras colaboraciones sostenidas se dan entre la empresa tecnológica de telefonía china **TENCENT** y el instituto tecnológico de nanotecnología de SUZHOU y el NANO BIONICS SINANO CHINESE ACADEMY OF SCIENCES -más de 15 nuevas solicitudes de patentes en 2021- en temas de estructuras de circuitos (puentes de aire). También entre la Universidad de FUZHOU y el Mindu Innovation Laboratory del centro FJIRSM <http://english.fjirsm.cas.cn>. La empresa **SINOSTAR** (que patenta con nombre **NINGXIA ZHONGSTAR DISPLAY MAT CO LTD**) <https://www.sinostarlcd.com/> coopera con la Universidad china de Hebei.

Como colaboración transnacional a destacar, la de **HUAWEI** con el centro ruso **Skoltech** (SKOLKOVO INSTITUTE OF SCIENCE AND TECH <https://www.skoltech.ru/en>), en tecnologías relacionadas con circuitos cuánticos analógicos.

En EE.UU., el **HARVARD COLLEGE** y el **MIT** patentan dispositivos con agrupaciones de qubits. La spinoff estadounidense **IONQ INC** <https://ionq.com/> tiene sus desarrollos copatentados con la Universidad de Maryland (sus fundadores, Chris Monroe y Jungsang Kim, recibieron financiación semilla de esta universidad) sobre varios métodos de computación cuántica y con aplicaciones que van desde la mejora de materiales para baterías, la captura de carbono, hasta el descubrimiento de nuevos medicamentos. En Canadá, **QUANTUM SILICON INC** y la Universidad de Alberta patentan conjuntamente en generación de números aleatorios y microscopía de sonda de barrido.

La empresa **QC WARE CORP** <https://www.qcware.com/> copatenta con **COVESTRO** de Alemania. También en Alemania, la Universidad **RWTH AACHEN** y el centro **FORSCHUNGSZENTRUM JUELICH GMBH** patentan varios métodos de manipulación de cúbits en puntos cuánticos.

En España, el **ICFO** (FUNDACIO INST DE CIENCIES FOTÒNIQUES) registra con titularidad compartida con el **ICREA** (INST CATALANA RECERCA ESTUDIS AVANCATS) varios dispositivos sensores y fototransistores.

En el Reino Unido, **QUANTUM MOTION TECH LIMITED** <https://quantummotion.tech/> y la subsidiaria gestora de la transferencia en la universidad de Oxford **UNIV OXFORD INNOVATION LTD**.

En Francia, la startup de ciberseguridad cuántica **VERIQLLOUD** <https://veriqloud.com/> patenta con la Universidad de la Sorbona y el CNRS francés.

Mercado de la Computación Cuántica

La información tecnológica obtenida a partir del análisis de patentes se ha completado con información secundaria obtenida a partir de fuentes de mercado.

La financiación pública y privada a Startups no ha parado de aumentar. En un artículo de la revista Nature ⁴ de finales de 2019, se hacía recuento de la inversión creciente en startups cuánticas que se ha venido produciendo desde los últimos 10 años. Aunque parece que se haya ralentizado en los últimos años (las causas podrían deberse bien a la situación económica o a que se esté alcanzando el alto en la curva del ciclo tecnológico, que podría indicar un estado previo a un despliegue más generalizado).

