

El futuro es cuántico: la disruptión que viene tras la IA y su impacto en la economía

Víctor Canivell Cretchley



**Reial Acadèmia Europea de Doctors
Real Academia Europea de Doctores
Royal European Academy of Doctors**

BARCELONA - 1914



Victor Canivell es Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Barcelona y MBA por ESADE. Fué Premio Extraordinario de Licenciatura y cuenta con publicaciones de investigación en física cuántica en base a su trabajo de doctorado en prestigiosas revistas internacionales americanas y europeas.

Victor ha dirigido su trayectoria profesional a puestos de dirección en el sector de la informática y las telecomunicaciones. Tras más de veinte años en cargos ejecutivos en multinacionales norteamericanas, tanto de vicepresidencias europeas como de direcciones generales en España, se ha focalizado en dirigir startups de tecnología. Ha trabajado y vivido más de quince años en Silicon Valley, Londres, Ginebra y Stuttgart con Hewlett-Packard, Silicon Graphics, 3Com y Perkin-Elmer, para volver a nuestro país para dirigir varias startups de seguridad informática y de bioinformática.

En la actualidad, es el Presidente del Consejo y co-fundador de la startup española de computación cuántica Qilimanjaro Quantum Tech, S.L., uno de los líderes europeos del sector. Qilimanjaro ha sido responsable de la instalación de los primeros computadores cuánticos en España y de los primeros proyectos en los Emiratos Árabes Unidos.

Victor ha cursado cursos especializados de gestión en INSEAD e IESE.

Es miembro de la Real Sociedad Española de Física, de la que fué vocal de relaciones empresariales, y asimismo miembro de la American Physical Society.

Entre otros reconocimientos, Victor ha recibido el premio a Emprendedor del Año 2024 por la asociación de ingenieros de telecos e informáticos de Cataluña.

El futuro es cuántico: la disrupción que viene tras la IA y su impacto en la economía

Excmo. Sr. Dr. Víctor Canivell Cretchley

El futuro es cuántico: la disruptión que viene tras la IA y su impacto en la economía

Discurso de ingreso en la Real Academia Europea de Doctores, como
Académico Correspondiente, en el acto de su recepción
el 28 de enero de 2026

por el

Excmo. Sr. Dr. Víctor Canivell Cretchley
Doctor en Física Cuántica

y contestación de la Académica de Número

Excma. Sra. Dra. Sonia Fernández-Vidal
Doctora en Física

COLECCIÓN REAL ACADEMIA EUROPEA DE DOCTORES



Reial Acadèmia Europea de Doctors
Real Academia Europea de Doctores
Royal European Academy of Doctors
BARCELONA - 1914
www.raed.academy

© Víctor Canivell Cretchley
© Real Academia Europea de Doctores

La Real Academia Europea de Doctores, respetando como criterio de autor las opiniones expuestas en sus publicaciones, no se hace ni responsable ni solidaria.

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del “Copyright”, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático y la distribución de ejemplares de ella mediante cualquier medio o préstamo público.

Producción Gráfica: Ediciones Gráficas Rey, S.L.

Impreso en papel offset blanco superior por la Real Academia Europea de Doctores.

ISBN: 978-84-09-80903-5

D.L: B 24456-2025

Impreso en España –Printed in Spain- Barcelona

Fecha de publicación: enero 2026

❖ PRESENTACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Excelentísimo Señor Presidente,
Excelentísimos Señores Académicos,
Excelentísimos e Ilustrísimos Señores,
Querida familia y amigos,
Señores y Señoras:

Me siento muy honrado y es una gran satisfacción para mi ingresar hoy en la Real Academia Europea de Doctores, por lo que ello representa poder contribuir a un foro privilegiado de personalidades expertas y doctores en diferentes áreas, y con un gran interés en debatir, conocer y hacer avanzar el conocimiento de manera transversal a todas las disciplinas, tanto a las científicas y tecnológicas en las que yo he desenvuelto mis actividades profesionales, como a las correspondientes a los ámbitos económico, legal y de ciencias sociales y de salud de gran importancia para nuestra sociedad.

Por ello quisiera agradecer en primer lugar al Excelentísimo Dr. Fernando Méndez, académico de la Real Academia, quien me hizo partícipe de sus actividades, y quien a la postre ha sido quien ha propuesto mi ingreso. Recuerdo su discurso de ingreso de hace un año como una revisión completa y enriquecedora de un tema de gran actualidad como es el de la crisis de la asequibilidad de la vivienda, y me hizo entrever el entresijo de factores económicos, legales y sociales que hay que considerar para poder proponer soluciones de calado en este tema crucial.

Es con este mismo espíritu que quisiera aportar mi conocimiento de la física y mi experiencia en el mundo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), para exponer ante ustedes la emergencia de una nueva revolución tecnológica, más allá de la Inteligencia Artificial, y que puede tener un impacto espectacular en nuestra sociedad digitalizada y su economía de los datos.

Se trata de la computación cuántica, una tecnología que se fundamenta en la capacidad de poder manipular información en base a su codificación en bits cuánticos (llamado qubits). Si la física cuántica ya es de por sí fascinante, y además la base necesaria para nuestra sociedad digitalizada actual, esta siguiente revolución nos conducirá a nuevos horizontes, y que son los que quisiera compartir y debatir entre todos en la Academia.

El ingreso en la Real Academia conlleva el correspondiente discurso de réplica, y quisiera agradecer a la Excelentísima Dra. Sonia Fernández Vidal su disponibilidad y gran interés en hacerlo en mi caso. No podría encontrar a una persona más idónea, dado su destacado perfil como investigadora y divulgadora de la física cuántica, amén de su perfil de emprendedora. En su discurso de ingreso ya planteó la esencia de la física cuántica y la necesidad de su conocimiento en la sociedad, debido al gran impacto industrial que ha tenido. También nos habló de la dificultad en entenderla, y de ahí sus grandes habilidades como comunicadora. Ahora, siete años tras su ingreso, trataré de la siguiente ola de innovación cuántica, desarrollada sólo recientemente, y que acelerará las capacidades de las TIC de manera insospechada.

Todo ello no habría sido posible sin el apoyo y el interés del Excelentísimo Sr. Presidente Dr. Alfredo Rocafort, artífice de esta Real Academia, a quien quiero agradecer su sincero impulso a mi candidatura.

También quiero agradecer a todos y todas mis amigos y amigas, a mis compañeros y compañeras de mi trayectoria académica y profesional, su acompañamiento, dedicación, enseñanzas y apoyo a lo largo de mi carrera, ya que sólo he podido llevar a cabo mi trabajo gracias a sus grandes labores de equipo.

Pero sinceramente, a quien más quisiera dedicar mis agradecimientos es a toda mi familia, y especialmente a mi mujer Roser, doctora en bioquímica, y a mi hija Silvia, doctora en medicina, de quienes no sólo me siento muy orgulloso, sino a quienes muy especialmente quiero agradecer su amor, su aliento, su apoyo, su paciencia y en ocasiones sus renuncias, por apoyarme a lo largo de los años y también a través de una serie de cambios de residencia consustanciales a mi trabajo.

Quisiera cerrar este apartado expresando mi ilusión por que esta Ilustre Corporación pueda contar con debates muy constructivos acerca de cómo las nuevas tecnologías puedan contribuir mejor al futuro de nuestra sociedad. Y la cuántica será sin duda una de ellas.

Muchas gracias.



ÍNDICE

Presentación y Agradecimientos	7
Prólogo	13
DISCURSO DE INGRESO	19
1. El futuro es cuántico	19
a. Los avisos.....	21
2. El contexto.....	35
a. La física cuántica, las TIC* y la economía	36
b. Dos disruptivas TIC entrelazadas y su simbiosis.....	50
3. La física cuántica.....	71
a. Su magia y su precisión inigualables.....	71
4. La computación convencional.....	99
a. Sus orígenes en la física cuántica	100
b. Sus límites estructurales	112
5. La computación cuántica	123
a. En qué consiste	124
b. Cómo supera los límites de la computación convencional....	131
c. Su impacto económico y geopolítico	173
d. La oportunidad de Barcelona.....	197
e. Cómo prepararse.....	213
6. Conclusiones.....	233
Bibliografía	241
DISCURSO DE CONTESTACIÓN	245
Publicaciones de la Real Academia Europea de Doctores	255



*TIC = Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

❖ PRÓLOGO

¡Bienvenidos al mundo de la cuántica!

Este documento pretende proporcionar una introducción de alto nivel al mundo de la computación cuántica, de dónde surge, en qué consiste y qué aporta, pero sin entrar en detalles técnicos.

Como veremos, la computación cuántica es una nueva forma de gestionar la información, en base a tratarla según las leyes exóticas de la física cuántica. Es justamente la capacidad de manipular este exotismo lo que proporciona sus ventajas potencialmente espectaculares.

Lo que la hace particularmente atractiva a la computación cuántica es que aportará una revolución en cuanto a mejoras, que pueden llegar a ser exponenciales, tanto de prestaciones para ciertos cálculos económicamente importantes, como de consumo de energía de los centros de datos. De ahí su novedad y su interés.

Por cierto, he de hacer notar que la computación cuántica no substituirá a la computación convencional actual, sino que la complementará, de manera que los centros de datos futuros serán híbridos, con elementos tanto convencionales del tipo actuales (que llamaremos clásicos) como cuánticos.

Habrán notado que hablamos en futuro. Ello es así porque, a fecha de hoy, de lo que disponemos es de prototipos muy prometedores de computadores cuánticos, pero aún sin la ca-

pacidad de aportar las grandes ganancias previstas. Para llegar a éstas, se habla de un plazo de entre 5 y 15 años. Aunque, ya antes, paulatinamente, y según se desarrolle la tecnología, se conseguirán resultados prácticos en casos específicos, cada vez más notables.

Se trata en definitiva de que nos encontramos al albor de una nueva industria, y por ello de una gran oportunidad. Una gran oportunidad para prepararse y evitar sorpresas con impactos negativos y aprovechar a tiempo sus grandes ventajas competitivas (como puede haber ocurrido para algunos con la eclosión de la Inteligencia Artificial o IA en 2022), y una gran oportunidad para construir las empresas que dominarán este nuevo sector.

Personalmente, se trata de un tema apasionante, ya que es para mí una vuelta a los orígenes. Me explico. Tras estudiar física y doctorarme en física cuántica, opté por dedicar mi carrera profesional al sector informático tras estudiar un MBA. Pero, tras varias décadas en el sector, he tenido la suerte y la oportunidad de unirme al equipo entusiasta de mis co-fundadores para crear una startup cuántica en nuestra ciudad. Así que he podido volver a inmiscuirme en el mundo fascinante de la física cuántica, cuando nada hacía presagiar que mis estudios teóricos de una disciplina, que parecía muy alejada de la realidad cotidiana, podrían un día desembocar en construir equipos tangibles de computación, justo la industria a la que he dedicado mi carrera.

Antes de empezar, quisiera remarcar los siguientes aspectos:

- Los datos que se presentan son a fecha de 30 de noviembre 2025. Lo recalco ya que este sector es muy dinámico, y suelen publicarse novedades importantes con cierta frecuencia. Pero la esencia del mensaje no debería verse afectado por posibles novedades a corto plazo.

- La terminología que sigo en cuanto a los términos de billones y trillones de cantidades sigue la norma europea, cuando se trata de cantidades en €, pero la americana cuando se trata de \$ (ya que uso una profusión de imágenes de publicaciones terceraes, unas europeas y otras americanas). Lamento la posible confusión a que ello pueda llevar, pero espero que se puedan seguir bien los mensajes.
- Lamento el uso extensivo de anglicismos, algo habitual en el sector, y debido al uso de imágenes de noticias en inglés.
- Las posibles opiniones e interpretaciones que se puedan incluir son exclusivamente mías.

A continuación, paso a explicar brevemente el hilo del documento, y que está plasmado en los encabezamientos de las transparencias en las que se basa el texto:

- A modo de introducción, planteo el hecho de que, aunque aún no se use la computación cuántica en la industria ni en los centros de datos comerciales, ya hay muchas señales de que la revolución de la computación cuántica se está acercando. Así hablaremos de señales como la de predicciones del apocalipsis de la ciberseguridad, como la de la evolución espectacular de las cotizaciones en bolsa de las primeras empresas dedicadas a esta nueva tecnología, como la de la presencia de los primeros equipos cuánticos en centros de investigación y como la de los artículos en prensa no especializada. Es decir, hay muchas señales de brotes verdes.
- A continuación, hablo del impacto de la industria de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC) en la economía actual, y ello en su doble faceta del aumento transversal de la productividad, y también por haber creado un nuevo sector económico. Y lo remarco porque esta joven industria TIC se ha construido, y ha crecido de manera

imparable, gracias a los conocimientos de la física cuántica. Fueron estos conocimientos los que dieron lugar al uso de semiconductores para fabricar transistores, chips integrados y microchips cada vez más potentes. Por ello, es una industria muy joven, de apenas unos 60 años, ya que la física cuántica en sí apenas se conoce desde hace 100 años. Y el hecho es que el sector TIC ha transformado la economía, y por ello se ha convertido en el sector económico con la mayor capitalización del mundo, lo cual le dota de una capacidad de inversión sin parangón.

- Seguiremos analizando, justamente, en qué nuevas iniciativas está invirtiendo este sector TIC. Y se trata de que está invirtiendo en dos revoluciones muy disruptivas. Una, la actual, la de la IA, y otra, en ciernes, la de la computación cuántica, objeto de este documento. Lo que hay que recalcar es que, siendo ambas disruptivas radicalmente diferentes en sus ámbitos, habrá una gran simbiosis entre ellas.
- Acto seguido estudiaremos por separado, y antes de abordar la computación cuántica en sí, qué es la física cuántica en la que se basa, dónde se aplica, cuál es su (aparente) magia y cómo de super-precisa es en su descripción del mundo atómico.
- También revisaremos brevemente qué es la computación actual (no cuántica), qué papel jugó la física cuántica en su desarrollo, así como, y esto es esencial, a qué problemas estructurales inabordables se enfrenta en estos momentos – justamente frente a los cuales podrá dar respuesta la nueva computación cuántica.
- Llegados a este punto, explicamos de qué trata la computación cuántica, al ser capaces de manipular la información en bits cuánticos de información (en vez de en bits convencionales), cómo ello permite superar las limitaciones estructu-

rales antes mencionadas de la computación convencional, y qué impactos económicos y geopolíticos puede provocar.

- Como consecuencia de una serie de factores favorables, abogo a continuación, por aprovechar la oportunidad de que nuestra ciudad se convierta en un hub internacional de tecnologías cuánticas entre los mejores a nivel internacional. Y por qué colectivamente no hemos de dejar pasar esta oportunidad de crear aquí una nueva industria. También aquí tenemos brotes verdes con startups como Qilimanjaro, muy bien acompañada por otras startups complementarias.
- A continuación, planteo qué tipo de preparativos son recomendables para que las empresas y organizaciones estén listas para aprovechar la futura eclosión de la computación cuántica, que, como ya he mencionado, se espera en su plenitud en un plazo de 5 a 15 años.
- Finalmente, incluyo las conclusiones de este estudio – así como una invitación a las instalaciones de nuestra startup Qilimanjaro, sita en el distrito 22@, para poder seguir trabajando conjuntamente en el desarrollo de esta tecnología fascinante y de gran impacto futuro en la economía.

Espero que estas páginas sean útiles al lector como una introducción al mundo apasionante de la computación cuántica.

Si la IA nos está cambiando el mundo, veamos hasta dónde nos acelerará la computación cuántica.

Lo dicho, el futuro es cuántico.

Barcelona, 30 de noviembre 2025.



❖ EL FUTURO ES CUÁNTICO



El futuro es cuántico, esta es la tesis de este documento.

Aunque, antes de empezar, hay que aclarar que nuestro presente ya es cuántico. Las tecnologías que nos rodean, como nuestro ordenador, nuestro móvil, internet, así como las imágenes médicas por resonancia magnética, y otras muchas cosas que usamos todos a diario, sólo han sido posible a raíz de conocer esa disciplina tan fascinante y exótica que es la física cuántica. De todo ello hablaremos.

Pero la tesis de este documento es acerca del futuro, en qué más nos ayudará la cuántica, a qué nuevos avances disruptivos nos llevará. Es decir, cómo será este futuro aún más cuántico.

¿De qué se trata? La computación cuántica es un tipo radicalmente nuevo de hacer computación, que puede aportar dos

ventajas fundamentales, y ambas con órdenes de magnitud de diferencia:

- su capacidad de cálculo, y
- el ahorro de su consumo energético.

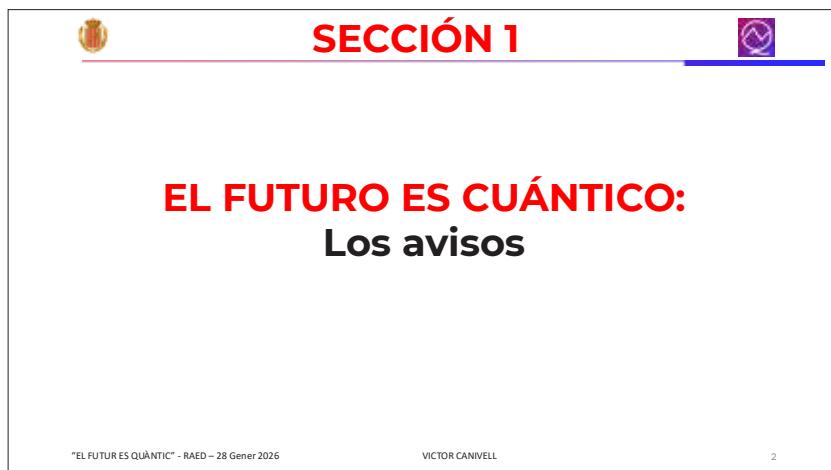
Es radicalmente nuevo porque se basa en tecnologías que hasta hace poco parecían de ciencia ficción: poder manipular fenómenos cuánticos individuales, es decir un solo átomo, un solo fotón u otros tipos de estados cuánticos individuales de la naturaleza. Hasta hace poco, la física cuántica había permitido desarrollar tecnologías cuánticas con efectos colectivos muy potentes, pero no había permitido manipular los llamados estados físicos cuánticos individuales. Y es esta nueva capacidad la que abre la puerta a la nueva tecnología disruptiva de la computación cuántica.

Este documento pretende dar una visión general a esta nueva tecnología, dar a conocer las implicaciones económicas que se desprenden de ella, así como plantear cómo prepararse ante su eclosión futura. Y planteará la oportunidad de crear un potente ecosistema de cuántica en Barcelona.

Aunque la computación cuántica está aún en ciernes, aunque esté aun saliendo de los laboratorios de investigación, ya tenemos muchas pistas de que está de camino.

Veamos algunas de estas señales, antes de abordar de lleno estos temas.

SECCIÓN 1 - LOS AVISOS



The banner features a red and yellow logo on the left, the text "SECCIÓN 1" in red in the center, and a blue and white circular logo on the right. Below the banner, the title "EL FUTURO ES CUÁNTICO: Los avisos" is displayed in red and black.

"EL FUTURO ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

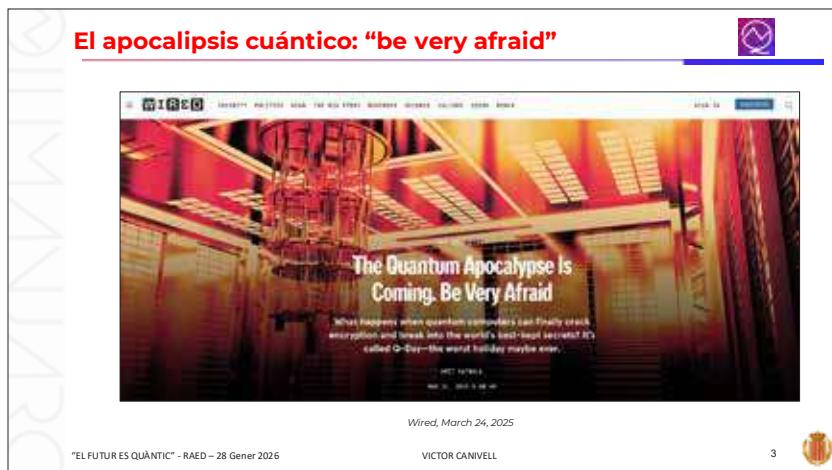
2

A modo de preámbulo, veamos en esta Sección 1 algunas de las múltiples señales que nos indican la llegada, en un futuro aún incierto, pero no necesariamente muy lejano, de unas tecnologías rompedoras de computación cuántica.

No hablamos de informes técnicos para expertos, hablamos de señales al alcance de todo el mundo.

Se habla de apocalipsis de la ciberseguridad, se habla de movimientos en bolsa, se habla de que ya se utilizan computadores cuánticos (pero quién, dónde y para qué usos), se habla de la necesidad de las empresas en poderse preparar. En fin, muchos avisos.

EL APOCALIPSIS CUÁNTICO: “BE VERY AFRAID”



La primera señal de atención son artículos de prensa que hablan del apocalipsis que va a provocar la computación cuántica. Más que de una señal, se trata de una alerta muy preocupante.

Es decir, de un gran impacto a nuestra economía – al ser capaces estos futuros computadores cuánticos de romper las claves utilizadas a diario para enviar mensajes por internet. Todos nuestros bizums, nuestros whatsapps, nuestros correos, nuestras transacciones financieras, todo, incluida la información protegida por blockchain. Toda la seguridad de la infraestructura de comunicaciones está en riesgo. Poca broma.

Este artículo fue publicado por *Wired* en febrero 2025, y se trata de una publicación de Silicon Valley de una gran difusión entre los profesionales del sector tecnológico.

Pero veremos que no es el único foro en que se habla de este problema.

Esta es la primera razón por la que las tecnologías cuánticas se han convertido en una prioridad geopolítica de primer orden: su impacto destructivo en la ciberseguridad.

La rápida maduración de la computación cuántica ha amplificado las vulnerabilidades de ciberseguridad, y los expertos estiman una probabilidad del 50 % de que surjan computadores cuánticos criptográficamente relevantes para 2035, capaces por ejemplo de romper el muy utilizado cifrado RSA-2048. Una de las principales preocupaciones es la estrategia de “recoger ahora, desencriptar después”, según la cual los adversarios podrían almacenar datos cifrados hoy para descifrarlos en el futuro, lo que podría comprometer la seguridad nacional y los sistemas financieros.

A lo largo de este documento, veremos qué consecuencias tiene esta profecía del apocalipsis, qué calendarios se le supone y qué medidas se pueden tomar para contrarrestar sus consecuencias.

Esta es una primera señal.

EFERVESCENCIA BURSÁTIL: +135% EN VERANO



El segundo toque de atención viene de las bolsas.

Resulta que, en la primera mitad de este año 2025, el crecimiento de las cotizaciones de las acciones de las empresas de computación cuántica cotizadas en NYSE y NASDAQ han superado de largo los índices del sector informático y del S&P 500.

¿A qué se debe este gran interés en la computación cuántica?

En este período, las acciones de IonQ se han revalorizado un 135%, superando el aumento del 33,8% del sector en general y el del 18% del S&P 500. Durante el mismo periodo, las acciones de sus principales competidores, como D-Wave Quantum (QBTS) y Rigetti Computing (RGTI), también se dispararon: mientras que las acciones de D-Wave ganaron más del 200%, las de Rigetti subieron un 104%.

Además, una de ellas, IonQ, se ha incluido en el índice “Fortune Future 50”, índice de prestigio que simboliza las acciones de las empresas con gran proyección de futuro.

También hay que decir que las valoraciones PER a 12 meses está muy por encima de la media del sector. Todo ello en el contexto de las valoraciones astronómicas del sector e la IA, que sin duda ha influido en este tema.

Veremos a lo largo de nuestro documento, qué vectores han impulsado este salto en las valoraciones ... y también cuánto puede haber de especulación.

De lo último, de haberlo, haylo, como con toda nueva tecnología revolucionaria, pero ello no ha de obviar lo fundamental, es decir, que nos encontramos en los albores de una gran disruptión.

EFERVESCENCIA AÚN TRAS LAS CRISIS: +87% EN NOVIEMBRE



Por cierto, estas subidas anuales tan espectaculares del +135% se ven correlacionadas con el fervor inversor del sector IA, y cuando este último se corrige, como ocurre a mediados de noviembre 2025, ello afecta a las cotizadas cuánticas, que tras esa corrección, después "sólo" suben el +87% anual, es decir, siguen haber subido espectacularmente.

Y cuando los títulos de las TIC y la IA recuperan la senda alcista, como cuando Nvidia anuncia resultados y expectativas muy positivas a finales de noviembre 2025, las de cuántica siguen la tendencia y las bolsas vuelven a subir.

La conclusión: con los vaivenes previsibles de una tecnología naciente, hay un gran interés en bolsa por las empresas que se focalizan en las nuevas tecnología cuánticas.

LA “NEXT BIG THING”: SÍ, ... ¿PERO CUÁNDO?

The screenshot shows a news article from the Wall Street Journal. The title is "Quantum Could Be Tech's Next Big Thing. But for Investors, It's All About Timing." by Alan Ruschel. The date is November 07, 2025. The article discusses the potential of quantum computing, mentioning its strides in recent years and the risk of getting ahead of the technology. Below the title is a photograph of a complex quantum computing setup with many wires and components.

Este segundo toque de atención, el de las bolsas, se traduce en la publicación en los medios, incluso los no especializados, de que hay que prepararse para esta revolución. Tal como se plasma en prensa como en este articulo del Wall Street Journal (WSJ) del mes de noviembre 2025, en el que se habla de la computación cuántica como de la “next big thing” .

¿Su impacto será como el de la IA?

En este documento se pretende revisar en qué consiste, cuál es el estado de la tecnología y qué previsiones se están barajando.

Un adelanto: sí puede ser muy impactante.

Pero no es seguro cuándo y qué valores bursátiles serán los ganadores.

De hecho, igual puede ser alguna startup hoy desconocida. Tiempo al tiempo.

EN BARCELONA



El tercer toque de atención es, que no se trata de una quimera, sino que ya hay computadores cuánticos instalados – incluso en nuestra ciudad.

El Barcelona Supercomputing Center (BSC), cabecera de la Red Española de Supercomputación, dispone desde hace poco de los primeros computadores cuánticos del país. Además, se trata de tecnología 100% europea proporcionada por la startup Qilimanjaro Quantum Tech con sede en el distrito 22@, y de la que soy co-fundador.

Se trata del proyecto “Quantum Spain”, que dispone de dos computadores cuánticos de primera generación, y que son la plataforma Cuántica actual del BSC con el apoyo del Ministerio de Economía (ahora desde el Ministerio de Transformación Digital) desde 2022. En la actualidad se está ampliando con un tercero, el MareNostrum Ona, con apoyo e la comisión Europea, como comentaremos más adelante.

Es decir, esta tecnología, ya existe, se usa y la tenemos aquí. Y además, se desarrolla aquí.

Es cierto también que los sistemas actuales son de primera generación, son demostraciones palpables de que funcionan según el paradigma de cálculo cuántico, y que sus prestaciones aún son limitadas.

Lo que sí son muy útiles es para el desarrollo de las nuevas aplicaciones cuánticas, para su integración con los computadores actuales, y para la formación de sus futuros usuarios.

Por cierto, es curioso saber que el novelista Dan Brown (conocido sobre todo por su obra El Código Da Vinci), en su novela “Origin” de 2017 ya había imaginado instalar un computador cuántico en la capilla desacralizada del BSC, algo en ese momento inverosímil, pero que se hizo realidad en 2025. El tiempo vuela.

UN DECENIO

The image is a composite of two screenshots from TechCrunch. On the left, a vertical timeline shows the year '2016' above a screenshot of a TechCrunch article titled 'IBM launches quantum computing as a cloud service'. On the right, a vertical timeline shows the year '2021' above a screenshot of a TechCrunch article titled 'Quantum computing primacy'. Both screenshots show various quantum computing logos and headlines. At the bottom of the collage, there is a footer with the text: "EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026" and "VICTOR CANIVELL". A small logo is also present in the bottom right corner.

El cuarto toque de atención es el hecho de que ya hace una década que se han construido computadores cuánticos de primera generación. IBM dio acceso público en primicia en 2016,

acceso dirigido a investigadores, a personas con conocimientos avanzados de física cuántica. Porque para usar estos primeros computadores cuánticos es necesario conocer y manipular conceptos cuánticos que sólo dominan los especialistas.

Hay que decir que una de las primeras usuarias de este sistema en la nube de IBM fué la directora actual del proyecto Quantum-Spain, Alba Cervera, a la sazón estudiante de doctorado con otro co-fundador de Qilimanjaro, el catedrático de la Universidad de Barcelona (UB) José Ignacio Latorre. Así, Alba fue la ganadora en 2018 del primer premio otorgado por IBM a usuarios de su primer sistema cuántico, en base a su tutorial “Exact Ising Model simulation: How to simulate time evolution at zero time”.

Un primer premio de computación cuántica ya para Barcelona.

A continuación, todas las grandes empresas del sector informática se han sumado a la iniciativa de ofrecer en la nube acceso a diferentes tipos de computadores cuánticos, algunos propios como son el caso de IBM y Google, y otros proveyendo acceso a computadores cuánticos de terceros; en particular este es el caso de los servicios Amazon Bracket (Amazon Web Services, AWS) y de Azure Quantum (Microsoft).

Ello demuestra el interés de proveedores y de usuarios en instalar y probar estos nuevos tipos de computadores.

Como mencionado antes, y se explicará más adelante, estos sistemas de primera generación son prueba de la validez de este nuevo tipo de computación, es decir, se comprueba que funcionan según lo previsto – pero aún no son suficientemente grandes y eficientes como para ser usados fuera del ámbito de las pruebas de concepto, es decir, no aún en producción.

Pero llegaremos a ello.

EN TODOS LOS CENTROS DE DATOS DE SUPERCOMPUTACIÓN



The screenshot shows a news article from the EuroHPC JU website. The title is "Selection of six sites to host the first European quantum computers". The text states: "The European High Performance Computing Joint Undertaking (EuroHPC JU) has selected six sites across the European Union (EU) to test and operate the first EuroHPC quantum computers, Czechia, Germany, Spain, France, Italy, and Poland." The date is October 4, 2022. At the bottom left is the text "EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026. At the bottom right is the number 9 and the Qilimanjaro logo.

Dentro de este cuarto toque de atención, de que ya existen computadores cuánticos, hay que destacar que el foco ha sido instalar estos primeros computadores cuánticos en instituciones académicas de investigación (como hizo Qilimanjaro en el primer proyecto cuántico de los UAE en Abu Dhabi en 2022) y sobre todo en centros de supercomputación (llamados de HPC por las siglas en inglés de High Performance Computing). Son los investigadores, así como los expertos en supercomputación, los primeros interesados en probar estos nuevos equipos y en aprender a cómo sacarles partido. Ello es debido a que tienen el conocimiento y la motivación para hacerlo (antes que los usuarios del mundo empresarial, ya que sus prestaciones son de momento limitadas).

Ese fue el caso pionero del BSC en España, y ese ha sido el caso sistemático y posterior de la Comisión Europea (CE) al dotar a la mayoría de centros de HPC europeos de diferentes tipos de computadores cuánticos de primera generación, bajo el paraguas de la iniciativa “European High Performance Computing Joint Undertaking” (EuroHPC JU), en que la CE y los estados miembros correspondientes financian al 50% dichos equipos cuánticos. Hay que decir que España pujó por y obtuvo uno de los primeros proyectos correspondientes, asignando la Comisión a Qilimanjaro de nuevo la instalación de un tercer computador cuántico (en este caso, analógico, ya se explicará más adelante en qué consiste) a partir de 2026.

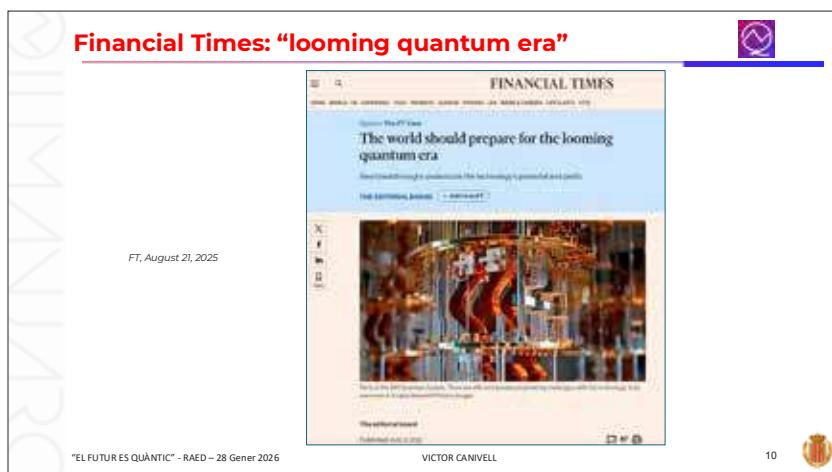
A estas instalaciones del BSC, en España hay que añadir otras en el Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA) en Santiago, otro foco importante de la Red Española de Supercomputación, con un computador cuántico de la startup británica Oxford Quantum Computing (vía Fujitsu) desde 2022 y otro de la startup finlandesa IQM a instalar en 2026. Estas iniciativas han sido lideradas por el gobierno de Galicia.

Para completar la lista de computadores cuánticos disponibles para investigación en nuestro país, hay que destacar la reciente instalación en 2025 de un System Two de importantes dimensiones, de la multinacional americana IBM en San Sebastián. En este caso, se trata de una iniciativa del gobierno vasco, creando un nuevo centro de computación avanzada focalizado en la computación cuántica, y con el énfasis, no en el desarrollo de tecnología de equipos propia, sino en el desarrollo de soluciones de software cuántico.

Todo ello demuestra el gran interés de las administraciones públicas en la computación cuántica y en sus futuras aplicaciones,

preparando el terreno para cuando sean de utilidad económica para las empresas y también para el desarrollo de una nueva industria.

FINANCIAL TIMES: “LOOMING QUANTUM ERA”



El quinto toque de atención es justamente la publicación en prensa, no sólo del ya mencionado interés bursátil en esta nueva industria, sino también del impacto transversal a nivel de las empresas y de su competitividad, por ejemplo en este artículo del Financial Times (FT) del pasado verano 2025.

La primera razón es el tema de cómo prepararse ante ataques cuánticos, de una intensidad y consecuencias hasta ahora desconocidas. Tal como avisaba el artículo de Wired comentado antes.

La segunda razón es por razones de competitividad por las ventajas de cálculo en precisión, en rapidez y/o en la necesidad de recursos.

Y en particular, para poder aprovechar el ahorro de consumo energético al que apuntan.

Es por ello que, no sólo empresas del sector del hardware están implicadas en esta aventura de diseñar y construir computadores cuánticos (como es el caso de IBM, Honeywell y muchas startups), sino también es el caso de las empresas que dominan internet (como Google y Amazon), que no venden hardware (aunque sí que son capaces de construir su propio hardware), pero sobre todo cuyo negocio principal se verá afectado indefectiblemente por las nuevas capacidades de la computación cuántica. Por ejemplo, el motor del negocio de la publicidad online, clave de bóveda del negocio de muchas de estas empresas, se basa en algoritmos de búsqueda muy sofisticados, y justamente este tipo de algoritmos se verán acelerados de manera muy importante por la cuántica. Otro acicate para no quedarse atrás.

¡HASTA EN EL METRO”



Y, ya finalmente, como último toque de atención acerca de la llegada de la computación cuántica, hemos visto este mes de noviembre 2025 cómo se habla de ello ¡hasta en el metro de nuestra ciudad!

Este ha sido el caso durante la “Biennal Ciutat i Ciència” en el mes de noviembre 2025.

¿Por qué? Porque es un tema de actualidad, y en particular por la celebración del centenario de la cuántica, que también exploraremos en este documento.



❖ SECCIÓN 2 - EL CONTEXTO



SECCIÓN 2



EL CONTEXTO

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

12

En esta Sección 2 se analizará el contexto actual de la industria de las TIC, una industria joven de no más de 60 años, contexto en el que se engarzará la futura revolución de la computación cuántica.

El resumen de esta sección es que la física cuántica, de la que hablaremos en la Sección 3, ha sido necesaria y crucial para el desarrollo de las TIC, que el impacto de las TIC es determinante en la productividad y en el crecimiento de las economías actuales, que este rol determinante les ha dotado de una extraordinaria capacidad de inversión, y que una de las dos grandes inversiones que están llevando a cabo en estos momentos es la de la computación cuántica.

EL CONTEXTO: LA FÍSICA CUÁNTICA, LAS TIC Y LA ECONOMÍA



SECCIÓN 2.a



El contexto: la física cuántica, las TIC* y la economía

*** TIC = Tecnologías de la Información y las Comunicaciones**

La economía moderna se basa cada vez más en los datos, lo que significa que estos desempeñan un papel fundamental en las actividades económicas, la toma de decisiones y la innovación. Este cambio se debe a la creciente disponibilidad y asequibilidad de las tecnologías de datos y al reconocimiento cada vez mayor de los datos como un activo valioso.

Los enfoques basados en datos conducen a decisiones más informadas, una mayor eficiencia y un mayor crecimiento económico.

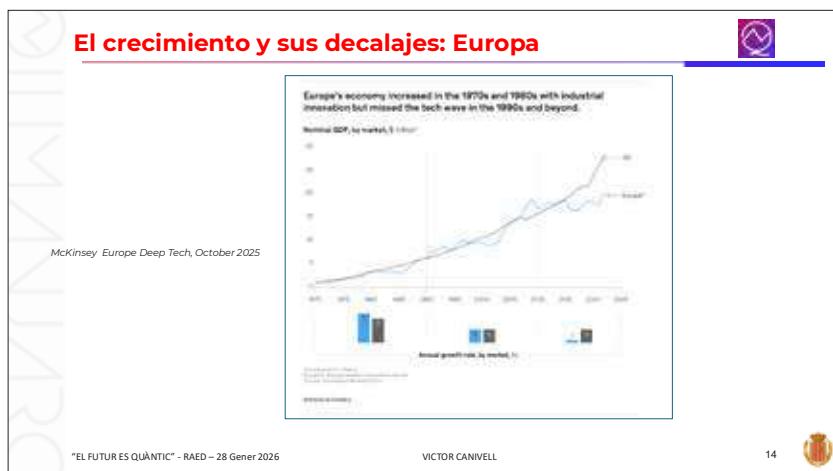
El motor del desarrollo espectacular de esta industria TIC ha sido la capacidad de producir chips con cada vez más prestaciones a un mismo coste, doblando capacidades cada dos años, o sea, multiplicando por treinta cada diez años, y ello durante varias décadas. Es difícil imaginar ninguna otra industria con este tipo de desarrollo. Y si el motor de esta industria han sido los chips, es decir los semiconductores, fue la física cuántica lo

que permitió desarrollarlos. Pero de física cuántica hablaremos en la sección tres.

Si se analiza el crecimiento reciente de la economía, se constata que las TIC han tenido una gran influencia – y por ello, que las TIC han contribuido a decalajes importantes entre regiones.

En particular veremos que una de dichas razones ha sido el desarrollo, o no, de empresas líderes en este nuevo sector, de su gran capitalización, de su gran capacidad de inversión y de cómo ello les permite invertir ahora en las dos revoluciones de las TIC que se prevé puedan acelerar en el futuro la economía de manera nunca vista hasta la fecha: la IA y la cuántica, y su simbiosis.

EL CRECIMIENTO Y SUS DECALAJES: EUROPA



Y este decalaje, por ejemplo, entre el PIB de USA y de Europa según un análisis de McKinsey, tiene que ver con la manera en que se ha desarrollado y dominado esta nueva industria de las TIC, sector con un gran peso económico.

Es decir, las TIC no sólo han contribuido a la eficiencia, productividad y crecimiento de la economía en su conjunto, sino que, ella misma, se ha convertido en un pilar de la economía – y es en este apartado donde se ha producido un decalaje.

Veamos, ¿qué empresas europeas son líderes a nivel mundial en el sector de las TIC, donde por extensión incluimos el sector de los semiconductores? Pues muy pocas, por ejemplo, las únicas dos en el top-20 del ranking de empresas TIC a nivel mundial:

- ASML (Holanda) en los aparatos de litografía del sector de los chips
- SAP (Alemania) en las aplicaciones de gestión empresarial

Otras empresas europeas (incluyendo el Reino Unido), realmente muy punteras en sus sectores respectivos de las TIC, han sido adquiridas por grupos externos, como, por ejemplo:

- DeepMind, líder en IA, adquirida por Google
- ARM, líder en diseño de chips, adquirida por SoftBank (Japón)

Pero a fecha de hoy no tenemos ninguna IBM, Microsoft, Google, Meta, Amazon, Nvidia.

