

Dossier: «Innovación y transformación digital: retos y oportunidades» coordinado por Mihaela Enache Zegheru y Ramon González Cambray

UNA REVISIÓN DE POSIBLES APLICACIONES

Innovación cuántica: ¿la próxima ola de transformación digital?

Agustí Canals

Profesor agregado de los Estudios de Economía y Empresa (UOC)

RESUMEN Los ordenadores cuánticos reciben cada vez más atención en los medios de comunicación, con la promesa de convertirse en una revolución en la computación y las comunicaciones digitales. Actualmente, no se puede saber seguro si esta promesa se cumplirá, pero sí que es posible hacerse una idea de qué rumbo podría tomar. El objetivo de este artículo es dar una breve panorámica de las tecnologías de la información cuántica y de sus posibilidades de futuro. Tras un resumen conciso de los cimientos de la computación cuántica y del estado actual de la tecnología, se lleva a cabo un repaso de los principales ámbitos en los que la tecnología puede dar lugar a innovaciones que mejoren sustancialmente las prestaciones de la tecnología actual. Finalmente, se apuntan algunos posibles efectos del desarrollo de la computación cuántica en la economía y la sociedad actuales.

PALABRAS CLAVE información cuántica; computación cuántica; ordenadores cuánticos; transformación digital; economía; sociedad

A REVIEW OF POTENTIAL APPLICATIONS

Quantum innovation: the next wave of digital transformation?

ABSTRACT *Quantum computers are receiving more and more attention in the media, with the promise of becoming a revolution in computing and digital communications. Nowadays, we cannot know for sure whether this promise will be fulfilled, but it is possible to get an idea of where things could go. The objective of this article is to give a brief overview of quantum information technologies and their future possibilities. After a concise summary of the fundamentals of quantum computing and the current state of the technology, we make a review of the main areas in which the technology can lead to innovations that substantially improve the performance of the current technology. Finally, we point out some possible effects of the development of quantum computing in today's economy and society.*

KEYWORDS *quantum information; quantum computation; quantum computers; digital transformation; economy; society*

Introducción

Las tecnologías relacionadas con la información cuántica reciben cada vez más atención en los medios de comunicación, con la promesa de convertirse en una gran fuente de innovación disruptiva en la computación y las comunicaciones digitales. Los premios Nobel de Física del 2022 (The Nobel Prize, s. f.), otorgados no hace mucho a tres investigadores pioneros en el campo de la información cuántica: Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger, han contribuido a esta popularidad y han provocado que se especulara todavía más en las posibilidades de esta tecnología.

Hace tiempo que en los medios especializados se empezó a hablar de la posibilidad de construir ordenadores basados en las propiedades cuánticas de la materia. Estos ordenadores cuánticos hipotéticos podrían superar en teoría a los ordenadores convencionales más potentes. Ahora bien, la gran dificultad técnica a la hora de construir en la práctica estos aparatos hizo que la idea no tuviera mucho eco público.

Aun así, en los últimos años, la tecnología cuántica ha avanzado considerablemente y hemos visto cómo se ha iniciado una carrera para construir el ordenador cuántico más potente por parte de los gobiernos más poderosos, como los de los Estados Unidos y de China, las grandes empresas tecnológicas, como IBM, Google, Amazon o Microsoft, y varias start-ups del sector.

Anuncios como el de Google en 2019 que afirmaban haber desarrollado el Sycamore (Dargan, 2022a), el primer ordenador en lograr la «supremacía cuántica» o el de IBM en 2022 donde presentaron el procesador cuántico Osprey (IBM, 2021), con 433 cúbits, podrían hacer pensar que estamos a punto de presenciar la eclosión de estas tecnologías en forma de múltiples aplicaciones prácticas de los ordenadores cuánticos e incluso del Internet cuántico.

Sin embargo, ¿hasta qué punto son reales estas posibilidades de las tecnologías de la información cuántica? ¿Estamos ya en el punto de empezar a ver sus aplicaciones? Entre los expertos del ámbito, hay opiniones muy diversas sobre estas cuestiones y en este artículo no podremos dar una respuesta definitiva. No obstante, sí que intentaremos esbozar una breve panorámica de los cimientos y las posibles aplicaciones de la computación cuántica, y de las consecuencias que pueden tener para empresas e instituciones en el futuro.