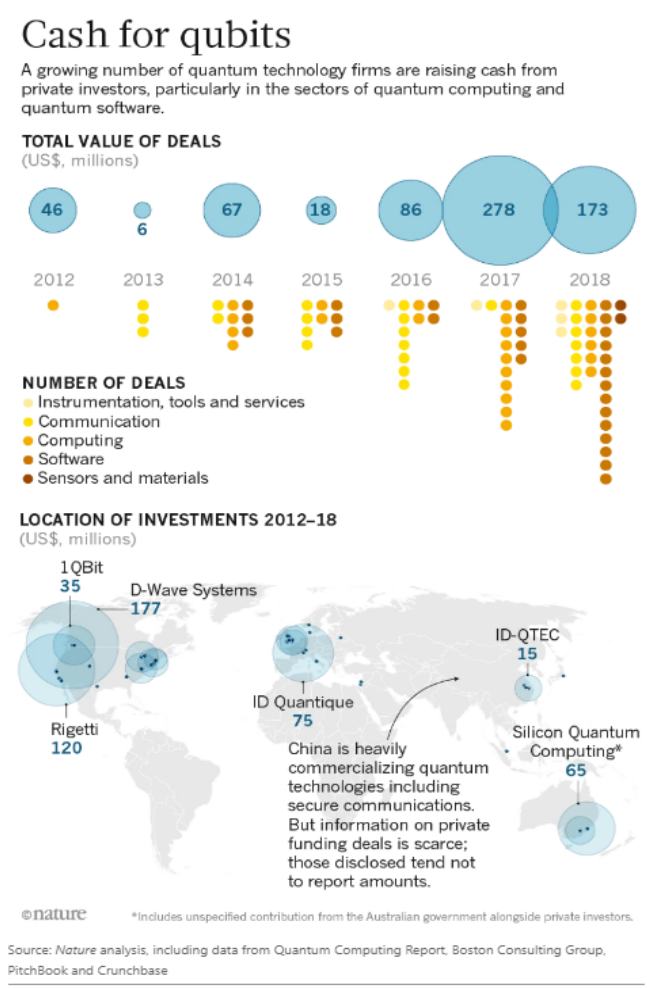


Figura 2.1. Fuente: Nature (Octubre, 2022)

⁴ Nature (02 October 2019) Quantum gold rush: the private funding pouring into quantum start-ups
<https://www.nature.com/articles/d41586-019-02935-4>

Según, McKinsey, cuatro principales industrias (farmacéutica, química, automoción y financiera) serán las primeras en beneficiarse de las ventajas cuánticas, con el potencial de captar casi \$700 mil millones en valor a partir de 2035 y los servicios financieros y las ciencias biológicas se apuntan como los casos de uso de computación cuántica de mayor valor a largo plazo.⁵

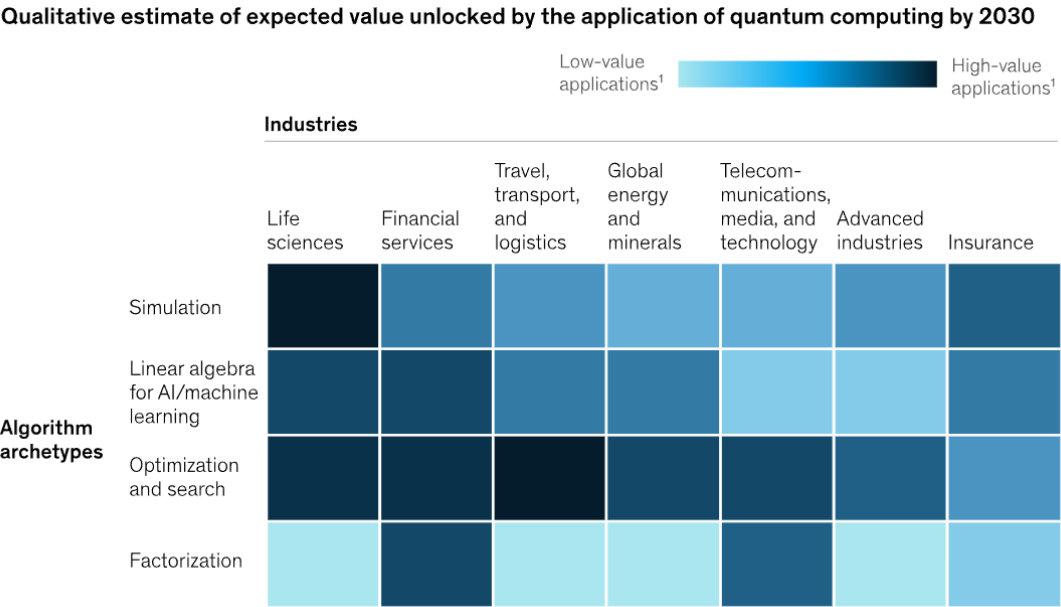


Figura 2.2. Fuente: McKindsey (Julio, 2022)

Con todo, podemos decir que varias tecnologías surgidas a partir de los desarrollos en tecnologías cuánticas, nanotecnología y fotónica ya son una realidad en la vida diaria (transistores en ordenadores, smartphones, chips, pantallas, imagen médica, etc.) y las nuevas aplicaciones en otros sectores van aumentando; van apareciendo propuestas cada vez más potentes de encriptaciones ultraseguras, dispositivos supersensores, nuevos materiales, nuevas aplicaciones en descubrimiento de medicamentos en biomedicina y acercamientos diversos para mejorar la capacidad de procesamiento y alcanzar el cobijado superordenador cuántico.