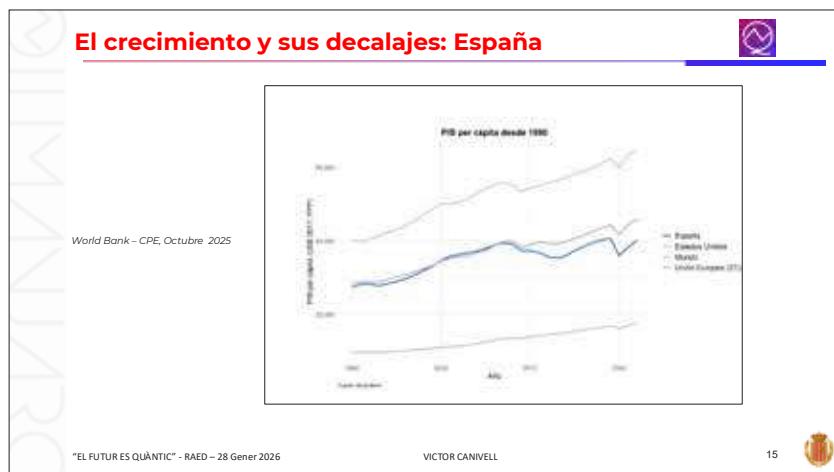
Sí tenemos candidatos, pero no realidades. Una excepción reciente que destacar es la startup francesa de IA, Mistral, debido a sus alianzas estratégicas anunciadas este año 2025 justamente con ASML (como inversor y como partner para optimizar sus procesos de litografía) así como con SAP (para dotar a las administraciones públicas alemana y francesa de agentes IA avanzados).

dos, según un acuerdo de noviembre 2025 del canciller Mertz y el presidente Macron). Este tipo de alianzas, que recuerdan el caso singular y exitoso de Airbus en el sector aeroespacial, es lo que puede cambiar el rumbo.

Esta situación en las industrias TIC es sintomático de la dificultad de crear empresas tractoras europeas en nuevas industrias tecnológicas. Y debido al peso de esta joven industria TIC, esta ausencia de empresas líderes pesa negativamente en el crecimiento comparativo del PIB.

La naciente industria de la cuántica brinda una oportunidad para revertir esta situación.

EL CRECIMIENTO Y SUS DECALAJES: ESPAÑA



Este decalaje también nos afecta en nuestro país, viendo por ejemplo otra métrica, la del PIB per cápita respecto a Europa (y USA), como muestra esta gráfica del Banco Mundial.

Evidentemente no se trata sólo de tener empresas pujantes en el sector TIC, ni tampoco sólo del aprovechamiento de la TIC por parte de las empresas y del Estado en hacer más competitiva la economía. Hay muchos otros factores que influyen en la evolución del PIB, y del PIB per cápita, por ello ¡la economía es mucho más compleja que la física!

La física trata de entender cómo funciona las bases de la materia, del universo, de objetos físicos observables y medibles, tema harto complejo. Pero la economía va mucho más allá, estudia las relaciones económicas donde influyen factores objetivos, aunque no siempre fácilmente medibles, pero además otros muchos factores intangibles, como son por ejemplo las decisiones individuales y grupales de inversión en base a circunstancias concretas.

En los cálculos de PIB per cápita hay que considerar que influyen factores como el mix de industrias (por ejemplo, el peso de la industria TIC), el número de horas trabajadas y la productividad (donde puede influir mucho el uso adecuado de las TIC).

Hablando de la tipología de empresas, en nuestro país, hay ciertas empresas TIC muy competitivas, e incluso líderes internacionales en ciertos segmentos muy específicos, pero de momento tienen un peso menor en el conjunto del PIB.

Por ello, hay la oportunidad de identificar nuevas industrias TIC en fases iniciales de desarrollo, como es ahora la cuántica, y apostar por la creación de potentes ecosistemas locales.

EL CRECIMIENTO: LA CLAVE ES LA PRODUCTIVIDAD CON LAS TIC

**El crecimiento:
la clave es la productividad con las TIC**

“...Citando al economista Premio Nobel, Paul Krugman, (“*Productivity isn't everything, but in the long run, it is everything.*”), Juan Francisco Jimeno afirmó que “la única forma de mantener un crecimiento del PIB sostenido en el tiempo es aumentando la productividad...”

“...En España, la baja inversión en TIC e intangibles y una estructura productiva centrada en sectores tradicionales con poca digitalización limita el crecimiento de la productividad y reduce el interés por especializarse en sectores tecnológicos...”

J.F Jimeno, 15 Octubre, 2025

“EL FUTUR ES QUÀNTIC” - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

Amics del País
Societat Econòmica i Culturalista d'Amics del País - RAED -

Publicacions

“El creixement de la productivitat, el principal repte de l'economia espanyola”

16

Volviendo a la cuestión del crecimiento del PIB, Juan Francisco Jimeno, economista del Banco de España, y presidente del Consejo de la Productividad de España desde 2024, puso recientemente de relieve, en un coloquio de Amics del País del mes de octubre 2025, su relación con la productividad ligada al aprovechamiento de las TIC.

Históricamente, España se ha situado en la parte baja de los rankings en términos de crecimiento de la productividad. La productividad por hora trabajada ha pasado del 2%, en el período que va desde finales del siglo XIX hasta finales del siglo XX, y al 0,7%, desde finales del siglo XX.

Las causas apuntan, según Jimeno, a una “baja inversión en TIC y a una estructura productiva centrada en sectores tradicionales con poca digitalización”, tal y como demuestran los

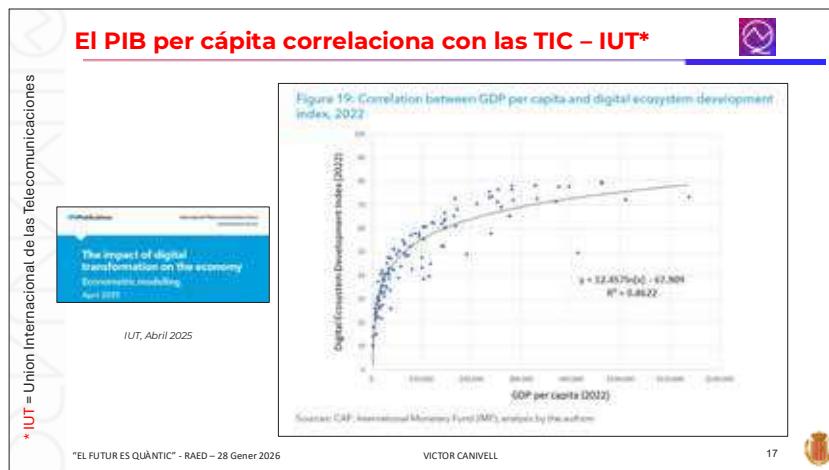
datos: la correlación entre el peso del empleo sectorial sobre el empleo total y la tasa anual media de crecimiento de la productividad por hora trabajada durante el período 1996 y 2021. Es decir, en palabras del ponente: “España invierte mal, porque tenemos muchos recursos en aquellos sectores de actividad donde menos crece la productividad”.

Sin embargo, “desde 2022, vemos una cierta recuperación de la productividad bastante significativa: cierta esperanza de que algo positivo está pasando”. Posibles causas de estos brotes verdes son el crecimiento del empleo, por encima de la media, en actividades profesionales de servicios a las empresas y de investigación e investigación. En definitiva, un mayor aprovechamiento de las TIC.

El buen aprovechamiento de las nuevas tecnologías TIC, como la IA, y en el futuro la computación cuántica, pueden contribuir a revertir la situación histórica de la productividad del país, en cuanto a hacer más competitivas a las empresas.

Y de cara al PIB, es muy importante también, no sólo el aumento transversal de la productividad en todos los sectores, sino también la creación de una nueva industria, como la cuántica, con empresas tractoras y startups líderes que puedan llegar a liderar mercados internacionales.

EL PIB PER CÁPITA CORRELACIONA CON LAS TIC - IUT



Siguiendo en esta senda, la correlación mencionada entre el PIB per cápita y el grado de desarrollo de las TIC en los países se refleja, por ejemplo, en un índice de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (IUT, por sus siglas en inglés), el "Digital Ecosystem Development Index".

Este índice contempla, entre otros, los grados de digitalización de las empresas, de la digitalización de las administraciones públicas, de la digitalización de los hogares, de la formación y del entorno regulatorio.

El resultado es claro, el PIB per cápita y las TIC van al unísono.

Otro índice que arroja conclusiones semejantes es el Network Readiness Index (NRI) de Portlands Institute y la Universidad de Oxford, un indicador de referencia para medir y comparar el grado de digitalización de los países, y fue originalmente de-

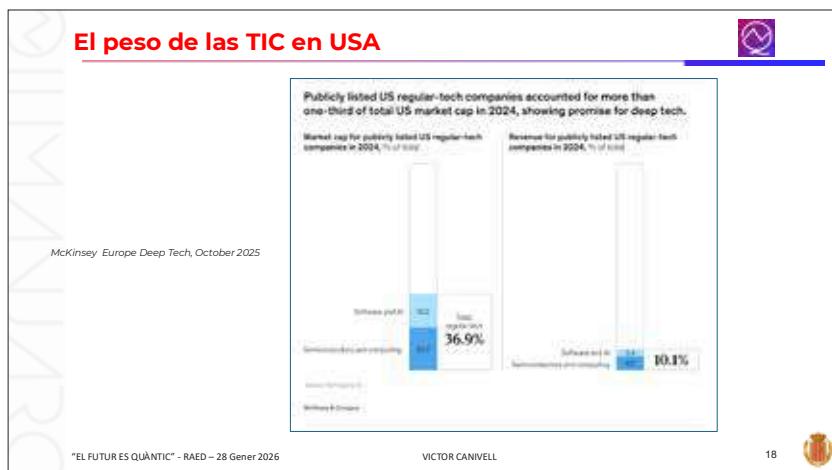
sarrollado por el World Economic Forum en 2019. El NRI es otro indicador fiable de preparación de los países para aprovechar las tecnologías digitales y su impacto en el desarrollo económico y social. Europa, en general, continúa liderando este índice, con países como Finlandia, Suecia y Dinamarca (pero no nuestro país) en los primeros puestos, gracias a su infraestructura avanzada, políticas digitales efectivas y alto nivel de alfabetización digital.

Todo ello incide también en un alto grado de desarrollo de startups en sectores emergentes de la TIC en los países del norte de Europa.

Al introducirse nuevas tecnologías rompedoras como la cuántica en el sector TIC, se abre la puerta a que países como el nuestro puedan dar un salto importante en estos índices, si sabemos aprovechar la oportunidad, no solo de ser pioneros en su utilización en los procesos económicos y productivos, sino también en desarrollar empresas proveedoras líderes en estos nuevos sectores como las tecnologías cuánticas – donde no hay aún caballos ganadores, aún no ha pasado la oportunidad.

Lo relevante del caso es que la cuántica será esencial para poder seguir este nivel de crecimiento – ya que la computación actual tiene unas limitaciones estructurales que sólo paradigmas alternativos como la cuántica permitirán superar.

EL PESO DE LAS TIC EN USA



Volviendo la vista a los temas macroeconómicos, el resumen es que las empresas TIC han tomado un peso muy importante en los mercados. Veremos hasta dónde.

Para empezar, en USA, las TIC representan un 37% de la capitalización total de sus bolsas, frente a un 10% de ventas. Este 37% es un caso excepcional, y una de las bases de su gran influencia global, ya que la economía global viene regida por los datos (además de las finanzas y la energía, entre otros factores).

Entre las razones que permiten este desarrollo de las empresas TIC tan importante en USA, en comparación por ejemplo con Europa, pueden incluirse las ventajas de tratarse de un único mercado de gran escala (vs una veintena de países con sus regulaciones aún diferenciadas, mayores burocracias e incluyendo su variedad de lenguas y de desarrollos históricos), con un mercado de capitales mucho más desarrollado y con una actitud frente al riesgo que permite apuestas más arriesgadas (con su

famosa proclama de la tolerancia a fallos, bajo la premisa “fail fast”, para olvidar los estigmas del fracaso inicial y seguir probando hasta dar con la fórmula ganadora).

LOS BENEFICIOS DE LAS BIG TECH



Pero si nos centramos en las empresas más importantes, y de hecho, en las 50 empresas con más beneficios (en 2024), resulta que las TIC representan, no el 10% de la facturación visto antes, sino un 25% del total de beneficios, un porcentaje mucho mayor que el de ventas, son empresas que generan muchos beneficios.

¿Por qué? Por una serie de factores, incluyendo su innovación, la naturaleza quasi-monopolista en ciertos nuevos segmentos donde aplica el “first-mover-takes-all”, así como aspectos fiscales de difícil aplicación en empresas de servicios puramente digitales (y por tanto deslocalizados), pero que, de manera general, son factores que generan importantes aumentos de productividad a sus usuarios, sea de costes, de

plazos, de calidad, de innovación de productos y/o de procesos productivos.

Estos beneficios del sector TIC se equiparan con los del sector de la energía, y sólo son superados por los del sector financiero. No está mal para una industria que no existía hace 60 años.

Pero resulta que este 25%, a su vez, palidece con la comparación de sus capitalizaciones.

LAS VALORACIONES DE LAS BIG TECH: GRAN CAPACIDAD DE INVERSIÓN



Resulta que, si analizamos la distribución de las valoraciones bursátiles de las mayores 50 empresas, las TIC (incluyendo las llamadas Big Tech) acumulan un 60% (sí, ¡¡un 60%!!) de la capitalización total. Esto son datos de octubre 2025, que superan a porcentajes similares a los del cierre 2024. Entre otros factores, con el impulso de la revolución de la IA, las Big Tech han alcanzado valoraciones individuales de más de \$4T.

Esto hay que ponerlo en contexto con los PIBs de 2024 de España (\$1.7T) y de Alemania (\$4.6T) para ver la magnitud de estas cantidades, líderes absolutos en bolsa.

¿Qué representan dichas valoraciones?

Las expectativas de beneficios futuros. Y también un cierto espíritu especulativo de los mercados cuando se perciben las oportunidades de revoluciones que distorsionan el status quo.

Lo relevante para nuestro análisis es que esas altas valoraciones representan la capacidad de atraer más capital y más financiación, y por ello a una gran capacidad de inversión de las Big Tech.

OCTUBRE 2025: “SUPER-SIX” ACAPARAN EL 50% DEL NASDAQ Y AUMENTAN SU GRAN CAPACIDAD DE INVERSIÓN



Este año 2025 se ha acentuado esta polarización, cuando se ve que las seis mayores del índice NASDAQ acaparan el 50% de

la capitalización en base a múltiplos muy altos, colectivamente de 10x ventas, con un crecimiento anual del negocio del 30%.

Es cierto que a finales del 2025 preocupa la posibilidad de un cierto efecto burbuja, pero de lo que no hay duda es del enorme atractivo por invertir en las empresas que van a acelerar la productividad de manera transversal de la economía.

Lo dicho, lo relevante es que todo ello les permite una enorme capacidad de inversión, sea con recursos propios y/o por su gran capacidad de endeudamiento si fuera necesario.

Y la pregunta es ¿en qué nuevas iniciativas están invirtiendo?

EL CONTEXTO: DOS DISRUPCIONES TIC ENTRELAZADAS & SU SIMBIOSIS



SECCIÓN 2.b



El contexto: grandes inversiones en dos disruptpciones TIC “entrelazadas” & **SU SIMBIOSIS**

“EL FUTUR ES QUÀNTIC” - RAED – 28 Gener 2026

VÍCTOR CANIVELL

22

Pues bien, el sector TIC está usando su gran capacidad de inversión en dos nuevas grandes iniciativas, que representan dos grandes disruptpciones del sector – una actual, la de la IA, que nos está cambiando el mundo, y otra, en el horizonte, relativamente desconocida, pero igual o potencialmente más disruptiva, la cuántica.

Se trata de dos disruptpciones de naturaleza totalmente diferentes, una basada en una nueva generación muy potente de software corriendo sobre computadores de arquitectura convencional (la IA), y otra, basada en una arquitectura de computación radicalmente nueva (la cuántica), un hardware y un software totalmente diferentes a los actuales.

Y lo importante es que ambas se “entrelazan”, dando lugar a una simbiosis, en la que cada una de estas disruptpciones puede acelerar a la otra.

LA DISRUPCIÓN HOY EN MARCHA: LA IA

The image shows a presentation slide with a blue header bar containing the text "La disrupción hoy en marcha: la IA". Below the header is a large rectangular box with a white background. Inside this box, at the top, is the date "November 30, 2022" and the word "Product". In the center of the box is the title "Introducing ChatGPT" in a large, bold, black sans-serif font. At the bottom of the box, centered, is the text "OpenAI, 2022". Outside the main box, at the bottom left, is the copyright notice "'EL FUTUR ES QUÀNTIC' - RAED - 28 Gener 2026". At the bottom right is the name "VICTOR CANIVELL" and a small circular logo.

Empezaremos analizando brevemente la revolución TIC actual, la de la IA, y veremos por qué se entrelaza con la revolución en ciernes, la de la computación cuántica.

La IA explota por sorpresa en noviembre 2022. Se trataba de una IA generativa, es decir, capaz de generar contenidos de manera autónoma, con una gran rapidez y con un nivel de detalle y calidad sorprendente. De los contenidos de texto rápidamente se pasó también a la generación de código de programación, de imágenes, de videos, de música, es decir de cualquier contenido que se pueda digitalizar (que es prácticamente toda la información que tratamos).

La IA se define como la capacidad de realizar tareas típicamente asociadas con la inteligencia humana, como el aprendizaje, el razonamiento, la resolución de problemas, la percepción y la toma de decisiones. Es un campo de investigación en informática que desarrolla y estudia métodos y software que permiten

a las máquinas percibir su entorno y utilizar el aprendizaje y la inteligencia para tomar medidas que maximicen sus posibilidades de alcanzar los objetivos definidos.

Esta eclosión del 2022 se debe fundamentalmente a la combinación de tres primicias a la vez: un acceso a una gran cantidad de información (léase, todo internet), un acceso a una nueva generación de software de IA (que se lleva gestando desde los años '60) y un acceso a Graphical Processing Units (GPU's) tipo Nvidia con una gran capacidad de cálculo. Las GPU's se concibieron en sus inicios como chips de cálculo especializado para la gestión de gráficos en 3D para la industria de los gamers (y las workstations 3D para aplicaciones de ingeniería, ciencia y animación) – y al cabo de los años resultaron ser justo el tipo de chips necesarios para los cálculos de álgebra lineal para la gestión de las redes neuronales de la IA.

La IA era una aspiración ya desde los años '50, que atrajo mucho interés y financiación en varias etapas de su desarrollo, pero que no llegaba a cuajar justamente por la falta de datos, las carencias del software y/o las capacidades de las CPU's clásicas para conseguir los resultados esperados. Por ello, la IA pasó por un par de “inviernos” con escaso interés y financiación. Hasta que llegó el momento, en 2022, tras pasar por el desarrollo de las técnicas de Deep Learning, Machine Learning y la arquitectura Transformer en 2017, en que se llegó a desarrollar los Large Language Models (LLMs) de éxito actuales.

LA IA ES LA “REVOLUCIÓN INTERNET” DE ESTA GENERACIÓN

La IA es la “revolución internet” de esta generación

D.Hassabis Google DeepMind & Nobel Prize:
The difference here is, it's going to be
10 times bigger than the Industrial Revolution,
and maybe 10 times faster.

The Industrial Revolution was not plain sailing for everyone,
but we wouldn't wish it hadn't happened.
Obviously, we should try to minimise that disruption,
but there is going to be change – hopefully for the better.

Bill Gates: Within 10 years, AI will
replace many doctors and teachers
—humans won't be needed 'for most
things'

"Universal Income will be necessary over
time if AI takes over most human jobs"
ELON MUSK

Nasdaq.com, March 27, 2025

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

24

Desde su eclosión, la IA no deja de avanzar en capacidades y en impacto a todos los niveles económicos y sociales. Se trata de un impacto profundo. El Premio Nobel de Química, y co-fundador de DeepMind (ahora Alphabet Google) en Inglaterra, Demis Hassabis, opina que estamos ante una revolución "10 veces mayor que la Revolución Industrial y 10 veces más rápido". Por cierto, su Nobel se basó en sus contribuciones en investigación IA para la predicción de estructuras de proteínas.

Hasta el extremo de que Bill Gates aduce que, no sólo empleos de bajo valor añadido serán reemplazados por sistemas autónomos, informáticos o robotizados, humanoides o no, sino que incluso ciertos empleos ligados a la enseñanza y la medicina también serán automatizados. Esto se corresponde hasta cierto punto con la realidad actual, en que importantes grupos empresariales del mundo de la consultoría, las Big Tech y bufetes de abogados han dejado de contratar, o directamente despedir

do, a personal junior, ya que sus tareas de programación y/o de búsqueda y contrastación de información se puede realizar con altos grado de satisfacción con sistemas de IA.

En la misma dirección se expresa Elon Musk cuando aboga por la necesidad de proveer de un salario universal a todo el mundo, ya que la IA automatizará un enorme número de procesos, hará la economía más eficiente y no hará falta que todo el mundo trabaje. De esta manera, el futuro podría ser lo mejor de ambos mundos. La visión optimista de Musk plantea que la IA se encargue de muchos trabajos en lugar de los humanos, pero ese trabajo siempre estará disponible para quienes lo deseen. Mientras tanto, la IA hará del mundo un lugar más eficiente, productivo y próspero. Sin embargo, para bien o para mal, Musk sí considera necesario un ingreso universal alto, incluso no solo una renta básica universal.

Otra lectura es la de proponer que los sistemas automatizados autónomos, como los robots por ejemplo paguen tributos. En fin, un sinfín de situaciones que afectan a la economía, la fiscalidad y a la sociedad en su conjunto.

Pero no se trata simplemente de generar contenidos en base a combinar información preexistente, ni de automatizar procesos con decisiones autónomas ante situaciones, acontecidas o no previamente, a mayor velocidad y/o mejor precisión, también se trata de ir más allá, de acercarse y de superar la capacidad intelectual y creativa de los humanos. Lo cual entra de lleno en aspectos éticos y morales, de cómo gestionar estos instrumentos creados por nuestra tecnología, pero que pueden llegar a escapar a nuestro control.

Por cierto, el Premio Nobel de Física 2024 fue otorgado conjuntamente a John J. Hopfield y Geoffrey Hinton “por descubrimientos e invenciones fundamentales que permiten el

aprendizaje automático con redes neuronales artificiales”, es decir, a sentar las bases de la IA.

Un detalle importante que considerar es que, aunque el número de usuarios de IA ha crecido exponencialmente desde 2022, también es cierto que el impacto en las empresas de manera general aun es modesto, debido a la necesidad de adecuar los procesos y las capacidades de los usuarios. Dicho lo cual, hay ejemplos de ganancias de productividad espectaculares en ciertas profesiones y en ciertas industrias. Ello irá en aumento sin duda, y el cambio será muy disruptivo.

LA CARRERA DE LOS HYPERSCALERS

La carrera de los hyperscalers

We are at the beginning of a new industrial revolution ... over the course of the next four or five years we'll have \$2T worth of data centers that will be powering software around the world.

After being revised up to USD400bn in 2023, the expectation for AI-related capital expenditure among hyperscalers has increased to USD500bn for 2027.

USD500 bn

Accel on AI, November 2023

VICTOR CANIVELL

Julius Bär

Lo importante para nuestro análisis es que esta aceleración de la IA requiere unas inversiones enormes en centros de datos para usar el software de la IA, en particular, para entrenar los modelos (antes de su uso) y para hacer las inferencias que respondan a las peticiones de los usuarios (durante su uso). Ambos procesos necesitan una gran capacidad de cálculo con GPU's.

Cuando hablamos de inversiones, estamos hablando de \$2T a \$5T a cinco años vista, una barbaridad. Las empresas que desarrollan y ofrecen sus servicios IA (como OpenAI, de chatbox por ejemplo) han de contratar centros de datos suficientemente potentes (como Amazon Web Services, Microsoft Azure, Google Cloud u otros), los cuales a su vez han de dotarse de suficientes GPU's (de Nvidia, por ejemplo) y de las infraestructuras necesarias.

Empezamos 2024 con las previsiones de Meta y otros de invertir cantidades del orden de \$40B cada uno de ellos – luego surgió la iniciativa Stargate de invertir \$500B, y ciertamente se llega a finales de 2025 con más de \$500B invertidos.

Son cantidades nunca vistas.

En particular, éstas son las operaciones más significativas de 2025 hasta la fecha de estos “hyperscalers”:

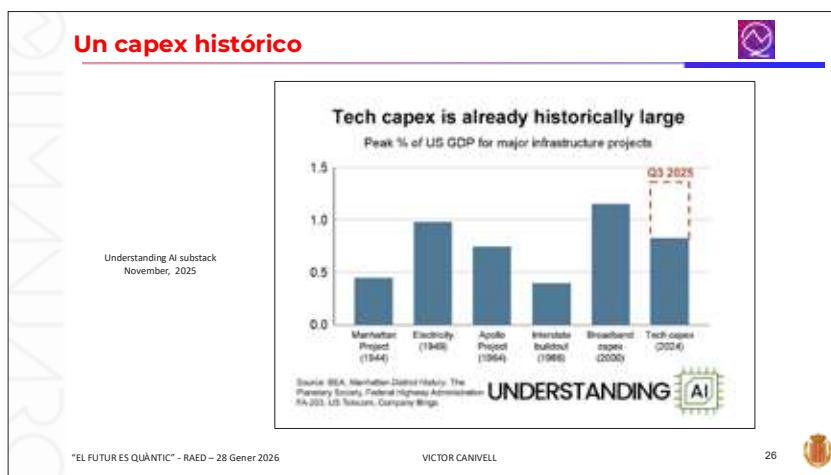
1. \$500B: El presidente Donald Trump anunció que OpenAI, SoftBank y Oracle crearán una nueva empresa, “Stargate”, en lo que Trump denominó el “mayor proyecto de infraestructura de IA de la historia”. Las empresas planean invertir hasta 500.000 millones de dólares para desarrollar infraestructura de IA en Estados Unidos en los próximos años y crear 100.000 empleos.
2. \$300B: OpenAI firmó un contrato con Oracle para adquirir 300.000 millones de dólares en potencia informática durante los próximos cinco años, según informó el Wall Street Journal. Oracle proporcionará aproximadamente 4,5 GW de capacidad energética.
3. \$100B: OpenAI y Nvidia anunciaron una alianza que incluye una inversión de 100.000 millones de dólares de Nvidia en

OpenAI, que afirmó que utilizaría al menos 10 GW de los sistemas de Nvidia para la infraestructura utilizada para entrenar modelos de IA.

4. \$50B: Amazon anunció que invertiría hasta 50.000 millones de dólares para ampliar la infraestructura de IA y las capacidades de supercomputación para sus clientes del gobierno estadounidense, con planes de añadir casi 1,3 GW de capacidad a través de nuevos centros de datos diseñados para agencias federales.

5. \$50B: Anthropic anunció planes para invertir 50.000 millones de dólares en infraestructura de IA, comenzando con centros de datos en Texas y Nueva York, en un proyecto que, según Anthropic, generará 800 empleos permanentes y más de 2.000 puestos en la construcción.

UN CAPEX HISTÓRICO



Este nivel de inversiones está en línea e incluso supera los grandes episodios de inversión en USA, superando en dólares cons-

tantes a lo que representaron proyectos como “Manhattan” en los ‘40, “Apollo” en los ‘60 o incluso el despliegue de redes de banda ancha para internet en los ‘00s.

Esta fiebre inversora de la IA representa un fenómeno histórico.

Y este fenómeno veremos cómo engarza más adelante con la cuántica.

92% DEL CRECIMIENTO DEL GDP EN EL PRIMER SEMESTRE

92% del crecimiento del GDP USA en el 1er semestre

J.Furman, Harvard, blog x.com
September 27, 2025

Investment in information processing equipment & software is 4% of GDP.
But it was responsible for 92% of GDP growth in the first half of this year.
GDP excluding these categories grew at a 0.7% annual rate in H1.

The chart on the left shows Real Business Fixed Investment in Information Processing Equipment and Software (Annual Rate) from 2017 to 2025. The chart on the right shows Real GDP excluding Information Processing Equipment and Software (Annual Rate) from 2017 to 2025.

Año	Real Business Fixed Investment (Anualizado)	Real GDP excluyendo IPE y Software (Anualizado)
2017 Q1	~2.5%	~0.5%
2017 Q2	~1.5%	~0.5%
2017 Q3	~2.0%	~0.5%
2017 Q4	~1.5%	~0.5%
2018 Q1	~2.0%	~0.5%
2018 Q2	~1.5%	~0.5%
2018 Q3	~2.0%	~0.5%
2018 Q4	~1.5%	~0.5%
2019 Q1	~2.0%	~0.5%
2019 Q2	~1.5%	~0.5%
2019 Q3	~2.0%	~0.5%
2019 Q4	~1.5%	~0.5%
2020 Q1	~2.0%	~0.5%
2020 Q2	~1.5%	~0.5%
2020 Q3	~2.0%	~0.5%
2020 Q4	~1.5%	~0.5%
2021 Q1	~2.0%	~0.5%
2021 Q2	~1.5%	~0.5%
2021 Q3	~2.0%	~0.5%
2021 Q4	~1.5%	~0.5%
2022 Q1	~2.0%	~0.5%
2022 Q2	~1.5%	~0.5%
2022 Q3	~2.0%	~0.5%
2022 Q4	~1.5%	~0.5%
2023 Q1	~2.0%	~0.5%
2023 Q2	~1.5%	~0.5%
2023 Q3	~2.0%	~0.5%
2023 Q4	~1.5%	~0.5%
2024 Q1	~2.0%	~0.5%
2024 Q2	~1.5%	~0.5%
2024 Q3	~2.0%	~0.5%
2024 Q4	~1.5%	~0.5%
2025 Q1	~2.0%	~0.5%
2025 Q2	~1.5%	~0.5%

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

27

Tanto es así, que prácticamente todo el crecimiento del PIB americano del primer semestre corresponde a las inversiones en chips y software estos proyectos de IA. El 92%, según datos de Harvard.

Sin comentarios.

El peso de las TIC ha llegado a unos límites insospechados.

A LA VEZ, MUCHA (¿O DEMASIADA?) EXHUBERANCIA



Evidentemente, antes tales cifras y predicciones extraordinarias, hay una preocupación de un efecto burbuja, tal como muestran los índices publicados en La Vanguardia en septiembre 2025 y por múltiples otros articulistas. Pero la realidad es que, a finales de noviembre 2025, y tras la presentación de los últimos resultados trimestrales y de perspectivas de futuros de Nvidia, las dudas en los mercados de momento parecen despejadas.

Por cierto, un fenómeno curioso de este sector de la IA es la dependencia triangular, mencionado antes, entre proveedores de servicios IA, de centros de datos IA y de chips IA – en especial, cuando la empresa líder de chips, con una muy alta valoración y capacidad de inversión, invierte justamente en una empresa de servicios IA por su potencial de crecimiento en tamaño y valor, la cual contrata un centro de datos IA quien a su vez cierra el círculo comprando los chips necesarios a la empresa de chips inicial. Es esta dinámica circular uno de los temas que pueden preocupar a los mercados.

Pero, la cuestión es que, con independencia de estos factores, la expectativa del impacto de la IA en las TIC y en la economía en general es innegable y revolucionaria.

Veremos luego qué relación tiene con la cuántica.

LA GRAN INCÓGNITA DE LA IA ES LA CONFIANZA

La gran incógnita de la IA es la confianza

Nobel Prize winners call for binding international 'red lines' on AI

Signers include "godfathers of AI," famous authors, scientists and Nobel Prize winners in nearly every category.



NBC, September 23, 2023

"EL FUTURO ES QUÁNTICO" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

29

Un último apunte respecto a la IA.

Con independencia de los temas financieros comentados, la preocupación principal ligada a la IA es el de la confianza, y ello en base a tres aspectos.

El primero es que se trata de una caja negra. Los desarrolladores de programas IA sólo dan pautas de actuación al software, de manera que es el mismo programa quien encuentra las correlaciones estadísticas entre las diferentes informaciones y establece, de manera autónoma y dinámica, dichas relaciones.

Y en la actualidad no hay manera de trazar la lógica y/o los procesos por las cuales el programa construye los contenidos. Esta falta de trazabilidad es un problema importante en escenarios donde se ha de poder certificar la corrección de los contenidos generados. Y es un problema de difícil solución, a pesar de los esfuerzos en poder elucidarlo.

El segundo es que estos programas de IA en ocasiones “alucinan”, es decir, generan contenidos inventados y por ello, según el ámbito, falsos. Por ejemplo, hay casos documentados de publicar noticias falsas o de documentar decisiones de tribunales también falsas, generadas por la IA. Conforme los modelos mejoren sus funcionalidades, es de esperar que estas alucinaciones ocurran con menor frecuencia.

Y en tercer lugar tenemos el problema del sesgo de los datos de entrenamiento. En muchas ocasiones se trata de sesgos imprevistos, como por ejemplo el del género en aplicaciones de IA para ensayos clínicos. Pero más preocupante es el sesgo inducido por los responsables del servicio. En particular tenemos el caso de Elon Musk, quien preocupado por el supuesto sesgo “liberal woke” en USA, ha decidido crear un servicio alternativo Grokipedia desde octubre 2025, que en su opinión, es más equilibrada, ergo veraz.

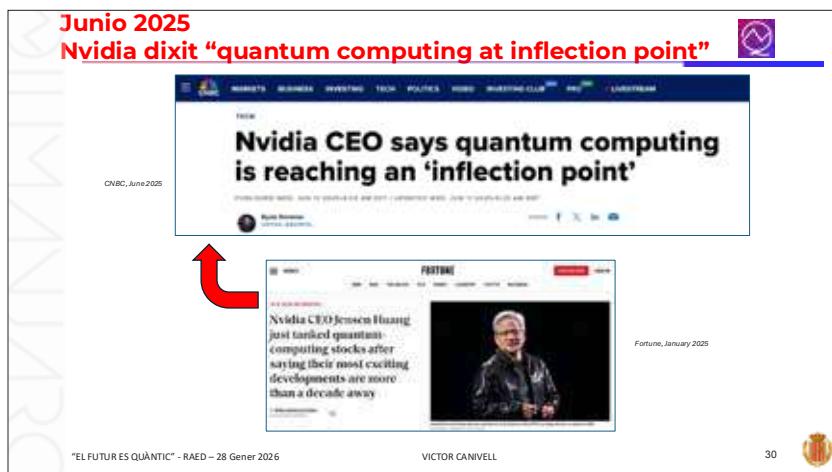
Es por este tipo de razones que, ante la Asamblea General de la ONU de septiembre 2025, un grupo nutrido de Premios Nobel ha hecho una llamada a los gobiernos para que se acuerde un marco de actuación respecto a la IA. Hay que decir que, en este aspecto, hay profundas diferencias de opinión entre países más reguladores, como es el caso europeo, y otros países que son del parecer que no se puede coartar el avance del desarrollo de la IA por su gran impacto económico y geopolítico ante la

amenaza de otras regiones más laxas en estos temas, y que es mejor trabajar en la educación de los usuarios y dejar libre el mercado. Estamos hablando de USA en particular. País donde las Big Tech operan con una gran libertad regulatoria (y fiscal).

Bien, hasta aquí hemos dado un vistazo a la revolución en marcha en estos momentos, la de la IA.

Ahora ha llegado el momento de abordar la otra revolución, la que aún está en ciernes, la de la cuántica, y de cómo engarza la una con la otra.

JUNIO 2025: NVIDIA DIXIT “QUANTUM COMPUTING AT INFLECTION POINT”



Justamente ha sido el campeón de la IA, el CEO de Nvidia, Jensen Huang, quien ha bendecido el desarrollo de la cuántica. Y ha sido muy repentino. En enero de 2025, Huang había comentado en público que la computación cuántica estaba lejos de poder aportar valor al mercado, que en definitiva se trataba

de un futurable a muy largo plazo. Pues bien, durante su discurso inaugural en la conferencia en junio de 2025 para desarrolladores, GTC París, del fabricante de chips. Huang dicho que “la computación cuántica está llegando a un punto de inflexión”. Añadió “estamos a punto de poder aplicar la computación cuántica en áreas que puedan resolver problemas interesantes en los próximos años”.

Como veremos, hay disparidad de opiniones en el sector acerca de en qué momento los computadores cuánticos serán útiles (y con grandes ventajas) para problemas de cómputo de interés para las empresas.

Pero, tras conocer más en profundidad los avances más recientes de esta tecnología, Huang ahora aboga por invertir en esta tecnología.

Debido a su posición, y debido a su liderazgo en la tecnología de chips IA, su opinión es muy relevante.

Y dicha opinión coincidió en el tiempo con anuncios de proveedores como IBM acerca de su calendario de computadores cuánticos útiles (y más adelante, tolerantes a fallos) a estar disponibles en plazos más cortos que previstos anteriormente, así como al inicio de un cierto proceso de consolidación entre startups del sector, bien financiadas en los mercados. Todo ello incide también en el sentimiento de inflexión.

NVIDIA INVIERTE EN EL ECOSISTEMA CUÁNTICO



Dicho y hecho, Nvidia, que (¿de momento?) no desarrolla chips cuánticos, sí ha demostrado un gran apetito repentino en invertir en empresas de cuántica. De hecho, hasta septiembre 2025 ha invertido en cuatro empresas o startups cuánticas importantes, todas ellas usando qubits diferentes (fotónica, iones atrapados, átomos neutros y superconductores).

Hablaremos de qubits y sus diferentes tipos en la sección 5.

Lo relevante es ver cómo Nvidia, campeón de los chips para IA, ha tomado la rápida decisión de invertir en varias de las plataformas cuánticas en desarrollo – ya que, de momento, nadie sabe con certeza qué tipo de qubit será el (o los) ganadores.

SOFTBANK INVIERTE EN EL ECOSISTEMA CUÁNTICO

Softbank invierte en el ecosistema cuántico

MOBILE WORLD LIVE | DIRECTORIAL | ANALYST REPORTS | INDUSTRY | MARKETS | OPERATORS | BIG DATA | DEVICES | R&D | CLOUD | NETWORK TECH | DIGITAL INDUSTRIES | MORE

SoftBank seeks post-5G edge with quantum, AI-computing link

MWL, September 29, 2025

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

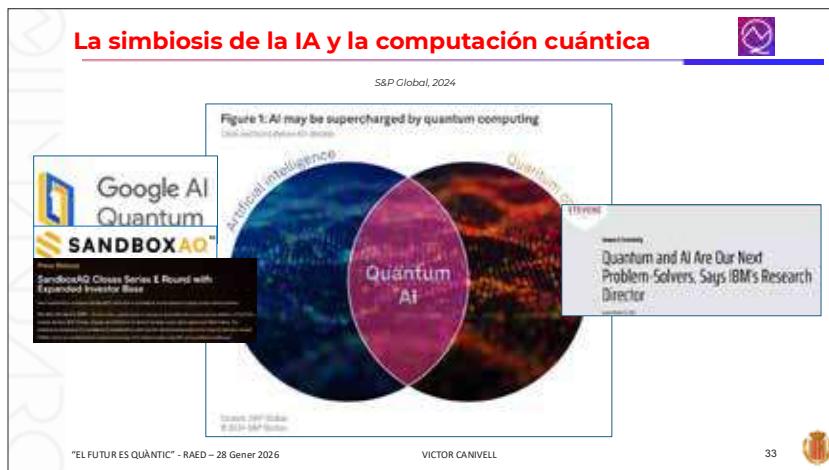
VÍCTOR CANIVELL

32

Este interés de Nvidia se repite también en otro de los grandes actores financieros en nuevas tecnologías, como es SoftBank de Japón. SoftBank es uno de los fondos de inversión en tecnología más conocidos a nivel internacional, con por ejemplo participaciones de control en ARM entre otros muchos intereses. Pues bien, recientemente en 2025, SoftBank está invirtiendo en proyectos para combinar IA con la tecnología de computación cuántica de Riken, también en Japón. Riken es el centro de investigación de High Performance Computing (HPC) o supercomputación más importante del país, y ha desarrollado tecnología de computación cuántica de primer nivel, en colaboración con Fujitsu y otros muchos grandes grupos industriales del país.

Esta alianza de SoftBank con Riken, para proyectos IA con cuántica y HPC, es otro ejemplo de esta tendencia – los grandes grupos industriales (como Nvidia) e inversores (como Softbank) están entrando de lleno en la computación cuántica.

LA SIMBIOSIS DE LA IA Y LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA



Y el motor de este interés es doble: si hoy la novedad y la disruptión, es la de la IA, la siguiente ola de disruptión será la de la cuántica.

Pero, y esto es lo más importante, la cuestión es que ambas revoluciones son simbióticas, se acelerarán mutuamente:

- Los sistemas de IA acelerarán el diseño y la ingeniería de los computadores cuánticos
- Los computadores cuánticos acelerarán el entrenamiento y las inferencias de la IA – y muy especialmente, les hará consumir mucha menos energía

El progreso a largo plazo probablemente dependerá de sistemas híbridos que combinen supercomputadores de IA con procesadores cuánticos para superar los obstáculos que ninguna de las dos tecnologías puede resolver por sí sola.

Es por ello que las grandes corporaciones con inversiones de I&D en IA y en cuántica (como puede ser IBM y Google) tie-

nen ambas actividades bajo el mismo paraguas, ya que está clara las ventajas que ambas funciones pueden aportarse entre sí.

El caso de Google se enmarca en su empresa del grupo SandboxAQ (donde la A viene de “AI”, y la Q viene de “quantum”). SandboxAQ ha cerrado en abril 2025 una ronda de financiación de 450 millones de dólares, lo que eleva el capital total recaudado a más de 950 millones de dólares desde su escisión de Alphabet en 2022. Ello refuerza la posición de SandboxAQ en el desarrollo de plataformas empresariales que integran IA y técnicas cuánticas.

Yendo más allá, esta simbiosis puede contribuir en el futuro a lo que se denominan Grandes Modelos Cuantitativos (LQM, por sus siglas en inglés), una clase de modelos de IA entrenados con física, química y matemáticas en lugar de texto o lenguaje. Estos son pasos en la dirección de dotar a estos sistemas de capacidades intelectuales avanzadas, como es por ejemplo Gemini 3 de Google anunciado en noviembre 2025, una potente herramienta de ayuda en el descubrimiento científico y matemático.