1. La extraña realidad cuántica

Nadie sabe cómo es la realidad. De hecho, no sabemos ni si la realidad existe. Pero lo que está claro es que, si existe, la realidad no es como nosotros la percibimos. Esto es lo que nos enseñan las dos grandes teorías de la física moderna que aparecieron a comienzos del siglo pasado, cuando parecía que quedaba poco por descubrir: la relatividad y la mecánica cuántica. La primera se hace patente cuando nos fijamos en magnitudes muy grandes, como la distancia entre galaxias, el tiempo que hace que el universo existe o la masa de las estrellas. La segunda, en cambio, se manifiesta cuando nos fijamos en magnitudes extraordinariamente pequeñas, como la medida de los núcleos atómicos, el tiempo de vida de partículas que se desintegran rápidamente o la masa de las partículas elementales. Actualmente, todavía no sabemos cómo hacer compatibles estas dos teorías.

Gracias a la relatividad, se han podido desarrollar grandes innovaciones como la navegación a través de GPS o los tubos de rayos catódicos de las pantallas antiguas, además de la conversión de masa en energía en las centrales nucleares o, desgraciadamente, con las bombas nucleares. Aun así, la lista de innovaciones basadas en la mecánica cuántica que utilizamos diariamente es todavía mucho más larga: transistores, láseres, fibra óptica, microscopía electrónica, generación de imágenes por resonancia magnética, placas solares, superconductores, entre otros.

Todas estas aplicaciones de la física cuántica se fundamentan en una serie de postulados teóricos que desarrollaron durante las primeras décadas del siglo XX un grupo de científicos brillantes como Niels Bohr, Werner Heisenberg o Erwin Schrödinger, y constituyen el grosor de lo que a veces se denomina la «primera revolución cuántica» (Enmohezca, 2020). Hoy en día, la aplicación de los mismos postulados junto con la capacidad tecnológica que tenemos de manipular objetos a escala atómica está permitiendo dar un salto cualitativo abriendo la posibilidad de trabajar con información en el ámbito cuántico. Es lo que algunos denominan la «segunda revolución cuántica» (Latorre, 2017). La clave de esta revolución es la construcción de ordenadores cuánticos, que, en vez de trabajar con bits como los ordenadores convencionales, trabajan con cúbits (bits cuánticos), que son mucho más complejos y difíciles de gestionar, pero que pueden proporcionar a estos nuevos ordenadores unas capacidades tan impresionantes como para que acontezcan una innovación realmente disruptiva.

A diferencia de los bits convencionales que pueden tomar solo dos posibles estados (0 y 1), los cúbits pueden tomar el valor 0, el valor 1 y cualquier valor intermedio. Además, tienen la particularidad de que este valor no está determinado, siempre y cuando no interactúe con nada. Se podría decir que contiene simultáneamente todos los valores infinitos entre 0 y 1. Es lo que se conoce como una «superposición» de estados. Así, cuando se hace un cálculo con un cúbit, se están llevando a cabo cálculos infinitos a la vez. De aquí la gran potencia de cálculo que puede proporcionar un ordenador cuántico. Y de aquí también la dificultad de construirlos, puesto que, a escala atómica, la superposición de estados se puede romper fácilmente cuando accidentalmente el cúbit interactúa con algún otro objeto y, por lo tanto, el cálculo ya no es válido.

Todo ello hace que sea mucho más complejo trabajar con cúbits que con los bits normales. Los ordenadores cuánticos deben poder manipular los cúbits para hacer cálculos, pero sin que se rompa la superposición de estados. Esto se puede conseguir a base de utilizar cúbits adicionales para la corrección de los errores que inevitablemente se producen y también gracias a una propiedad «casi mágica» de los objetos a escala cuántica que se denomina *entrelazamiento* (*entanglement*) y que permite transferir la información de un cúbit a otro sin romper la superposición (Brody, 2020).