⁵ McKinsey <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-computing-funding-remains-strong-but-talent-gap-raises-concern>

En el presente estudio se ha tratado de recopilar y actualizar los actores y tendencias principales, para un mapeo general de la actividad de R+D+i en computación cuántica. Un listado de las principales empresas, centros de investigación y entidades activas hoy en el mundo, clasificados por región, se ofrece a continuación:

Principales empresas:

En America:

- **IBM** (NY, USA) <https://quantum-computing.ibm.com/> Qiskit <https://github.com/Qiskit>
- **Google** (USA) QuantumAI <https://quantumai.google/>
- **D-Wave** (USA) <https://www.dwavesys.com/>
- **Northrop Grumman** (USA) <https://www.northropgrumman.com/>
- **Microsoft** (USA) Azure <https://azure.microsoft.com/> and QIO <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/provider-microsoft-qio>
- **Quantinuum H1 (Honeywell)** (Sedes en Brumfield CO, USA y Cambridge, Reino Unido) <https://www.quantinuum.com/products/h1>
- **Quantum Circuits** (New haven, US) <https://quantumcircuits.com/>
- **Rigetti** (Berkeley, CA, USA) <https://www.rigetti.com/> (Rigetti Quantum Cloud Services <https://docs.rigetti.com/qcs/>)
- **1Qloud** (Canada) <https://1qbit.com/1qloud/>
- **RED HAT** <https://next.redhat.com/>
- **Zapata** (Boston, MA, USA) <https://www.zapatacomputing.com/>
- **Xanadu** (Canada) <https://www.xanadu.ai/> La startup canadiense anunció que su procesador fotónico Borealis que alcanza los 216 cúbits⁶
- **QC ware** (Palo Alto, CA, USA) <https://www.qcware.com/>
- **Ostendo** (Carlsbad, CA, USA) <https://www.ostendo.com/>
- **Amazon** (USA) (Ofrece servicio de computación cuántica en la nube: Braket <https://aws.amazon.com/es/braket/>)
- **Coldquanta** (Boulder, CO, USA) <https://coldquanta.com/>
- **Strangeworks** (Austin, TX, USA) <https://strangeworks.com/>
- **IonQ** (Maryland, USA) <https://ionq.com/> Blog <https://ionq.com/resources/learn>
- **Equal 1 Labs** (Fremont, CA, USA y sede en Irlanda) <https://www.equal1.com/>
- **Keysight** <https://www.keysight.com/> (Santa rosa, CA, USA) sistemas de control cuánticos (En 2016 adquirió Sygnadine, spin-off del ICFO. Tienen sede en Barcelona)

⁶ Quantum computational advantage with a programmable photonic processor (Nature, 2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9159949/>

- **Raytheon BBN** (Cambridge, MA, USA) <https://www.raytheonintelligenceandspace.com/what-we-do/advanced-tech/quantum>

En Asia:

- **Quantum Origin** (China) <https://originqc.com.cn/>
- **Toshiba SQBM+** (Japón) <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/ai-iot/sbm.html>
- **SUNERA** (China) <http://www.sunera-cn.com/> patenta con nombre de titular JIANGSU MARCH SCIENCE AND TECH CO LTD sobre dispositivos semiconductores orgánicos OLEDs que contienen compuestos de boro-nitrógeno.
- **Samsung** (Corea) <https://www.samsung.com/>
- **BOE** (China) <https://www.boe.com/>
- **BAIDU** (China) <https://quantum.baidu.com/> Ha construido la plataforma de hardware cuántica QIAN SHI.
- **TENCENT** (China) <https://www.tencent.com/> La telefónica cuanta con un lab de tecnologías cuánticas <https://quantum.tencent.com/>
- **Huawei** (China) <https://www.huaweicloud.com/intl/en-us/solution/hiq/> Plataforma de software HiQ
- **Zensar** (Pune, India) <https://www.zensar.com/>
- **SpeQtral** (Singapur) <https://speqtral.space/> ofrece QKD espacial comercial, basado en tecnología desarrollada en el Centre for Quantum Technologies (CQT) de la National University of Singapore.
- **TCL** (China) <http://electronics.tcl.com/en/global/home.php>
- **TURINGQ** (China) <https://www.turingq.com/>
- **Ruban Quantum** (Tus Holdings) Juangsu (China) <http://www.tusholdings.com/>
- **Qike Quantum** (China) <http://www.qudoor.com/> Startup china que en 2021 recibió 50 millones de Yuans de financiación ⁷
- **Q-ctrl** (Sydney, Australia) <https://q-ctrl.com/> (Michael Biercuk)