MÁS ALLÁ DE LA CONLEVANCIA

MÁS ALLÁ DE LA CONLEVANCIA

Más allá de la conlevancia


www.eldebate.com
EL DEBATE
Fundado en 1925
Juan Ignacio Cirac, Director del Instituto Max Planck de Optica Cuantica en Alemania. Entrevista: Víctor Canivell

Entrevista a Juan Ignacio Cirac, Director del Instituto Max Planck de Optica Cuantica en Alemania

**Juan Ignacio Cirac,
padre de la
computación
cuántica: «Está
condenada a convivir
con la IA, no son
competidoras»**

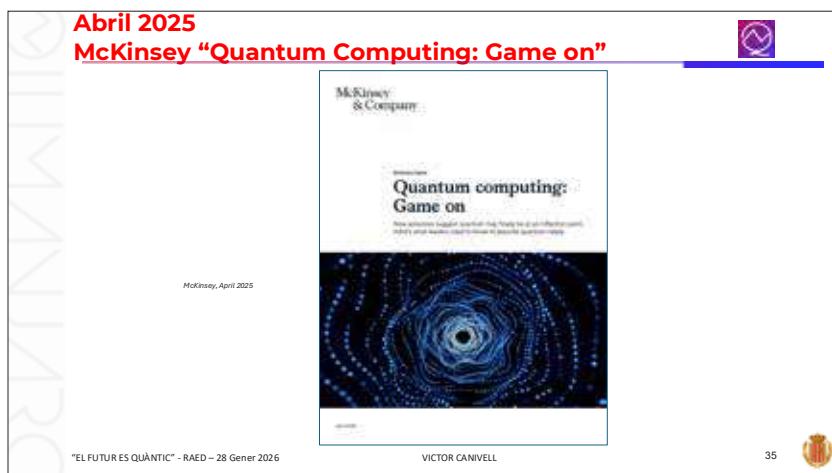
VÍCTOR CANIVELL

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2025
34

Este mismo mensaje lo refrendó el Prof. Ignacio Cirac en su reciente visita a Barcelona durante la “Biennal Ciutat i Ciència 2025”.

La cuántica y la IA, no sólo no son competidores, sino que se complementan y se apoyan mutuamente y, en consecuencia, para llegar mucho más lejos que sin contar con la otra tecnología.

ABRIL 2025: MCKINSEY “QUANTUM COMPUTING: GAME ON”



Todos estos avances han despertado el interés en computación cuántica por parte de las grandes consultoras de negocio, como este caso de McKinsey (cuya lectura es muy recomendable) con su expresión de “game on” para la cuántica ...

JUNIO 2025: “QUANTUM ACTION” DE LA G7



...como también de las principales organizaciones supranacionales, como por ejemplo el G7.

El G7 agrupa grandes economías, como son USA, Canadá, Reino Unido, Australia, Japón, Francia, Alemania e Italia, y sus prioridades reflejan las grandes tendencias a nivel internacional.

En la última reunión de sus líderes, llevada a cabo en Canadá en junio 2025, además de trabajar sobre los grandes conflictos del momento como Gaza y Ucrania, también tomaron la decisión de iniciar una “G7 Quantum Action” debido a la importancia geopolítica de la cuántica.

El anuncio indica que las tecnologías cuánticas, antes consideradas como proyectos científicos a largo plazo, se están integrando cada vez más en el ámbito de la infraestructura estratégica y la comercialización a corto plazo. Los países del G7 se están posicionando para liderar un campo que podría transfor-

mar sectores que abarcan desde la salud y la agricultura hasta las finanzas, la logística y la defensa. Los líderes del G7 destacaron los beneficios transformadores, así como las considerables amenazas, de las tecnologías cuánticas.

Y no es sólo el G7 quien se moviliza por la cuántica, todos los países industrializados también. Los del G20, y los del “Global South”, también. Por descontado, China tiene un plan nacional muy potente.

Otro ejemplo es la India, que acaba de anunciar un plan, como todos, muy ambicioso. Ha publicado una hoja de ruta nacional para convertirse en una de las tres principales potencias cuánticas mundiales para 2035. Esta hoja de ruta describe planes para escalar el hardware nacional, dominar los mercados de software cuántico e implementar la tecnología en sectores estratégicos y civiles. Sus objetivos incluyen al menos 10 startups cuánticas competitivas a nivel mundial que generen más de 100 millones de dólares cada una, la captura de más de la mitad del mercado mundial de software y servicios cuánticos, y despliegues tempranos en defensa, energía, logística, aviación, finanzas y salud. Comentaremos más adelante la situación geopolítica y los planes nacionales.

Bien, este es el contexto en que se mueve la computación cuántica.

A partir de ahora analizaremos primero, qué es la física cuántica, y después cómo incide en el sector de la computación, para dar lugar a la computación cuántica.



❖ SECCIÓN 3 - LA FÍSICA CUÁNTICA: SU MAGIA Y SU PRECISIÓN INIGUALABLES



SECCIÓN 3

LA FÍSICA CUÁNTICA: su magia y su precisión inigualables

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

37

Tras todo este contexto acerca de la importancia de las TIC en la economía y acerca de sus dos revoluciones en marcha y de su simbiosis, ha llegado el momento de describir, en esta Sección 3, qué es la física cuántica.

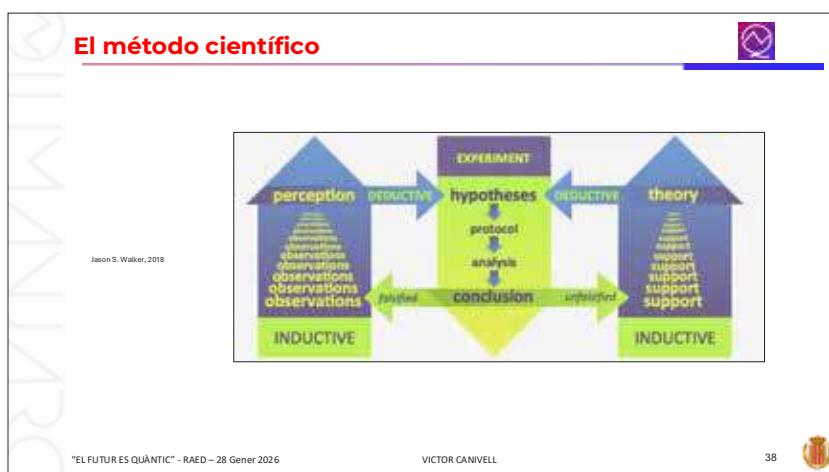
Todo el mundo ha oído hablar, o habrá leído, acerca de la física cuántica. Como se sabe, hay un áurea, un áurea muy merecida, de ser incomprensible, a la vez que muy potente.

Ello es totalmente cierto.

Como también lo es que se trata de la rama de la ciencia que ha llegado a describir fenómenos naturales con mayores precisiones, con cifras significativas de hasta quince o más órdenes de magnitud. Esta precisión ya es, de por sí, espectacular.

En este apartado daremos unas pinceladas para acercarnos a esta rama de la ciencia, y poder intuir por qué es tan fascinante – y la base de muchas nuevas tecnologías, en particular de las TIC (tanto de la computación convencional actual que ya usamos cotidianamente, como de la nueva computación cuántica en ciernes).

EL MÉTODO CIENTÍFICO



Antes de hablar de la cuántica, hemos de ver en base a qué procesos se construyen las teorías científicas, y cómo fue que se llegó a describir una teoría tan exótica.

La ciencia moderna, desde Newton en el siglo XVII, es una disciplina sistemática que construye y organiza el conocimiento en forma de hipótesis y predicciones comprobables sobre el universo. Lo de comprobable es crucial.

El método científico está bien establecido y busca explicar objetivamente los eventos de la naturaleza de manera reproducible. Se trata de un proceso sistemático para adquirir conocimiento

sobre el mundo natural mediante la observación, la experimentación y el razonamiento basado en la evidencia. Es un enfoque iterativo y flexible que se utiliza para validar las observaciones y minimizar los sesgos, en lugar de una fórmula rígida.

Los científicos suelen dar por sentado un conjunto de supuestos básicos necesarios para justificar el método científico: existe una realidad objetiva compartida por todos los observadores racionales; esta realidad objetiva se rige por leyes naturales y estas leyes se descubren mediante la observación sistemática y la experimentación. Las matemáticas son esenciales en la formulación de hipótesis, teorías y leyes, ya que se utilizan ampliamente en el modelado cuantitativo, la observación y la recopilación de mediciones. La estadística se utiliza para resumir y analizar datos, lo que permite a los científicos evaluar la confiabilidad de los resultados experimentales.

Pues bien, a finales del siglo XIX, los físicos habían dado con todas las teorías necesarias para explicar los fenómenos que hasta ese momento se conocían y se podía medir.

Incluían

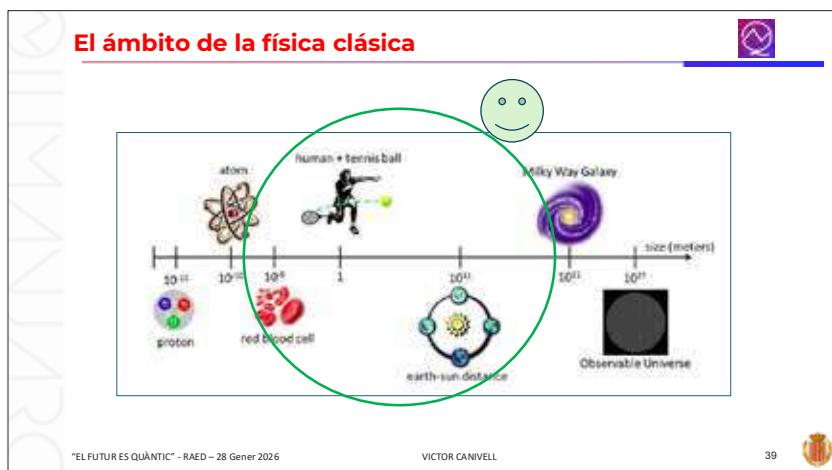
- las leyes del movimiento de Newton del siglo XVII, que explicaba entre otras, la mecánica, el movimiento de los objetos, la relación entre masas, movimiento y fuerzas, la gravitación y las observaciones estelares
- las leyes del electromagnetismo de Maxwell del siglo XIX, base entre otras de la naciente industria eléctrica de finales de siglo
- las leyes termodinámicas y de la entropía de Boltzmann, base entre otras de la revolución industrial del siglo XIX de las máquinas de vapor

Hasta el punto de que se ha atribuido a científicos de la talla de Lord Kelvin en 1900 aseveraciones del tipo: “Ya no queda nada nuevo que descubrir en la física. Todo lo que queda es la medición cada vez más precisa”.

Pero, como ocurre siempre en la ciencia (hasta la fecha), se empezaba a poder medir fenómenos naturales en ámbitos nuevos de experimentación, y resultaba que, de manera muy excepcional, quedaban fuera del marco de estas leyes conocidas. Es decir, las leyes clásicas no explicaban lo que ocurría.

Ello condujo a lo largo del siglo XX a descubrir nuevas leyes físicas, que por su naturaleza revolucionaria, y por el hecho de ser totalmente inesperadas, hicieron del siglo XX un siglo realmente sublime en cuanto a sus descubrimientos.

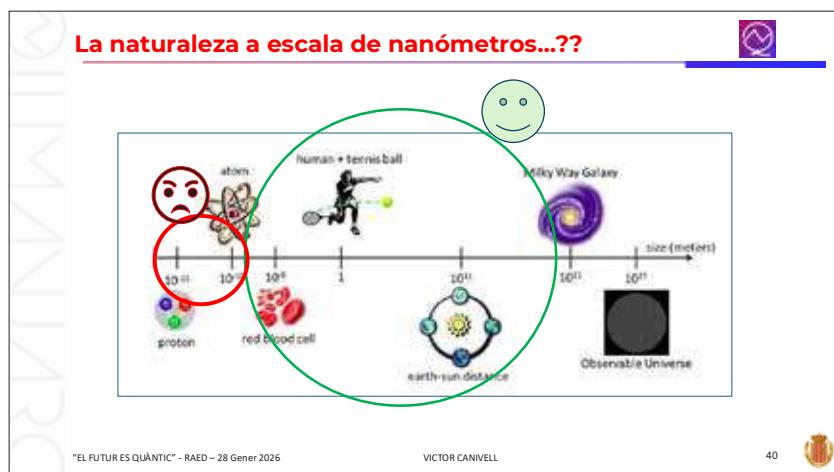
EL ÁMBITO DE LA FÍSICA CLÁSICA



Como se ha mencionado, las leyes de la física conocidas en ese momento (llamadas ahora de la física clásica, las de Newton, Maxwell y Boltzman) abarcaban un espectro enorme de dimensiones, desde observaciones por microscopio hasta las observaciones de las galaxias.

Todo cuadraba perfectamente.

LA NATURALEZA A ESCALA DE NANÓMETROS ...??

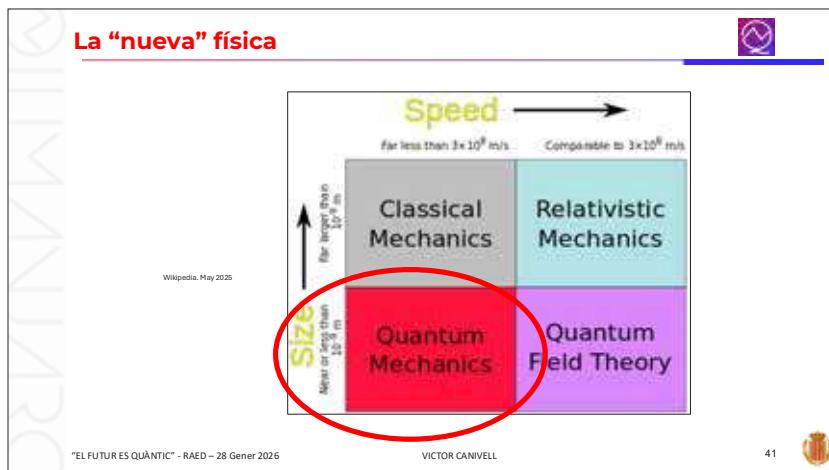


Pero al poder medir experimentos relativos a nuevos fenómenos, de, por ejemplo, a lo que ahora llamamos electrones, las leyes existentes no explicaban algunas de sus mediciones.

Así que hubo que buscar otras, y de ellas surgió la física del siglo XX.

Veamos algunos ejemplos.

LA “NUEVA FÍSICA”



Antes de ello, enmarquemos la física cuántica en el marco de estas nuevas leyes, ya que, a principios del siglo XX, hubo dos grandes revoluciones inesperadas, la cuántica y la relatividad.

Nosotros nos centraremos en la cuántica.

La cuántica es la teoría que explica con gran precisión los fenómenos de la naturaleza a escalas atómicas y subatómicas.

Estamos hablando de dimensiones de nanómetros, es decir de una millonésima de milímetros. Estos fenómenos son absolutamente lejanos a nuestra experiencia del mundo macroscópico en el que vivimos, y ello nos ha de hacer pensar y aceptar que quizás las reglas a estas escalas sean muy diferentes a nuestra experiencia diaria. De aquí que las leyes nos parezcan tan exóticas, que lo son y mucho. Por ejemplo, se pasa de una descripción determinista en las leyes clásicas a otras probabilísticas en las leyes cuánticas.

La otra revolución, que se gestó en las mismas décadas, fue la del estudio de fenómenos que incluían velocidades muy altas, como la luz, y para ello surgió la teoría de la relatividad y sus consideraciones acerca del binomio espacio-tiempo. Pero este es un tema que vamos a soslayar en este trabajo, ya que la computación cuántica se basa en la manipulación de estados cuánticos de la naturaleza no necesariamente relativistas. Por cierto, la relatividad es también fascinante. Y de hecho llegó un momento en que ambas teorías se conjugaron para explicar el mundo de las hoy llamadas partículas elementales subatómicas, en la teoría cuántica de campos.

Es importante recalcar que, aunque estas leyes (clásicas y cuánticas) de por sí contemplan conceptos y ecuaciones distintas, de hecho, se establece una cierta continuidad o emergencia entre la cuántica y la física clásica, en el sentido de que a medida que las dimensiones crecen, las leyes de un ámbito dan pie a las leyes del otro ámbito, jugando en ello un papel fundamental los fenómenos colectivos y estadísticos. En la práctica, cada serie de leyes se aplica en su contexto respectivo, pero coexisten sin generar incoherencias. En otras palabras, la física clásica no está equivocada, describe perfectamente el mundo en las escalas macroscópicas, y la ingeniería tradicional funciona perfectamente gracias a sus leyes, pero al entrar en el mundo microscópico, no nos valen, y las que sí valen son las cuánticas. Y de éstas se llega a las otras, al servir de base a la química y a la ciencia de materiales con sus propiedades macroscópicas. No se trata de dos universos disjuntos, como a veces uno puede imaginar, al estilo de situaciones como las que se encuentra Alicia, la protagonista de la novela de Lewis Carroll, *El País de las Maravillas*, un país separado, imaginario, sorprendente y absurdo a la vez.

ONU: 2025 AÑO INTERNACIONAL DE LA CUÁNTICA



Este año 2025 se conmemora el centenario de haberse establecido las bases completas de la física cuántica, y por ello la ONU lo celebra como el año internacional de la cuántica.

La relevancia de la cuántica se traduce en estimaciones acerca de estar en el origen de un tercio del PIB mundial actual, en base a todos los productos y servicios que se han podido desarrollar a partir de conocimientos y tecnologías que emanen de la física cuántica. Por ejemplo, todo el sector TIC, que hemos analizado anteriormente.

Es un logro descomunal.

Aunque nos queda el problema de la interpretación de la cuántica, en el sentido de poderla entender. De ahí la persistencia de símiles (siempre inexactos), símiles como la del famoso gato de Schrödinger, un “Gedanken-Experiment” que plantea el tema de probabilidad y superposición de estados de la naturaleza antes de su medición, temas a los que referiremos más adelante,

en base a un gato encerrado en una caja que contiene un veneno. Sin abrir la caja (sin medir) no sabemos si el gato está vivo o muerto. Sólo podemos plantear probabilidades. Y esto es lo que hace la cuántica, calcula dichas probabilidades. Hay un azar intrínseco en la naturaleza a nivel atómico, pero cuyas probabilidades sí sabemos calcular con gran precisión con la física cuántica. Así que, si bien el poder predictivo de la mecánica cuántica es muy claro, su nivel descriptivo o explicativo puede ser menos satisfactorio, lo que conduce a debates continuos sobre la naturaleza de la realidad que describe.

El tema del azar, incluso de discusiones de libre albedrío que se puedan plantear, quedan fuera de los aspectos prácticos de la ciencia y tecnologías cuánticas, tema de este trabajo, pero no dejan de ser apasionantes.

LA CUÁNTICA ES DIFERENTE



Antes hemos mencionado símiles habituales de la física cuántica a nivel macroscópico, como el del gato de Schrödinger.

La realidad es que la física cuántica se describe con unos conceptos tan alejado de nuestra experiencia, como el que representa este sketch de un esquiador en un New Yorker de 1940.

Este dibujo es un absurdo para nosotros, nunca hemos visto ni veremos una situación macroscópica de este estilo.

Pero, para explicar cómo funciona la naturaleza a escala atómica, sí nos hemos de plantear descripciones matemáticas que sugieren fenómenos como éste.

LA CUÁNTICA NO ES INTUITIVA

La cuántica no es intuitiva



"If you think you understand quantum mechanics,
then you don't understand quantum mechanics."
- Richard Feynman

Nobel Prize Physics 1965

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

44

Para dejarlo claro, múltiples científicos han dejado escrito que la física cuántica no se puede entender sin haber dedicado mucho esfuerzo en conocer los principios y estructuras matemáticas que la describen. Es más, no es que se “entienda” en términos coloquiales, sino que se trata de conocerla y saberla utilizar.

Y justamente la computación cuántica surge de la idea de aprovechar sus fenómenos exóticos para poder hacer cálculos.

Vayamos por pasos.

De momento daremos tres pinceladas de qué experimentos condujeron a la cuántica.

LA LUZ ES UNA ONDA ... Y SON PARTÍCULAS

La luz es una onda ... y son partículas

Photoelectric effect

Source: Bozeman Science July 2015

	Wave Nature of Light	Particulate Nature of Light
Reflection	✓	✓
Refraction	✓	✓
Interference	✗	✓
Diffraction	✗	✓
Polarization	✗	✓
Photoelectric effect	✓	✗

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026 VICTOR CANIVELL 45

El primero: resulta que la luz, que se supone que se describe como una onda de campos electromagnéticos, en ciertos casos se comporta, no como una onda, sino como si fuesen partículas. Esto parece absurdo, o tenemos una onda o tenemos una partícula. ¿En qué quedamos?

La luz a finales del siglo XIX se había entendido perfectamente como una onda electromagnética, en cuanto que permitía explicar todos sus fenómenos conocidos, como reflexión, refracción, difracción, polarización etc.

Pero cuando se estudió el llamado fenómeno fotoeléctrico, hasta entonces desconocido ya que no se podían medir, resultó que la única manera de poderlo explicar era considerando que la luz consistía en una serie de partículas (que ahora llamamos fotones). Fue idea de Einstein en 1905, aunque en su momento pasó desapercibido por interpretarse como una curiosidad teórica. Pero, a la postre, le valió el Premio Nobel de 1921, al constatarse la originalidad y contribución fundamental de esta idea.

Hoy se interpretan estas ondas, no como ondas en un medio, sino como ondas de probabilidades. Y las partículas, los fotones, son partículas de energía, pero sin masa. En ese momento, estos detalles se desconocían.

Pero la cuestión es que sí, la luz tiene una doble personalidad, lo cual no cuadraba en la física clásica.

LAS PARTÍCULAS ... SON TAMBIÉN ONDAS

Las partículas ... son también ondas

The diagram illustrates the double-slit experiment. On the left, a box labeled 'PARTICLE' shows particles passing through two slits, 'SLIT A' and 'SLIT B', onto a screen where they form a pattern of individual dots. On the right, a box labeled 'WAVE' shows waves passing through the same two slits, creating a continuous interference pattern on the screen. A legend at the bottom right states: 'If particles behaved classically, the pattern they produce on a screen would be the sum of patterns created by particles passing through individual slit.' and 'But they are quantum, though, and produce an interference pattern that cannot be explained by classical logic.'

New Scientist

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

46

Y después resultó que esta doble personalidad también se aplicaba a las partículas.

El experimento en cuestión, también inicialmente realizado con electrones, que son partículas, pasando a través de dos rendijas adecuadas, daba lugar a una figura de interferencia (como si fueran ondas) en pantallas dispuestas detrás, incluso cuando se envían de una en una. Pero si fueran partículas, debería haber dos franjas, no múltiples franjas, típicas de fenómenos ondulatorios.

El desconcierto era total.

PARTÍCULAS & ONDAS

Fue el Premio Nobel de 1924, De Broglie, quien puso orden en este desconcierto de las dobles personalidades, llegando a la conclusión de que realmente toda partícula tenía una onda asociada y viceversa.

¿Como puede ser?

Se debe a que la relación entre la longitud de onda y la masa con su velocidad viene regida por un número extremadamente pequeño (la llamada constante “ h ” de Planck, que consiste un numero con 34 decimales).

Y por ello, en ámbitos macroscópicos es imposible de ver o notar, ya que para una pelota de 100 gr con una velocidad de 40 m/s, su longitud de onda correspondiente (que sí existe) es del orden de treinta y cuatro decimales de metro, es decir completa y absolutamente inobservable para nosotros en nuestra vida cotidiana. A considerar que los átomos tienen tamaños del orden de diez decimales de metro, y sus núcleos de quince decimales de metro. En otras palabras, totalmente invisible para nosotros. Nunca veremos al esquiador del New Yorker pasando, a la vez (!) a ambos lados del abeto.

Pero, para átomos o electrones, es suficientemente “grande” (del orden de “sólo” quince o menos órdenes de magnitud de metro), como para que sí se pueda medir en ciertos fenómenos de manera indirecta (como el caso del efecto fotoeléctrico). Es interesante saber que, en la actualidad, se está intentando medir directamente este tipo de fenómenos para ciertos objetos como macromoléculas, para emular al famoso esquiador.

Pero no deja de ser una situación sorprendente y que la física clásica no puede explicar.

INCERTIDUMBRES INTRÍNSECAS

Un tercer aspecto sorprendente que describe la cuántica es el principio de incertidumbre.

Se trata de que no puede haber conocimiento exacto de ciertas variables conjugadas de las partículas, es decir, y por ejemplo, la determinación de la posición y de la velocidad de una partícula: su multiplicación, ha de ser necesariamente mayor que un número muy pequeño, donde de nuevo entra en juego la constante de Planck, la de los 34 decimales.

El Premio Nobel Heisenberg llegó a esta conclusión sobre la base de que, en el mundo de partículas muy pequeñas, al medir sus propiedades e interaccionar con ellas, necesariamente se verían afectadas.

Cuando medimos la posición de un objeto macroscópico, como el de nuestro móvil depositado sobre nuestro escritorio, sabemos con toda la certeza que nos dan nuestros instrumentos de medida, dónde está y que no se mueve – ya que el cálculo de

las incertidumbres es tan “grosero” a escala atómica, que para nosotros de hecho dichas incertidumbres son efectivamente “cero”. Excepto que, cuando medimos partículas a escala atómica, dichas incertidumbres se vuelven relevantes.

Otra idea sorprendente.

IDIOSINCRACIA Y PARADOJAS DE LA CUÁNTICA

Idiosincrasia y paradojas de la cuántica

The collage includes a cat superimposed on a chair, Schrödinger's cat, and a diagram titled "Quantum Properties" showing Superposition and Entanglement.

Source: quantumcomputingtech.blogspot.com

• Dualidad onda-partícula
• Principio de incertidumbre
• Impacto de las medidas
• Aleatoriedad y probabilidades
• **SUPERPOSICION**
• **ENTRELAZAMIENTO**
• **EFFECTO TÚNEL**

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

49

Como resumen, no vamos a entrar a describir la cuántica aquí, ya que es un tema muy complejo, imposible de exponer en este documento.

Baste decir que hay una serie de conceptos fundamentales que han de ver con el concepto de probabilidad: las probabilidades de los observables (de lo que podemos medir) se comportan como ondas de probabilidad, por lo que en consecuencia dan lugar a fenómenos de superposición. Por otro lado, en la descripción de la naturaleza macroscópica no hay probabilidades,

hay certezas, ya que nunca llega a contemplar ni le influyen directamente las sutilezas del mundo atómico.

Justamente, este fenómeno de la superposición, consustancial a la naturaleza de los estados cuánticos, se puede aprovechar en la teoría de la computación cuántica.

Por cierto, cuando hablamos de estado cuánticos, nos referimos a estados de la naturaleza que siguen las leyes de la física cuántica. Pueden ser fotones de luz, átomos aislados, fenómenos de superconductividad (que no son partícula en si, pero que sí se rigen por las mismas leyes de la física cuántica) u otros. Una condición para que estos estados sigan estas leyes de la física cuántica es que estén aisladas del entorno, lo cual ha sido muy difícil de replicar en el laboratorio - hasta hace poco tiempo. Y es esta novedad precisamente la que dará pie a la computación cuántica.

Otro fenómeno de la física cuántica fundamental para la teoría de la computación cuántica es el entrelazamiento. Se trata de que, una vez dos estados cuánticos se hayan correlacionado al estar cercanos, ocurre que la medición de ciertas propiedades en uno de los dos nos informa automáticamente de la misma propiedad del otro estado, por muy alejado que esté. No se trata de que haya una comunicación instantánea (que violaría una de las reglas clave de la relatividad), sino que es algo consustancial en la naturaleza, por difícil que nos sea de entender. En nuestro mundo macroscópico esto del entrelazamiento entre objetos macroscópicos tampoco pasa, es decir, no se ve en la práctica.

Finalmente, el tercer fenómeno cuántico que se puede usar en la computación cuántica es el llamado efecto túnel. Está muy ligado a la idea de las probabilidades y de la superposición. Ello permite que, en ciertas condiciones, partículas que están ence-

rradas en un pozo puedan salir del mismo a pesar de no tener la energía suficiente para encaramarse a sus bordes, es como si pudieran pasar por un túnel imprevisto.

El secreto está en que los teóricos de la computación aprovecharon la conjunción de estos tipos de fenómenos naturales de mundo atómico para construir modelos de cálculo, que los experimentales han aprovechado para construir físicamente equipos de cálculo con unas capacidades que pueden ser exponencialmente mejores que los computadores convencionales de CPUs, GPUs y HPC de la actualidad – para ciertos tipos de cálculo.

LA INIGUALADA EXACTITUD DE SUS PREDICCIONES

La inigualada exactitud de sus predicciones

1:1 000 000 000 000

"EL FUTUR ÉS QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

50

A pesar del exotismo de las propiedades en las que se basa la física cuántica, resulta que dicha teoría resulta ser extremadamente precisa, con predicciones verificadas con un grado inigualable por cualquier otra teoría científica, coincidiendo consistente-

mente con los resultados experimentales de forma nunca vista en la historia de la ciencia.

Esta precisión se demuestra en su exitosa aplicación a tecnologías como microchips y láseres, y en mediciones de alta precisión. El mejor ejemplo es que el valor medido del momento magnético anómalo del electrón concuerda con la teoría hasta 10 cifras significativas, lo cual constituye un nivel de coincidencia asombroso. La teoría no falla necesariamente con 10 cifras significativas; ese es simplemente el nivel actual de error experimental. En definitiva, la mecánica cuántica (y la consiguiente teoría cuántica de campos, que describe la interacción de la luz y la materia, específicamente cómo las partículas cargadas, como los electrones, interactúan mediante el intercambio de fotones) ha realizado las predicciones más precisas de toda la ciencia.

Otro ejemplo son los relojes cuánticos. Los más precisos alcanzan una incertidumbre tal que solo se atrasarían o adelantarián un segundo cada 30 000 millones de años. Son significativamente más precisos que los relojes atómicos estándar actuales, que se desvían aproximadamente un segundo cada 300 millones de años.

Hay que decir que, aunque la teoría cuántica tiene una inmensa precisión práctica, aún existen ciertas dudas teóricas acerca de su compatibilidad con otros modelos físicos, como la relatividad general, y algunas dificultades conceptuales en su interpretación. Se trata de una cuestión de futuro, que requiere de más avances en la investigación básica. Es decir, no estamos ahora tampoco en el final de la física, aun quedan cosas que explicar, ¡afortunadamente para los científicos!

En cualquier caso, con esta teoría cuántica tan exótica y precisa, ya se ha podido desarrollar a fecha de hoy toda una serie de

productos e industrias que han impactado de manera crucial en nuestras vidas, como indica el siguiente gráfico.

LOS FRUTOS DE LA CUÁNTICA - HOY



Este cuadro representa los ejemplos más llamativas de las tecnologías que usamos a diario y que están basadas en el conocimiento de la física cuántica, es decir, sin cuántica nada de todo ello tendríamos hoy:

- Los computadores actuales con sus chips, los teléfonos móviles, internet etc. y por tanto las aplicaciones informáticas en que estamos embebidos como google, whatsapp, redes sociales, IA – todo el sector TIC
- Cámaras digitales para imágenes
- Lasers para fibras ópticas, microcirugía, almacenamiento de datos etc.
- LEDs para iluminación con mejor solidez, duración etc.

- GPS con relojes atómicos para posicionamiento de pocos metros
- MRI para las resonancias de imágenes médicas
- Paneles solares
- etc.

La física cuántica ha permitido entender bien las bases de la química, completar la tabla periódica de los elementos y estudiar las propiedades de los materiales de manera a, por ejemplo, conocer y describir los elementos semiconductores, base de los transistores (1947), y por ello de los circuitos integrados (1971), a su vez la base sobre la que se ha construido todo el hardware de la industria TIC actual.

Por ello, y como se ha mencionado anteriormente, hay estimaciones de que la física cuántica está en la base de un tercio del PIB mundial actual, o lo que es lo mismo, sin el conocimiento desarrollado a principios del siglo XX acerca de la cuántica, seríamos casi un tercio más pobres.

Un hecho poco conocido.

Pero, hablamos del futuro, no ha sido hasta el último par de decenios en que se ha podido detectar y manipular estados cuánticos individuales, los que en su dinámica natural siguen las leyes de la cuántica con sus fenómenos de superposición, entrelazamiento y efecto túnel de manera a poderlas usar como plataforma de computación.

Esta es la razón por la que en algunos círculos se habla en la actualidad de una “segunda revolución cuántica”, justamente la de poder manipular efectos cuánticos individuales.

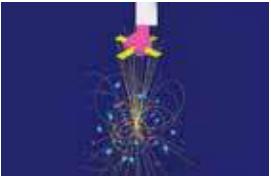
LA NUEVA FRONTERA DE LA CUÁNTICA: MANIPULAR ESTADOS INDIVIDUALES

**La nueva frontera de la física cuántica:
manipular estados individuales**

NOBEL 2012 Physics
Manipulating individual quantum systems

[Últimos artículos](#) & [Hallazgos](#)

[Nature](#) 492, 56 (2012) | Cite this article



“Los galardonados han inventado .. métodos para **medir y manipular** partículas **individuales** preservando su naturaleza **mecánico-cuántica**, de maneras que antes se creían inalcanzables...”

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

52

La base experimental de esta manipulación individual en el laboratorio es la razón por la que se concedió el premio Nobel de Física 2012.

La citación explica “Los Premios Nobel han abierto la puerta a una nueva era de experimentación con la física cuántica al demostrar la observación directa de partículas cuánticas individuales sin destruirlas. Para partículas individuales de luz o materia, las leyes de la física clásica dejan de aplicarse y la física cuántica toma el relevo. Sin embargo, las partículas individuales no se aíslan fácilmente de su entorno y pierden sus misteriosas propiedades cuánticas en cuanto interactúan con el mundo exterior. Por lo tanto, muchos fenómenos aparentemente extraños predichos por la física cuántica no podían observarse directamente, y los investigadores solo podían realizar experimentos mentales que, en principio, podrían manifestar

estos fenómenos extraños. Gracias a sus ingeniosos métodos de laboratorio, Haroche y Wineland, junto con sus grupos de investigación, han logrado medir y controlar estados cuánticos muy frágiles, que antes se consideraban inaccesibles para la observación directa. Los nuevos métodos les permiten examinar, controlar y contar las partículas.”

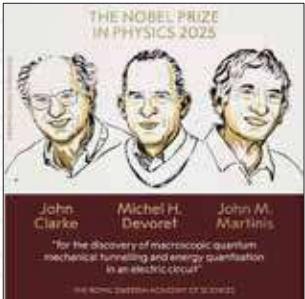
La ventaja de la computación cuántica reside en la posibilidad de controlar fenómenos cuánticos, como la superposición y el entrelazamiento. Preservar estos fenómenos cuánticos exige que el bit cuántico (o qubit, por la contracción de “quantum bit”) permanezca bien aislado del entorno. Por otro lado, un computador no es sólo un experimento científico, sino una máquina que puede programarse para realizar tareas específicas, lo cual requiere control, y en esta dicotomía reside el principal problema de construir computadores cuánticos.

Como veremos más adelante, además de esta dicotomía entre aislamiento y control, existe el reto de la conectividad. En los computadores convencionales, la información se copia y se transmite libremente a través de circuitos cableados. En el mundo cuántico, los estados desconocidos no se pueden copiar, y sólo se pueden mover a una ubicación física diferente. En consecuencia, ejecutar lógica con qubits, que pueden estar físicamente alejados, no es trivial, y agrava significativamente el desafío de escalar los computadores cuánticos.

Aunque hay vías de desarrollo abiertas en la actualidad, para resolver esta cuestión.

LA NUVA FRONTERA DE LA CUÁNTICA: FENÓMENOS MACROSCÓPICOS

**La nueva frontera de la física cuántica:
fenómenos macroscópicos**



THE NOBEL PRIZE
IN PHYSICS 2025

John Clarke Michel H. Devoret John M. Martinis

"for the discovery of macroscopic quantum mechanical tunnelling and energy quantization in an electric circuit"

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

"...Los experimentos de los galardonados demostraron que las propiedades de la mecánica cuántica pueden hacerse concretas a escala macroscópica..."

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

53

Otro gran avance reciente de la física cuántica, de gran interés también para la computación cuántica, ha sido merecedor del Premio Nobel 2025. Se trata de llevar efectos cuánticos a escalas macroscópicas (es decir, a escalas no sólo de nanómetros). Estos fenómenos se hallan en la base de uno de los tipos de computadores cuánticos más arraigado, el de los qubits superconductores, que comentaremos más adelante y que usa Quilimanjaro.

Una cuestión fundamental en física es el tamaño máximo de un sistema que puede demostrar efectos mecánico cuánticos. Los galardonados en física de 2025 realizaron experimentos con un circuito eléctrico en el que demostraron tanto el efecto túnel cuántico, como los niveles de energía cuantizados en un sistema lo suficientemente grande como para sostenerlo en la mano.

Como hemos comentado anteriormente, la mecánica cuántica permite que una partícula se mueva directamente a través de una barrera mediante un proceso llamado efecto túnel. En

cuanto intervienen grandes cantidades de partículas, los efectos cuánticos suelen volverse insignificantes. Los experimentos de los galardonados demostraron que las propiedades cuánticas pueden concretarse a escala macroscópica.

Incluso para un campo que a menudo se considera muy difícil de seguir, este descubrimiento suena desconcertante. Pero sus implicaciones han sido profundas y de gran alcance. “Esto es algo que conduce al desarrollo del computador cuántico. Mucha gente está trabajando en computación cuántica, y nuestro descubrimiento es, en muchos sentidos, la base de esto”, declaró el profesor Clarke por teléfono en la conferencia de prensa, momentos después de que le comunicaran su victoria.

Devoret es el científico jefe de Google Quantum AI, Martinis cofundó la startup cuántica Qolab y Clarke continúa investigando en la Universidad de California en Berkeley. El premio se otorga durante 2025, el Año Internacional de la Ciencia Cuántica, reafirmando que la investigación cuántica no es una abstracción, sino el motor de la innovación moderna.

El sector cuántico ha alcanzado así un importante punto de inflexión, validando su transición de la teoría a la industria: este premio honró a los pioneros de los qubits superconductores, legitimando instantáneamente los esfuerzos de hardware a nivel mundial. Veremos más adelante que la startup de Barcelona, Quilimanjaro, trabaja precisamente con estos tipos de qubits.

Quizás el legado más profundo del trabajo del trío sea filosófico. Al demostrar que los sistemas macroscópicos pueden exhibir comportamiento cuántico, desafilaron una de las suposiciones más profundas de la física: la existencia de una frontera estricta entre los mundos cuántico y clásico. Sus resultados

mostraron que la división no es absoluta, sino condicional, determinada por los materiales, la temperatura y la precisión del control.

También replantea nuestra forma de pensar sobre el mundo, como un continuo donde la realidad clásica es simplemente la mecánica cuántica vista a escala. Tal como apuntábamos al hablar de la “nueva física” y el Año Internacional de la Cuántica.

LA NUEVA FRONTERA DE LA CUÁNTICA: COMPUTACIÓN, COMUNICACIONES Y SENSÓRICA



Estos avances en las últimas dos décadas son la base de la nueva ola de tecnología que permite desarrollar:

- Computación cuántica muy potente
- Comunicaciones cuánticas muy seguras
- Sensórica y metrología ultrasensible

En los tres casos se trata de mejoras de prestaciones de órdenes de magnitud, de ello su acepción como “segunda revolución cuántica”.

La computación cuántica es un campo multidisciplinario que abarca aspectos de la informática, la física y las matemáticas y que utiliza la mecánica cuántica para resolver problemas complejos más rápido que en las computadoras clásicas.

La comunicación cuántica es el uso de la mecánica cuántica para transmitir información de forma segura, aprovechando principios como el entrelazamiento y la superposición para crear redes de comunicación imposibles de hackear.

La sensórica cuántica utiliza los principios de la mecánica cuántica para crear sensores significativamente más precisos y sensibles que los clásicos. Esta tecnología permite medir magnitudes físicas como los campos magnéticos, el movimiento y el tiempo con extrema precisión, aprovechando los fenómenos cuánticos a nivel atómico. Sus posibles aplicaciones son muy diversas, desde el diagnóstico médico y la navegación hasta la geofísica, la defensa e incluso la ciberseguridad.

El grado de madurez es diverso, con productos ya comerciales en los casos de sensórica y comunicaciones, mientras que la computación aún está en una fase de prototipos – prototipos muy prometedores, y que como veremos, van a permitir resultados muy espectaculares en los próximos cinco a quince años.

En este documento nos centramos en la computación cuántica.

Respecto a la computación, se puede argumentar que la física cuántica, en su primera etapa, ha dado lugar a la revolución de los computadores, mientras que en su segunda etapa, al ser

ahora capaces de manipular estados cuánticos de la naturaleza, da lugar ahora a la revolución de la computación cuántica, la de tratar con información codificada cuánticamente.

En otras palabras, pasamos de la revolución que ha consistido en construir los equipos físicos de computación actuales que trabajan con bits (en base a transistores) a la nueva revolución de trabajar con computadores cuánticos que trabajan con información cuántica (en base a qubits).