En Europa:

- **IQM** (Finlandia) <https://www.meetiqm.com/> En 2021 abrió filial en Bilbao.
- **Pasqal** (Francia) <https://pasqal.io/>
- **Oxford Ionics** (Reino Unido) <https://www.oxionics.com/> (partnership con Infineon).
- **River Lane** (Reino Unido) <https://www.riverlane.com/>
- **Quantastica** (Finlandia) <https://quantastica.com/#generator>

⁷ <https://thequantuminsider.com/2021/01/29/chinese-based-qike-quantum-garners-50-million-yuan-7-8-million-u-s-in-angel-round-financing/>

- **Quandela** <https://www.quandela.com/c> (Francia y Alemania) tiene partnership con EDF.
- **VeriQloud** (Francia)
- **QuantPI** (Alemania y Suiza) <https://www.quantpi.com/>
- **Classiq** (Israel) <https://www.classiq.io/>
- **IDQ** (Suiza) <https://www.idquantique.com/> soluciones de ciberseguridad cuántica.

En España:

- **Qbeast** (Barcelona) spinoff del BSC <https://qbeast.io/>
- **Quside** (Barcelona) spinoff del ICFO <https://quside.com/>
- **Qurv** (Barcelona) Spin-off del ICFO <https://www.qurv.tech/> sensores de imagen de amplio espectro
- **Qilimanjaro** <https://www.qilimanjaro.tech>, spin-off de la UB (José Ignacio Latorre, Pol Forn, Artur Garcia Saez)
- **LuxQUanta** (Castelldefels, Barcelona) <https://www.luxquanta.com/>
- **GMV** (Madrid) <https://www.gmv.com/es-es>
- **Arquimea** (Madrid) <https://www.arquimea.com/es/>
- **Inspiration-Q** (Madrid) <https://www.inspiration-q.com/> (Samuel Fernández Lorenzo, Diego o CSIC y Jun José García Ripoll, CSIC)
- **Qcentroid** (Madrid) <https://qcentroid.xyz/> (Carlos Kuchkovsky)
- **DAS Photonics** (Valencia) Spinoff de la UPV <https://www.dasphotonics.com/>
- **iPronics** (Valencia) <https://ipronics.com/>
- **VLC Photonics** (Valencia) <https://www.vlcphotonics.com/>
- **Multiverse Computing** (Donostia) <https://multiversecomputing.com/>
- **Quantum Mads** (Bilbao) <https://quantum-mads.com/>
- **Quanvia** (Bilbao, con sedes en Madrid y Munich) Spinoff the la UPV/EHU. Recientemente ha adquirido la canadiense Nimoy Cognitive Computing <https://thestandardcio.com/2022/08/29/quanvia-adquiere-nimoy-cognitive-computing/>
- **Serikat** (Bilbao) <https://serikat.es/>
- **Ayesa** (recientemente ha adquirido Ibermática) (Sevilla) <https://www.ayesa.com/>
- **TTI Norte** (Santander) <https://www.ttinorte.es/>

Consultoras tecnológicas:

- **Accenture** <https://www.accenture.com/us-en/services/technology/quantum-computing-services>
- **Atos** (Francia, España) <https://atos.net/en/solutions/quantum-learning-machine>
- **Entanglement Partners** (Barcelona) <https://www.entanglementpartners.com/>

Fondos y aceleradoras

- **The Quantum Revolution Fund** (Jaume Torres) primer fondo de inversión europeo de cuántica. Este fondo es gestionado por Q Ventures, inversores especializados en cuántica.
- **Q Foundation** (Q ventures) que tiene por misión la difusión de la mecánica cuántica.
- **Gohub**, instrument de OpenInnovation de GlobalOmnium Aigues de València
- **Quantonation** (Francia) <https://www.quantonation.com/>

Centros de referencia:

En América:

- **IQIM CALTECH**(USA) <https://iqim.caltech.edu/>
- **Quantum strategy institute** (Brian Lenahan) (USA) <https://quantumstrategyinstitute.com/>
- **Cquic University of New Mexico** (USA) <https://cquic.unm.edu/>
- Lawrence Berkeley National Lab (USA) (**LBL**) <https://www.lbl.gov/>
- **Fermilab** <https://www.fnal.gov/>
- Universidad de Maryland (USA) <https://quantum.umd.edu/>
- Universidad de Alberta (Canada) <https://www.ualberta.ca/science/quantum-nano.html>
- El MIT (USA) <https://cqe.mit.edu/>
- El Harvard College (USA) <https://quantum.harvard.edu/>
- Universidad de Chicago (USA) <https://pme.uchicago.edu/themes/quantum-engineering>
- El **NIST** (National Institute of Standards and Technology) <https://www.nist.gov/> lidera el Quantum consortium (**QED-C**) <https://quantumconsortium.org/>

En Asia:

- Centre for Quantum Technologies (**CQT**) de la Universidad Nacional de Singapur <https://www.quantumlah.org/>
- Quantum Science and Engineering Centre (**Qtek**) en China <http://quantum-info.com/>
- Shandong Quantum Research Institute, **SIQST** en China <http://www.quantum-sd.com/>
- Mindu Innovation Laboratory, China (**FJIRSM**) <http://english.fjirsm.cas.cn/au/>
- Universidad de Hebei, China <http://wdxu.hubu.edu.cn/info/1019/3815.htm>
- Nanyang Technological University en Singapur <https://www.ntu.edu.sg/>
- Quantum Optodevice Laboratory **RIKEN** en Japón <https://www.riken.jp/>
- Instituto Tecnológico de Tokyo, Japón <https://www.titech.ac.jp/>
- Universidad de Tsinghua <https://www.tsinghua.edu.cn/>
- Universidad de Pekín <https://english.pku.edu.cn/>
- Universidad de South China Normal <http://english.scnu.edu.cn/>

- Universidad de Nanjing <https://www.nju.edu.cn/EN/main.htm>

En Europa:

- **CERN** (Suiza) <https://home.cern/>
- **ETP 4 HPC** (Países Bajos) <https://www.etp4hpc.eu/>
- **ETH Zurich** (Suiza) <https://qc.ethz.ch/>
- National Physical Laboratory (**NPL**) (Reino Unido) <https://www.npl.co.uk/>
- Engineering and Physical Sciences Research Council (**EPSRC**) (Reino Unido) <https://www.ukri.org/councils/epsrc/>
- **TU Delft** (Países Bajos) <https://www.tudelft.nl/tnw/over-faculteit/afdelingen/quantum-nanoscience>
- **DESY** (Alemania) <https://www.desy.de/>
- Universidad de **RWTH AACHEN** (Alemania) <https://www.rwth-aachen.de/>
- FORSCHUNGSZENTRUM **JÜLICH** (Alemania) GMBH en Alemania <https://www.fz-juelich.de>
- El Leibniz Supercomputing Centre (**LRZ**) (Munich, Alemania) <https://www.lrz.de/english/>
- **SKOLTECH** (Rusia) <https://www.skoltech.ru/en>
- IT4Innovations National Supercomputing Centre at the VSB Technical University of Ostrava (República Checa) <https://www.it4i.cz/en>
- GENCI en TGCC/CEA Bruyères-le-Châtel (Essonne, Francia) <https://www-hpc.cea.fr/en/complexe/tgcc-curie.htm>
- **Cineca** (Bologna, Italia) <https://www.cineca.it/>
- Poznan Supercomputing and Networking Centre (Polonia) <https://www.psnc.pl/>
- **QICS** de la Universidad de La Sorbona (Francia) <https://qics.sorbonne-universite.fr/>
- El Commissariat de l'Energie Atomique, **CEA** (Francia) <https://www.cea.fr/>
- La Universidad de Oxford (Reino Unido) <http://oxfordquantum.org/>
- La Infraestructura de Comunicación Cuántica Europea (**EuroQCI**) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