Ya hemos visto al empezar, con al aviso de la “apocalipsis cuántica”, cómo computadores cuánticos suficientemente potentes (que no son los que tenemos hoy) podrán romper prácticamente toda la criptografía usada hoy en internet y blockchain. Justamente, las comunicaciones cuánticas permiten superar este tipo de problemas, ya que permiten construir aparatos de comunicaciones intrínsecamente seguros, en cuanto basados en principios de la naturaleza (que no se pueden obviar).



❖ SECCIÓN 4: LA COMPUTACIÓN CONVENCIONAL

The graphic features a red decorative border. In the top left corner is a small gold-colored logo. In the center is a large red bold font title "SECCIÓN 4". In the top right corner is a blue circular logo with a white symbol. At the bottom center is a large red bold font title "LA COMPUTACIÓN CONVENCIONAL". At the very bottom of the page, within the graphic area, are three small lines of text: "“EL FUTUR ES QUÀNTIC” - RAED – 28 Gener 2026", "VÍCTOR CANIVELL", and "55".

Antes de analizar la computación cuántica, en esta Sección 4 se analizará en base a qué y cómo surgió y se ha desarrollado la computación actual, es decir, nuestros laptops, nuestros móviles, y todos los servicios asociados que se han convertido en nuestro entorno vital, sin el que difícilmente podemos desarrollar nuestras vidas.

No únicamente se revisará hasta dónde se ha llegado en capacidades de cálculo, sino que, también se analizará cuáles son tres límites insuperables a los que se enfrentan las TIC actuales, sus límites estructurales.

Ello dará pie, más adelante, a ver cómo la computación cuántica es un instrumento clave para superarlas. Como veremos, de ahí su relevancia.

LA COMPUTACIÓN CONVENCIONAL: SUS ORÍGENES EN LA FÍSICA CUÁNTICA



SECCIÓN 4.a



La computación convencional: sus orígenes en la física cuántica

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VÍCTOR CANIVELL

56

Hasta aquí hemos hablado mucho del sector de las TIC, pero sin definir en qué consiste la computación digital convencional que usamos a diario de manera transparente. Sí hemos mencionado que la física cuántica ha sido crucial para su desarrollo.

La computación trata de poder realizar cálculos, y de manipular todo tipo de informaciones, basados en aparatos de cálculo que sean programables.

La computación actual consiste en conseguir unos resultados (outputs de información) a partir de unas entradas (inputs de información) tras haber pasado dicha información (en formato digital de bits) por una serie de manipulaciones o puertas lógicas.

Y la manera práctica de fabricar estos bits han sido, hasta la fecha, los transistores.

Veamos las bases de lo que entendemos hoy por computación.

APARATOS DE CÁLCULO

Aparatos de cálculo

The image displays three historical calculating devices. On the left is a copy of a Roman abacus, a rectangular frame with horizontal rods and beads. In the center is the Antikythera mechanism, a complex bronze gear system used for astronomical calculations. On the right is a slide rule, a long, thin ruler with logarithmic scales.

Abaco (4.000 años)

Máquina de predicción de posiciones de los planetas (S. I a.C.)

Regla de cálculo (S. XVII)

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

57

El primer dispositivo conocido como herramienta de cálculo es el ábaco. Un ábaco es una herramienta de cálculo que se utiliza deslizando fichas a lo largo de varillas o ranuras para realizar funciones matemáticas. Además de calcular las funciones básicas de suma, resta, multiplicación y división, el ábaco puede calcular raíces hasta el grado cúbico. Los ábacos se han utilizado en diversas partes del mundo durante más de 4000 años.

Otros aparatos interesantes fueron las máquinas de predicción de mareas, computadoras analógicas que se utilizaron para predecir la hora de las mareas altas y bajas en todo el mundo desde finales del siglo XIX hasta la era digital. La primera máquina de predicción de mareas fue diseñada y construida en Londres en 1873. Se desarrolló como respuesta a la creciente presión de las líneas navieras comerciales hacia mediados del siglo XIX, que querían un mayor número de predicciones de mareas más precisas y con mayor rapidez de lo que se podía calcular a mano. Hubo un precedente sorprendente de este tipo de máquina de predicción analógica, en Grecia en el Siglo I a.C. para el cálculo de las posiciones de los planetas y de los eclipses.

Finalmente, una regla de cálculo es un dispositivo informático mecánico utilizado para realizar cálculos matemáticos, en particular multiplicación y división, antes de la llegada de las calculadoras electrónicas. Consiste en escalas logarítmicas sobre una regla deslizante y una base, lo que permite a los usuarios alinear las escalas y leer los resultados. Se desarrolló en el siglo XVII basándose en el trabajo emergente sobre logaritmos de John Napier. Permitía realizar cálculos más rápido y con menos errores que evaluarlos en papel. Antes de la llegada de la calculadora científica de bolsillo, era la herramienta de cálculo más utilizada en ciencia e ingeniería. La facilidad de uso, la disponibilidad y el bajo coste de la regla de cálculo hicieron que su uso siguiera creciendo en los '50s y '60s, incluso con la introducción de las computadoras electrónicas digitales. Sin embargo, tras la introducción de la calculadora científica portátil HP-35 en 1972 y su abaratamiento a mediados de la década de 1970, las reglas de cálculo quedaron prácticamente obsoletas y dejaron de utilizarse con la llegada de los computadores personales en los '80s.

LOS COMPUTADORES PROGRAMABLES

Los computadores programables

The diagram illustrates the evolution of computing. On the left, a photograph of a complex mechanical calculator from the 19th century is labeled "Cálculo fijo o programmable manualmente (S.XIX)". On the right, a block diagram of a 1948 programmable computer is labeled "Programmable por software (1948)". The computer architecture is shown with an "Input Device" connected to a "Central Processing Unit" (which contains a "Control Unit" and an "Arithmetic/Logic Unit"). The CPU is also connected to a "Memory Unit". An arrow points from the CPU to an "Output Device".

Source: Science Museum

Cálculo fijo
o
programmable manualmente (S.XIX)

Programmable por software
(1948)

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

58

El avance más importante fue diseñar y construir máquinas de cálculo programables, es decir, que realizasen cálculos en base a algoritmos programables almacenados en el mismo equipo, sin tener que hacer ningún ajuste mecánico manual.

Las primeras ideas de máquinas programables surgieron del trabajo de John Babage en Inglaterra en el siglo XIX y la primera propuesta de programación vino de la mano de Ada Lovelace, la primera programadora de la historia.

Un paso importante en el desarrollo de la informática se dio en 1936, cuando Alan Turing presentó la idea teórica de una máquina universal, posteriormente llamada máquina de Turing, capaz de computar cualquier cosa computable. El concepto central de la computadora moderna se basó en sus ideas.

Estos computadores utilizaron bits (ceros y unos) para representar información.

Estos bits se representaron inicialmente con interruptores físicos y lógica de relés en los primeros computadores electromecánicos. Estas fueron enormes y contundentes proezas de ingeniería, y era evidente la necesidad de una mejor forma de representar los bits.

Las primeras máquinas de computación tenían programas fijos. Algunos computadores muy sencillos aún utilizan este diseño, ya sea por simplicidad o con fines de aprendizaje. Por ejemplo, una calculadora de escritorio (en principio) es un computador con programa fijo. Puede realizar operaciones matemáticas básicas, pero no puede ejecutar un procesador de textos ni juegos. Cambiar el programa de un equipo con programa fijo requiere re-cablear, reestructurar o rediseñar la máquina. Los primeros computadores no estaban tanto “programados” como “diseñados” para una tarea específica. La “reprogramación”, cuando era posible, era un proceso laborioso que comenzaba con dia-

gramas de flujo y notas en papel, seguido de diseños de ingeniería detallados y, finalmente, el a menudo arduo proceso de re-cablear y reconstruir físicamente el equipo.

Otro paso fundamental en el desarrollo de los computadores fue el de Von Neumann, quien en 1948 propuso un computador con un programa almacenado. Para ello utiliza el mismo mecanismo subyacente para codificar tanto las instrucciones del programa como los datos, a diferencia de los diseños que utilizan mecanismos como el cableado discreto de tableros de conexiones o circuitos de control fijos para la implementación de instrucciones. Los computadores con programa almacenado representaron un avance con respecto a los computadores reconfigurados manualmente o de función fija de los '40s, como ENIAC. Estos se programaban configurando interruptores e insertando cables de conexión para enrutar datos y señales de control entre varias unidades funcionales. Configurar y depurar un programa en ENIAC de 1946 podía llevar tres semanas.

TODA INFORMACIÓN SE PUEDE REPRESENTAR CON BITS

Toda información se puede representar con bits



"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

59

La información que se utiliza en los computadores se codifica en base a 0s y 1s., los bits. Todo tipo de información, sean cifras, letras, palabras, colores, música, todo.

Se trata de registrar todos estos tipos de información en base a unos registros previamente acordados. Por ejemplo, en un registro tipo byte (de ocho bits, por tanto, con 256 opciones) se pueden representar todas las letras del abecedario, todos los números y muchos otros símbolos). Una vez acordado el tipo y tamaño del registro, la lógica del computador los manipula adecuadamente para realizar las tareas de ordenamiento y/o de cálculo correspondiente.

Es curioso observar como en español usamos indistintamente la acepción proveniente del francés (ordenador) como la del inglés (computador), ya que en ambos idiomas se decanta la denominación del equipo en una de sus habilidades, la de ordenamiento o la de computación. Ambas tareas son las básicas que hacen estos computadores.

El bit, como decíamos, es la unidad de información más básica en la informática y comunicación digital. Su nombre es una abreviatura de “dígito binario” en inglés, y fue acuñado por Claude Shannon en 1948. El bit representa un estado lógico con uno de dos valores posibles.

El bit teórico puede implementarse físicamente con un dispositivo de dos estados. Estos pueden ser las dos posiciones de un interruptor eléctrico, dos niveles distintos de voltaje o de corriente permitidos por un circuito, dos niveles distintos de intensidad de luz, dos direcciones de magnetización o polarización, la orientación del ADN biciatenario reversible, etc.

Quizás el primer ejemplo de un dispositivo de almacenamiento binario fue la tarjeta perforada usada por los primeros fabrican-

tes de computadoras como IBM. Una variante de esa idea fue la cinta de papel perforada. En todos esos sistemas, el medio (tarjeta o cinta) conceptualmente transportaba una matriz de posiciones de agujeros; Cada posición podía ser perforada o no, transportando así un bit de información.

NÚMEROS, TEXTOS, IMÁGENES, COLORES, SONIDOS ...

Números, textos, imágenes, colores, sonidos...

The diagram illustrates the relationship between color depth and the number of bits. It consists of three horizontal bars, each representing a different bit depth. Each bar is composed of a series of vertical color bands transitioning through the visible spectrum. The top bar is labeled "8 bits", the middle bar "10 bits", and the bottom bar "12 bits". The number of distinct colors in each bar increases with the bit depth, demonstrating how more bits allow for a richer color palette. The background of the slide features a faint watermark of the word "QUÀNTIC" vertically along the left side.

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

60

Aunque en principio no parece evidente cómo representar colores a base de bits, es precisamente lo que hacen todos nuestros computadores y dispositivos electrónicos.

Lo mismo ocurre con la música.

De manera que necesitamos dispositivos físicos que puedan representar dos estados alternativos, pero necesitamos que sean, entre otras cosas, muy compactos, rápidos en su respuesta, baratos de fabricar en volumen y resistentes.

Los primeros bits se representaban en válvulas de tubos de vacío, que son muy frágiles, voluminosos y consumen mucha energía.

Fue la física cuántica lo que permitió estudiar los elementos semiconductores, y en base a ello se pudo inventar el transistor, y a continuación el chip integrado.

LA FÍSICA CUÁNTICA PERMITE INVENTAR LOS CHIPS



El conocimiento de la física cuántica fue fundamental y necesaria para el descubrimiento y desarrollo de los productos basados en materiales semiconductores. La física cuántica explica cómo los electrones se mueven en los materiales (teoría de bandas), permite aprovechar los efectos cuánticos túnel para un switching rápido (diodos de túnel, memorias flash) y permite el control de la conductividad a través del dopaje (p-n junctions) – para poder desarrollar los transistores, LEDs y la electrónica moderna.

En la práctica, fue sólo a partir de 1947 que en los laboratorios Bell se pudo conseguir el primer semiconductor práctico. Dicho material semiconductor, como el silicio, el germanio y el arseniuro de galio, pueden actuar como conductores y ais-

lantes simplemente añadiéndoles una impureza (denominada dopaje).

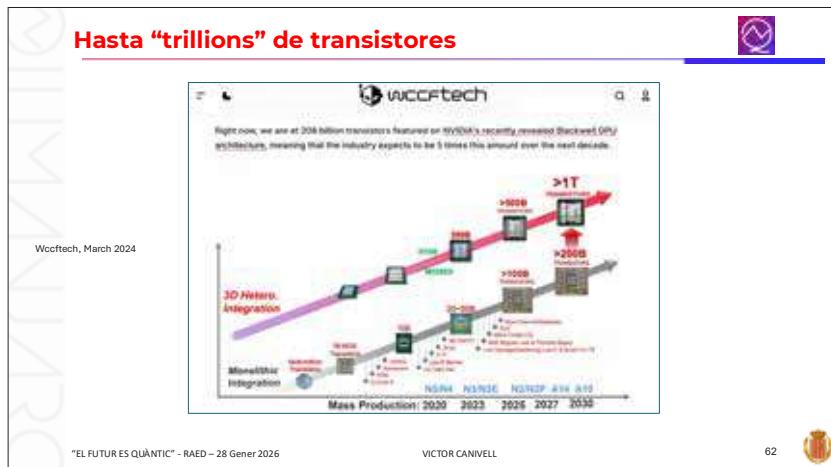
Estos dispositivos semiconductores sustituyeron a los tubos de vacío. Utilizan la conducción de electricidad en estado sólido y, por lo tanto, se conocen como dispositivos de estado sólido, a diferencia del estado gaseoso de los tubos de vacío.

En los 50's se inventaron los transistores, dispositivos discretos fabricados con semiconductores. Se utilizan para amplificar señales electrónicas y eléctricas. Requerían muy poca energía y en comparación no generaban calor. Revolucionaron la industria electrónica. Sin embargo, los componentes discretos debían ensamblarse en una sola placa de circuito impreso (PCB).

Luego en los 60's se inventaron los circuitos integrados, el paso decisivo para poder integrar y fabricar en un único dispositivo compacto y resistente una gran cantidad de transistores, frágiles en su producción, en gran volumen y muy bajo coste.

Desde entonces la industria ha podido seguir lo que a grandes rasgos se conoce como la Ley de Moore, propuesta por uno de los fundadores de Intel, y que predecía que el número de transistores por chip se podría doblar cada dos años a un mismo coste. Esta "ley" es una predicción, no está basada en ninguna ley de la ciencia, pero ha sido una excelente guía práctica de la evolución de la industria de los semiconductores, llegándose en la actualidad a los cientos de billones de transistores por chip. Ello ha sido la base del desarrollo arrollador del sector TIC en las últimas décadas.

HASTA “TRILLIONS” DE TRANSISTORES



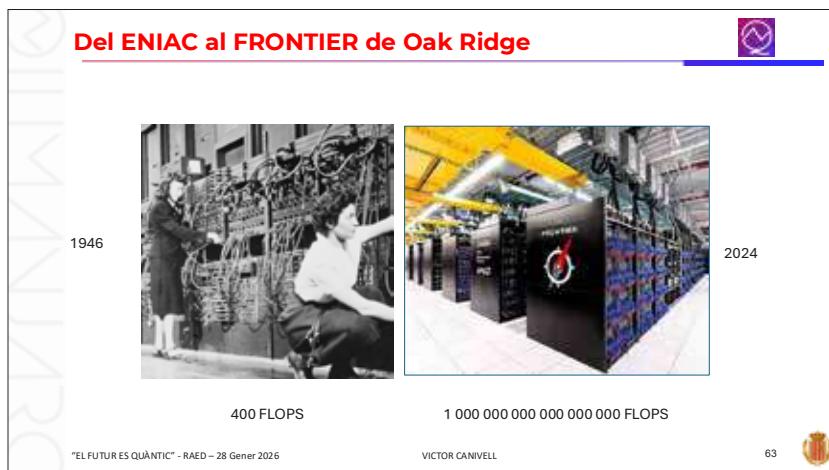
Esta gráfica explica la evolución increíble de la capacidad de integración de los chips. Y cómo, recientemente, la evolución ha incluido la integración de los chips en 3D, es decir añadiendo una capa superior al chip planar tradicional.

Esta arquitectura 3D, así como la búsqueda de nuevos materiales, son algunas de las vías seguidas para conseguir seguir aumentando la integración y las capacidades de los chips actuales.

Veremos más adelante es que esta evolución está llegando a unos límites físicos de la naturaleza de difícil superación.

Y que los nuevos chips cuánticos en desarrollo son una excelente opción para poder superar estas limitaciones.

DEL ENIAC AL FRONTIER DE OAK RIDGE



En definitiva, los computadores han evolucionado a partir del ENIAC de 1946, el primer computador digital de propósito general del mundo, con válvulas de tubo de vacío y una capacidad de cálculo de unos 400 FLOPS (operaciones de coma flotante por segundo) a los sistemas más avanzados de supercomputación HPC actuales, como el equipo FRONTIER de Oak Ridge National Laboratories, en Tennessee, de 1 exaflops (un quintillion o 10^{18} FLOPS).

El ENIAC incluía unas 18.000 tubos de vacío y pesaba 30 toneladas. El FRONTIER incluye 47.000 chips y pesa 300 toneladas. Pero el ratio de capacidad de cálculo es aproximadamente de mil billones de veces (10^{15}).

Estos equipos de computación de alto rendimiento (HPC por sus siglas en inglés) se utilizan para simulaciones complejas, análisis de datos y modelado en muchos campos, incluida la investigación científica (por ejemplo, modelado climático, física de partículas, genómica), ingeniería (por ejemplo, aerodinámica, análisis estructural), servicios financieros (por ejemplo, modelado de

riesgos, comercio de alta frecuencia), medios y entretenimiento (por ejemplo, renderizado de efectos especiales) y fabricación (por ejemplo, diseño de productos, optimización de la cadena de suministro). Esto es lo que se hace en Oak Ridge, y es lo que se hace en el BSC, en todos los centros de supercomputación

Otra comparación curiosa es la que se ha publicado acerca de que un chip de un cargador USB-C moderno es 500 veces más potente que el computador que se usó para el control de la navegación del Apolo 11 en su viaje y su primer alunizaje de la historia, y otra es que un teléfono móvil de hace una década era aproximadamente 100,000 veces más potente

Esta aceleración de prestaciones sin precedentes está en la base del peso del sector TIC en la economía, tal como vimos en la sección 2.

LA COMPUTACIÓN CONVENCIONAL: SUS LÍMITES ESTRUCTURALES



SECCIÓN 4.b



La computación convencional: sus límites estructurales

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

64

Pero toda tecnología tiene sus límites.

Vamos a estudiar tres limitaciones importantes de la TIC actuales, y veremos más adelante cómo la computación cuántica puede permitir superarlas.

La relevancia de estos límites de la computación convencional, y su superación, es la tesis principal de los proponentes de la computación cuántica, de sus inversores y la expectativa de su impacto.

LOS LÍMITES DE LA MINIATURIZACIÓN

Los límites de la miniaturización

Moore's Law
An observation that the number of transistors on a microchip roughly doubles every two years, whereas its cost is halved over that same timeframe.

We're not prepared for the end of Moore's Law

The great chip crisis threatens the promise of Moore's Law

Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes

MIT Technology Review

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

65

El primer límite estructural que destacar es que la tecnología de los chips semiconductores tiene un límite físico de fabricación que no podrá superar.

Ya que, aunque es casi imposible de imaginar, los chips actuales pueden contener 100 millones o más de transistores por milímetro cuadrado, que es aproximadamente el área de la cabeza de un alfiler. O en otras palabras, hay chips con hasta varios billones (europeos) de transistores.

Es decir, desde la década de 1970 y hasta principios de la década de 2010, las empresas de semiconductores siguieron la llamada Ley de Moore con notable fidelidad, reduciendo el tamaño de los transistores de micrómetros a nanómetros de un solo dígito, o sea a dimensiones casi atómicas – lo que quiere decir que estamos llegando al límite físico de densidad de transistores en un chip.

Ya que, por debajo de un átomo ya no hay “menos átomos”, lo que hay es las estructuras internas de los átomos, otro mundo, y la Ley de Moore llega a su límite natural.

En la actualidad hablamos de chips de 2 a 3 nanómetros para definir el tamaño más pequeño del transistor. Un átomo de silicio mide solo 0,2 nm, así que no podemos reducir mucho más las dimensiones.

Desde esta perspectiva, la Ley de Moore está a punto de chocar con un muro.

Además, a medida que la industria se acerca a las limitaciones físicas de la tecnología CMOS (semiconductor complementario de óxido metálico) basada en silicio, el escalamiento tradicional comienza a fallar. La densidad de potencia, las corrientes de fuga, la tunelización cuántica y los desafíos litográficos aumentaron de manera significativa.

CÁLCULOS IMPRACTICABLES

Cálculos impracticables



FALTA DE RECURSOS

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

66

El segundo límite estructural que destacar es el hecho de que, a pesar de que los computadores actuales son universales en cuanto que permiten trabajar y resolver en principio cualquier programa de computación, la realidad es que la arquitectura de los computadores actuales no siempre les permite disponer de recursos suficientes para hacer los cálculos.

Pongamos el caso del estudio de las propiedades de una molécula de cafeína, su estructura y los enlaces que la mantienen unida (entre sus protones, neutrones y electrones). Se trata de una molécula con solo 24 átomos, es decir, una molécula relativamente sencilla. Por cierto, pensemos en que en una taza de café caben unos 100 mg y por tanto hay del orden de $10^{exp}20$ moléculas. Queremos estudiar solo una de ellas. Pues bien, para calcularlo nos hacen falta $10^{exp}48$ bits. Y para poner las cosas en perspectiva, como en la Tierra hay unos $10^{exp}49$ átomos, ello quiere decir que nuestro computador debería ser capaz de trabajar con una décima parte de los átomos de la tierra convertidos por arte de magia en transistores. Esto es absolutamente inviable.

Es decir, ningún superordenador actual, ni cualquiera futura generación de estos, puede llegar a acceder a tantos bits.

La razón es que el coste computacional de modelar con precisión estos sistemas con computadores clásicos crece exponencialmente con el número de electrones en interacción, lo que hace que las soluciones exactas sean prácticamente inaccesibles incluso para moléculas relativamente pequeñas. Si bien existen algunos métodos de aproximación clásicos que pueden simular sistemas químicos con una fuerte correlación electrónica, estos métodos son computacionalmente costosos

¿Cómo se resuelve este problema en la actualidad? Pues no se resuelve. Lo que se hace es contemplar diferentes tipos de aproximaciones en las ecuaciones para poder llegar a resultados aproximados. Esto funciona relativamente bien para moléculas pequeñas, pero rápidamente se demuestra inviable para molecular más grandes, en cuyo caso extremo están las biomoléculas de interés en la industria farmacéutica. Por contra, las simulaciones de química cuántica ejecutadas en computadores cuánticos sí pueden calcular con precisión la estructura electrónica y las energías de estos sistemas.

Por ello, el gran interés en las industrias química y farma por la computación cuántica, ya que, al funcionar de forma totalmente distinta, ocurre que, para el tipo de cálculos necesarios para estudiar las propiedades de las moléculas, la cantidad de recursos necesarios no crece de forma exponencial (como con los computadores actuales).

CÁLCULOS IMPRACTICABLES

Cálculos impracticables

IEEE Spectrum | Quantum Computer Comes Closer to Cracking RSA Encryption



The screenshot shows a quantum computing simulation interface. On the left, there is a large block of binary code representing quantum circuit parameters. In the center, there is a 3D plot showing a red surface rising from a green base, with a grid background. At the bottom, the text "FALTA DE TIEMPO" is displayed in red.



"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

67

El problema de la falta de recursos tiene otra derivada, la falta de tiempo.

Para ciertos tipos de cálculo, los computadores actuales no dan abasto, es decir los mejores programas para resolver ciertos tipos de computación se alargan tanto en el tiempo que los hacen impracticables. Y en eso justamente se basa la criptografía actual.

La criptografía se basa en intercambiar mensajes encriptados por el emisor y que el receptor solo puede leer en base a disponer de una llave adecuada. Una de las maneras en que hoy se envía inicialmente dicha llave se basa en un esquema donde juega un papel crucial un cálculo que se puede hacer muy fácilmente en un sentido (como multiplicar dos números) pero que resulta muy engorroso hacerlo en sentido inverso (dado un número, qué dos números primos son los que se han usado como múltiplos para llegar a él). Y sin esos números primos, no podemos conocer la llave, y por tanto no podemos descifrar el mensaje. Ocurre que este esquema en apariencia tan sencillo es uno de los fundamentos que usamos (sin ser conscientes de cómo funcionan nuestros móviles o laptops) todos nosotros a diario en internet, ya que para romper una llave de este tipo RSA de 2048 bits se necesitarían miles de millones de años en un computador medio. Por ello, estamos todos tranquilos usando internet. Y por ello los ciberataques en la actualidad se centran en otros objetivos, técnicos o de tipo social, pero no el de romper las llaves.

Y se da la coincidencia de que justamente este tipo de cálculos será perfectamente abordable por computadores cuánticos, suficientemente potentes, en tiempos muy asequibles a los atacantes. Es decir, podrán romper la encriptación usada

hoy para proteger nuestros whatsapps, bizums, transacciones bancarias, informes médicos etc., todo lo que circula por internet. Ni que decir tiene que esta posibilidad es altamente preocupante, no solo para lo que se refiere a los ciudadanos, sino también para todo tipo de organizaciones privadas o gubernamentales. Se trata del apocalipsis mencionada al inicio de este documento.

Ahora bien, resulta que los computadores cuánticos actuales no son, ni de lejos, suficientemente grandes como para poder hacer estos cálculos. Así que no debería haber un problema. Quizá en quince años sí, pero ahora, no.

Excepto que hay el posible ataque llamado “Recoger ahora, descifrar después” mencionado al inicio del documento (el artículo en Wired), que consiste en almacenar hoy los mensajes de internet (que hoy no podemos descifrar), esperar a tener el computador cuántico adecuado en el futuro y entonces poder descifrar todo lo que pueda interesar. Y esto puede ser muy importante si se quieren conservar ciertos secretos en el tiempo. Los hay que se quieren proteger diez, veinte, cincuenta años, por ejemplo. Pues bien, todos ellos ahora están en riesgo por los avances en construir computadores cuánticos suficientemente grandes.

La criptografía es otro de los vectores que incide muy directamente en el interés por la cuántica, ya que puede hacer cálculos impracticables por los sistemas convencionales.

Veremos más adelante, qué tipo de soluciones se están trabajando para soslayar este problema, tanto soluciones no cuánticas como cuánticas.

LOS LÍMITES DE LA SOSTENIBILIDAD

Los límites de la sostenibilidad

AWS buys data center running on nuclear power: smart sustainability?

Laura Heredia - 19 March 2025

techzine.eu, 19 March 2025

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2025

VICTOR CANIVELL

68

Y el tercer límite estructural de la computación actual es la sostenibilidad.

Durante todo este año 2025 se han venido repitiendo los anuncios de inversión en construcción de centros de datos en todo el mundo, y son cantidades espectaculares.

Pero lo que también ha trascendido es que estos nuevos grandes centros de datos de GPU's tienen una gran voracidad de consumo de energía (y de agua).

Hasta el punto de que los llamados hyperscalers (y los grandes centros de datos IA de Google, Amazon, Microsoft y similares) están contratando centrales nucleares para que puedan funcionar.

No hay más que explicar: si un centro de datos tipo HPC requiere potencias de MW's, estos nuevos centros de datos de IA van a requerir GW's, una escala inconcebible hasta la fecha.

LA LOCURA DEL CONSUMO ENERGÉTICO

La locura del consumo energético

OpenAI, Oracle Partner to Build One of the World's Largest Data Centers in the Middle East

OpenAI, alongside Oracle and UAE-based G42, is developing a massive 5-gigawatt data center in Abu Dhabi, set to be one of the world's largest AI infrastructure projects.



Spanning 1.0 square miles and drawing the power equivalent of five nuclear reactors, the facility signals OpenAI's bold global expansion and bet on the Middle East's AI potential.

Image Source: Invert

DTI May 20, 2025

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

69

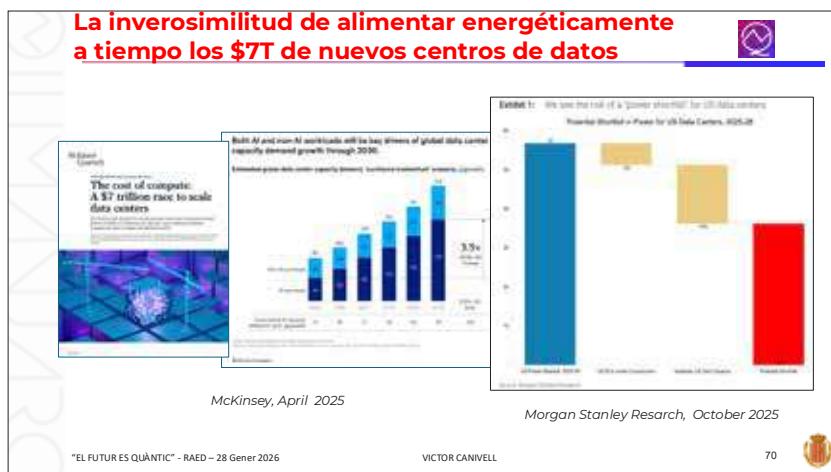
Justamente son 5GW's los necesarios para el proyecto Stargate de Abu Dhabi en los UAE. O en otras palabras, cinco centrales nucleares.

Evidentemente estamos llegando a límites insostenibles.

Es cierto que estos nuevos centros de datos permitirán hacer diseños de futuros chips y de futuros centros de datos más sostenibles. Pero con todo y con eso, hemos llegado a un límite.

Por ello los hyperscalers están invirtiendo, no sólo en contratar centrales nucleares actuales sino también en nuevas generaciones de centrales nucleares de reactores modulares pequeños (SMR por sus siglas en inglés).

LA INVEROSIMILITUD DE ALIMENTAR ENERGÉTICAMENTE A TIEMPO LOS \$7T DE NUEVOS CENTROS DE DATOS



Pero es que no se trata sólo de sostenibilidad, es que incluso es posible que no se pueda materialmente llegar a estas cifras a tiempo (ver el estudio de McKinsey, donde calcula en \$7T las necesidades de inversión para los centros de datos). Por ello, Morgan Stanley proyecta un déficit de 36 GW en el suministro energético de los centros de datos estadounidenses durante los próximos tres años, el equivalente a construir 30 nuevos reactores nucleares, o un tercio de toda la capacidad estadounidense.

En especial, se prevé que el 6% del consumo global en 2030 sea de estos centros de datos y que llevará de 3 a 7 años poder superar la diferencia entre demanda y oferta de energía, amén de tener que adaptarse a todas las regulaciones relativas a la localización de los datos y de energías limpias.

Debido a esta situación, y si bien la IA se debatió en el marco de la “UN Climate Change Conference COP30” en Brasil, este mes de noviembre 2025, uno de los temas más debatidos por los responsables de la toma de decisiones a nivel mundial ha sido intentar equilibrar el impacto potencial del consumo energético de la IA con el potencial de la tecnología para transformar la energía limpia. Las previsiones varían considerablemente, pero algunos activistas han pedido una moratoria en la construcción de nuevos centros de datos de IA, advirtiendo que podrían aumentar significativamente las emisiones globales para 2030, ralentizando o incluso revirtiendo el progreso actual en la lucha contra el cambio climático. En contrapartida, de una encuesta reciente de KPMG a altos ejecutivos, resulta que la mayoría consideran que y la IA como un factor para acelerar el progreso hacia los objetivos de cero emisiones netas. Pero, la cuestión es que este consumo desmesurado es una realidad inmediata e insostenible.



❖ SECCIÓN 5 – LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

The graphic features a red decorative border. At the top left is a small gold emblem. In the center, the word "SECCIÓN 5" is written in large red capital letters. At the top right is a blue circular logo with a white symbol. Below the title, the text "LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA" is displayed in large red capital letters. At the bottom left, the text "“EL FUTUR ES QUÀNTIC” - RAED – 28 Gener 2026" is printed in small black font. At the bottom right, the name "VICTOR CANIVELL" is printed in small black font.

LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Llegamos ahora al corazón de este documento, la computación cuántica.

El resumen es que se trata de una manera totalmente diferente de tratar la información, mucho más potente, que permite superar las limitaciones de la computación convencional mencionados en la Sección 4.b, que por ello arrastra un gran interés geopolítico por temas de soberanías nacionales, además de inversiones privadas de las TIC, así como de fondos de inversión especializados – y pacientes, ya que esta tecnología aún se considera de frontera. Hay que añadir que, a fecha de hoy, noviembre 2025, las previsiones son cada vez más optimistas en cuanto a plazos.

LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA – EN QUÉ CONSISTE



SECCIÓN 5.a



La computación cuántica: en qué consiste

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

72

Para empezar, veamos dos conceptos relativos a la “cuántica” y la computación.

En primer lugar, hemos visto que la computación actual se basa en el uso de chips integrados, es decir, en base a transistores de materiales semiconductores. Y el conocimiento de estos materiales sólo se consiguió a partir del conocimiento de la “física cuántica”.

Pero, en segundo lugar, veremos en esta Sección 5 que la “computación cuántica” es un nuevo tipo de computación totalmente diferente al convencional, basado en técnicas avanzadas y muy novedosas de la “física cuántica” que están ligadas a la manipulación de estados cuánticos individuales mencionados al final de la Sección 3.

La diferencia fundamental entre ambos tipos de computación radica en que los datos que se manipulan, la información que se trabaja, son, en un caso, datos cuánticos (qubits), y en el otro, bits convencionales.

En otras palabras, la diferencia radica en el substrato físico usado para codificar la información, y en el consiguiente tipo de manipulaciones que se puede realizar con ellos, mucho más rico en el caso de los qubits.

UN NUEVO PARADIGMA DE COMPUTACIÓN

Un nuevo paradigma de computación



- **NUEVO** hardware & **NUEVO** software
- Revolucionario – **órdenes** de magnitud (para **ALGUNOS**)
- **Gran** ahorro de consumo energético
- **Complementario** & híbrido = QPU + CPU + GPU
- Futurista – próxima década



"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

73



Aquí tenemos el resumen fundamental de lo que representa la computación cuántica.

Se trata de un nuevo paradigma, una nueva manera de construir computadores que, en base a ciertos inputs de información, realizan cálculos y producen resultados. Pero no se basa en bits de válvulas de vacío, ni transistores ni en nada de lo que usamos hoy.

Se trata de un nuevo tipo de hardware (que manipula qubits) y por tanto requiere de un nuevo tipo de software para programarlo. Todo es diferente.

Siempre hemos mencionado que su uso será ventajoso para ciertos tipos de cálculo, no necesariamente será el más adecuado y económico para todos los tipos de cálculo imaginables. Por ejemplo, a fecha de hoy no tiene sentido plantearse un computador cuántico sólo para enviar un correo electrónico. Por ello, lo que ocurrirá es que los centros de datos hibridarán con el conjunto de CPUs y GPUs de los centros de datos actuales, es decir tendremos CPUs, GPUs y QPUs (para Quantum Processing Units) trabajando en coordinación entre ellos, descargando los cálculos en los sistemas más adecuados para cada uno.

Precisamente Nvidia ha apostado fuertemente por esta hibridación. A finales de octubre 2025, anunció una arquitectura de sistema abierta para acoplar sus GPUs con procesadores cuánticos y así construir supercomputadoras cuánticas. La nueva plataforma, llamada NVQLink, también está integrada con la plataforma de software cuántico CUDA-Q de Nvidia. Entre sus socios se encuentran muchas de las empresas más importantes de la industria de la computación cuántica.

Y finalmente hay que tener claro que de lo que disponemos hoy en día son prototipos. Los computadores cuánticos capaces de llevar a cabo los cálculos realmente útiles para los tamaños de problemas, tiempos de cálculo y exactitudes relevantes para las empresas están en desarrollo en estos momentos. Hay disparidad de opiniones acerca de para qué problemas serán útiles en qué momento, y en general oscilan entre los cinco y los quince años.

Lo que es muy probable (o seguro) es que llegarán, y cuando lo hagan, revolucionarán el sector y la economía.

Es por ello por lo que gobiernos, como los europeos, que han visto pasar las revoluciones del sector hasta la fecha (como las de los semiconductores, los chips, el software e incluso la IA)

sin poder construir una industria propia realmente competitiva a nivel mundial, salvo excepciones, ven esta nueva ola de disruptión como una gran oportunidad.

UN NUEVO PARADIGMA ...

Un nuevo paradigma ...

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026
VICTOR CANIVELL
74

¿Qué quiere decir un nuevo paradigma? Se trata de hacer algo de manera diferente.

Veamos un símil que pretende dar una intuición de lo que queremos expresar. Un símil, por definición, no es un reflejo exacto de la realidad de la computación cuántica, pero pretende acercarnos a la misma.

El problema que resolver es el siguiente: se lleva una persona al centro de un laberinto (como el de Horta en nuestra ciudad) y el problema a resolver es encontrar la salida.

No hay otra que ir probando de una en una todas las opciones, decidir en cada encrucijada de pasillos en qué dirección seguir e

ir probando todas las combinaciones posibles, una tras la otra. La persona va a ciegas, y no hay otra opción que probar los itinerarios de uno en uno, descartando itinerarios sin salida, hasta dar finalmente con la salida. Es una labor ardua y sistemática, no exenta de las lógicas frustraciones.

UN NUEVO PARADIGMA ... CON LA MAGIA CUÁNTICA



Ahora imaginemos que tenemos un nuevo paradigma para solucionar el problema.

En esta ocasión, a la persona en el centro del laberinto se le proporciona un dron.

La cosa cambia radicalmente.

Se envía el dron a la vertical del centro del laberinto, se hace una foto del mismo, y, bingo, en una sola tirada vemos el itinerario ganador, ya que tenemos todo el mapa a nuestra disposición.

La diferencia entre probar a ciegas cada posible camino, a poder conocer todas las opciones a la vez, es un reflejo de lo que puede aportar la computación cuántica.

Se trata de lo que los expertos llaman un espacio exponencialmente más amplio y dinámico para hacer los cálculos – en definitiva, aprovechar la magia de la cuántica.

UN NUEVO PARADIGMA DE LA COMPUTACIÓN CON MAGIA CUÁNTICA

Un nuevo paradigma de computación con magia cuántica



La computación cuántica es una nueva rama de la computación que utiliza las leyes de la mecánica cuántica para representar y procesar información en un **espacio exponencialmente más amplio y dinámico** que el que pueden acceder los sistemas clásicos

	Classical Computer	Quantum Computer	Quantum Implication
Bit Elements	1	3	More inputs
Entanglement	No	Yes	Parallel Computation
Core Operators	3	6+	More Operators
Logic Direction	One-Direction	Bi-Directional	More Efficient
Programming	Deterministic	Probabilistic	Leverages wave properties

Russ Fein , November 2025
VICTOR CANIVELL

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

De manera más técnica, volvemos al concepto del espacio exponencialmente más amplio y dinámico para hacer cálculos.

Para los computadores cuánticos, la unidad fundamental de tratamiento de la información es el qubit, y el qubit tiene muchas más formas de ser preparado y manipulado que su contraparte clásica de bits, como se expresa en la tabla.

Es decir, un computador cuántico aprovecha la física cuántica y tiene un conjunto diferente de inputs, reglas y restricciones

que uno convencional. En lugar de bits binarios, los computadores cuánticos utilizan qubits, que pueden superponerse, lo que significa que pueden ser 1 o 0, o una combinación de ambos. Además, los qubits son objetos tridimensionales, por lo que pueden orientarse en cualquier dirección dentro de esas tres dimensiones. Estos inputs tridimensionales pueden manipularse mediante más que las tres reglas que limitan la computación clásica (AND, NOT y OR). Existen al menos seis reglas o puertas principales que pueden aplicarse (las puertas X, Y y Z, que rotan el qubit a lo largo de esos ejes dimensionales, y las puertas Hadamard, de fase y T, que esencialmente rotan el qubit de diferentes maneras). Además, dado que los qubits pueden entrelazarse, también existen varias puertas multiqubit (la CNOT, también conocida como puerta Controlled-Not, es un ejemplo principal). En definitiva, tenemos unos objetos mucho más ricos (los qubits) y aplicamos una lógica matemática correspondientemente más rica (lógica cuántica en vez de lógica de Boole).

Hay que destacar otra manera de aprovechar la riqueza y la magia de la cuántica para hacer cálculos, basada en la simulación entre el cálculo a realizar y el chip cuántico. En contrapartida al anterior, llamado de puertas lógicas o digital (por similitud con los computadores convencionales), se conoce como analógico, e incluye un caso particular llamado de annealing. Veremos más adelante las características diferenciales entre ambas.

Finalmente, también conviene destacar el hecho de que al tratarse se sistemas cuánticos, los resultados son probabilísticos y que para determinar realmente dichas probabilidades hay que realizar los cálculos multitud de veces para sacar la estadística correcta de resultados. Esto no es un problema, ya que las mediciones en los sistemas cuánticos son extremadamente rápidas, del orden de nanosegundos.

LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA: CÓMO SUPERA LOS LÍMITES DE LA COMPUTACIÓN CONVENCIONAL



SECCIÓN 5.b



La computación cuántica: cómo supera los límites de la computación convencional & dónde estamos ahora

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VÍCTOR CANIVELL

77

Este nuevo tipo de computación cuántica, radicalmente diferente a la convencional, promete superar con éxito notable las tres limitaciones estructurales de la computación convencional referidas anteriormente:

- Chips cuánticos con capacidades de llevar mucho más allá de los límites de la Ley de Moore que castigan a los chips CPU's, GPU's, etc. actuales
- Sistemas cuánticos con capacidad de cálculo en plazos y/o precisiones más allá de los convencionales para ciertos problemas de cálculo
- Sistemas cuánticos con un consumo de energía radicalmente inferior a los actuales

Seguidamente explicaremos en qué consisten los qubits, qué características tienen, para comentar luego qué casos de uso son los más interesantes para los usuarios de la computación cuán-

tica, antes de sopesar sus problemas de errores, barrera principal para poder escalar estos nuevos computadores.

A continuación, veremos cómo se pueden aprovechar los sistemas cuánticos “ruidosos” actuales y qué plazos plantean los diferentes proveedores para llegar a la promesa de los “Fault Tolerant Quantum Computers” (FTQC), el cenit del sector.

Se señalará que hay un nuevo tipo diferente de computadores cuánticos, llamados analógicos, que permiten evitar el problema de los errores cuánticos.

Vistos estos aspectos técnicos de la computación cuántica, se presentará lo que se supone será su notable impacto económico y geopolítico, los planes nacionales en marcha y sus niveles de inversión.

Finalmente, abordaremos lo que para mí es un aspecto central de este documento, y es la oportunidad que brinda esta nueva tecnología naciente para desarrollar en nuestro país el núcleo de una nueva industria, algo que hasta la fecha en el mundo de las TIC no se ha podido realizar. Ahora sí tenemos la oportunidad. Igual que se ha hecho con la biotech, ahora se puede repetir con la cuántica.

Cerraremos esta sección con un repaso a qué pasos pueden dar las empresas para prepararse ante esta nueva disruptión, cómo protegerse de futuros ataques cuánticos de ciberseguridad, y sobre todo, cómo aprovechar estas nuevas capacidades, fuente de nuevos niveles de competitividad.

LA LEY DE MOORE HASTA LA FECHA ...



Las limitaciones a la Ley de Moore para fabricar chips más densos y por tanto más potentes, ha impulsado una transición desde el simple recuento de transistores hacia innovaciones como los FinFET, el apilamiento de chips 3D, los módulos multi-chip y los aceleradores de dominio específico. Para la década de 2020, las hojas de ruta de la industria, como la Hoja de Ruta Internacional para Dispositivos y Sistemas (IRDS) del IEEE, habían comenzado a enfatizar los enfoques “Más que Moore”, centrándose en la integración a nivel de sistema, la computación heterogénea y las arquitecturas no Von Neumann.

Es justamente en este enfoque “Más que Moore” con computación heterogénea donde juegan un papel importante los chips cuánticos y la computación cuántica. Los chips cuánticos funcionan de manera totalmente distinta a los actuales, permitiendo acceder a capacidades cada vez mayores más allá de los chips convencionales.

Hay que mencionar también la exploración de otra vía que la cuántica para la computación heterogénea mencionada arriba.

Se trata de la computación neuromórfica, aún en fases muy iniciales de su investigación. La computación neuromórfica se inspira en la estructura y función del cerebro humano, que está diseñado para crear sistemas eficientes y de bajo consumo para procesar la información de forma paralela y similar a la del cerebro mediante neuronas artificiales y redes neuronales activas. A diferencia de la arquitectura de Von Neumann, integra el almacenamiento y el procesamiento de datos, lo que puede dar como resultado un hardware más rápido, adaptable y energéticamente eficiente para tareas complejas de IA en el edge. Por ello, se especula que, si la cuántica será un recurso importante para el training de las IA, la neuromórfica puede hacer lo propio para las inferencias en el edge de la IA.

... Y EL FUTURO DE LA LEY DE MOORE



Justo en la conferencia inaugural de la conferencia anual de SEMI Europe el mes de noviembre 2025, su presidente, el Dr. Altimime, expuso las alternativas de la industria de semiconductores a seguir evolucionando según los parámetros de la Ley de Moore, y expuso en su presentación la prometedora alternativa de la computación cuántica, como muestra esta gráfica.

En conclusión, la Ley de Moore en 2025 no está muerta ni plenamente vigente en su forma original. Ha evolucionado, fragmentado y diversificado en una constelación de vectores de escalado. Si bien la miniaturización de los transistores continúa, aunque con un gran coste y complejidad, el rendimiento ahora escala mediante el empaquetado, la especialización, la optimización del software y la innovación interdisciplinaria. La industria ha pasado de una carrera unidimensional de reducción del tamaño de las características a una estrategia multidimensional de escalado del rendimiento. La Ley de Moore ahora resume nuestra ambición colectiva de innovar en todos los niveles de la computación: desde los átomos hasta los algoritmos, desde las ondas hasta las cargas de trabajo.

Y los qubits cuánticos ofrecen un claro camino de futuro.

LA PROMESA CUÁNTICA EN PRESTACIONES: EXPONENCIAL



Seguidamente, se presenta la razón por la que la computación cuántica también puede superar el segundo problema

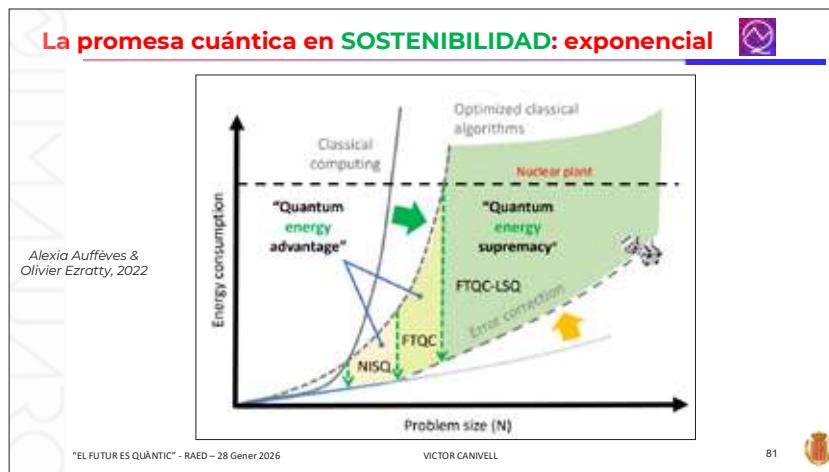
estructural de la computación convencional, el de la falta de recursos.

De manera simplificada, se trata de que, para ciertos tipos de cálculo, el tiempo (o los recursos de bits) necesarios en un computador cuántico crece de manera sólo lineal con el crecimiento del tamaño del problema, mientras que, para un computador convencional, dicho tiempo crece de manera exponencial (o polinómica), de manera que los hace intratables, tal como hemos comentado en los dos ejemplos de la sección anterior, el del cálculo de las propiedades de una molécula, y el de un cierto cálculo de llave criptográfica.

El hecho de no ser exponencial tiene que ver con la capacidad intrínseca de la computación cuántica de codificar la información en qubits. Los qubits son mucho más ricos en funcionalidades que los bits. Es como si en una partida de ajedrez, un jugador dispusiera solo de peones, mientras que el otro pudiera disponer de muchas reinas. Se describe en las matemáticas correspondientes que los qubits operan en más dimensiones y con más operadores en un espacio de computación mucho más amplio que los bits. Vamos a dejarlo aquí, ya que entraríamos en demasiados tecnicismos. Pero esta es una de las bases de la promesa de la computación cuántica.

Estos hechos se trasladan en la gráfica en la que se visualiza la gran diferencia de necesidad de recursos que conllevan ambos tipos de computación, la convencional y la cuántica.

LA PROMESA CUÁNTICA EN SOSTENIBILIDAD: EXPONENCIAL



Y para completar la discusión de cómo supera la computación cuántica las limitaciones de la convencional, hay que analizar el tercer caso, de qué manera crece el consumo energético.

Lo importante del tema de la sostenibilidad de los centros de datos, y su probable inviabilidad (o al menos las limitaciones extremas en su desarrollo con sistemas convencionales), es justamente que los computadores cuánticos tienen un consumo de órdenes de magnitud inferiores a los actuales.

Ello pudiera sorprender a primera vista, cuando se conozcan las tecnologías necesarias para los computadores cuánticos, pero la realidad es que todo indica que habrá un ahorro de ordenes de magnitud, del tipo kW a MW o más.

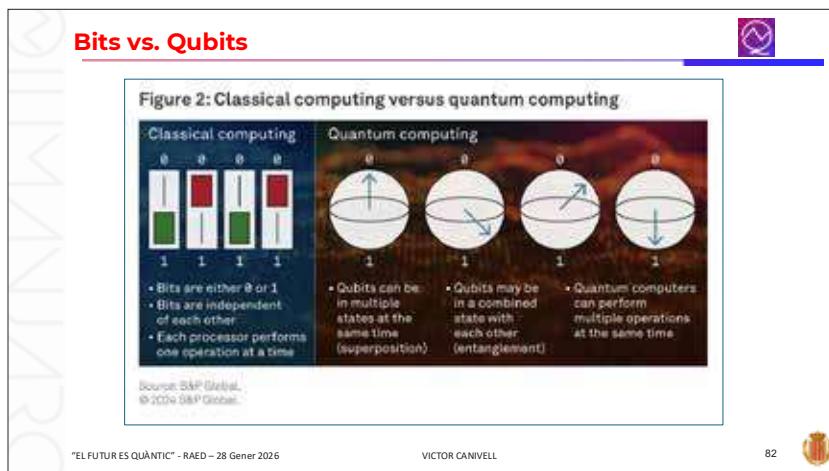
Este gráfico recuerda el gráfico anterior, comparando tiempos de cálculo en función de tamaño del problema, y representa el consumo energético en función del tamaño del problema. La

consecuencia es parecida, hay un gran ahorro potencial en el uso de energía.

Este tema del ahorro energético se está estudiando muy de cerca conforme se avanza en el desarrollo de las nuevas generaciones de computadores cuánticos, y es claramente un aspecto fundamental de su atractivo, a pesar de ser un aspecto poco conocido hasta la fecha.

Hay que decir que, entre los fondos de inversión que trabajan en el sector de las startups de cuántica, hay una clara presencia de fondos de inversión de sostenibilidad, por esta misma razón.

BITS VS. QUBITS



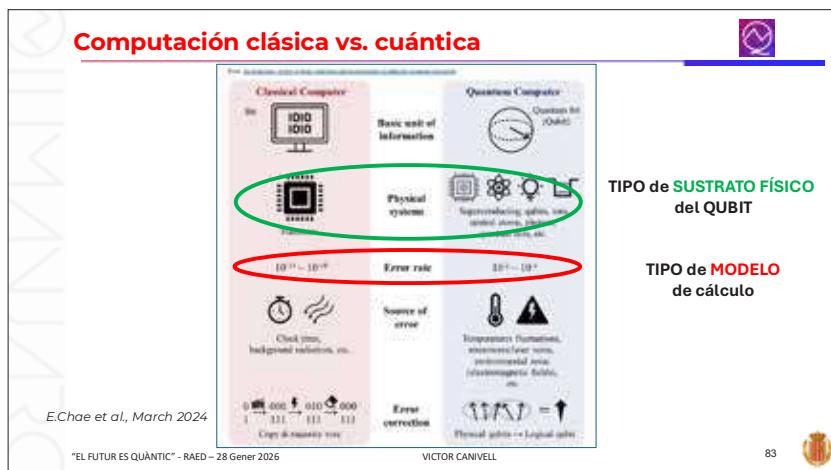
La magia de la computación cuántica reside en las propiedades exóticas de los qubits, estos estados individuales de la naturaleza que siguen las leyes de la física cuántica.

Este otro cuadro comparativo entre qubits y bits pone de relieve las características diferenciales de manera gráfica:

- superposición de estados para un mismo qubit
- combinación de estados entre varios qubits
- realización de operaciones en paralelo

Este tipo de efectos es en los que se basa la computación cuántica – y que son totalmente inexistentes en el mundo de los bits (y en los chips convencionales).

COMPUTACIÓN CLÁSICA VS. CUÁNTICA



Este cuadro amplía el contraste entre computación cuántica y clásica más allá del contraste conceptual visto anteriormente, en que nos centrábamos en los qubits.

Aquí se visualiza cuál es la expresión física de los qubits vs los bits, los chips correspondientes (de los que hay varios tipos, de diferentes materiales, algunos naturales, otros inducidos), y sobre todo se destaca algo fundamental, como veremos un poco más adelante, que es la gran diferencia que hay en la pro-

blemática de los errores de unos y otros: órdenes de magnitud de 1 a 10^{13} a 18 (los convencionales) frente 1 a 2^{12} a 4 (los cuánticos).

Los errores de los qubits son inherentes a la computación cuántica, debido a la fragilidad de los estados cuánticos y su sensibilidad a las perturbaciones ambientales, lo que genera imprecisiones en los cálculos. Estos errores, principalmente los errores de inversión de bits y de inversión de fase, requieren técnicas de corrección de errores cuánticos (QEC por sus siglas en inglés) para garantizar cálculos cuánticos fiables y precisos.

El error de inversión de bits es uno de los tipos de error más comunes en la computación cuántica. Un error de inversión de bits se produce cuando el estado de un qubit cambia de 0 a 1 o de 1 a 0, lo que es análogo a invertir un bit clásico. Los errores de inversión de bits suelen estar causados por interacciones ambientales, como el ruido o las operaciones imperfectas en los qubits.

Un error de inversión de fase, por otro lado, no cambia el qubit de 0 a 1 ni viceversa. En cambio, cambia la fase interna de su estado. Específicamente, el estado 0 permanece inalterado, pero el estado 1 adquiere un signo negativo en su contribución al comportamiento general del qubit. Esto no afecta el resultado de la medición si el qubit se encuentra puramente en estado 0 o 1, pero tiene un efecto significativo cuando se encuentra en superposición. Los errores de inversión de fase suelen estar causados por factores como fluctuaciones en los niveles de energía del sistema o interacciones con el entorno.

Este tema de los errores es probablemente el más importante al que se afronta la industria cuántica.

LA PRIMERA INTUICIÓN EN LOS ‘80

La primera intuición en los '80

International Journal of Theoretical Physics, Vol. 21, No. 4/5, 1982

Simulating Physics with Computers
Richard P. Feynman
Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91109
Received May 7, 1981

I. INTRODUCTION

On the program it says this is a keynote speech—and I don't know what a keynote speech is. I do not intend to suggest what should be in the meeting as a lecture of the subject or anything like that. I have my own ideas about what I would like to talk about, but I don't think anybody needs to talk about the same thing or anything like it. So what I want to talk about is what Miller Thermodynamics suggested that nobody would talk about, which was the possibility of simulating physics with computers and I mean that in a specific way which I am going to explain. The reason for doing this is something that I learned about from Ed Fredkin. He said that if you want to understand quantum mechanics you has to do with learning something about the possibilities of computers, and also something about possibilities in physics. If we suppose that we know all the physics, then really we don't have to prove anything about the computers. It's interesting anyway to learn to come up with the idea that we've got something to learn about physical laws, and if I take a related view here (after all I'm here and not at home) I'd admit that we don't understand everything.

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

84

La historia de la computación cuántica nace a principios de los ‘80 cuando el Premio Nobel Richard Feynman aduce que la única manera de calcular las propiedades de las moléculas (que ya vimos era imposible de hacer en la práctica con los computadores convencionales, debido a la falta de recursos que crecen exponencialmente con el tamaño del problema) sería construir un aparato de computación que él mismo si-guiese las leyes de la cuántica, es decir construyendo un geomelo.

Ello dio lugar a toda una serie de investigaciones que condujeron al desarrollo de la teoría de computación cuántica, es decir cómo hacer cálculos aprovechando las leyes poco convencionales, pero muy ricas, de la cuántica. La base de la cuestión está en que la información en este caso se codifica físicamente en qubits.

EL CALENDARIO APUNTA A SU FRUICIÓN EN LA DÉCADA DE LOS 2030



Así fue como durante la década de los '80s los físicos teóricos y matemáticos construyeron las bases de la computación cuántica, con qubits y puertas lógicas cuánticas.

Entre otros avances, Deutsch generalizó en 1985 la máquina de Turing al caso cuántico, demostrando su universalidad.

Fue en la década siguiente, en los '90s, cuando se establecieron los primeros y más famosos algoritmos de la computación cuántica:

- el algoritmo de Shor para la factorización en números primos (1994)
- el algoritmo de Grover para la búsqueda no estructuradas (1996)
- la primera demostración experimental de un algoritmo cuántico (1998)

De manera que es en la década de los 2000 cuando se lanza la carrera para construir computadores cuánticos.

Y ello enlaza con el premio Nobel de Física de 2012 mencionado anteriormente, basado justamente en la capacidad de preparar y manipular estos cuánticos individuales de la naturaleza, lo expresión física necesaria de los qubits.

EL ZOO DE LOS QUBITS



La expresión física de los qubits difiere drásticamente de los bits, todos ellos basados en transistores. En el caso de los qubits para computación tenemos una gran diversidad de candidatos. Por cierto, en comunicaciones cuánticas sólo se usa un tipo de qubit, los fotones.

En el caso de los qubits se trata de poder trabajar, preparar y manipular estados cuánticos de la naturaleza, y los principales tipos en que se trabaja hoy en día son los siguientes:

- Electrones
- Superconductores a microKelvins (cerca del cero absoluto de temperaturas), controlados por microondas, rápidos
- Spin de electrones (o quantum dots), fáciles de fabricar
- NV vacancies (diamantes sintéticos con defectos para atrapar electrones y usar su spin), a temperatura ambiente pero difíciles de controlar con láser y microondas
- Átomos
- Átomos atrapados, en que un laser los ioniza, un campo magnético los fija y se hacen operaciones con los lasers
- Átomos neutros o fríos, en que un laser los enfriá y mantienen en posición para operar
- Fotones
- Generación individual de fotones que se dividen para superposición y entrelazamiento
- Topológicos
- Cuasi-párticula (aniones) cuyas propiedades topológicas se usan para manipular qubits

Todos ellos tienen diferentes ventajas y desventajas en cuanto a los criterios necesarios para su uso industrial, y ninguno es el ganador evidente a fecha de hoy.

Se ha de tener en cuenta su calidad, rapidez, propensión a errores (y tiempos de coherencia) facilidad de producción, facilidad de escalabilidad y su coste entre otras consideraciones.

LAS VENTAJAS & DESVENTAJAS DE CADA QUBIT



Este cuadro de McKinsey refleja cómo responden los diferentes tipos de qubits a los criterios de comparación para poder devengar una base potente para construir los computadores cuánticos que puedas responder a las prestaciones necesarias para ser útiles a las empresas.

El resumen del cuadro es que ninguna de las tipologías de qubits sobresalen en todos los criterios. Es decir, no está claro aún cuál de los tipos de qubits serán los más útiles.

De hecho, tanto es posible que haya un único tipo de qubit que devenga en la plataforma claramente mejor para construir los computadores cuánticos, como que finalmente varios tipos de qubits devengan las plataformas idóneas para tipos diferentes de cálculo (unos para simulaciones químicas, otros para cálculos estructurados, otros finalmente para cálculos útiles en IA etc.).

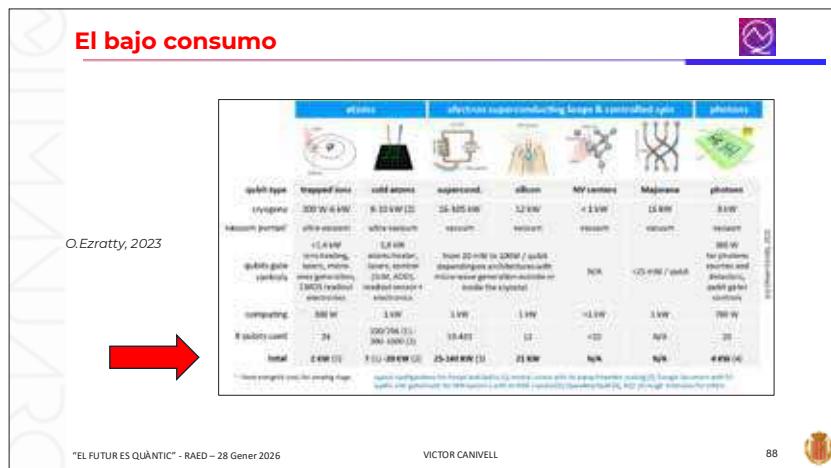
El estado de madurez de la tecnología no permite predecir hoy con seguridad cual o cuáles serán los ganadores. Y ello da pie a una gran oportunidad de las startups frente a los recursos de las multinacionales. Y hablamos no solo de startups ya consolidadas con inversiones recibidas de centenares de millones, sino también de las spinoff de centros de investigación que continuamente aparecen en el sector, en base a nuevas investigaciones académicas.

Es por ello por lo que existe en la actualidad una pluralidad de iniciativas de las grandes multinacionales (como IBM; Google, Honeywell, Amazon etc.) que conviven con varias decenas de startups más o menos grandes (algunas cotizadas como IonQ, Rigetti, D-Wave o QC-i), todas ellas trabajando en desarrollos que abarcan la multiplicidad de las opciones. Las principales a fecha de hoy son los qubits de superconductividad, átomos neutros, iones atrapados y fotones.

Con toda probabilidad se iniciará un proceso de consolidación entre empresas de cuántica, que de hecho ya ha empezado este año con la adquisición de Oxford Ionics (UK) por parte de IonQ (USA) tras su salida a bolsa y el gran crecimiento de sus cotizaciones, mencionado al principio del documento. Se trata de dos empresas de computación cuántica trabajando con el mismo tipo de qubits (iones atrapados).

Pero aprovecho para comentar que la consolidación iniciada por IonQ va más allá de la computación, ya que también ha adquirido este año startups de comunicaciones cuánticas (como IDQ para QKD, Lightsynq para networking, Qubitek para seguridad, Capella Space para comunicaciones espaciales) y sensorica (Vector Atomic). Es sólo el empezar de una tendencia que aumentará conforme madure el mercado.

EL BAJO CONSUMO



Una cosa está clara, con independencia del tipo de qubits, los computadores cuánticos que se construyen en base a ellos, en todos los casos tienen un consumo energético del orden de los kW – muy lejos de los MW de los centros de cálculo HPC (como los 6MW del BSC o los 40 MW de Oak Ridge), y de los GW que se plantean en los centros de datos para IA.

Aquí hay una diferencia fundamental y contrastada.

VENTAJAS DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Ventajas de la computación cuántica

- Computación – ventaja **EXPONENCIAL**
-QUÍMICA CUÁNTICA
-FACTORIZACIÓN, ciberseguridad
- Computación – ventaja polinómica
-Sistemas lineales/ álgebra, ML para IA
-Optimización
-Búsquedas desestructuradas
- Consumo de energía
-**ÓRDENES DE MAGNITUD** de ventaja

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VÍCTOR CANIVELL

89

De manera que podemos resumir las aportaciones de la computación cuántica de nuevo en este cuadro, donde se subrayan las promesas de ventajas exponenciales de órdenes de magnitud, de capacidades y de consumo de energía.

Ahora bien, hace falta poder llegar a construir estos computadores cuánticos. Como veremos, hoy tenemos prototipos. Este es el quid de la cuestión, ¿cuándo llegará el momento de poderlos usar en problemas prácticos? Hablaremos de este calendario más adelante.

LOS CASOS DE USO

Los casos de uso

A quantum computer leverages quantum mechanics, making it very powerful.

Why is quantum computing so powerful?

- It leverages the phenomena of quantum mechanics.
- Superposition: The possibility of quantum systems to be in a single coherent state, left or right, up or down, etc.
- Entanglement: The possibility of two or more atoms/quantum systems to form an inseparable connected state.
- Interference: The potential of quantum beams to interfere.

Which problems can a quantum computer solve?

- Linear algebra, machine learning and AI (e.g., reduction of large data for better processes, predictions, and automation)
- Simulation of quantum systems and processes—e.g., molecular properties, climate models, and the universe
- Optimization problems—e.g., quantum annealing that can handle non-local optimization (e.g., financial modeling)
- Factorization (separability of large numbers with exponential speedup—e.g., to break modern-day encryption protocols)

What do potential use cases look like?

Automotive	Pharma and chemicals	Finance	Security
• Longer lasting batteries Optimization: Efficiently predict the lifetime of batteries	• Simulation of molecules Simulate molecular processes for drug discovery	• Optimization of collateral Consider more collateral and solve with higher accuracy	• Factorization: Use quantum random-number generators to enhance security

McKinsey, 2025

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

90

Hablemos ahora de los casos de uso, que es lo que interesa a los usuarios.

Este cuadro de la consultora McKinsey es ilustrativo al respecto.

Tenemos varias categorías principales donde podremos aprovechar las ventajas de los algoritmos de la computación cuántica:

- Simulaciones químicas de interés directo para el sector químico y farmacéutico en primer lugar, y también en otros, como el del coche eléctrico, muy necesitado de baterías largas, materiales especiales y costes asociados
- Entrenamiento de sistemas de IA, con un gran incidencia en temas de sostenibilidad

- Cálculos de optimización (encontrar el mínimo o máximo del uso de ciertos recursos, dadas las relaciones entre las variables y las condiciones de contorno), muy transversal a muchos sectores económicos, desde el financiero (cálculo de riesgos, composición de carteras, etc.), el logístico (cálculo de rutas y scheduling, colocación de containers en aviones, etc.), el energético (ubicación de plantas, impacto de las renovables, etc.) hasta el industrial (flujos de las líneas de producción, mantenimiento, etc.), entre otros.

Consideración aparte merece el de la criptografía. En este caso se trata de romper prácticamente toda la criptografía actual. En defensa frente a estos ataques futuros, se ha trabajado con éxito en dos frentes:

- Identificar otros algoritmos criptográficos para los computadores convencionales que se supone no son atacables por un computador cuántico (criptografía post-cuántica, o PQC por sus siglas en inglés)
- Aprovechar el conocimiento cuántico para desarrollar sistemas de comunicaciones basados en fotones que sean intrínsecamente seguros (distribución cuántica de llaves, o QKD por sus siglas en inglés)

Veremos luego cual es el impacto esperado de estos casos de uso en los diferentes sectores.

LAS FRONTERAS DE HOY – TENEMOS POCOS ALGORITMOS

Las fronteras de hoy – tenemos pocos algoritmos

FT., September 2, 2025

VICTOR CANIVELL

91

Es importante reconocer que hay una gran oportunidad para descubrir nuevos algoritmos cuánticos que puedan aportar el tipo de ventajas exponenciales o polinómicas del tipo de los conocidos algoritmos de Shor y de Grover.

Hay mucho trabajo teórico en curso para conseguirlo, y se trata de uno de los vectores de aceleración de la demanda de la computación cuántica más importantes del momento.

Aunque ciertos expertos son escépticos en este apartado, ya que hace años que no se ha conseguido descubrir nuevos algoritmos que aporten ventajas exponenciales.

Pero hay que destacar que, con los que tenemos hoy, ya nos basta para poder revolucionar el sector TIC.

Y si hubiese más algoritmos, tanto mejor.

LAS FRONTERAS DE HOY – TENEMOS “NISQ” RUIDOSOS

The screenshot shows a Wikipedia article page with the title "Noisy intermediate-scale quantum era" in red at the top. Below the title, there are tabs for "Article" and "Talk". On the right side, there are links for "Read", "Edit", "View history", and "Tools", along with a "4 languages" button. The main content area contains a yellow-highlighted paragraph about the noisy intermediate-scale quantum (NISQ) era. At the bottom of the page, there is a footer with the text "EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026, the author's name VICTOR CANIVELL, and a small logo.

La otra gran oportunidad para la eclosión de la computación cuántica es llegar a disponer de computadores cuánticos resistentes a errores (FTQC, por sus siglas en inglés), que es lo que necesitamos para realmente disfrutar de las ventajas citadas de la computación cuántica.

Porque lo que tenemos hoy son prototipos llamados “Noisy Intermediate-Scale Quantum” (NISQ’s).

El problema es cómo superar el problema de los errores cuánticos. Porque si se acumulan demasiados, el resultado deja de tener sentido. Y ésta es la barrera de los prototipos actuales.

Se está trabajando con ahínco en diferentes frentes:

- Supresión de errores cuánticos - se intenta prevenir la ocurrencia de errores. Esta técnica suele ser el nivel más básico de gestión de errores. El hardware cuántico está diseñado

para ser más resistente al ruido, lo que significa que la mayoría de los errores que este método aborda son los más cercanos al nivel de hardware.

- Mitigación de errores cuánticos - es una técnica que reduce la incidencia de errores después de la ejecución de un circuito cuántico. Esta práctica ejecuta múltiples versiones de un circuito cuántico para obtener redundancia y analizar sus resultados. Esto permite al sistema estimar un resultado sin errores.
- Corrección de errores cuánticos - es una técnica más avanzada que intenta detectar y corregir errores a medida que ocurren. Esta estrategia se centra en la redundancia para reducir las tasas de error. Los valores de un solo qubit se asignan a muchos qubits para que el sistema pueda reconocer y devolver información precisa incluso si algunos qubits detectan un error.

MUCHO PROGRESO PERO FALTAN ÓRDENES DE MAGNITUD

Mucho progreso PERO faltan órdenes de magnitud

Digital quantum computers are limited by **ERRORS**
(and to be able to correct for them, we need very large chips)

Google Quantum AI-Led Researchers Find 'Sweet Spot' To Use Current Quantum Computers To Make Practical Calculations

Microsoft advances quantum error correction with a family of novel four-dimensional codes

VICTOR CANIVELL

93

Por un lado, este último año se han hecho avances significativos en la corrección de errores.

- Google (octubre 2024): Willow es el primer procesador donde los qubits con corrección de errores mejoran exponencialmente a medida que aumentan de tamaño.
- Microsoft (junio 2025): Proponen un nuevo código geométrico 4D de corrección de errores, con la novedad de la corrección single-shot, lo que significa que pueden recuperarse de los errores con una sola ronda de mediciones.

También hay empresas dedicadas expresamente a este aspecto de la tecnología, la corrección cuántica de errores (QEC por sus siglas en inglés), como es el caso de la startup inglesa Riverlane.

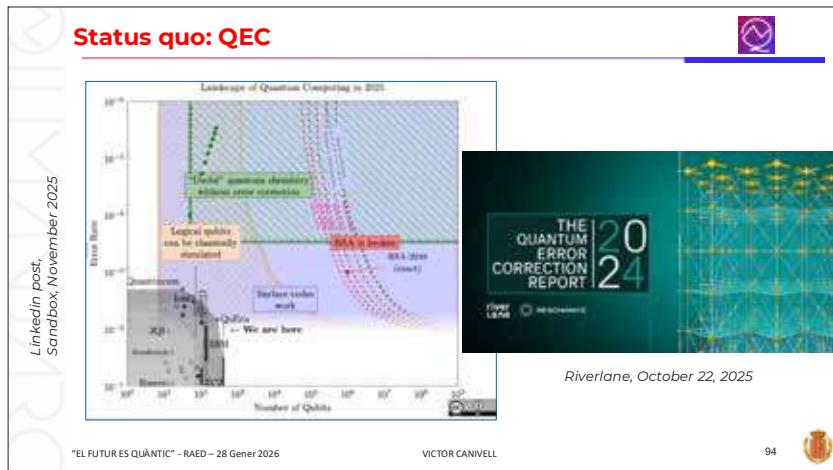
Pero la realidad es que estamos aún muy lejos de poder construir un computador cuántico tolerante a fallos (FTQC por sus siglas en inglés).

Otra cosa es que los avances en curso permitan a ciertos proveedores ofrecer servicios de computación cuántica útil para ciertos cálculos en un plazo de pocos años.

En definitiva, todo ello hace referencia a los computadores cuánticos de puertas lógicas, o digitales, que son la mayoría de los proyectos en marcha. Y son la mayoría, ya que estos modelos cuentan con el principio de universalidad, igual que los convencionales, lo que los hace muy atractivos. Pero se dan de brucos con el tema de los errores cuánticos.

Más adelante veremos cómo esta barrera no lo es tal para el otro tipo de computadores cuánticos, los analógicos, que de momento es minoritario en el mundo de las startups, pero muy prometedor.

STATUS QUO: QEC



Precisamente este cuadro presenta el estado actual de la tecnología de la gestión de errores – dónde estamos hoy (el vértice inferior izquierdo) y dónde necesitamos llegar para los sistemas digitales. Faltan varios órdenes de magnitud, y la cuestión es cuánto tiempo llevará para que los computadores cuánticos digitales aporten las ventajas prometidas.

Este lapso de tiempo abre las puertas para la computación cuántica analógica, ya que, en ésta, al no tener que interactuar con el qubit de manera repetitiva cada vez que ha de pasar por una puerta lógica del programa (y por tanto aumentar la probabilidad de que dicha interacción provoque involuntariamente su colapso cuántico y la imposibilidad de continuar trabajando en el régimen cuántico), los computadores analógicos evitan en gran medida estar condicionados por esta barrera. Comentaremos luego el caso de Qilimanjaro Quantum Tech, la startup cuántica de Barcelona.

Para corroborar este hecho, Riverlane ha publicado en octubre 2025 un informe que detalla la enorme magnitud del desafío a que la corrección de errores cuánticos (QEC por sus siglas en inglés) se enfrentará en este campo. El análisis subraya la necesidad de millones de qubits físicos para crear un solo qubit lógico, destacando la corrección de errores como un obstáculo central para la computación cuántica práctica. Los hallazgos de Riverlane destacan que, sin avances significativos en QEC, la construcción de computadoras cuánticas útiles seguirá siendo un gran desafío. Este informe es un recordatorio crucial de que, a pesar de los recientes avances e inversiones, el cuello de botella de la corrección de errores domina la viabilidad a corto plazo, reafirmando la brecha entre los prototipos experimentales y el hardware cuántico escalable y confiable.

Debido a esta dificultad de conseguir qubits sin errores, los desarrolladores de computadores cuánticos hablan de “qubits lógicos”, que se comportan como qubits teóricos sin errores y que se constituyen como una amalgama de “qubits físicos” (los que se pueden realmente fabricar, y que están sujetos a errores, sobre todo cuando se les insta a que sigan operaciones de puertas lógicas). Este año 2025 ha visto una abundancia de anuncios de estos qubits lógicos, como Quantinuum con Microsoft con 12 de ellos entrelazados o Atom Computing también con Microsoft con 24 de ellos entrelazados. IBM ha anunciado 200 qubits lógicos entrelazados para 2029. Asimismo, QuEra con MIT han realizado experimentos con más de 400 qubits entrelazados. Hay que decir que, siendo todos ellos sistemas con qubits diferentes (iones atrapados, átomos neutros, superconductores respectivamente), es muy difícil comparar objetivamente los méritos respectivos de cada cual, ya que entran en juego otros parámetros como son la velocidad, nivel de control o su escalabilidad industrial entre otros.

Lo que es cierto, es que es al camino para trascender la fase de los NISQs y dirigirse hacia el objetivo, aún lejano, de los sistemas tolerantes a fallos FTQCs.

Hay quien califica este impulso de los qubits lógicos como el “quantum integrated circuit moment”, mientras que la fase de los NISQs sería la equivalente a la de los tubos de vacío de la computación convencional.

Y es en este camino donde hay juego para startups analógicas como Qilimanjaro, ya que, de por sí, sus qubits de calidad y tiempos largos de coherencia, podrán funcionar de facto como qubits lógicos. Todo ello hace vislumbrar la cercanía de ventajas comerciales prácticas, seguramente de manera progresiva, y antes de alcanzar plenamente los FTQCs.

LOS ACTORES DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA



Este cuadro refleja la veintena más relevante de empresas que están desarrollando computadores cuánticos en la actualidad.

Están agrupados por tipo de qubit, y la mayoría son sistemas de puertas o digitales. Se incluye una categoría llamada “annealers”, pero que en realidad debería identificarse como “analog” (en cuya categoría se incluye el concepto de annealing, como es el caso de D-Wave). En esta categoría se incluye Qilimanjaro.

El número de actores por categoría da idea de la actividad e interés suscitado en cada caso, aunque no es necesariamente una prueba fehaciente del potencial de cada uno.

También se puede ver cómo la mayoría de las multinacionales están presentes (y las que no, tienen líneas de investigación corporativa y/o iniciativas de colaboración de startups, para seguir el pulso a este nuevo sector).

En este cuadro no se incluyen las iniciativas que puedan existir en países como Japón o China.

Esta última está muy activa a nivel de centros académicos, con investigación coordinada centralmente, y también incluye alguna startup en la categoría de qubits superconductores como Origin y QuantumCTek.

En cuanto a Japón, muchos de sus grandes grupos trabajan en coordinación con el centro nacional HPC Riken, y en particular con Fujitsu en el desarrollo de avanzados sistemas digitales superconductores.

Fujitsu además dispone de un equipo convencional que puede emular el funcionamiento de annealers cuánticos hasta un cierto tamaño, llamado Digital Annealer. Es útil como banco de pruebas, pero no deja de ser un computador clásico.

ROADMAPS CON IMPACTO EN LOS 2030'S



Todas estas empresas trabajan en sus roadmaps, sus planes de producto a futuro, y todas con el objetivo a llegar a poder aportar ventajas cuánticas frente a los computadores convencionales.

Se utilizan diferentes términos y cada proveedor lo adapta a su manera, para dar la impresión de estar más cerca del objetivo que los demás competidores.

De manera general, se define la supremacía cuántica como la demostración de que un computador cuántico resuelve un problema imposible para cualquier computador clásico, incluso un supercomputador, en un tiempo razonable. La ventaja cuántica es el siguiente paso, donde los computadores cuánticos resuelven un problema práctico y útil más rápido que los computadores clásicos, mientras que la utilidad cuántica se da cuando los computadores cuánticos pueden resolver estos problemas y proporcionar valor tangible y beneficios reales. La diferencia clave radica entre una tarea imposible

para un computador clásico (supremacía) y una tarea práctica y útil (ventaja/utilidad).

Google afirmó este mes de octubre 2025 que su chip cuántico Willow ha logrado una ventaja cuántica sobre un supercomputador clásico al ejecutar con éxito un algoritmo cuántico 13.000 veces más rápido de manera verificable que un algoritmo clásico, al hacerlo en el supercomputador más rápido a nivel mundial. Se trata de su algoritmo “Quantum Echoes” corriendo sobre el chip Willow. De ser exitoso, sería la primera vez que un computador cuántico logra una ventaja cuántica verificable, un gran hito.

Pero hay que decir que se trata de un tipo de cálculo muy específico, de interés en entornos académicos, y muy alejado aun del tipo de aplicaciones que esperan las empresas. Por tanto, es un paso relevante, pero un hito más en el largo proceso de superar los errores cuánticos y los challenges tecnológicos para construir un computador digital útil.

En definitiva, y en lo que concierne a ventajas estrictamente cuánticas (de tipo exponencial o polinómico) y útiles para la industria, entre los expertos hay variedad de opiniones, pero oscilan entre los 5 y 15 años para llegar a ventajas estrictamente cuánticas (no híbridas) y útiles para la industria.

En este sentido, comentaremos al final de la sección cinco el apoyo de las instituciones públicas USA (DARPA) y europeas (EuroHPC JU) en conseguir utilidades puramente cuánticas en la próxima década.

MIENTRAS, PUEDEN SER MUY ÚTILES: ALGORITMOS HÍBRIDOS CUÁNTICO-CLÁSICOS

**Mientras, pueden ser muy útiles:
algoritmos híbridos cuántico-clásicos**

ACS, June 2017

VQE
QAOA
QML

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

97

A pesar de que, de momento, solo dispongamos de computadores cuánticos ruidosos tipo NISQ, sí hay un camino para poder sacar provecho de ellos. Se trata de hacerlos trabajar de manera complementaria con computadores convencionales, de manera híbrida, para que se pueda aprovechar las ventajas de cada uno incluso a este nivel. Esto se está haciendo con frecuencia en la actualidad, y de hecho la mayoría de los anuncios públicos acerca de “aplicaciones cuánticas” realizados por usuarios hasta la fecha tienen que ver con este enfoque intermedio. Hay que reconocer sin embargo que no se trata de haber usado un computador cuántico real en plenitud de sus facultades teóricas.

Por otro lado, un ejemplo de ventaja en un contexto híbrido citado este año 2025, ha sido la empresa de ingeniería Ansys, que utilizó la computadora cuántica de IonQ para acelerar su análisis de interacciones de fluidos en dispositivos médicos en un 12 % en comparación con la computación clásica únicamente.

Otro ejemplo en contexto híbrido y citado este año ha sido el de Xanadu, Rolls-Royce y Riverlane, quienes han completado con éxito un proyecto colaborativo que demuestra mejoras drásticas en el modelado de simulaciones del flujo de aire de motores a reacción mediante un enfoque híbrido cuántico-clásico. La colaboración redujo considerablemente los tiempos de ejecución de las simulaciones para Rolls-Royce, reduciendo los costes de cálculo de semanas a menos de una hora, acelerando así la creación de prototipos para la industria aeroespacial.