España:

- **ICFO** Castelldefels, Barcelona <https://www.icfo.eu/ca/>
- Barcelona Supercomputing Center **BSC** <https://www.bsc.es/>
- **QuantumComputing-UV** <https://quantumcomputing.uv.es/>
<https://news.pcuv.es/en/institutos-pcuv-icmuv-particles-trapped-in-2d-materials-essential-for-the-design-of-quantum-computers-identified> Low-dimensional materials research <https://www.uv.es/lowdim>
- Instituto de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos (**BIFI**) de la Universidad de Zaragoza <https://www.unizar.es/noticias/un-estudio-del-instituto-bifi-de-la-universidad-de-zaragoza-indica-que-la-reduccion-de-la>

- **Quantum Spain** <https://quantumspain-project.es/>
- **Barcelona qbit** <http://www.barcelonaqbit.com/>
- Quantum World Association-**QWA** (Oscar Sala) <http://quantumwa.org> (en medium https://medium.com/@quantum_wa)
- Quantum Blockchain Alliance (**QBA**), compuesta por la consultora Entanglement Partners (presidida por Josep M. Vilà), ISACA Barcelona Chapter y EURECAT.
- Varios centros del **CSIC** <https://wp.icmm.csic.es/>
- **CESGA** (Galicia) <https://www.cesga.es/> Centro de supercomputación
- **CTIC** (Gijón, Asturias) <https://www.fundacionctic.org/>
- **CTTC** (Cataluña) <https://www.cttc.cat/>
- **EURECAT** <https://eurecat.org/>
- **izcat** <https://izcat.net/>
- **IFAE** (Cataluña) <https://www.ifae.es/ca/>
- **DIPC EHU** (Donostia, País Vasco) <https://www.cesga.es/>
- **Tecnalia** (País Vasco) <https://www.tecnalia.com/>
- **IMDEA** (Madrid) <https://www.imdea.org/>

nota: Para más información sobre el estado de la cuántica en España, ver el reciente informe de la asociación **Ametic** la España Cuántica 2022 ⁸

Algunas conclusiones

Se ha realizado una revisión de las principales tecnologías que están siendo desarrolladas en el ámbito de la Computación Cuántica, a partir de la información contenida en las invenciones protegidas por patentes en todo el mundo y a partir de la revisión de otras fuentes y estudios secundarios recientes, con el fin de ofrecer un panorama actualizado de los últimos avances, tendencias y actores clave a tener en cuenta.

Las principales áreas de los desarrollos tecnológicos actuales se relacionan con:

- ✓ Realizaciones físicas o arquitecturas de procesadores cuánticos o componentes para manipular cúbits, p.ej. acoplamiento de cúbits o control de cúbits
- ✓ Criptografía cuántica (sistemas de transmisión que emplean ondas electromagnéticas distintas de las ondas de radio, por ejemplo, luz, infrarrojos; sistemas multiplexados por división de longitud de onda)

⁸ Ametic Informe la España Cuántica 2022 https://ametic.es/sites/default/files/ametic_-_informe_la_espana_cuantica_v06.pdf

- ✓ Nanotecnología para el procesamiento, almacenamiento o transmisión de información (computación cuántica o lógica de un solo electrón)
- ✓ Circuitos cuánticos
- ✓ Métodos de aprendizaje, combinaciones de Redes Neuronales y computación de matrices

En los últimos años han tomado mayor fuerza:

- ✓ La corrección, detección o prevención de errores cuánticos, p. códigos de superficie o destilación de estado mágico.
- ✓ Los algoritmos cuánticos basados en optimización cuántica, transformaciones cuánticas de Fourier o Hadamard.

Se constata como, en general, la comunicación cuántica cobra cada vez mayor relevancia.

Como áreas emergentes (de interés más reciente) se identifica:

- ✓ El **uso de funciones hash criptográficas** (non-keyed hash functions, e.g. modification detection codes [MDCs], MD5, SHA or RIPEMD)
- ✓ La **Computación cuántica en la nube** (Quantum programming, e.g. interfaces, languages or software-development kits for creating or handling programs capable of running on quantum computers; Platforms for simulating or accessing quantum computers)
- ✓ La **Provisión de servicios criptográficos o infraestructuras criptográficas**
- ✓ La **Protección de la integridad de los datos mediante uso de checksums, certificados o firmas usando terceras partes**
- ✓ La **Computación basada en simulación de formas de vida** colectivas o individuales, p.ej. avatares, simulaciones sociales, mundos virtuales u optimización de enjambres de partículas (particle swarm optimisation).