La cuestión es que algunos problemas complejos resueltos por la computación clásica tienen un rendimiento y una escalabilidad limitados debido al número exponencialmente creciente de estados a evaluar. Por otro lado, actualmente, la computación cuántica se ve limitada porque el hardware cuántico aún no está lo suficientemente desarrollado como para ejecutar algoritmos que procesen grandes cantidades de datos. Al combinar ambas tecnologías, NISQ y clásica, es posible obtener en algunos casos un algoritmo capaz de procesar grandes volúmenes de datos con mayor velocidad.

Algunos de los algoritmos híbridos cuántico-clásicos más destacados incluyen:

- Variational Quantum Eigensolver (VQE): se utiliza en química cuántica y ciencia de materiales. El procesador cuántico calcula los niveles de energía de una molécula y el ordenador clásico optimiza los resultados.
- Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA): diseñado para problemas de optimización combinatoria, donde el procesador cuántico genera soluciones candidatas y el ordenador clásico selecciona la mejor.

- Quantum Machine Learning (QML): los algoritmos híbridos se aplican en modelos de aprendizaje automático donde el ordenador cuántico gestiona manipulaciones complejas del espacio de características y los algoritmos clásicos procesan y refinan las predicciones.

UN CASO RECENTE

Un caso reciente

FT, September 25, 2025

FINANCIAL TIMES
HSBC Holdings PLC | ANALYSTS
HSBC claims quantum trading breakthrough
Europe's largest lender tested a tool developed by IBM on bond market data

IBM Stock Jumps After HSBC Touts Quantum Bond Trading Trial

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

98

Un caso al uso de estos cálculos híbridos se anunció este verano 2025 con la noticia de que un gran banco europeo había probado una herramienta desarrollada por IBM con datos del mercado europeo de bonos corporativos, y descubrió que la tecnología era un 34 % mejor que los métodos tradicionales para predecir la probabilidad de ejecución de una orden.

Si bien los resultados del equipo de HSBC e IBM eran sólo teóricos y se basaban en datos históricos, sugerían que la computación cuántica podría tener un impacto significativo en la negociación en mercados extrabursátiles sin un intermediario centralizado. Los datos abarcaron más de un millón de solici-

tudes de cotización de más de 5000 bonos entre septiembre de 2023 y octubre de 2024.

El estudio publicado advertía que las conclusiones carecen de garantías de generalización a otros entornos de mercado o conjuntos de datos de negociación.

La noticia causó tal interés (debido al impacto en operaciones bancarias donde los márgenes pueden ser ínfimos), que, debido a ello, las acciones de IBM sufrieron ese día un impacto en positivo.

Este es el tipo de impacto que puede tener la computación cuántica, un salto cualitativo y disruptive en ciertas operaciones empresariales.

... O ERA OTRO “QOMBIE”?

The screenshot shows a blog post by Scott Aaronson. The title is "Shtetl-Optimized: The Blog of Scott Aaronson". The main text discusses HSBC's claim of a quantum advantage in financial trading. It includes a small image of a quantum circuit diagram and some mathematical notation. The post is dated September 25, 2025. At the bottom, there is a link to the abstract of a paper from HSBC and IBM.

... o era otro “qombie”?

S.Aaronson blog,
September 25, 2025

[+ Darkness over America](#)

HSBC unleashes yet another “qombie”: a zombie claim of quantum advantage that isn’t

Today, I got email after email asking me to comment on a new paper from HSBC—yes, the bank—together with IBM. The paper claims to use a quantum computer to get a 34% advantage in predictions of financial trading data. (See also blog posts [here](#) and [here](#), or numerous popular articles that you can easily find and I won’t link.) What have we got? Let’s read the abstract:

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

99

Excepto que hay que ir con pies de plomo al hacer ciertas aseveraciones, dada la complejidad de los cálculos y los contextos e hipótesis que hay que realizar en estos casos.

En particular, esta noticia levantó suspicacias entre algunos de los expertos, considerando que se había levantado otro “zombie cuántico” o “quombie”, en el sentido de dar por buenas conclusiones erróneas para anunciar ventajas cuánticas inexistentes. Esto suele ocurrir con nuevas tecnologías en sus fases iniciales, cuando no se calibran bien las circunstancias.

Los críticos adujeron que los usuarios sólo veían ventaja cuántica cuando había ruido en el computador cuántico, si se daba en el NISQ que utilizaron, pero que no se daría en un sistema tolerante a fallos, por lo que concluyeron los críticos que la “ventaja” aducida era solo un extraño artefacto de los métodos particulares que decidieron comparar, que no tenía nada que ver con la mecánica cuántica en general, ni con la aceleración computacional cuántica en particular.

Con independencia de los méritos respectivos del anuncio del banco, así como de sus críticos, está claro que hay que ir con mucho tiento al anunciar según que hitos revolucionarios.

Lo cual no quiere decir que no llegarán, porque llegar, sí llegarán sus ventajas revolucionarias.

MIENTRAS, TEMABIÉN PUEDEN SER MUY ÚTILES: ALGORITMOS, NO CUÁNTICOS, PERO SÍ “QUANTUM INSPIRED”

Mientras, también pueden ser muy útiles:
algoritmos, no cuánticos, pero sí “quantum inspired”

PWC, November 06 2024

Multiverse Computing Compresses
Llama 3.1-6B and Llama 3.9-70B By
80% With Almost No Precision Loss
Advanced LLM-compressor Compartilhamento similar versão das mais populares open-source AI
models available as a service

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

100

Para completar la visión del estado del arte de los sistemas cuánticos digitales, hay que comentar un beneficio colateral de la computación cuántica, los algoritmos conocidos como “quantum inspired”.

Los informáticos cuánticos se dieron cuenta de que podían des-cuantificar los algoritmos cuánticos, los que están destinados a los sistemas tolerantes a fallo y que en algunos casos se aprovechan en sistemas híbridos. De esta manera, inventaron un algoritmo clásico, modelado a partir del cuántico, que pudiera ejecutarse en hardware clásico y aprovechar ciertas ventajas del cuántico. En otras palabras, usar las matemáticas habituales de la cuántica para abordar problemas de computación clásicos de manera diferente a la tradicional. Resulta que, en algunos casos, y sólo en casos específicos, ocurre que este enfoque, inspirado en la cuántica, pero corriendo sobre computadores convencionales, dan resultados muy positivos.

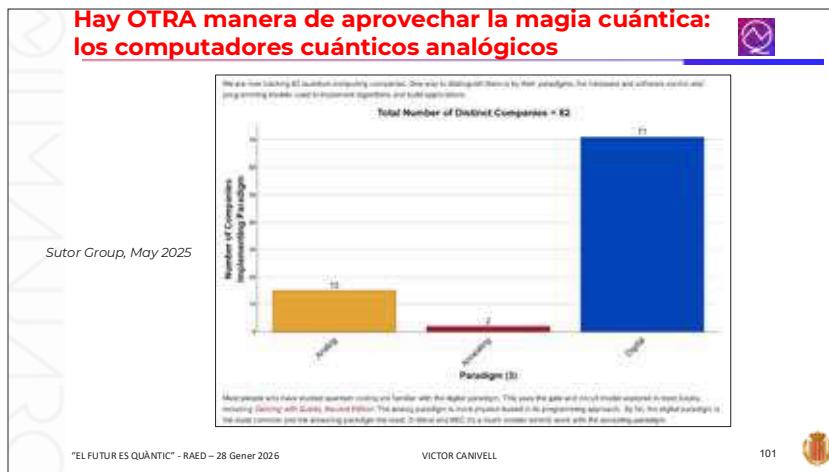
Por ejemplo, Qilimanjaro consiguió rebajar en un 70% el tiempo de cálculo de precios de una energética italiana, y T-Systems consiguió disminuir de 6 horas a 5 minutos el cálculo de la ubicación de nuevas torres de telefonía móvil.

Si logramos ampliar el concepto de computación cuántica a estas técnicas clásicas, relacionadas con la cuántica, como las redes tensoriales, y las incluimos en el ámbito de lo que llamamos computación cuántica, entonces sí, habrá una creciente demanda en un futuro muy próximo, especialmente en la era de los modelos generativos de IA, donde el número de parámetros crece exponencialmente.

Otro ejemplo notable de estos resultados fue el conseguido por Multiverse, empresa española líder en software de IA y con un gran bagaje de conocimientos de las técnicas de tensor networks utilizadas en la cuántica. Su modelo de tensorización trunca eficazmente las correlaciones presentes en un modelo LLM, lo que permite una reducción significativa del tamaño de la memoria y la cantidad de parámetros del modelo, manteniendo la precisión. La reducción significativa de la cantidad de parámetros del modelo mediante la tensorización reduce drásticamente el tiempo de transferencia GPU-CPU, lo que reduce el tiempo de entrenamiento e inferencia en un 50 % y un 25 %, respectivamente. En base a este tipo de resultados, Multiverse ha conseguido este año 2025 cerrar una de las rondas de financiación europeas más importantes, y es candidata para devenir un unicornio en el futuro. Pero recordemos que estamos hablando de quantum inspired.

Imaginemos lo que puede ocurrir con startups que consigan desarrollar tecnologías realmente cuánticas.

HAY OTRA MANERA DE APROVECHAR LA MAGIA CUÁNTICA: LOS COMPUTADORES CUÁNTICOS ANALÓGICOS



Como hemos mencionado en varias ocasiones, la gran mayoría de computadores cuánticos en desarrollo en la actualidad se basan en el modelo de puertas lógicas (o digitales). La razón principal ha sido el hecho de tratarse de un modelo universal de computación (similar al convencional), una faceta muy atractiva. Pero como hemos visto, la barrera principal para su desarrollo es la necesidad de corregir los errores cuánticos, y por ello de momento lo que tenemos son computadores ruidosos tipo NISQ de utilidad relativa.

En contrapartida, hay otra manera de aprovechar la magia de la física cuántica para hacer cálculos, se trata del modelo analógico de computación. Se trata de “physics aware algorithms”, en los que se codifica el problema a resolver, no en una secuencia de puertas lógicas cuánticas, sino en la expresión matemática de la dinámica de un sistema físico cuánti-

co (su “hamiltoniano”). La codificación se hace en base a los parámetros que rigen su dinámica. Y ello permite, una vez preparado el sistema cuántico, en dejarlo evolucionar casi de manera autónoma, con sólo un ligero acompañamiento, es decir con una mínima interacción con los qubits. De esta manera no se introducen las interacciones que, puerta a puerta, castigan a los qubit en los sistemas digitales. Esta es la gran ventaja.

Por otro lado, en principio no se trata de sistemas universales. Por ello despertaron menos interés inicialmente. Pero la realidad es que, en primer lugar, son la plataforma idónea para cálculos continuos (como todos los que se describen en la naturaleza, y por ello idóneos para estudios de materiales por ejemplo) y además no sufren el descalabro de los errores cuánticos. Por ello, en este cuadro se puede apreciar que de las 88 empresas listadas, sólo 15 siguen el modelo analógico (y 2 el de annealing, que puede considerarse, un caso particular del analógico), lo que pone de relieve la gran oportunidad actual de los sistemas analógicos.

Este modelo analógico es justamente el que usamos en Qilimanjaro para diseñar y construir nuestros computadores cuánticos, con el objetivo de ofrecer ventajas cuánticas para ciertos problemas de gran interés económico, sobre todo las adaptadas al modelo de cálculo analógico, y antes que la mayoría de los competidores digitales por la práctica ausencia del impacto de los errores cuánticos.

Además, se está explorando activamente la computación cuántica digital-analógica (DAQC por sus siglas en inglés), un enfoque híbrido que combina las fortalezas de ambos paradigmas. Este método utiliza operaciones analógicas robu-

tas para interacciones multi-qubit (bloques entrelazados) y puertas digitales para el control y la flexibilidad de un solo qubit. Este es uno de los objetivos futuros de Qilimanjaro en base a sus qubits superconductores y sus ventajas intrínsecas de control y programabilidad, además de la ventaja de fabricación con infraestructuras de la industria de semiconductores. Empresas como Pasqal y QuEra utilizan otros tipos de qubits, los átomos neutros, que pueden operar tanto en modo analógico como digital, aprovechando también las ventajas de cada uno para diferentes aplicaciones.

COMPUTACIÓN CUÁNTICA ANALÓGICA VS DIGITAL

Computación cuántica analógica vs. digital



Las ventajas principales de la arquitectura analógica son:

- Impacto muy inferior de los errores cuánticos
- Adecuación natural a los problemas de cálculo continuos, obviando errores innecesarios de su digitalización
 - Procesos naturales de interés en química, materiales
 - Cálculos relativos al entrenamiento de la IA

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

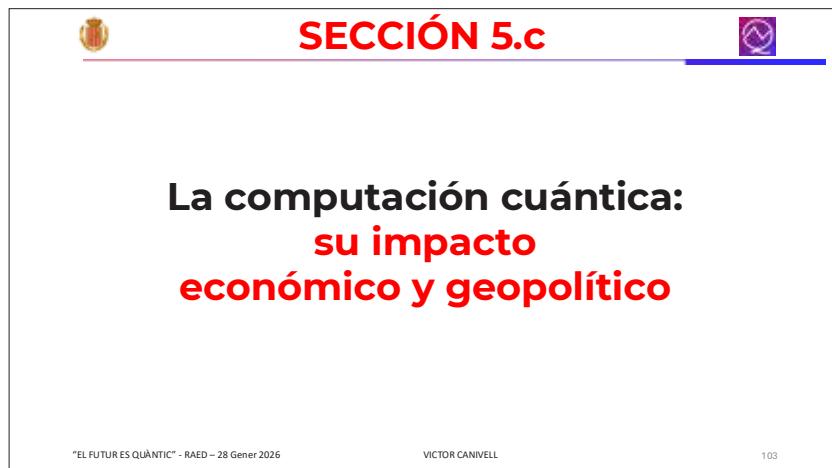
102

Las diferencias clave entre ambas arquitecturas, la computación analógica y la digital pueden resumirse en este cuadro:

Característica	Digital (o de puertas)	Analógico
Representación de la información	Utiliza qubits discretos, de forma similar a los computadores clásicos.	Utiliza variables continuas, como la amplitud y la fase de una función de onda cuántica.
Cómo opera	Emplea una secuencia de puertas lógicas discretas (circuitos cuánticos) para ejecutar algoritmos paso a paso.	Manipula unos pocos parámetros físicos y permite que el sistema evolucione continuamente hacia una solución, a menudo aprovechando las interacciones naturales entre los qubits.
Flexibilidad	Universal: cualquier computación cuántica posible puede descomponerse en una secuencia de puertas.	Específica para cada tarea; ideal para problemas específicos como la optimización y las simulaciones cuánticas, donde el problema puede mapearse directamente en el hardware.
Susceptibilidad a errores	Los errores se acumulan con cada operación de puerta, lo que requiere técnicas complejas de QEC.	Es menos susceptible al ruido en problemas específicos, ya que el cálculo es una evolución continua, lo que es más resistente a los errores.
Horizonte para ventaja cuántica	Promete aplicaciones universales, pero se enfrenta a grandes desafíos para lograr tolerancia a fallos.	Podría lograr una “ventaja cuántica” antes para problemas específicos a corto plazo debido a una menor acumulación de errores y tiempos de ejecución más rápidos para tareas relevantes.

En el caso de Qilimanjaro, lo que ha primado su decisión de centrarse en la arquitectura analógica ha sido justamente esta última característica, la de poder aportar ventaja cuántica a ciertos problemas importantes de cómputo antes que la competencia. Hablaremos de Qilimanjaro en la sección referida a la oportunidad de crear un hub cuántico en Barcelona.

LA COMPUTACION CUÁNTICA: SU IMPACTO ECONÓMICO Y GEOPOLÍTICO



The header features a red ribbon banner with the text "SECCIÓN 5.c" in white. On the left is a small circular logo with a heraldic emblem. On the right is a blue circular logo with a stylized letter "Q". Below the banner, the title "La computación cuántica: su impacto económico y geopolítico" is displayed in large, bold, black and red text.

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

103

Vistos los conceptos básicos de qué es y en qué estado de evolución se encuentra la computación cuántica, se trata ahora de ver cuál será su impacto en los ámbitos económicos y geopolíticos.

El impacto es importante.

En una primera fase, son los gobiernos quienes alientan el conocimiento, investigación y desarrollo de estas nuevas tecnologías debido a su doble impacto futuro, tanto económico como geopolítico. Estas inversiones motivan a continuación el interés de inversores privados en apoyar las startups disruptivas que surgen de los centros académicos, aún sabiendo que se trata de tecnologías “deeptech” con posiblemente un largo recorrido hasta su madurez, es decir, se trata de capital paciente.

Finalmente se establecen consorcios de los actores principales, tanto de proveedores tipo startups como de empresas TIC establecidas, como de empresas usuarias pioneras, para contribuir

con sus iniciativas a que se establezcan las mejores condiciones de este mercado en fase naciente, con actividades de lobby incluidas para financiación e infraestructuras de los proveedores, y para facilitar el acceso y la educación de los usuarios.

VECTORES DEL IMPACTO

Vectores del impacto

- **Ciberseguridad = criptografía**
- **Procesos económicos**

McKissey, July 2025

Quantum computing will create huge value in almost every industry, but it will pose an unprecedented threat to cybersecurity, too.

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

104

Ante todo, hay que reconocer las dos grandes categorías del impacto de la computación cuántica:

- Los ligados a la ciberseguridad, debido a su capacidad de romper la criptografía actual
- Los ligados a la competitividad y el crecimiento económico, ligado al uso de computadores mucho más capaces que los convencionales en ámbitos como nuevos materiales y medicinas, mejoras en la logística o en el uso y desarrollo de la IA

Más allá del impacto transversal de la computación cuántica en toda la economía, hay que considerar también el impacto del

desarrollo de una nueva industria, una industria que además será estratégica por sus derivadas geopolíticas.

EXPECTATIVAS DE IMPACTO POR SECTOR EN LA ACTUALIDAD



Veamos la situación actual, quiénes son los pioneros en usar la computación cuántica. Este cuadro de la consultora Omdia clasifica los sectores en base a la percepción actual del impacto en ellos de la computación cuántica.

Está claro que los sectores farma y química, junto al financiero, son los que lideran la tabla con más de un 80% de impacto, seguido de cerca por los sectores el sector energético y aeroespacial y defensa, junto al sector público (con el peso de los centros de investigación académica y los centros de ciberseguridad).

En definitiva, un peso importante de los sectores donde los casos de uso de simulación cuántica (más que de computación estructurada) son importantes.

IMPACTO ECONÓMICO: DE \$1 A \$2 “TRILLIONS”



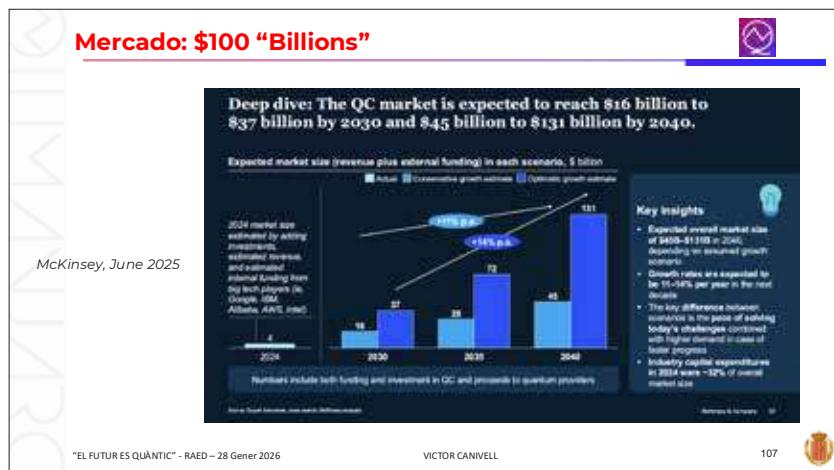
Por otro lado, este otro estudio de McKinsey traduce y cuantifica los impactos económicos esperados de la computación cuántica, por sectores, en cuanto al valor económico aportado hasta 2035, y donde destacan de nuevo los sectores financiero, farma, energía y materiales, además de transportes y logística.

El valor económico aportado se define aquí como facturación adicional y/o en reducción de costes debido al uso de computación cuántica en los próximos diez años.

Y el cómputo final es de \$1T a \$2T, una cifra considerable teniendo en cuenta el PIB mundial de unos \$100T, así como el hecho de que a fecha de hoy de lo que disponemos es de NISQ's. En el estudio se modelizan diferentes escenarios de cómo de rápido avanzarán en su desarrollo a FTQC.

Así, estos estudios contemplan diferentes escenarios de desarrollo y calendarios para acceder a ventajas cuánticas en este decenio, por caso de uso y sector - y confirman las expectativas de aportación de valor por parte de la computación cuántica.

MERCADO: \$100 “BILLIONS”



En el mismo estudio de McKinsey se valora el tamaño del mercado cuántico como tal, en este caso sumando la facturación conseguida más las inversiones externas recibidas por las startups cuánticas así como estimando las inversiones internas realizadas por las multinacionales en sus divisiones cuánticas.

De esta manera se estima una cifra de \$4B en 2024, de \$16B a \$37B en 2030 y de \$45B a \$131B en 2035.

Para poner las cifras en perspectiva, el mercado global de las TIC se valora en aproximadamente \$6T en 2024 y se proyecta que alcance \$7B para 2030.

Así que se trata de un segmento emergente, pero de gran impacto.

LOS SECTORES PIONEROS – A FECHA DE HOY

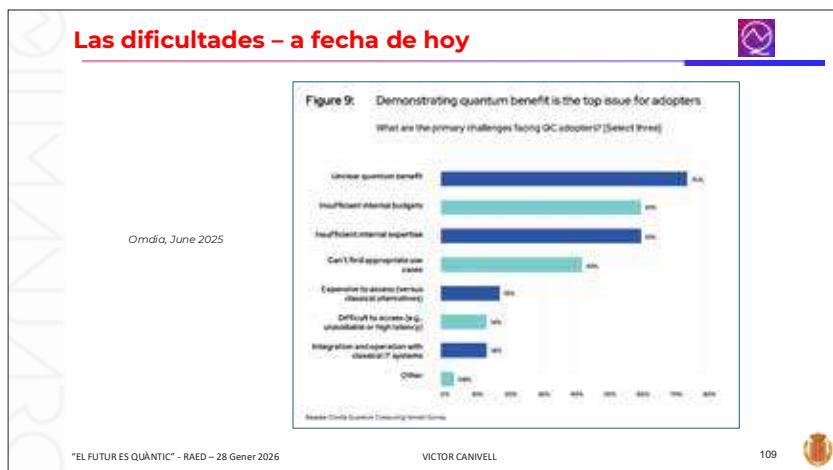


Visto el impacto esperado, volvamos a la actualidad, para ver qué tipos de sectores están ya interesados en empezar a explorar estas nuevas tecnologías de computación cuánticas.

Como es de esperar, y se puede observar en este estudio de Omdia, se trata de los grandes centros de investigación y los gobiernos, seguido por los sectores financiero y la farma.

En estas estadísticas se mezcla el interés en temas de nuevas aplicaciones y algoritmos para acelerar los cálculos operativos junto al interés en temas de ciberseguridad.

LAS DIFICULTADES – A FECHA DE HOY



¿Y cuáles son las dificultades encontradas hasta la fecha por estos primeros usuarios?

Se suman temas internos ligados a la falta de conocimiento (la cuántica hasta la fecha es el ámbito exclusivo de los físicos) y de falta de presupuestos (por tratarse de un futurable, que no algo urgente) junto al hecho de que los casos de uso y sus beneficios de momento son limitados (ya que la tecnología no ha estado suficientemente madura como para proveer de ventajas sustanciales a nivel empresarial).

Todo ello muy previsible dadas las circunstancias que hemos comentado.

LA CARRERA GEOPOLÍTICA



Ahora veamos el impacto geopolítico en la práctica, qué están haciendo los gobiernos al respecto.

El resumen es que todos los gobiernos de los países avanzados han definido planes estratégicos para asegurarse de que su industria TIC lidere, o al menos no pierda el carro de una tecnología sensible en temas de ciberseguridad además de motor de competitividad en industrias clave. Hasta la fecha se han contabilizado \$56B de inversiones del sector público a nivel global.

Pero cada región lo hace según su modelo de funcionamiento.

En los USA el peso de esta naciente industria lo lleva directamente (algunas de) las Big Tech y el conjunto de spinoffs de sus principales universidades. El gobierno federal y los de los estados complementan estas iniciativas privadas con programas de financiación de compra pública y sobre todo de apoyo a la investigación, tanto civil como de defensa. Es curioso destacar que el actual Sub-Director General del poderoso Department

of Energy (DoE), el español Darío Gil, que proviene de IBM, y donde había sido el responsable de sus unidades de Investigación y Desarrollo de computación cuántica y de IA. Ello demuestra la importancia de estas dos tecnologías en sus prioridades. El DoE es un gran actor en temas de centros públicos de investigación, así como de hacer frente a las grandes demandas actuales de crecimiento de la infraestructura energética por la demanda de las grandes inversiones en centros de datos IA.

En China, aunque no haya demasiada visibilidad acerca de lo que allí ocurre, está claro que el gobierno central apoya con fuerza la computación cuántica, y de que cuentan con una gran capacidad de desarrollo al respecto. De hecho, se cree que es el país que mayor presupuesto destina a su desarrollo. Por un lado, no hay ninguna duda de que China está en la punta de la ola en tecnologías de comunicaciones cuánticas. Por otro, y en relación con la computación cuántica, un acontecimiento curioso ha sido que, en noviembre 2023, Alibaba, el gigante del comercio electrónico y la computación en la nube, anunció el cierre de su laboratorio de investigación de computación cuántica y la donación de todo su equipo a la Universidad de Zhejiang, en Hangzhou. En enero 2024, Baidu, el principal proveedor de búsquedas de su país, siguió el ejemplo y transfirió sus instalaciones de investigación a la Academia de Ciencias de la Información Cuántica de Pekín. Ninguna de las compañías explicó la decisión, aunque los principales comentaristas especularon que las medidas podrían indicar un intento del gobierno chino de ejercer un control más estricto sobre lo que considera una tecnología estratégicamente importante.

En medio de ambas potencias se encuentra Europa. Como es tradición, con una gran calidad en la investigación académica, pero con el riesgo de perder esa posición privilegiada en cuanto haya que convertir la investigación en innovación de éxito en el

mercado. Es por ello que la Comisión, así como muchos de los países, han creado una serie de iniciativas potentes de acompañamiento de las startups para hacerlas crecer y tener opciones de crear campeones internacionales de este mercado (en contrapartida a lo ocurrido en las tecnologías TIC hasta la fecha).

En particular, España anunció este año 2025 un ambicioso plan de 800M€ para cuántica. Y la Generalitat está preparando las bases de su propio plan de tecnologías cuánticas para 2026.

ES ESTRATÉGICO

The screenshot shows a news article with the title "Es estratégico" at the top. Below it, there is a section titled "Quantum technology is viewed as a strategic asset by major governments..." with three sub-sections: "White House FY 2027 R&D priorities, 2025", "National quantum strategy, UK government, 2023", and "Quantum Europe Strategy, European Commission, 2025". Each sub-section includes a small image of the respective country's flag. At the bottom of the screenshot, there is a link to "EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026 and the author's name, VICTOR CANIVELL.

Todos los gobiernos han anunciado que la cuántica, y en particular la computación cuántica, entra entre sus prioridades de futuro.

Es interesante ver, incluso en USA, como la administración Trump ha indicado recientemente su disposición a entrar directamente en el capital de las startups cuánticas, algo inaudito en este país, excepto para sectores que se consideran es-

tratégicos para su economía y para su defensa. Esto ya se está haciendo en Europa a través de los vehículos del BEI.

Hablando de USA, el Departamento de Energía (DOE) busca duplicar la productividad científica nacional en una década mediante la convergencia de la IA, la computación clásica de alto rendimiento y la computación cuántica. Esta estrategia incluye una inversión importante (que supera los 1.600 millones de dólares desde 2019) en Ciencia de la Información Cuántica (QIS por sus siglas en inglés), basándose en las contribuciones históricas del DOE a la física cuántica.

Reforzando este compromiso, el DOE ha anunciado en noviembre 2025 una inversión de hasta \$625M para apoyar los cinco Centros Nacionales de Investigación QIS. Estos centros, inaugurados en 2018, ya han contratado a más de 900 científicos y capacitado a más de 2.500 personas, y ahora se ampliarán para incluir colaboraciones con más de 50 instituciones académicas y 18 socios industriales. El objetivo es superar los desafíos clave de la computación cuántica, escalar sistemas y aplicar las tecnologías cuánticas a problemas científicos del mundo real. Esta “Genesis Mision” persigue que “todo el conocimiento sea computable” para la IA y la cuántica. La iniciativa se denomina también “Proyecto Manhattan 2.0”, pero a diferencia de su predecesora, depende de la movilización de la inversión del sector privado, ya que reunirá a los laboratorios del DOE junto con actores privados como Nvidia, OpenAI y Cisco para convertir grandes cantidades de datos científicos históricos en datos de entrenamiento de alta fidelidad para IA.

Ni que decir tiene que, además de los países aquí recogidos como muestra, hay que añadir los planes cuánticos de países como China, Japón, India y otros muchos.

INICIATIVAS PRIORITARIAS POR REGIÓN

Iniciativas prioritarias por región			
Region/Country	Public Investment	Private Investment	Key Players
European Union	MS >6bn + €2B Quantum Flagship (H2020)	Lower compared to global counterparts	Universities, startups, MS and EU-led, IQM, Pasqal, AQF, Blueforce, ...
qt.eu, 2025	United States	National Quantum Initiative	Strong from bit tech players such as Google, IBM, Microsoft
	China	Large state-backed investment in quantum infrastructure	Growing, government-driven
	Canada	Gov-private partnerships on quantum computing research	Strong collaboration with D-Wave, Xanadu, ...
	Japan	Significant gov investment (Moonshot, Quantum Strategic Program)	Growing with Toshiba, NTT, Fujitsu
	UK	Major public funding through UK National Quantum Technologies Programme	Moderate, focused on startups and collaborations
	Australia	State investment in quantum computing and communications	Collaboration with companies like Silicon Quantum Computing
			Silicon Quantum Computing, Quantum Brilliance, DarioQ

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

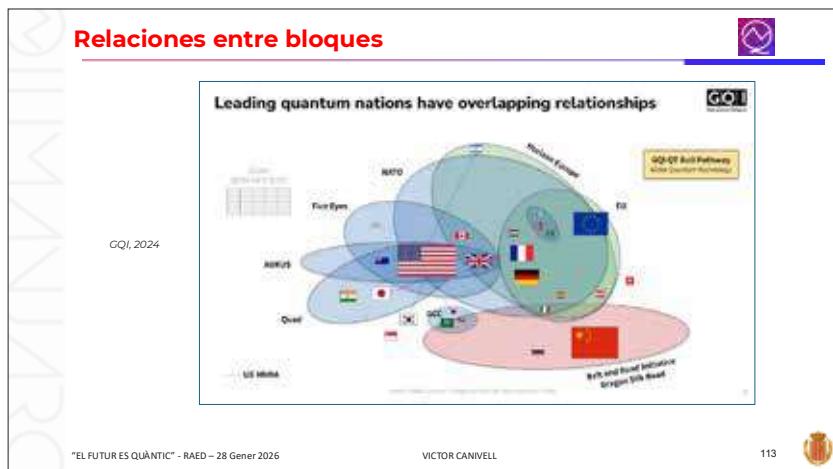
112



En particular, este cuadro del Quantum Flagship de la CE, destaca las características y algunos detalles de cómo afrontan y qué prioridades establecen las diferentes regiones con estas políticas públicas de apoyo al desarrollo al sector de la computación cuántica, siguiendo las pautas comentadas anteriormente.

Hay que destacar que, más allá de las iniciativas locales de cada región, se establecen relaciones de colaboración entre bloques como visualiza la siguiente gráfica de GQI,

RELACIONES ENTRE BLOQUES



El mundo de la computación cuántica es aún muy joven y tiene una gran relación e incluso dependencia de lo que se hace en los centros académicos.

Como el mundo académico es muy abierto y transparente, ocurre en este sector de la computación cuántica que aún hay muchas colaboraciones de facto entre países o regiones, mas allá de lo que ocurre en el mundo empresarial. Ello hace pensar en un caso paradigmático en el mundo de la investigación de física de altas energías, la del CERN durante la guerra fría. A pesar de la enorme tensión entre bloques, en el CERN siguió habiendo una colaboración efectiva de investigación básica entre países de ambos bloques. Un poco de este efecto se da en la actualidad.

Por otro lado, es evidente que el tema de la IP y las patentes juega ya un peso fundamental en el mundo de las empresas cuánticas. Y finalmente entran en juego los mecanismos de control de exportaciones entre bloques.

En cualquier caso, este cuadro sí indica que existen claras zonas de colaboración entre regiones o países, muy alineado con los temas de inteligencia o defensa, debido a la naturaleza de la tecnología cuántica.

LOS PLANES NACIONALES



Volviendo al tema de los planes nacionales de apoyo a la cuántica, esta tabla de GQI-Pestel valora la efectividad esperada de los mismos según una batería muy completa de criterios.

Se incluyen entre otros, los niveles académicos, el talento, la presencia de empresas tractoras, el contexto legal y la capacidad de financiación.

Como no deja de ser habitual, los países mejor cualificados son USA, Reino Unido y Suiza, cuyos planes son una buena fuente de inspiración, por su compromiso y su efectividad.

Este cuadro de los planes nacionales es un instrumento útil para hacer comparaciones y ver que países tienen la mejor puntuación por categoría.

Hay que destacar nuevos planes nacionales recientemente anunciados y aquí no incluidos, como el español, y también el de Singapur, ambos ambiciosos. Este último, en el que juega un rol importante nuestro co-fundador de Qilimanjaro, Latorre, como director del prestigioso Center for Quantum Technologies (CQT), es muy interesante como ejemplo de cómo un pequeño país sin recursos naturales ha decidido crear una “quantum economy”, con una gran concentración de recursos y planificación centralizada, en base a proveer a sus usuarios con el mejor servicio comercial disponible en el mercado y, a la vez, desarrollar tecnología y campeones propios.

EL CONTROL DE LAS EXPORTACIONES ...

El control de exportaciones ...





FOR IMMEDIATE RELEASE
September 5, 2024
<https://www.bis.gov>

Bureau of Industry and Security
U.S. Department of Commerce

BUREAU OF INDUSTRY AND SECURITY
Office of Congressional and Public Affairs
Media Contact: OCPA@bis.doc.gov

Department of Commerce Implements Controls on Quantum Computing and Other Advanced Technologies Alongside International Partners

WASHINGTON, D.C. – The U.S. Commerce Department’s Bureau of Industry and Security (BIS) published an interim final rule (IFR) today implementing controls on critical and emerging technologies that have reached broad technical agreement among our international partners. This IFR includes controls related to quantum computing, semiconductor manufacturing, and other advanced technologies. Today’s action strengthens our international relationships with like-minded countries and ensures that U.S. export controls keep pace with rapidly advancing technologies that pose serious threats to our national security when in the wrong hands.

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

115

Pero abordemos otro aspecto de la geopolítica, el tema de los controles de exportación. El tema geopolítico no se limita al

desarrollo de los planes nacionales, sino que tiene mucho que ver también con el control de la propiedad intelectual (IP por sus siglas en inglés) y de las exportaciones, como instrumento de defensa de la soberanía nacional en temas muy estratégicos.

Ya en época de la administración Biden, los USA impusieron una serie de restricciones importantes en la exportación de tecnologías avanzadas a otros países, incluyendo la cuántica.

Y desde entonces este control no sólo se ha acrecentado, sino que se ha multiplicado a muchas regiones. Incluidas la UE, con transposiciones a los países miembros, como es el caso español.

... ¿CONTRAPRODUCENTE A LARGO PLAZO?



De todas maneras, hay que reconocer que en ocasiones las políticas de control de exportaciones tienen el efecto contrario, al espollear al otro país en poner más foco y recursos en el desarrollo

de tecnología propia, y por tanto en llegar a desligarse antes de las dependencias que pudiese haber tenido con el país de origen.

En particular, los expertos especulan que en el caso de Nvidia y Huawei puede haberse dado un fenómeno de este tipo este año 2025 al anunciar sus nuevos chips, ya muy competitivos con la gama medio alta de la empresa norteamericana.

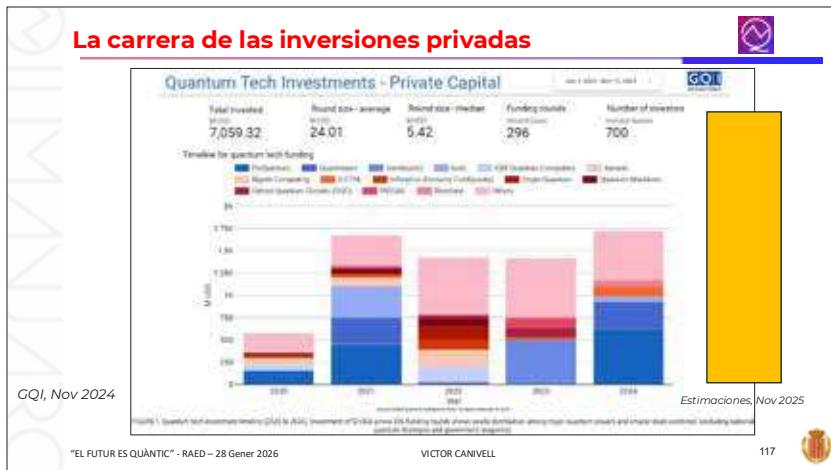
En cualquier caso, ya a comienzos del 2025, y a pesar de este tipo de restricciones de exportación de los chips más avanzados, empresas chinas han sido capaces también de desarrollar sistemas LLM de AI muy (sino más) competitivos en base a su capacidad de desarrollo de software con chips de tipo medio (no sujetos a restricciones). Este fue el caso de DeepSeek en diciembre 2024, cuando su modelo de LLM superó los modelos de rivales consolidados como OpenAI, Meta y Anthropic, respaldados por Microsoft (MSFT), que han invertido miles de millones de dólares en ampliar sus LLM. El primer LLM de código abierto de DeepSeek, DeepSeek V3, se construyó con menos de 6 millones de dólares, utilizando chips H800 de Nvidia (NVDA) para el entrenamiento, es decir funciona con chips de capacidad reducida.

Estos LLM de DeepSeek se han desarrollado a pesar de los controles de exportación USA para limitar el acceso de China a los chips avanzados necesarios para el trabajo de IA.

Es más, la última versión de Deepseek (v3.2) es igual o mejor en prestaciones que los LLMs de Google y OpenAI ... a una décima parte de su precio.

Lo ocurrido con los chips de IA y los LLM, también puede ocurrir en la cuántica. A pesar de ello, es seguro que ciertos controles persistirán.

LA CARRERA DE LAS INVERSIONES PRIVADAS



Para poner en perspectiva el nivel de inversión del sector público, veamos el nivel de inversión correspondiente en el sector privado.

Las inversiones privadas en la actualidad están en un nivel anual de \$2B en startups (datos a cierre de 2024). En este cuadro de GQI se incluyen los casos de SandboxAQ, del grupo Alphabet (Google) pero con otros inversores privados, y de Quantinuum, una empresa spinoff de Honeywell que también cuanta con inversión privada independiente.

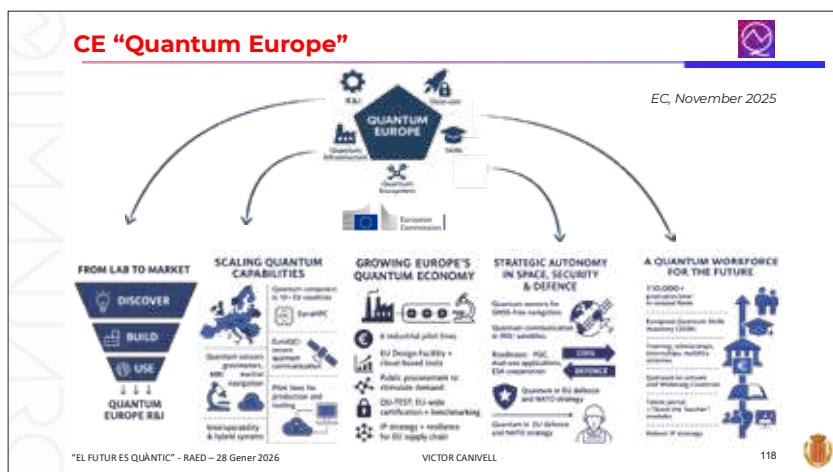
Como referido al inicio, al hablar de las inversiones de Nvidia en cuántica, este año 2025, y solo con las rondas más importantes ya conocidas en noviembre, se estima que se habrá invertido unos \$4B en el año, lo que representa un crecimiento anual del 100%.

En este cuadro, que abarca varios años hasta el 2024, se contabilizan una mayoría de startups USA, con un par de excepciones.

nes europeas (IQM y Pasqual) y una china (Origin), lo que es un reflejo de la situación global.

Se estima que las inversiones internas en computación cuántica de las multinacionales implicadas en computación cuántica serían otros \$2B en el 2024, por lo que el nivel de inversión privada en computación cuántica fué del orden de los \$4B en 2024.

CE “QUANTUM EUROPE”



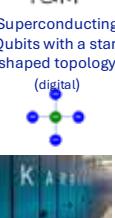
Si analizamos el caso europeo, vemos un programa completo de la Comisión Europea de apoyo a la naciente industria de la computación cuántica. Plan que complementa los planes nacionales, que los complementa e intenta coordinar.

Se trata de una serie de iniciativas que siguen en la actualidad el impulso iniciado hace una década en el apoyo a la investigación académica con el programa Quantum Flagchip de inversión de 100 millones de euros durante diez años, y que ha permitido desarrollar una gran capacidad de investigación cuántica en Europa.

Se calcula que en total la CE ha invertido unos 11B€ (2B€ de la CE y 9B€ de los países miembro) en los últimos cinco años, tanto en investigación como en inversión en infraestructuras de desarrollo y fabricación de prototipos, como en apoyo a las startups de la región.

En la actualidad, el foco se ha puesto en apoyar la innovación resultante de este esfuerzo para apoyar y hacer crecer startups europeas. Por ello hay iniciativas del tipo “lab-to-fab” para proporcionar las infraestructuras necesarias para desarrollar en tiempos los chips cuánticos necesarios, debido al gran coste de salas blancas correspondiente. También se promueve la compra pública de computadores cuánticos en instalaciones de supercomputación para acelerar la experiencia de los usuarios con sistemas cuánticos, así como en su hibridación en plataformas de HPC. Entre otros, también se promueve el desarrollo de aplicaciones en áreas prioritarias y por descontado se promueve también la formación de los usuarios en estas nuevas tecnologías tan diferentes a las convencionales.

CE “QUANTUM COMPUTING INFRASTRUCTURE”

CE "Quantum Computing Infrastructure"					
EuroQCS-France [GENCI]  Photonic Qubits (digital) 	Euro-Q-Exa (Germany) [LRZ]  Superconducting Qubits (digital) 	EuroQCS-Italy [CINECA]  Neutral atom Qubits (analogue/digital) 	Lumi-Q (Czechia) [IT4I]  Superconducting Qubits with a star-shaped topology (digital) 	EuroQCS-Poland [PSNC]  Trapped ion Qubits (digital) 	EuroQCS-Spain [BSC]  Superconducting Flux Qubits – Annealer Mode (analogue) 
Joliot-Curie	SuperMUC-NG	Leonardo	Karolina	Altair	Mare Nostrum-5
"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026					
VICTOR CANIVELL					
EC, November 2025					
119					

La iniciativa de instalar computadores cuánticos en centros de HPC europeos se inició en seis centros de supercomputación, y ahora está previsto ya para el doble, por lo que en la práctica todos los centros públicos tendrán acceso directo a un sistema cuántico.

La Comisión ha pretendido que haya una gran diversidad de tecnologías (de qubits y/o de sistemas digitales o analógicos) de manera a poder probarlos en la práctica y poder evaluar cuales son los más prometedores. También es intención de la Comisión que haya acceso público para la red de los investigadores a todos estos centros de datos, así como a sus computadores cuánticos respectivos, para hacer las pruebas lo más extensivas posibles.

En el caso español, y dentro de esta iniciativa europea, Qilimanjaro instalará en 2026 uno de sus nuevos sistemas cuánticos analógicos en el BSC.

De esta manera el BSC será uno de los centros HPC pioneros a nivel internacional en ofrecer a sus investigadores, a la vez, acceso a un computador cuántico analógico, a otro digital (cuyo conjunto se conoce como MareNostrum Ona), ambos bajo el mismo stack de software, más al supercomputador MareNostrum 5 de HPC y a la nueva AI Factory

Se trata de un entorno muy completo de tecnologías, prototípico de los centros de datos del futuro, con CPUs de propósito general, GPUs de IA, más QPUs cuánticos en sus dos modalidades, analógico y digital.

CE “QUANTUM PILOT LINES”

CE “Quantum Pilot Lines”

Quantum Tech	Technical Focus	Strategic Objective
	Integrated microwave control, scalable fabrication, coherence preservation	Industrial-scale yield of superconducting QPUs
	Quantum Photonic Integrated Circuits (QPICs), monolithic integration, photon sources	Enable photonic QPUs & QComm chips with CMOS-compatible fabrication
	Silicon spin qubits, CMOS-compatible fabrication, 2D/3D stacking	Transfer spin-based QPUs from labs to fabs, scalable readout & packaging
	NV and SiV centers in diamond, sensing and computing integration	Advance EU self-sufficiency in quantum sensors and QPUs based on diamond
	Atom arrays, optical tweezers, laser beam integration	Create pilot-level capability for neutral-atom-based digital/analog QPUs
	Micro-fabricated ion traps, vacuum packaging, integrated laser systems	Establish EU trapped-ion foundry with sustainable chip-level production

The diagram illustrates the objectives of the Quantum Pilot Lines:

- Supporting the development of quantum chip technology.
- Providing scaled-up production facilities.
- Enhancing availability for computing, communication and sensing.
- Open to European stakeholders, especially start-ups and SMEs.
- Boosting innovation capacity for Europe.

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

EC, November 2025

120

Para poder fabricar los corazones de los computadores cuánticos hace falta fabricar los chips cuánticos. Como de momento estos desarrollos son artesanales, en cuanto que se hacen en pequeñas cantidades según van avanzando sus diseños, este trabajo se realiza en salas blancas de centros públicos (caso de las startups) o internos (caso de las multinacionales) de las empresas que las desarrollan. En particular, las startups, sin la capacidad de invertir en estas costosas infraestructuras, sufren en general un tiempo de respuesta muy largo de acceso a la fabricación, lo que les pone en clara desventaja competitiva.

Por ello, una de las líneas cruciales del programa de la Comisión es la inversión en una red de centros de fabricación “piloto” que darán cobertura a las startups.

En el caso de Barcelona, además, hay una iniciativa muy relevante en curso para dotar de una planta “lab-to-fab” para nuevos tipos de chips, como los cuánticos superconductores de Qilimanjaro o los chips de grafeno de startups en el ámbito

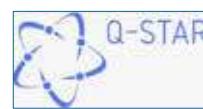
biomédico, para poder disponer en el Parc Alba de una planta avanzada de este tipo. El proyecto de esta iniciativa lleva el nombre de Innofab, y se espera que esté operativa a partir de 2028. Ello será una gran contribución al tejido de las nuevas industrias cuánticas – sumándose a otras salas blancas para investigación, como las del CMB-CNM de Bellaterra y la del ICFO en Castelldefels.

QUIC: EL CONSORCIO CUÁNTICO

QuIC: el consorcio cuántico







"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026
VICTOR CANIVELL
121

Para complementar las iniciativas públicas mencionadas, las empresas de este nuevo sector cuántico se están organizando en asociaciones o consorcios para preparar recomendaciones e iniciativas dirigidas al sector público para contribuir al desarrollo más efectivo del mismo.

Estos consorcios también se dirigen al mundo empresarial, para promover el conocimiento de estas nuevas soluciones y promover el interés en su uso, inicialmente como pruebas de concepto y más tarde pasar a pruebas piloto.

En particular, en Europa se ha constituido desde el 2029 el Quatum Industry Cosortium (QuIC), muy influyente en la CE en cuanto a plantear las opciones de futuro para el sector y sus necesidades. En este consorcio se incluyen las empresas proveedoras (tanto startups como gigantes del sector, junto a las empresas usuarias interesadas en el uso de estas tecnologías, generalmente grandes grupos, siempre desde el ángulo de las empresas europeas).

Este consorcio se relaciona con los consorcios respectivos de otras regiones, como en USA (Quantum Economic Development Consortium o QED-C), UK (UKQuantum), Canada (Quantum Industry Canada o QIC), o Japon (Q-STAR) por ejemplo. Todas ellas abogan por la cooperación internacional, las alianzas confiables y la interoperabilidad para establecer una economía cuántica global exitosa. No hay que obviar que, en primer lugar, dichas asociaciones abogan por el desarrollo de sus respectivas industrias nacionales.

Las empresas españolas son muy activas en QuIC desde su inicio en 2021. Asimismo, a nivel del estado, hay un grupo de trabajo muy activo dentro de Ametic, la asociación española del sector informático.

LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA: LA OPORTUNIDAD DE BARCELONA



The graphic features a red ribbon banner across the top with the text "SECCIÓN 5.d". On the left is a small blue and white logo, and on the right is a blue square with a white circular symbol. Below the banner, the title "La computación cuántica: la oportunidad de Barcelona" is displayed in bold black and red text.

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

122

Es importante destacar que la zona metropolitana de Barcelona cuenta con las bases y las iniciativas para convertirse un hub internacional importante, no únicamente en el abanico de las tecnologías cuánticas como las de comunicación, que sin duda también, sino especialmente en computación cuántica.

Hay la oportunidad de construir un ecosistema con centros académicos cuánticos, empresas startups cuánticas y fondos de inversión especializados en cuántica – similar a lo que ya se ha hecho con éxito en las dos últimas décadas con el ecosistema biotech.

UN HUB CUÁNTICO EN CIERNES: LAS BASES



Tenemos las bases, el punto de partida, tal como se aprecia en la diapositiva: excelencia en educación STEM, excelencia en investigación en materiales y tecnologías cuánticas, excelencia en instituciones con infraestructuras, es decir la fuente de profesionales, el knowhow y las condiciones para diseñar y construir computadores cuánticos.

Pero no únicamente disponemos de una cantera excelente de científicos e ingenieros, y con las ideas que surgen los centros de desarrollo, sino que también, y esto es crucial, con el marco de usuarios de HPC, con los expertos en computación, integrando sistemas de supercomputación, IA y cuántica en el marco de uno de los centros de más impacto a nivel internacional, el BSC.

Es decir, las fuentes de talento, de desarrollo del hardware y del desarrollo de los algoritmos. Un verdadero lujo.

Tenemos por tanto todas las piezas para poder desarrollar ecosistemas de excelencia tales como se ha hecho ya en Holanda (Delft), Finlandia (Helsinki) Francia (Paris), Alemania (Mu-

nich) o Inglaterra (Oxford). La oportunidad está al alcance de la mano: los usuarios, los investigadores, el conocimiento y las infraestructuras están preparadas.

Ahora hace falta un apoyo decidido de los emprendedores, de la sociedad civil y de las autoridades públicas para hacerlo realidad en la próxima década.

UN HUB CUÁNTICO EN CIERNES: LA INDUSTRIA

Un hub cuántico en ciernes: la industria

Un espectro continuo de excelencia en los elementos clave de la computación cuántica
Formación >>>>>> Investigación >>>>>>> Infraestructuras >>>>>> Usuarios que da lugar a

una primera etapa del ecosistema con startups y futuros centros de dtos híbridos

LUXQUANTA QILIMANJARO Quside

The Rydberg experiment openchip

OXIGEN

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026 VICTOR CANIVELL 124

Y ya tenemos la primera hornada de startups ligadas a computación cuántica (como Qilimanjaro, startup consolidada, con qubits superconductores), que se complementan muy bien con otras startups cuánticas en los ámbitos de las comunicaciones y de la ciberseguridad.

Porque el futuro de los computadores cuánticos pasa por la conexión entre módulos, y esta conexión ha de hacerse en base a la fotónica, de cuyo polo de excelencia en Barcelona, el ICFO, han surgido ya varias startups muy prometedoras.

A ello se suman otros de sus proyectos de investigación, en este caso de interés en computación cuántica, como son los qubits de átomos ultra fríos de Rydberg.

Así que tenemos la génesis de dos tipos de computación cuántica, más todo lo necesario para la comunicación y seguridad cuánticas.

Y finalmente, como los centros de datos de futuro serán híbridos, es también muy importante la colaboración entre estos productos cuánticos y los chips de HPC y de IA de última generación, como justamente los que se desarrollan en base a la arquitectura abierta RISC-V alrededor de otra iniciativa muy potente, la de la startup Openchip, vértice de un proyecto europeo, que se coordina desde Barcelona, y que ya ha acumulado más de 180M€ de financiación y cuenta con más de 400 empleados.

Es más, tanto Qilimanjaro como Openchip están estableciendo colaboraciones con la empresa Oxygen de centro de datos en la zona metropolitana, para prever posibles instalaciones futuras de sus correspondientes chips, cuánticos y de IA, y poder probar *in situ* el funcionamiento y la hibridación de los nuevos sistemas de computación en el contexto de un centro de datos comercial.

En definitiva, tenemos una constelación de startups que puede dar mucho juego en el futuro de la computación híbrida, cuántica y convencional, y ser la base de una nueva industria.

Esto nunca había pasado en nuestro país hasta la fecha.

UN NUEVO HUB EN LA RED INTERNACIONAL DE EXCELENCIA

Un nuevo hub en la red internacional de excelencia

The infographic is divided into two main sections:

- Existing quantum clusters continue to grow; growing investments support the development of emerging clusters.**
- Innovation clusters have a global footprint.**

Key trends shaping the innovation of clusters for the quantum industry

- Clusters continue to grow ...**
 - Quantum clusters, usually anchored by research universities, provide a critical mass of technology, talent, and infrastructure for cutting-edge advancements in QT.
 - Existing larger (eg. Boston, Chicago) and smaller clusters are expected to continue to expand as the quantum industry matures.
- ... while new clusters emerge and develop**
 - As QT matures, growing commercial and public interest further drives growth of existing clusters—and development of new, emerging clusters.
 - Companies often form partnerships or sponsor R&D at innovation clusters, providing funding and direct infrastructure for innovation clusters.

Innovation clusters have a global footprint

Example clusters (non-exhaustive):

Boston	Helsinki	San Diego	Toronto	Austin
Chicago	Montreal	Industry of Canada	Waterloo	Edmonton
Delft	Vienna	Singapore	Montreal	Calgary
Durham	Industry of Canada	Industry of Canada	Waterloo	Montreal
Tel Aviv	Vienna	Industry of Canada	Montreal	Calgary
Hefei	Industry of Canada	Industry of Canada	Industry of Canada	Montreal
Seoul	Industry of Canada	Industry of Canada	Industry of Canada	Montreal

McKenzie, Junio 2025
VICTOR CANIVELLI

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

El proyecto de un hub cuántico en Barcelona ya está de facto en contacto estrecho con otros de los principales hubs internacionales, y es cuestión de que ello redunde en colaboraciones fructíferas entre sí.

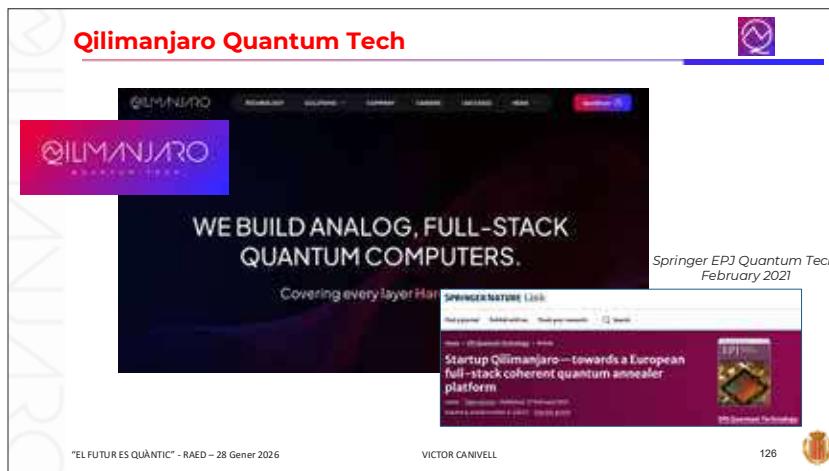
Esta relación nace del vínculo establecido inicialmente entre los centros académicos de excelencia que siempre han sido la base de cada hub de éxito. Y como existe una gran capilaridad de investigadores entre los diferentes centros académicos, de manera natural esta capilaridad se traduce en relaciones de colaboración entre los ecosistemas correspondientes de startups y de fondos de inversión.

Si tomamos el caso de una de las startups, la de Qilimanjaro, uno de sus fundadores se doctoró en Delft y, como consecuencia, Qilimanjaro tiene relaciones comerciales muy directas con varias de las startups holandesas, para intercambiar tecnologías complementarias e incluso plantearse desarrollos conjuntos.

Sólo tomando en consideración la lista de hubs de este cuadro de McKinsey, Qilimanjaro también colabora con investigadores y startups de Oxford, Tel Aviv y Boston. Es decir, las interrelaciones ya están en marcha.

Ahora se trata de fortalecer y hacer crecer nuestro hub, y pasar de la excelencia académica a la excelencia de todo su ecosistema.

QILIMANJARO QUANTUM TECH



Hablemos de la startup de la que soy co-fundador, y de la que ya se ha mencionado su foco en computadores cuánticos en la sección anterior.

Qilimanjaro contrata su primer empleado en 2020, justo antes de la pandemia, en base a un proyecto financiado por la CE, para llevar al mercado un nuevo tipo de computadores cuánticos, lo que en esos momentos llamábamos un annealer cuántico coherente. La idea era poder salir a mercado con ventaja de utilidad cuántica antes que la mayoría de los otros proveedores,

centrados en sistemas basados en puertas, o digitales, ya que estos han de lidiar con el problema de la corrección de errores cuánticos, la gran barrera del sector.

Qilimanjaro nació de la idea original de tres físicos cuánticos, Pol Forn Díaz, Artur García Sáez y José Ignacio Latorre, trabajando en equipo desde sus posiciones en la IFAE, BSC y UB respectivamente, a los que me añadí yo, en tanto que físico cuántico con una amplia experiencia empresarial en el sector TIC, y un quinto fundador, Jordi Blasco, abogado especialista en M&A para los aspectos legales y financieros. Un equipo muy equilibrado, y muy entusiasta.

Como referencia, a principios del 2021 publicamos un artículo, en Springer EPJ Quantum Technology, planteando la base de nuestro proyecto.

Lo verdaderamente crucial, en cuanto al equipo humano de Qilimanjaro, es que hemos podido incorporar a dos personas claves para el desarrollo del proyecto, grandes expertos que, y esto es lo importante, de manera totalmente independiente al equipo fundador en Barcelona, habían llegado a la misma conclusión: la arquitectura de futuro había de ser analógica. Se trata de nuestra CEO actual Marta P. Estarellas (proveniente del centro de investigación National Institute of Informatics o NII de Tokio, Japón) y de nuestro CSO, Tim Duty (proveniente de una multinacional en USA, y uno de los pioneros en el sector cuántico, cercano a algunos de los Premio Nobel 2025).

Y ello nos ha llevado a un modelo de computación cuántica analógica (que incluye pero que va más allá del annealing coherente) con qubits superconductores de máxima calidad (fluxoniums) en un contexto multi-modal, que facilita el acceso y la

hibridación con los demás tipos de sistemas de computación, tanto cuánticos digitales como clásicos tipo GPU, necesario en el futuro de los centros de datos.

La empresa ha trabajado de momento con un perfil bajo (modo “stealth”), trabajando en el desarrollo de la arquitectura y los componentes fundacionales de alta calidad de su tecnología analógica, para, en la actualidad, hacerla accesible a las empresas, conseguir desarrollar los casos de uso que realmente darán pie a las verdaderas ventajas cuánticas de interés económico, y finalmente poder convertirse en un proveedor clave del sector de centros de datos a nivel internacional.

QILIMANJARO EN CENTROS DE DATOS HPC

Qilimanjaro en centros de datos HPC

Bruselas aprueba construir un tercer computador cuántico en Barcelona

El diario La Vanguardia publicó una noticia sobre la construcción de un tercer computador cuántico en Barcelona, que se instalará en el BSC. La noticia menciona que el proyecto ha sido aprobado por la Comisión Europea y que se invertirán 120 millones de euros.

La Vanguardia, 29.01.2025

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

127

Como resultado de esta primera fase, Qilimanjaro ha instalado ya varios computadores cuánticos en el BSC, tras sendos concursos competitivos y para uso de sus investigadores. Anteriormente, había sido el proveedor de la tecnología para el

laboratorio con el primer computador cuántico y su primer qubit en Abu Dhabi en 2021.

Esta es una de las vías de negocio, la instalación de estos computadores en las instalaciones del cliente. En la actualidad, sólo los centros públicos de investigación o de HPC a nivel internacional son los que tienen interés en instalar este tipo de equipos. Su objetivo es la formación de los investigadores y el desarrollo de las primeras aplicaciones de software cuántico.

En el marco del proyecto Quantum-Spain, bajo la iniciativa del Plan Estratégico de Inteligencia Artificial, Qilimanjaro ha instalado a partir de 2023 dos computadores cuánticos en el BSC, que está previsto alcancen los 35 y 20 qubits superconductores respectivamente. Se trata de sistemas de puertas, ya que era la tecnología más extendida inicialmente y el objeto del concurso correspondiente.

A continuación, en el marco del proyecto EuroHPC-JU de la CE, Qilimanjaro está instalando ya en el BSC un tercer computador cuántico, MareNostrum Ona éste ya con la innovadora arquitectura analógica de diseño propio, según las condiciones de este segundo concurso.

QILIMANJARO EN LA NUBE - SPEQTRUM



Qilimanjaro en la nube para empresas - SpeQtrum

La Vanguardia, 08.11.2025
"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

QILIMANJARO

La empresa de computación cuántica inauguró su centro de datos en el 22@. A las empresas de computación cuántica se les permite acceder a los sistemas existentes en el dispositivo de procesamiento de Qilimanjaro. Los investigadores y profesionales de la industria podrán usar la nube para ejecutar las aplicaciones de simulación y elaboración.

tras desplegar el sistema cuántico en la planta de la firma bávara de servicios, la creación de un dispositivo de procesamiento de Qilimanjaro en el que se integran tecnologías y perspectivas para que el desarrollo de la industria de la nube sea más duradero y se ajuste a las necesidades de la industria".

128

A partir de ahora, y para fomentar el acceso a esta nueva tecnología sin tener que afrontar el coste y la complejidad de una instalación en sus centros de datos, Qilimanjaro ha inaugurado en octubre 2025 un servicio de acceso para empresas (e investigadores), a través de la nube, un “Quantum-as-a-Service” (QaaS), llamado SpeQtrum.

Se trata de una primicia internacional, en cuanto que es un acceso multi-modal, es decir, permite el acceso a través de un único stack de software a un sistema cuántico analógico (con el chip innovador de Qilimanjaro), otro cuántico digital (con chip digital de un partner europeo) y también a servidores convencionales con emuladores cuánticos. Todo ello con software y la integración ambos realizados por Qilimanjaro. La integración se refiere a la de sus chips con los refrigeradores de dilución, cables criogénicos y electrónica de control cuántico.

El concepto multi-modal, en que se incluye el acceso a los dos tipos de arquitecturas cuánticas (la digital y la analógica)

a través de un único stack de software, nos permite ofrecer ya al usuario el escenario del futuro de la computación cuántica. Estimamos que cuando las tecnologías de computación cuántica maduren, el resultado final será una combinación de sistemas digitales y analógicos, cada uno óptimo para cálculos diferentes. Con toda probabilidad, los digitales serán mejores para cálculos estructurados en base a lógicas de cálculo con puertas (tipo Shor o Grover), mientras que los analógicos lo sean para cálculos donde prime la continuidad del problema (tipo simulaciones químicas o también ciertos cálculos de IA cuántica, alternativos a redes neuronales, como los Analog Quantum Reservoirs y los Quantum Extreme Learning Machines, que está persiguiendo Qilimanjaro).

En definitiva, no sólo se da acceso al sistema cuántico analógico propio (foco de nuestra investigación y desarrollo), sino que lo hacemos incluyendo el acceso a sistemas cuánticos digitales de terceros, así como a sistemas no cuánticos (tipo por ejemplo de GPUs de Nvidia), para que el usuario, desde el minuto uno, trabaje en el contexto híbrido, que es el que resultará en cualquier escenario de futuro. Es decir, se prueba nuestra tecnología, no de manera aislada, sino en el contexto de las otras soluciones que van a estar disponibles. Y con la comodidad de un acceso unificado y con acceso vía los SDK correspondientes a los otros lenguajes como pueden ser Qiskit de IBM y cuQuantum de CUDA-Q para Nvidia.

Finalmente, y para facilitar el aprovechamiento de este servicio en la nube, Qilimanjaro ofrece también un servicio completo de consultoría y co-desarrollo de software cuántico, para ayudar al usuario a desarrollar las soluciones cuánticas correspondientes, y que son totalmente diferentes a los programas convencionales. Ello se basa en consultoría propiamente dicha, ligada al servicio QaaS, más el acceso a una potente librería de

módulos de software cuántico. De esta manera, los usuarios podrán acelerar la adecuación del servicio cuántico al tipo de problemas de computación de su interés. Esta consultoría es esencial para acelerar la adopción de estos nuevos sistemas en estos momentos iniciáticos del sector.

QILIMANJARO & LOS ALGORITMOS

The screenshot shows a website with a red header bar containing the text "Qilimanjaro & los algoritmos". Below the header is a grid of six images illustrating different applications of quantum computing:

- Our Traction:** A collage of images including a server rack, a graph, and a satellite dish.
- HPC:** An image of a supercomputer.
- FINANCE:** An image of a stock market chart.
- TELECOMS:** An image of a satellite in space.
- HEALTH:** An image of a medical test tube.
- LOGISTICS:** An image of a truck.
- NEW MATERIALS:** An image of molecular structures.

At the bottom of the page, there is footer text: "EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026", "VICTOR CANIVELL", and the Raed logo.

Por ello, y la vez que se desarrollan los chips y los sistemas de computación, Qilimanjaro desde sus inicios ha trabajado con grandes usuarios para trabajar conjuntamente en adaptar sus problemas de computación de más interés para la computación cuántica.

Se ha trabajado con grandes grupos internacionales en sectores como la moda (gestión de almacenes robotizados), logística de distribución en ciudades (“last-mile”), y energía (cálculo de precios entre otros), así como con grupos de investigación científica de gran prestigio internacional, como son el CERN (física de altas energías) en Suiza o TCG-Crest (química) en la India.

Esta vía de trabajo es crucial para poder avanzar de manera coordinada en el diseño de los chips para hacerlos mejor adaptados a los problemas de cálculo correspondiente, es decir, para conseguir la llamada utilidad cuántica. Se trata de adaptar los chips cuánticos a los problemas objetivo, que en ocasiones se describe como ASIC's (Application Specific IC's) cuánticos, para maximizar sus prestaciones.

QILIMANJARO Y LOS CENTROS DE DATOS

Qilimanjaro & los centros de datos del futuro

The diagram illustrates the hierarchy of data center components. At the top is 'Cloud Access' followed by 'QEMM/QIO'. Below that is 'QMM/QIO'. In the middle section, there are three overlapping circles: a green circle labeled 'Google IQM rigetti' containing 'IS-MPU', 'AZ-AV100 GPU', and 'QPU'; a red circle labeled 'Qilimanjaro' containing 'QPU'; and a green circle labeled 'NVIDIA' containing 'GPU'. The bottom section is labeled 'Company Confidential'.

We build the future of data centers, from top to bottom

Cloud Access
QEMM/QIO
QMM/QIO
Qilimanjaro
Google IQM rigetti
Company Confidential
IS-MPU
AZ-AV100 GPU
QPU
QPU
NVIDIA
GPU

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

130

El recorrido final del plan de Qilimanjaro es el de convertirse en un proveedor clave de los centros de datos en cuanto se genere una demanda masiva de computación cuántica, aportando la excelencia en arquitecturas analógicas. Ello requerirá que se demuestren las ventajas cuánticas importantes, sino exponenciales, que se están trabajando con los usuarios que acceden a nuestro QaaS en la nube.

El objetivo final consiste en dominar el segmento de los computadores cuánticos analógicos de qubits superconductores, y

de facilitar al máximo la interacción con los equipos de proveedores de computadores digitales y de los de GPU's, a través de software como el desarrollado en nuestra propuesta multi-modal inicial, presentada este otoño, de interacción eficiente con los otros sistemas.

Una idea adicional, muy atractiva, sería la de poder trabajar con controles analógicos y digitales en el mismo chip, para llegar a una solución óptima de correr algoritmos mixtos digitales y analógicos.

Todo ello son caminos de futuro que se pretenden trabajar.

Evidentemente, en este camino futuro de crecimiento de capacidades, se incluirían tecnologías distribuidas con conexiones fotónicas (con acuerdos con proveedores de startups especializadas en redes cuánticas, tales como empiezan a surgir de centros como el ICFO, como también con multinacionales del sector como puede ser Cisco con su laboratorio de Barcelona).

DISTINCIONES DE LA COMISIÓN, INTEL, MWC

Distinciones de la Comisión, Intel, MWC

The collage includes the following text elements:

- intelignite**
Intel® for Deep Tech Startups
- Intel® Ignite Selects Startups for Spring '23 Cohorts**
- Spanish quantum computing startup Qilmanjaro Quantum Tech wins 4YFN competition at Mobile World Congress
- WINNER
- Category winner NextGen Tech!
- QILMANJARO QUANTUM TECH
- Qilmanjaro secured the NextGen Tech award for its full-stack Quantum Application Specific Solutions (QAS), delivering quantum benefits today. The company's cutting-edge approach enables quantum innovation at scale.
- MOBILE WORLD CONGRESS 2023
- EUROPEAN UNION
COMMISSION
PRIZE

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

131

Qilimanjaro ha sido distinguida con varios premios, tanto a nivel mundial, europeo, nacional y local. A destacar, la mejor startup del 4YFN Mobile World Congress 2024, la mejor startup “NextGen” 2024 de la CE, la distinción como “Exponential Leader 2021” por Acció (Generalitat de Catalunya) y el premio la mejor startup de innovación de la ciudad de Barcelona 2024.

En la actualidad cuenta con más de 70 empleados de una veintena de nacionalidades, una mezcla muy mayoritaria de físicos (una cuarentena) y de ingenieros (una veintena), muchos de ellos doctores.

Por otro lado, fomenta la incorporación de interns, así como los programas de Doctorados Industriales. De hecho, su primer doctor industrial ha sido galardonado con el premio al Ingeniero del Año 2025 del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones (COITT).

En 2023 Qilimanjaro fue seleccionada por la multinacional Intel (a la sazón, la líder histórica del mercado de semiconductores) para participar en su programa de aceleración en Munich para startups de tech. Fue la única startup cuántica invitada al programa.

Desde el punto de vista financiero, la empresa ha firmado contratos comerciales por valor de 20 M€, ha recibido subvenciones nacionales y europeas por valor de 5M€ y ha cerrado una primera ronda de inversión de más de 10M€ con inversores de fondos privados de capital riesgo, un fondo corporativo (Repsol), una family office y fondos estatales (ICO y SETT), además del apoyo financiero de Avançsa (Generalitat). En la actualidad ha abierto una segunda ronda de financiación, a cerrar en 2026.

Qilimanjaro cuenta con un plantel de asesores de primer nivel, como Ioan Pop (KIT en Karlsruhe, principal experto europeo en qubits fluxoniums, el tipo que desarrolla Qilimanjaro), Denise Ruffner (gran experta del negocio en cuántica, por su larga trayectoria en los negocios cuánticos de líderes multinacionales como IBM, y startups de éxito como IonQ y Atom Computing), Antoni Mesquida (gran experto en el mundo de los semiconductores tras su larga trayectoria como alto ejecutivo en ASML, líder mundial de litografía) y Pedro Mier (emprendedor de éxito en electrónica del espacio y expresidente, muy influyente, de Ametic en nuestro país).

LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA: CÓMO PREPARARSE



SECCIÓN 5.e



La computación cuántica: cómo prepararse

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

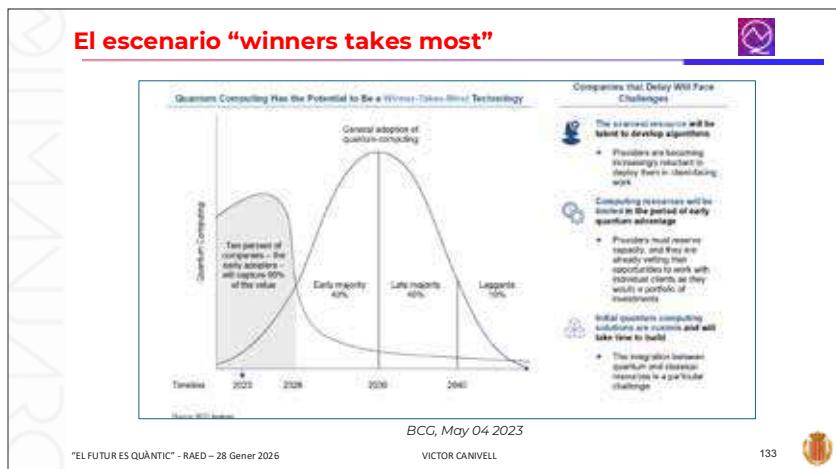
132

Tras este repaso de la computación cuántica, lo importante para todas las organizaciones es plantearse cómo mejor prepararse ante esta nueva ola de disruptión.

Veremos que podría repetirse el fenómeno de la IA de noviembre 2022, que coja por sorpresa a muchas empresas, en este caso, tanto en los aspectos de la ciberseguridad como en los del potencial repentino de nuevas y grandes capacidades de cálculo, que cambien sustancialmente las reglas del juego de la competitividad de ciertos sectores.

Hay acciones específicas que se pueden y se deben tomar – a pesar de la incertidumbre de en qué año estarán disponibles estas capacidades. Son acciones a medio plazo de planificación, de creación de equipos, de pruebas piloto y de trazar los procesos y las decisiones a tomar en los momentos decisivos, y que pueden surgir con una cierta sorpresa.

EL ESCENARIO “WINNERS TAKE MOST”



Porque es importante hacer notar que, ante este tipo de disruptivas, suele ocurrir que los primeros en adoptarlas suelen acumular la gran mayoría de las ventajas competitivas correspondientes. En este gráfico se habla de que un 90% del valor lo acumulan las empresas pioneras, el 10% del total según este cuadro del Boston Consulting Group (BCG).

La razón fundamental es la escasez de talento para desarrollar las aplicaciones, que, a su vez, sólo se podrán correr con éxito diferencial en los equipos que aporten primero una utilidad cuántica, los cuales también tendrán limitada su disponibilidad en la primera época – tiempo suficiente para crear una diferenciación operativa que pudiese ser crucial, por ser la primera, según el sector.

Total, los primeros usuarios con acceso a las aplicaciones y las plataformas necesarias serán los ganadores. Y las ventajas cuánticas pueden ser considerables, por lo que es importante que las empresas estén atentas y preparadas.

AVISOS - PRENSA

The screenshot shows a news article from The Wall Street Journal. At the top, there's a red banner with the text "Avisos - prensa". Below it, the WSJ logo and the title "THE WALL STREET JOURNAL" are displayed. A navigation bar includes links for English Edition, Print Edition, Video, Austin, Latest Headlines, More, and categories like Latest, World, Business, U.S., Politics, Economy, Tech, Markets & Finance, Opinion, Arts, Lifestyle, Real Estate, Personal, and CIO Journal. The main headline reads: "Quantum Computing Is Closer Than Ever. Everybody's Too Busy to Pay Attention." A subtext below the headline says: "A technology that feels like it's 'always five years away' may suddenly be two years away—but businesses are a little preoccupied". At the bottom of the article, there's a small note: "My Invaluable Discrepancy Future Feb. 13, 2025 7:00 am ET". The footer of the page includes the text "EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026, VICTOR CANIVELL, and the number 134.

Tal como se ha indicado al inicio de este documento, al hablar de las señales de brotes verdes acerca de la llegada de la computación cuántica, este aviso ya se hace patente en la prensa, como en este caso del WSJ de febrero 2025. Recalca que la ventaja cuántica puede aparecer por sorpresa, como ocurrió con la IA y OpenAI en noviembre 2022, y no había mucha gente preparada

AVISOS – CONSULTORES DEL SECTOR INFORMÁTICO

The slide has a blue header bar with the text "Avisos – consultores del sector informático". On the right side of the header is a small circular logo with a stylized letter "N". The main content area contains a quote in white text on a dark background:
"Quantum computing applications ... have the potential to deliver transformative impacts ... executives should scope out what the practical applications could be and when those benefits can be captured"
Below the quote, it says "Gartner (Sept 2024)" and "Source: What Is Quantum Computing? And Why Executives Should Care". To the right of the quote is a photograph of a quantum computing system, showing several gold-colored cylindrical components. At the bottom left of the slide, there is a vertical watermark-like text "EL FUTUR ES QUÀNTIC" and at the bottom center, the text "VICTOR CANIVELL". On the right side, there is a small circular logo with a red and yellow design. The page number "135" is located at the bottom right.

El mismo mensaje ya hace algún tiempo que los analistas especializados del mercado TIC hacen llegar a los CIO's (los directores de sistemas de información, por sus siglas en inglés).

En este caso, el ejemplo proviene de Gartner Group en septiembre 2024. Gartner es el líder mundial de servicios de inteligencia para los CIO's.

AVISOS – CONSULTORES DE NEGOCIO



Y finalmente, las grandes consultoras corporativas de negocio hace tiempo que publican whitepapers, dirigidos a los CEOs y sus ejecutivos, relativos el impacto de la computación cuántica.

Aquí se mencionan documentos muy útiles de grupos como McKinsey, Boston Consulting Group (BCG), Accenture y el World Economic Forum (WEF).

El mensaje es el mismo: hay que ser consciente de esta disrupción, y hay que prepararse.

Tanto en lo referido a la ciberseguridad (para salvaguardar informaciones que se pretende guardar a largo plazo), como en lo referido a nuevas aplicaciones que puedan aportar ganancias competitivas muy significativas.

Es decir, tanto por razones defensivas como ofensivas, tanto para protegerse, como para ganar competitividad frente a la competencia.

WORLD ECONOMIC FORUM: EL NUEVO Y2Q

The screenshot shows a news article from the World Economic Forum. The title is "Quantum Computing Could Deliver 'Next Global Shock': WEF". Below the title, a sub-headline reads "Risk to encrypted data could paralyze critical infrastructure and destabilize global security dynamics". The author's name is Berenice Baker, and the date is January 16, 2024. The article includes a thumbnail image of the "The Global Risks Report 2024" and a "DAVOS 2024" logo. At the bottom, there is a footer with the text "EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026, VICTOR CANIVELL, and the number 137.

En primer lugar, hay que protegerse del “apocalipsis” que mencionaba Wired al principio de este documento, y del que ya avisaba el World Economic Forum en Davos en febrero 2024.

También se conoce como el efecto Y2Q (haciendo referencia al efecto Y2K o Y2000 de 1 de enero 2000, con el problema que hubo con el nuevo milenio, del cambio de fechas anuales cuando en los sistemas antiguos sólo se usaban dos dígitos para definir el año de las transacciones).

En un importante desarrollo relativo a este asunto, investigadores de Google Quantum AI han publicado en mayo de este año 2025 un estudio que indica que un computador cuántico con un millón de qubits ruidosos podría teóricamente descifrar el cifrado RSA de 2048 bits en una semana, una disminución considerable de la estimación de 2019, que requiere 20 millones de qubits y 8 horas (es decir, 20 veces menos número de qubits pero 21 veces más tiempo). Hay que tener en cuenta que los computadores cuánticos digitales actuales

sólo pueden manejar alrededor de 100 a 1000 qubits, o sea que, como ya hemos visto anteriormente, aún estamos lejos de este objetivo.

LA NECESIDAD INMEDIATA DE LA CIBERSEGURIDAD: CRPTOGRAFÍA POST-CUÁNTICA (PQC)

**La necesidad inmediata de la ciberseguridad:
criptografía post-cuántica (PQC)**



The screenshot shows a news article from the National Institute of Standards and Technology (NIST) website. The title is "NIST Releases Post-Quantum Encryption Standards". Below the title, it says "POSTED ON AUGUST 13, 2024". The main content discusses the timeline for transitioning away from traditional cryptographic algorithms due to the threat of quantum computing.

In summary, NIST outlines the following timeline:

- From now until 2030, existing encryption methods should be phased out
- By 2030, algorithms relying on 112-bit security will be deprecated
- By 2035, all systems will need to be transitioned, as traditional cryptographic algorithms will be disallowed

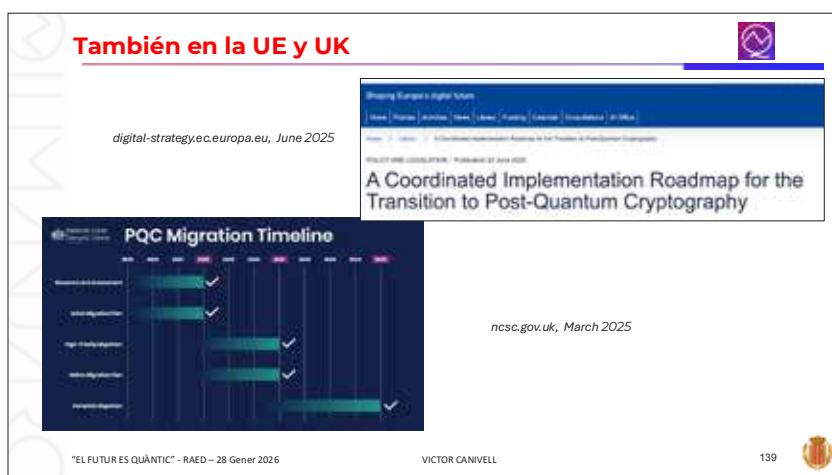
"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026 VICTOR CANIVELL 138

La reacción inmediata del sector de la criptografía ante este peligro de ataques futuros de los computadores cuánticos ha sido buscar otros tipos de cálculos computacionales que, se supone, ni siquiera un computador cuántico pueda romper. Por ello, el National Institute of Standards and Technology (NIST) en USA lideró una iniciativa global de búsqueda de estos algoritmos, y en 2024 propuso varias opciones de estos nuevos algoritmos criptográficos, llamados post-cuánticos os. Se denomina criptografía post-cuántica (PQC por sus siglas en inglés). Se trata de algoritmos que, aun corriendo en un sistema cuántico, se supone que no se pueden romper en plazos de tiempo prácticos.