Referencias

Otras referencias consultadas

- TTqm <https://ttqm2022.ethz.ch/index.html>
- Quantum Matter <https://www.quantumforbusiness.eu/insights/quantum-matter-2022>
- Quantum algorithm Zoo
<https://web.archive.org/web/20180429014516/https://math.nist.gov/quantum/zoo/>
- Imperial Tech Foresight 2041 Scenarios: Quantum
<https://www.youtube.com/watch?v=gHel-q2gcZM&t=14s>
- Quantum Computing Report <https://quantumcomputingreport.com/>
- Inside Quantum Technology <https://www.insidequantumtechnology.com>
- Quantum Journal <https://twitter.com/quantumjournal>
- Quantum channel https://twitter.com/QuantumChannel_
- Mapping the commercial landscape for quantum technologies
<https://physicsworld.com/a/mapping-the-commercial-landscape-for-quantum-technologies/>
- Particles trapped in 2D materials, essential for the design of quantum computers, identified (30/06/2020) <https://news.pcuv.es/en/institutos-pcuv-icmuv-particles-trapped-in-2d-materials-essential-for-the-design-of-quantum-computers-identified>
- Nature Quantum Materials Articles 2022
<https://www.nature.com/npjquantmats/articles?year=2022>
- Quantum Opportunities for superconducting quantum technology in the UK (10-2018)
<https://www.npl.co.uk/special-pages/documents/quantum-metrology-institute/qmi-superconducting-quantum-computing-report>
- Red Meetup quantum Valencia <https://www.meetup.com/es-ES/quantum-valencia/>
- IBM emeritos <https://www.ibmemeritos.org/tag/ordenador-cuantico/>
- Quantum blog <https://blog.quantum.com/>
- Quantum matters <https://quantumfrontiers.com/>
- HPCwire <https://www.hpcwire.com/>
- Quantumvillage <https://www.quantumvillage.org/blog/post-quantum-thoughts>
<https://www.quantumvillage.org/home>
- The quantum insider <https://thequantuminsider.com/>
- Insidequantumtechnology <https://www.insidequantumtechnology.com/>
- Microsoft Azure Blog <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/>
- EU deploys first quantum technology in six sites across Europe
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_5914
- Quantum FLagship <https://qt.eu/>
- Munich QUantum Valley <https://www.munich-quantum-valley.de/>
- Quantum computing report <https://quantumcomputingreport.com/news/>
- Publicaciones en Arxiv <https://arxiv.org/list/quant-ph/new>

- Ametic Informe la España Cuántica 2022 https://ametic.es/sites/default/files/ametic_-_informe_la_espana_cuantica_vo6.pdf
- Martino Travagnin, MT (2019) “Patent analysis of selected quantum technologies” Joint Research Centre (JRC) [doi:10.2760/938284](https://doi.org/10.2760/938284)
- Mathew Alex, Relecura Technologies Pvt. Ltd. (10-02-2021) Quantum Technologies: A Review of the Patent Landscape <https://arxiv.org/pdf/2102.04552.pdf>
- Mateo Aboy, Timo Minssen & Mauritz Kop (06-07-2022) Mapping the Patent Landscape of Quantum Technologies: Patenting Trends, Innovation and Policy Implications <https://link.springer.com/article/10.1007/s40319-022-01209-3>
- Quantum Information
- Anthony (Tony) Trippe and Bryan Scanlon, Patinformatics, Llc (2017) “Technology (QIT): A Patent Landscape Report” www.patinformatics.com
- ESPI, ESA (2020) “Patent insight report Quantum technologies and space”
- EPO (2019) “Landscape study on patent filing Quantum metrology and sensing”
- IPO UK (October 2013) “Quantum Technologies”
- Physicists Create a Holographic Wormhole Using a Quantum Computer (30-11-2022) <https://www.quantamagazine.org/physicists-create-a-wormhole-using-a-quantum-computer-20221130/>