Lo relevante del tema es que, en USA, el gobierno federal dictaminó ya en 2024 que, para 2035, todos sus sistemas informáticos debían estar protegidos por estos estándares post-cuánticos, todos.

Se supone que este plazo es razonable, en cuanto que difícilmente habrá computadores cuánticos con la suficiente potencia en ese año para poder romper la criptografía actual. Ello da idea de la importancia y urgencia del tema.

TAMBIÉN EN LA CE Y UK



Esta misma directiva se ha aplicado también en otros países, como UK y la CE en 2025, con el mismo objetivo del 2035.

CIBERSEGURIDAD CON ENCRYPTACIÓN CUÁNTICA



Hay que destacar que hay otra manera de defenderse de los ataques cuánticos. Y se trata justamente de usar la tecnología cuántica de comunicaciones para garantizar que los mensajes enviados no han sido interceptados. La garantía aquí sí es absoluta, ya que sigue las leyes fundamentales de la naturaleza, la cuántica. Se trata de enviar las claves criptográficas vía una serie de fotones individuales. Al comportarse como estados cuánticos, si alguien intenta leer dichos fotones, el receptor y emisor pueden comprobar que ha habido una intercepción, y por tanto excluyen el uso de dichas claves.

Esta opción se conoce como Quantum Key Distribution (QKD), y se usa de momento en entornos sensibles como pueden ser los gobiernos o el sector de finanzas. Se está realizando en Europa un gran esfuerzo en desarrollar e implantar estas soluciones. En varias zonas metropolitanas españolas se están implantado redes de fibra, para empezar a usar esta tecnología, tanto en redes de fibra dedicada como en redes de fibra comerciales. Más adelante están previstas pruebas de QKD con

satélites para abarcar distancias mucho más largas. Su handicap de momento es que se trata de una tecnología relativamente costosa, aunque la integración futura en chips fotónicos (PICs por sus siglas en inglés) ayudará mucho en sus despliegues.

Entre los líderes europeos hay que destacar la empresa suiza pionera del sector IDQ (adquirida este año 2025 por IonQ, que extiende su ámbito de la computación a incluir también comunicaciones cuánticas) y también a la startup del ICFO Lux Quanta con su tecnología muy innovadora, que está en curso de instalarse en varias redes europeas de redes de fibra ópticas.

En definitiva, la recomendación respecto a ciberseguridad es 1) todo el mundo ha de cambiar su criptografía a post cuántica y 2) los usuarios más sensibles a estos problemas pueden iniciar pruebas de despliegues con tecnología QKD fotónica.

LA OPORTUNIDAD DE LOS ALGORITMOS



Una vez acometidas las tareas relativas a la ciberseguridad frente a futuros ataques cuánticos, hay que centrarse en cómo mejor sacar rendimiento de las aplicaciones de negocio con computadores cuánticos.

Y ésta es la parte más interesante, donde más ventaja competitiva se puede desarrollar.

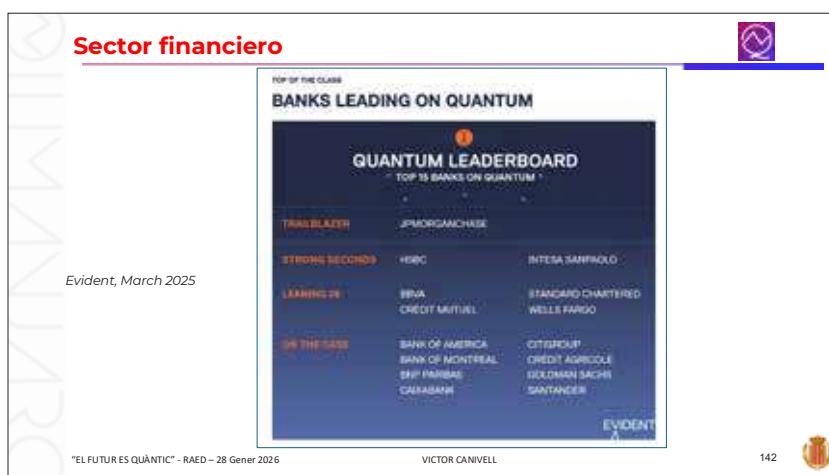
Todas las consultoras proponen un proceso similar: analizar con expertos en cuántica qué casos de uso son susceptibles de mejoras de prestaciones significativas en qué momento del desarrollo de los computadores cuánticos, priorizarlas e invertir en desarrollar las aplicaciones cuánticas correspondientes. Para ello, además de trabajar con expertos externos, es importante crear una célula de expertos en la empresa, que crecerá según las necesidades del calendario previsto de posibles anuncios de utilidad cuántica.

En este proceso será importante acometer inicialmente pruebas de concepto para testear estas nuevas aplicaciones cuánticas en entornos no de producción, sino en entornos aislados pero que sean reflejo de las aplicaciones en producción en sistemas convencionales. En todas estas pruebas cabe plantearse aplicaciones inherentemente cuánticas, como también aplicaciones híbridas con sistemas convencionales, como también aplicaciones quantum-inspired. Es más, estas últimas, aunque no tengan que ver con la cuántica (ya que corren en sistemas convencionales), en ocasiones pueden dar lugar a beneficios de cómputo a corto plazo. Como se ha dicho anteriormente, la mayoría de las noticias publicadas por empresas aludiendo a ventajas cuánticas son de hecho quantum-inspired, aprovechando el enfoque y las herramientas matemáticas usadas en cuántica para aplicarlas en sistemas convencionales.

Después de las pruebas de concepto se pueden iniciar pruebas piloto en áreas ya de producción, sin interferir en los procesos más importante de las operaciones, con el objetivo final de pasar las aplicaciones cuánticas en cuanto sus prestaciones sean de interés.

Este cuadro propuesto por Accenture en uno de sus publicaciones recientes refleja de manera general cómo prepararse para aprovechar las ventajas que podrán aportar los computadores cuánticos.

SECTOR FINANCIERO



El sector financiero es uno de los sectores donde el impacto de la computación cuántica será más importante. La rentabilidad de sus servicios está íntimamente relacionada con la capacidad de usar algoritmos informáticos muy sofisticados. Por ello disponen de expertos “quants”, que describe la pléthora de matemáticos, físicos e informáticos que se focalizan en maximizar el rendimiento de sus aplicaciones, a veces por diferencias de

cálculo muy pequeños y/o en rebajar en cantidades ínfimas de tiempo sus cálculos y transmisión de órdenes en os mercados. Por ello, la promesa de prestaciones de los computadores cuánticos les es muy atractiva.

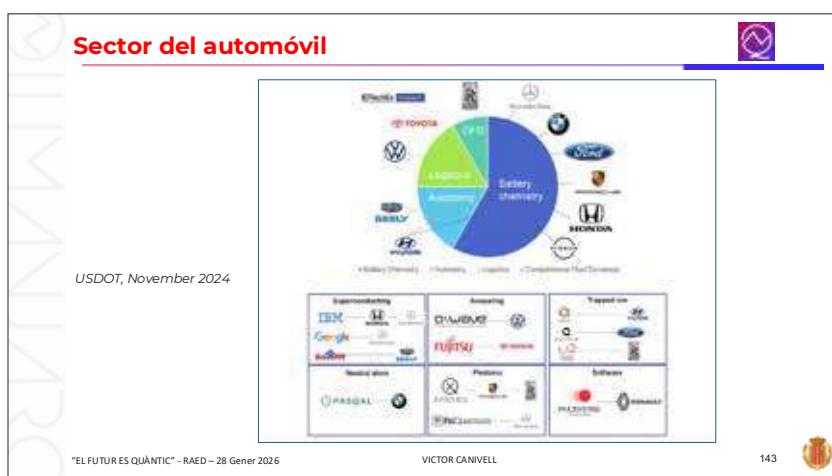
La computación cuántica puede transformar fundamentalmente la forma en que las instituciones financieras gestionan el riesgo, optimizan sus operaciones, detectan el fraude y protegen datos vitales. Las primeras aplicaciones, que a menudo utilizan métodos híbridos cuántico-clásicos, ya muestran claros beneficios en casos específicos. Si bien aún faltan años para que los computadores cuánticos totalmente tolerantes a fallos se desarrollen, los líderes de la industria son cada vez más conscientes de que la era cuántica es una realidad emergente que se espera que traiga resultados transformadores durante la próxima década, aproximadamente, por lo que es crucial que los líderes le presten atención ahora.

En varias comparativas internacionales, JPMorgan ocupa una posición de liderazgo por su compromiso con la cuántica. Destaca en computación cuántica integrada (algoritmos, aleatoriedad) y en ciberseguridad (QKD/PQC). Por otro lado, HSBC destaca por sus pilotos de trading, y el Santander es mencionado por ejemplo por su interés por PQC. Lo que sí está claro, es que todas las instituciones financieras priorizan las defensas alineadas con el NIST ante los riesgos de los ataques “harvest now, decrypt later” (es decir, descifrar lo recogido en el tiempo, cuando haya disponibilidad de computadores cuánticos suficientemente potentes).

Se estima que en 2025 las inversiones globales en finanzas cuánticas serán del orden de \$5B, con JPMorgan representando un 20% vía colaboraciones y partnerships.

Hay que destacar que JPMorgan afirmó que su nueva “iniciativa de seguridad y resiliencia” facilitaría la financiación y la inversión en cuatro sectores estratégicos: cadena de suministro y manufactura; defensa y aeroespacial; independencia energética; y tecnologías de vanguardia como la inteligencia artificial y la computación cuántica.

SECTOR DEL AUTOMÓVIL



El sector del automóvil está en plena transición, sobre todo por el foco en los vehículos eléctricos.

Hay que tener en cuenta que estos vehículos son fundamentalmente una gran batería con cuatro ruedas y un ordenador, y que la batería representa aproximadamente la mitad del coste. Por ello, es de gran interés el estudio de materiales con buena disponibilidad que permitan construir baterías con prestaciones de peso, vida media, coste y otros parámetros.

Y en el estudio de materiales es donde hay una gran promesa de la computación cuántica. Por ello, además de otras razones, como la optimización de logística, rutas y demás, este sector ha demostrado un gran interés en esta tecnología.

Esta primavera 2025 tuvo lugar por ejemplo en Casa Seat de nuestra ciudad un encuentro internacional del grupo VW con startups y expertos cuánticos, como Qilimanjaro para abordar estos temas y poder calibrar mejor sus pruebas de concepto.

SECTOR FARMA

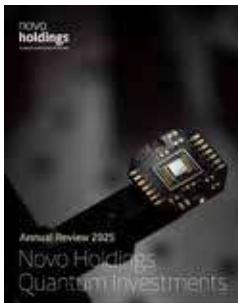
Sector farma



We believe a practical quantum advantage in healthcare is possible before 2030, based on the steady progress in better hardware and more efficient algorithms.

“”


Darren Barker
Partner, Novo Holdings



Novo Holdings
Annual Review 2025
Novo Holdings Quantum Investments

Infinity Q Delta NL, April 2025
Novo Holdings, November 2025

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

144 

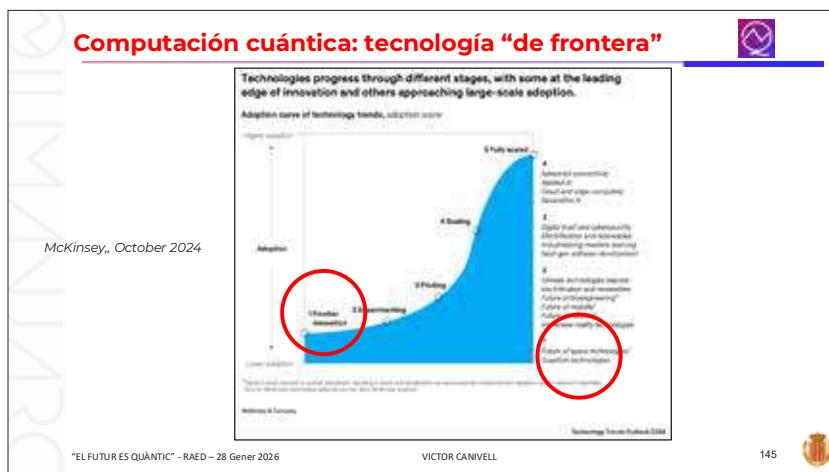
El sector farma es otro de los sectores donde suscita mayor interés la promesa de la computación cuántica. En particular, hay un caso de uso muy atractivo, que es el relativo a la búsqueda de nuevas moléculas, sabiendo que el plazo de tiempo muy largo (10 a 15 años) y los costes muy altos (varios billones de dólares) para la salida al mercado, hace muy atractiva la posibilidad de estudiar biomoléculas con computación cuántica para acortar plazos y costes en base a potentes simulaciones infor-

máticas cuánticas. De hecho, ya hay estudios en marcha con los computadores cuánticos actuales, los NISQ.

Una de las empresas europeas que ha demostrado un mayor compromiso con la cuántica es Novo Nordisk, quien no únicamente está invirtiendo directamente en recursos cuánticos propios en coordinación con el ecosistema cuántico danés vertebrado por centros académicos de prestigio como en el Niels Bohr Institute, sino que además está invirtiendo en startups cuánticas internacionales.

Novo Holdings se está posicionando como un inversor fundamental en la economía cuántica de Europa, expandiéndose más allá de sus raíces en la biotecnología con un compromiso de 188 millones de euros para desarrollar tecnologías cuánticas destinadas a mejorar la salud humana y planetaria, según su reciente informe de noviembre 2025.

COMPUTACIÓN CUÁNTICA: TECNOLOGÍA “DE FRONTERA”



Hemos llegado así prácticamente al final del recorrido de este documento.

La conclusión es que estamos ante la eclosión de una nueva tecnología disruptiva, la computación cuántica, que nos hemos de preparar adecuadamente – a la vez que hay que reconocer que estamos aún a unos años de que realmente ofrezca las ventajas exponenciales que promete. Aunque, cuando sea el momento, las consecuencias serán disruptivas.

Por ello, en USA, la agencia DARPA ha puesto en marcha en 2025 un proceso de apoyo a un grupo limitado de proveedores del entorno anglosajón para contribuir a que en 2033 se pueda disponer de un computador cuántico que provea valor industrial. Así que, esta fecha, a ocho años vista, es una referencia de cuándo podemos esperar esta eclosión.

La CE ha anunciado un proceso similar para 2026, la Global Quantum Challenge, para apoyar a un número limitado de startups para conseguir algo similar en un plazo hasta el 2035. Es decir, las expectativas y los plazos son similares.

Aunque nadie sabe realmente en qué momento y con qué plataforma de qubits se llegará a este momento – llamado el Q-Day (en referencia al D-Day de la segunda guerra mundial) para destacar el momento clave donde habrá un impacto mayor.

Mientras tanto, y poniendo las cosas en perspectiva, la realidad es que, tal como propone McKinsey en este gráfico, los consultores clasifican de momento la computación cuántica como una innovación “de frontera”, para distinguirla de otras en fases más avanzadas de implantación, donde el caso más avanzado es justamente la IA. Innovación “de frontera” se interpreta como que está en el horizonte, pero que no es inmediata.

Y tal como hemos dicho al principio del trabajo, la cuántica y la IA son simbióticas, acelerándose mutuamente.

UNA DISRUPCIÓN EN POSITIVO

Una disrupción en positivo

The image shows the cover of a research paper titled "Quantum for Good and the Societal Impact of Quantum Computing". The cover features a blurred background of a city skyline at night with glowing lights. The title is displayed in large, bold, blue font. Below the title, it says "To be published in a forthcoming issue of Periodico Academicum Scientiarum Scripta Vario". At the bottom, it lists the authors: Matthias Troyer, Emily Violi, Benjamin Ani Gomorkum, and others. The URL "https://arxiv.org/abs/2403.02921" is also present. The entire image is framed by a white border, and there is some vertical text on the left edge of the frame.

<https://arxiv.org/abs/2403.02921>

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

146

Hay un último aspecto, muy importante, que no hay que soslayar: y que es trabajar para que el impacto de esta disrupción emergente sea positive para la sociedad, y ello a nivel internacional. Como ocurre con cualquier nueva tecnología disruptiva, que sirva para el desarrollo en positivo.

Por ejemplo, contribuyendo a los principios ESG (ambientales, sociales y de gobernanza, por sus siglas en inglés) de la ONU.

Por ello hay varias iniciativas en marcha, de las que quiero destacar una liderada por científicos de primera línea, algunos trabajando en multinacionales con intereses en cuántica en sus oficinas de Suiza. En particular, promocionan las siguientes ideas:

- Impacto: garantizar que la computación cuántica beneficie a toda la humanidad mediante el desarrollo de soluciones cuánticas para resolver problemas globales críticos.
- Uso: proteger contra el uso malicioso acelerando la implementación de criptografía cuántica segura y desarrollando procesos de gobernanza y controles para el uso responsable de las máquinas cuánticas.
- Acceso: democratizar el potencial de crecimiento económico en toda la sociedad mediante la capacitación, el desarrollo de la fuerza laboral y los ecosistemas, y la infraestructura digital.



❖ SECCIÓN 6 - CONCLUSIONES



SECCIÓN 6



CONCLUSIONES

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

147

Para cerrar, hablemos de las expectativas y de las oportunidades que nos plantea la computación cuántica, en base a sus promesas y en base a la realidad de su desarrollo en la actualidad.

Las oportunidades se declinan en dos aspectos, el de las empresas y organizaciones en general, de cómo defenderse y de cómo aprovechar esta nueva fuente de competitividad, y el de los países, por el surgimiento de una nueva industria que, de por sí, tendrá mucho impacto económico y geopolítico en un mundo que se está polarizando.

IMPACTO ASEGURADO – “BIGGER THAN AI?”



Un artículo de la BBC en noviembre 2025 aduce que, si el impacto de la IA está siendo muy importante, el impacto potencial de la cuántica puede ser de la misma magnitud que el de la IA, es decir, enorme. Hay que ser consciente de ello.

Estos equipos están en sus inicios; se cree que hay unas 200 en todo el mundo (sin embargo, China no ha revelado cuántas posee). Esto no impide que los expertos en computación cuántica hagan afirmaciones audaces sobre su potencial.

“Como consumidores, experimentaremos el impacto de la computación cuántica en casi todos los ámbitos de nuestra vida”, declaró Rajeeb Hazra, director de Quantinuum, una empresa valorada recientemente en 10 000 millones de dólares, en una entrevista con el podcast Tech Life de la BBC.

“En mi opinión, el ámbito de la computación cuántica, si nos fijamos en sus aplicaciones, es tan grande, si no mayor, que la IA”.

Se puede interpretar esta declaración como una declaración interesada, ya que Quantinuum es una de las startups cuánticas más conocidas, pero el hecho es que el impacto puede ser espectacular a medio plazo. Sin duda.

LAS EXPECTATIVAS DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Las expectativas de la computación cuántica

**LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA
SERÁ UNA TECNOLOGÍA REALMENTE DISRUPTIVA**

**LAS VENTAJAS ACTUALES SON LIMITADAS
YA QUE
LOS SISTEMAS DE QUE DISPONEMOS SON DE
PRIMERA GENERACIÓN**

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

149

Este es el resumen de la situación:

- La computación cuántica está de camino
- Será muy disruptiva (en capacidad y en consumo energético)
- Los equipos actuales son prototipos que prueban la tecnología funciona, pero las prestaciones son aún limitadas

Las perspectivas temporales de cuándo se podrá contar con equipos cuánticos que provean de ventajas significativas para aplicaciones de interés económico se cifran en entre cinco y quince años, según el caso de uso. Y no olvidemos el famoso

dicho: tendemos a sobreestimar el efecto de una tecnología en el corto plazo y ¡subestimar el efecto en el largo plazo!.

LAS OPORTUNIDADES DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Las oportunidades de la computación cuántica

**(1) TODAS LAS ORGANIZACIONES:
PROTEGERSE CON PQC
&
IDENTIFICAR SUS APLICACIONES CUÁNTICAS DE IMPACTO**

**(2) LAS STARTUPS & LOS PAÍSES:
LIDERAR ESTA NUEVA INDUSTRIA
&
CREAR ECOSISTEMAS POTENTES**

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

150

En conclusión, estos mensajes son los que hemos de retener:

- Todas las organizaciones han de contemplar, tanto la implantación de la criptografía post-cuántica, como la selección y preparación de las aplicaciones cuánticas que pueden causar las mejores ventajas competitivas de sus actividades.
- Hay una gran oportunidad para crear una nueva industria, en el contexto de la economía cuántica – y en particular, hacerlo en nuestra ciudad, y por extensión, en nuestro país.

COMPUTACIÓN CUÁNTICA: ¡LO MEJOR ESTÁ POR INVENTAR!

Computación cuántica: ¡lo mejor aún está por inventar!

The Guardian, October 23, 2019

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED – 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

151

Una última consideración (aplicable a cualquier nueva disrupción tecnológica).

Ocurre que, en los inicios de toda nueva revolución tecnológica, es difícil, sino imposible, imaginar las nuevas aplicaciones a las que darán lugar y a su impacto.

Recordemos que, antes de que Von Neumann propusiera en 1948 su arquitectura de computadores digitales (ahora llamados clásicos) y Noyce inventara en 1960 el primer circuito integrado monolítico (que hacía posible su industrialización), y en vistas a lo costosos y complicados de mantener de los primeros computadores, se llegó a decir que en todo el mundo la demanda sería de unas pocas unidades Así, a principios de la década de 1940, el presidente de IBM, Thomas J. Watson, supuestamente dijo: "Creo que hay un mercado mundial para unas cinco computadoras". Y es que tenía razón en esos momentos,

con los computadores que en ese momento se podían fabricar. Pero ¡cómo cambió la situación!

Nadie se podía imaginar en esa época que acabaríamos teniendo chips baratos con una gran integración para construir computadores muy potentes, que se inventaría internet, que se inventaría Google y las redes sociales, los teléfonos móviles y muchos otros servicios, de manera que, en la actualidad, la joven industria TIC sería la base de toda la economía y por ende de la sociedad.

Nadie.

Ello nos hace pensar en el caso de la computación cuántica pasará algo similar. En la foto central vemos al CEO de Google, Pishay, en 2019, cuando anunció el primer resultado de un cálculo en que un computador cuántico claramente superaba las capacidades de los mayores supercomputadores del momento. Con independencia del hecho de que la comparación resultó no ser del todo correcta, representó el pistoletazo de salida para anunciar al gran público que los computadores cuánticos ya eran una realidad.

Todo ello da alas a pensar que aún no tenemos idea de hasta dónde podemos llegar, de qué podrá aportar la computación cuántica (siempre ligada con la comunicación cuántica).

Incluso hay alguna voz, como la del ex-CEO de Intel, Gelsinger, que ha opinado recientemente que “la computación cuántica reventará la burbuja de la IA”, en cuanto que predice que las GPUs no sobrevivirán a la década, serán reemplazadas por la cuántica. Esta es una opinión extrema, pero lo que es seguro es que el sector TIC está entrando en una década prodigiosa con la cuántica y la IA. En lo que todos coincidimos, es que la com-

putación cuántica y la IA van a acelerar el mundo. Confiamos en que para bien.

¡Lo mejor aún está por inventar!

UNA INVITACIÓN ABIERTA A EXPLORAR LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Una invitación abierta a explorar la computación cuántica 



www.qilimanjaro.tech
@qilimanjaro

Qilimanjaro Quantum Tech, S.L.
C/ Veneçuela, 74
08019 Barcelona

"EL FUTUR ES QUÀNTIC" - RAED - 28 Gener 2026

VICTOR CANIVELL

152 

El centro de datos cuántico de Qilimanjaro se encuentra en el distrito 22@ de Barcelona.

Como co-fundador de Qilimanjaro, animo a todos los interesados en explorar cómo se usan y para qué sirven sus computadores cuánticos, a que os pongáis en contacto con nosotros, para visitar el laboratorio, y para explorar conjuntamente las aplicaciones cuánticas de impacto futuro en vuestras organizaciones.

Y para cerrar, una idea, la cuántica es fascinante.



BIBLIOGRAFÍA

1) Física cuántica

- R. Feynman, R. Leighton and M. Sands,
“The Feynman Lectures on Physics”, Addison Wesley
- R. Feynman,
“The Character of Physical Law”, Penguin
- B. Cox and F. Forshaw,
“The Quantum Universe”, Penguin
- J.I. Latorre,
“Cuántica”, Ed. Ariel
- R. Tarrach,
“De la materia al cosmos”, Ed. Funambulista
- S. Fernández-Vidal,
“Abrir las puertas de la Biblioteca de Alejandría”, RAED

2) Computación y semiconductores

- J.M. Martorell,
“L'impacte de la supercomputació a la Ciència i la Societat”,
Amics del País
- C. Miller,
“Chip War”, Simon & Schuster

3) Computación cuántica

- B Sutor,
“Dancing with Qubits”, Packt Publishing

- O. Ezratty,
<https://www.oezratty.net/wordpress/2025/understanding-quantum-technologies-2025/>
- McKinsey,
<https://www.mckinsey.com/capabilities/tech-and-ai/our-insights/the-year-of-quantum-from-concept-to-reality-in-2025>
- Boston Consulting Group (BCG),
<https://www.bcg.com/capabilities/digital-technology-data/emerging-technologies/quantum-computing>
- Accenture,
<https://www.accenture.com/us-en/insights/quantum-computing>
- World Economic Forum (WEF),
<https://initiatives.weforum.org/quantum/home>
- European Quantum Industry Consortium (QuIC),
<https://www.euroquic.org>
- Comisión Europea (CE),
<https://www.european-quantum-act.com>
- España
<https://espanadigital.gob.es/estrategia-de-tecnologias-cuanticas-de-espana>
- Catalunya
<https://quantum-cat.cat/ca/computacio-quantica/>
- Nvidia & quantum
<https://thequantuminsider.com/2025/12/03/ai-is-emerging-as-quantum-computings-missing-ingredient-nvidia-led-research-team-asserts/>
- Recursos educativos
<https://www.nqcc.ac.uk/a-guide-to-online-resources-for-learning-quantum-computing/>
<https://quantum.cloud.ibm.com/learning/en>

4) Ecosistema cuántico de Barcelona

- Barcelona Innovation & Technology Center (BIST) con IFAE, ICFO, ICN2
 - <https://bist.eu>
 - <https://www.ifae.es/groups/qct>
 - <https://www.icfo.eu>
 - <https://icn2.cat/en/>
- Barcelona Supercomputing Center (BSC)
 - <https://www.bsc.es/es/research-and-development/research-areas/quantum-information>
- Quantum Spain (BSC)
 - <https://quantumspain-project.es/en/quantum-spain/>
 - <https://www.bsc.es/es/noticias/noticias-del-bsc/el-bsc-presenta-el-primer-ordenador-cuantico-de-espana-desarrollado-con-tecnologia-100-europea>
- Sincrotrón Alba
 - <https://www.cells.es/es/acerca-de/bienvenida-a-alba>
- Master Interuniversitario de Computación Cuántica (UB, UAB, UPC)
 - <https://web.ub.edu/es/web/estudis/w/masteruniversitario-md70d>
- Qilimanjaro Quantum Tech
 - <https://qilimanjaro.tech>
- Lux Quanta
 - <https://www.luxquanta.com>
- Quside
 - <https://quside.com>
- Openchip
 - <https://openchip.com>

Discurso de contestación

Excma. Sra. Dra. Sonia Fernández-Vidal

**Excelentísimo Señor Presidente de la Real Academia Europea
de Doctores,
Excelentísimos Señores Académicos,
Ilustrísimas Autoridades,
Señoras y señores:**

Permítanme comenzar estas palabras expresando mi más sincero agradecimiento a la Junta de Gobierno de la Real Academia Europea de Doctores y, muy especialmente, a su Presidente, el Excmo. Sr. Dr. Alfredo Rocafort, por el honor que supone para mí intervenir en este solemne acto académico para dar respuesta al discurso de ingreso del Excmo. Sr. Dr. Víctor Canivell.

Responder a la disertación de un nuevo académico es siempre un privilegio y una responsabilidad: un privilegio, por la oportunidad de compartir con todos ustedes la trayectoria y las ideas de quien se incorpora hoy a nuestra Ilustre Corporación; y una responsabilidad, por la necesidad de hacerlo con la altura intelectual y el rigor que este foro merece.

Víctor Canivell nació en Barcelona en 1951, en un entorno familiar y cultural que marcaría de manera decisiva su trayectoria vital e intelectual. Hijo de padre español y madre inglesa, creció desde muy joven en una dimensión claramente internacional, reforzada por su educación en la Escuela Suiza de Barcelona y por el contacto habitual con distintos países y lenguas. Inglés, alemán y francés formaron parte de su vida cotidiana desde la infancia, no como un mero aprendizaje instrumental, sino como una auténtica apertura al mundo.

Esa temprana vocación internacional se combinó pronto con una inclinación clara hacia la ciencia. Buen estudiante y pro-

fundamente atraído por el pensamiento abstracto, dudó en sus inicios entre las matemáticas y la física, decantándose finalmente por la física matemática, movido por su deseo de dedicarse a la investigación. Se licenció con excelentes resultados, obteniendo el premio de licenciatura, y realizó su doctorado en Barcelona, una etapa que recuerda como especialmente fértil desde el punto de vista intelectual y creativo.

Durante su tesis doctoral publicó en revistas de referencia internacional como *Physical Review*, mostrando ya una sólida capacidad investigadora en el ámbito de la física teórica y la mecánica cuántica. Sin embargo, pese a disfrutar intensamente del trabajo científico, decidió no continuar su carrera en el ámbito estrictamente universitario, optando por un camino entonces poco habitual: tender puentes entre la ciencia y la empresa.

Con ese objetivo cursó un MBA en ESADE, al que asistía por las noches durante tres años, mientras ejercía como profesor de física en la universidad durante el día. Fue, en sus propias palabras, un “bicho raro”: un físico teórico dedicado a la cuántica, rodeado de economistas y futuros directivos. Esa doble formación, doctor en Física y máster en Dirección de Empresas, marcaría definitivamente su perfil profesional.

Tras finalizar esta etapa, decidió, junto a su ahora esposa Roser, iniciar una larga experiencia internacional con la idea de pasar una década en el extranjero antes de regresar a España. Durante esos años trabajó en diversas multinacionales tecnológicas, destacando su larga trayectoria en Hewlett-Packard, donde se incorporó al ámbito de la computación avanzada. Su carrera le llevó a Alemania, Suiza, Estados Unidos (incluida una etapa en Silicon Valley a comienzos de los años ochenta) y de nuevo a Europa, desempeñando responsabilidades crecientes tanto en áreas técnicas como en gestión y ventas estratégicas.

Posteriormente dio el salto al mundo de las *spin-offs* tecnológicas, participando activamente en la implantación y desarrollo en España de Silicon Graphics, empresa pionera en gráficos 3D y simulación avanzada, primero desde Madrid y más tarde asumiendo responsabilidades a nivel europeo desde Londres. A esta etapa siguieron nuevas experiencias en el ámbito de las redes de comunicación y el software, con compañías como 3Com, y más adelante en el ecosistema emergente de las *startups* tecnológicas.

Ya en el siglo XXI, Víctor Canivell asumió el cargo de consejero delegado de Safelayer, *spin-off* universitaria especializada en ciberseguridad, certificación y firma digital, empresa clave en el desarrollo del DNI electrónico en España. Esta etapa le permitió conocer de primera mano la compleja intersección entre tecnología, administración pública y regulación, así como la gestión de consejos de administración e inversores.

Su trayectoria continuó combinando multinacionales, proyectos internacionales y nuevas empresas, incluyendo el liderazgo de iniciativas en el ámbito financiero suizo, el desarrollo de negocios en España y América Latina y, a partir de 2011, su entrada en el mundo de la bioinformática como CEO de una *startup* centrada en la secuenciación genómica, finalmente adquirida por un grupo estadounidense con sede en Boston.

Tras esta etapa y su regreso a Barcelona, ya formalmente jubilado de la multinacional, comenzó a ejercer como mentor y *coach* de nuevas empresas tecnológicas. Fue en ese contexto cuando volvió, de algún modo, a sus orígenes científicos, incorporándose como CEO fundador a la *startup* de computación cuántica Qilimanjaro, impulsada por un equipo de físicos cuánticos liderados por el profesor José Ignacio Latorre. Desde ese rol ha contribuido decisivamente a estructurar el proyecto empresa-

rial, la estrategia y la financiación, permaneciendo actualmente como presidente del consejo.

A lo largo de toda su trayectoria, Víctor Canivell ha mantenido una constante: la curiosidad intelectual y el interés por las fronteras del conocimiento. Desde la física teórica y la cuántica, pasando por la computación, los gráficos 3D, las redes, la ciberseguridad y la bioinformática, su carrera es un ejemplo singular de diálogo continuo entre ciencia, tecnología y empresa, siempre desde una perspectiva profundamente internacional.

En el plano personal, comparte su vida con la Dra. Roser Fusté, doctora en bioquímica y galardonada con el Premio Ciudad de Barcelona, y es padre de la Dra. Silvia Canivell, doctora en Medicina, especializada en diabetes y obesidad, con experiencia investigadora en Suiza y actualmente médico de familia en Barcelona. Amante de la montaña, del esquí (que practicó en competición durante su juventud) y de la naturaleza, mantiene ese mismo espíritu de exploración que ha guiado su trayectoria profesional.

Entrando ya en el contenido del discurso que hoy nos ha ofrecido el doctor Canivell, debo comenzar destacando la claridad y ambición con la que ha planteado una tesis que no es menor: nos encontramos a las puertas de una nueva disruptión tecnológica, la cuántica, llamada a transformar de manera profunda no solo el ámbito científico y tecnológico, sino también la economía, la geopolítica y, en última instancia, la organización misma de nuestras sociedades.

El acierto inicial de su exposición reside en una afirmación que, siendo sencilla, resulta fundamental: nuestro presente ya es cuántico. Lo que hoy llamamos la primera revolución tecnológica cuántica nos adentró en la era tecnológica del siglo

XX que todos conocemos, desde los semiconductores hasta la resonancia magnética, desde Internet hasta la computación clásica. Ninguna de las tecnologías digitales actuales existiría sin el conocimiento de la física cuántica. Recordarlo no es un ejercicio de erudición histórica, sino una llamada de atención: la cuántica no es una promesa lejana, sino el cimiento invisible de la modernidad.

A partir de esta constatación, el doctor Canivell nos muestra cómo en la actualidad estamos en los inicios de una segunda revolución tecnológica cuántica. En esta nueva etapa, el control alcanzado sobre fenómenos como la superposición y el entrelazamiento, junto con la capacidad de manipular átomos y fotones a nivel individual, ha allanado el camino hacia tecnologías emergentes de enorme potencial. En ese recorrido aparecen, en primer término, la metrología y los sensores cuánticos; más adelante, la comunicación cuántica (incluidos los protocolos de encriptación); la simulación cuántica y, finalmente, la tan esperada computación cuántica.

Con una lógica que combina el rigor científico con la mirada estratégica del directivo, el doctor Canivell nos presenta una serie de “avisos” que anuncian la llegada de esta nueva era: desde la creciente preocupación por la ciberseguridad y la amenaza a los sistemas criptográficos actuales hasta la efervescencia bursátil, el interés geopolítico y la presencia ya tangible de computadores cuánticos en centros de supercomputación y de investigación, incluso en nuestra propia ciudad.

Esta manera de presentar la cuántica no como una abstracción teórica, sino como una realidad emergente, medible y observable, resulta especialmente valiosa en un momento en que el debate público oscila con frecuencia entre el entusiasmo acrítico y el escepticismo paralizante. El doctor Canivell rehúye ambos

extremos y sitúa la discusión en un terreno intermedio: el de la anticipación informada.

Uno de los ejes más interesantes de su intervención es el análisis del contexto económico y tecnológico en el que emerge la computación cuántica. Nos recuerda que la industria de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, pese a su juventud, se ha convertido en el sector con mayor capitalización y capacidad de inversión a escala global. Esa capacidad explica, en buena medida, por qué las grandes corporaciones tecnológicas están invirtiendo simultáneamente en dos disruptoras de naturaleza muy distinta pero profundamente entrelazadas: la inteligencia artificial y la computación cuántica.

La caracterización de esta relación como una simbiosis, y no como una sucesión, resulta especialmente acertada. La inteligencia artificial ha puesto de manifiesto tanto el enorme potencial de los datos como los límites estructurales de la computación convencional, especialmente en términos de consumo energético y escalabilidad. Es precisamente ahí donde la computación cuántica aparece no como un sustituto, sino como un complemento capaz de abrir nuevas fronteras de cálculo y eficiencia.

Desde mi perspectiva como física, quisiera subrayar también el esfuerzo pedagógico del discurso al explicar qué hace verdaderamente singular a la computación cuántica: no se trata únicamente de “hacer lo mismo más rápido”, sino de cambiar radicalmente el paradigma de procesamiento de la información, aprovechando fenómenos como la superposición y el entrelazamiento. Esta distinción es crucial para evitar equívocos y expectativas infundadas, y el doctor Canivell la expone con precisión y prudencia.

Otro aspecto destacable es su reflexión sobre el impacto económico y geopolítico de esta tecnología. La computación cuántica no solo promete ventajas competitivas para determinados sectores, sino que plantea una auténtica carrera estratégica entre regiones y países. En este contexto, su llamada a aprovechar la oportunidad de crear ecosistemas locales sólidos (y, en particular, su defensa del potencial de Barcelona como *hub* de tecnologías cuánticas) no es un ejercicio de localismo, sino una invitación a pensar en términos de soberanía tecnológica, talento y visión a largo plazo.

Finalmente, me gustaría destacar el tono con el que el doctor Canivell concluye su intervención: lejos de presentar la cuántica como una inevitabilidad que simplemente “nos sucederá”, nos interpela como comunidad académica, empresarial y social a prepararnos, a formarnos y a participar activamente en su desarrollo.

Pensar en ordenadores cuánticos y en las tecnologías que los acompañan no es ciencia ficción de sobremesa: es política del siglo XXI. Es nuestro deber, desde esta ilustre institución, promover un acercamiento riguroso al conocimiento que subyace a estas nuevas herramientas y entender que plantearnos preguntas no es un lujo intelectual, sino un imperativo cívico. Como decía Stephen Hawking: «Las grandes preguntas no son un lujo intelectual: son un deber cívico, porque el futuro que ignoramos acaba por ocurrirnos».

Esta apelación a la responsabilidad colectiva conecta de manera muy natural con el espíritu de esta Real Academia, concebida precisamente como un espacio de reflexión transversal y de diálogo entre disciplinas.

En definitiva, el discurso que hoy hemos escuchado no solo

nos ofrece una panorámica clara y documentada del estado y las perspectivas de la computación cuántica, sino que nos invita a reflexionar sobre cómo queremos afrontar las grandes transformaciones tecnológicas del siglo XXI: con miedo, con ingenuidad o con conocimiento, criterio y compromiso. Estoy convencida de que la aportación del doctor Canivell enriquecerá de manera notable los debates de esta Ilustre Corporación en los años venideros.

Y termino ya, señor Presidente, señoras y señores Académicos.

En nombre de la Real Academia Europea de Doctores, quiero dar la más cordial bienvenida al Excmo. Sr. Dr. Víctor Canivell, deseándole una fructífera trayectoria entre nosotros y confiando en que su experiencia, su visión internacional y su profundo conocimiento del diálogo entre ciencia, tecnología y empresa contribuyan de manera decisiva a engrandecer la labor de esta Corporación.

Bienvenido a esta, que desde hoy es también su casa académica.

Muchas gracias.
He dicho.



**PUBLICACIONES DE LA REAL ACADEMIA
EUROPEA DE DOCTORES**

Publicaciones



Revista RAED Tribuna Plural





SÒNIA FERNÁNDEZ-VIDAL es doctora en Información y Óptica Cuántica por la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). Ha trabajado y colaborado como investigadora en algunos de los centros más prestigiosos como son el Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN) en Suiza, el Laboratorio Nacional de Los Álamos en Estados Unidos o el Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) en Barcelona. Es profesora del departamento de física de la Universitat Autònoma de Barcelona y co-fundadora de la consultora tecnológica Gauss & Neumann.

En 2017 Sonia fue seleccionada por la revista Forbes como una de las 100 personas más creativas del mundo.

Sonia es escritora y divulgadora científica. Autora de la trilogía La Puerta de los Tres Cerrojos, novelas de divulgación científica de alcance internacional destinada tanto a niños como mayores y traducida a 12 idiomas. Autora de Quantic Love, novela ambientada en el CERN que aproxima la ciencia desde el lado más humano. Su tercer libro “Desayuno con partículas”, es una obra de divulgación de física moderna destinada a todos los públicos. Su último libro, El Universo en Tus Manos, está destinado a niños y niñas y les adentra en las maravillas de nuestro Cosmos.



«[Quantum mechanics] describes nature as absurd from the point of view of common sense. And yet it fully agrees with experiment. So I hope you can accept nature as She is - absurd.»

Richard Feynman, Nobel Prize in Physics 1965

«A classical computation is like a solo voice—one line of pure tones succeeding each other. A quantum computation is like a symphony—many lines of tones interfering with one another».

Seth Lloyd, MIT, 2006

«Classic computers compute linearly. Quantum machines make leaps».

McKinsey blog, June 26, 2025

«Quantum Computing Moves from Theoretical to Inevitable».

Bain & Company, September 23, 2025

Víctor Canivell Cretchley

1914 - 2026

Colección Real Academia Europea de Doctores



Generalitat
de Catalunya