2. El estadio actual de la computación cuántica

Uno de los primeros en sugerir la idea de ordenadores cuánticos fue el físico teórico Richard Feynman en una serie de conferencias que dio en 1981 en el Caltech de California y en el MIT de Boston (Feynman, 1996). Sin embargo, en aquel momento, nadie sabía mucho sobre cómo se tendría que construir en la práctica el hardware de los ordenadores cuánticos ni sobre los nuevos algoritmos que tendría que constituir la base de su software. En los últimos años, la posibilidad de construir ordenadores cuánticos ha ido tomando fuerza (Gribbin, 2014; Katwala, 2021).

En cuanto al hardware, a mediados de los años noventa del siglo pasado, a partir de la tecnología de «trampas de iones» desarrollada anteriormente para otras utilidades, se pudo producir el primer diseño de un ordenador cuántico. Desde entonces, se han llevado a cabo varias propuestas tecnológicas, algunas de las cuales han tenido más recorrido que otras.

Actualmente, la tecnología que utilizan la mayoría de las iniciativas que están desarrollando ordenadores cuánticos es la de los cúbits de superconductores. Es el caso, por ejemplo, de Google e IBM. Esta tecnología se basa en integrar los cúbits en una arquitectura de chips de silicio similares a los que se utilizan en los computadores convencionales. Esto hace que la tecnología sea relativamente fácil de miniaturizar y de escalar. En este caso, el problema es que los cúbits de superconductores solo funcionan a temperaturas de 10 milikelvins, muy cerca del cero absoluto, y, por lo tanto, requieren condiciones físicas complicadas de mantener. Microsoft, en cambio, apuesta por una tecnología basada en los cúbits topológicos, que serían más robustos en lo que respecta a mantener los estados de superposición. En este caso, el problema es que se basan en una idea teórica, la de las partículas de Majorana, que todavía no se sabe seguro si pueden existir realmente. Últimamente, han surgido otras iniciativas nuevas, como la de la empresa Universal Quantum, que apuesta por una combinación de superconductividad y trampas de iones.

Estamos en un estadio inicial del ciclo de vida de la tecnología de computación cuántica y, por tanto, todavía no sabemos qué arquitectura acabará siendo la ganadora. Ahora bien, lo que parece claro es que prevalecerá la solución que consiga minimizar los errores debidos a la pérdida de los estados de superposición. Esta probablemente será una de las claves para obtener una «supremacía cuántica» real sobre los ordenadores clásicos.

El otro pilar necesario para el buen funcionamiento de los ordenadores cuánticos es el desarrollo de software específico que aproveche sus particularidades. La principal ventaja que pueden tener los ordenadores cuánticos sobre los clásicos es la posibilidad de resolver en un tiempo razonable algunos problemas que tardarían quizás miles o millones de años en resolverse en ordenadores convencionales. Eso sí, siempre que se desarrollen los algoritmos adecuados. Porque no se trata simplemente de un ordenador como los habituales pero más rápido. Un ordenador cuántico únicamente es más efectivo para determinadas cuestiones, es decir, problemas que tienen una estructura que los hace susceptibles de ser resueltos con eficiencia utilizando las características especiales de los cúbits y con los algoritmos adecuados.

Uno de estos problemas es el de la factorización de grandes números, una cuestión clave para los sistemas de encriptación que actualmente garantizan la seguridad y la privacidad de las transacciones en línea. Un algoritmo diseñado por Peter Shor en 1994 en Bell Labs permitiría mejorar drásticamente la efectividad del proceso de factorización. Técnicamente, consistiría en pasar de tiempos exponenciales a tiempos polinomiales para resolver el problema de descomponer

un número muy grande en los dos primeros factores que lo forman. La consecuencia de esto sería que, de repente, los sistemas de encriptación actual serían fácilmente descifrables con un ordenador cuántico, con la disrupción que esto implicaría en las comunicaciones a través de Internet y en la seguridad de los archivos electrónicos encriptados.

Otro de los problemas interesantes que se podrían resolver con un ordenador cuántico es el de la búsqueda en una base de datos no ordenada. Lev Grover, también de Bell Labs, diseñó en 1996 un algoritmo para computadores cuánticos que reducía drásticamente el tiempo de búsqueda, de forma que, si para encontrar el elemento adecuado en una base de datos de un millón de registros, un ordenador clásico tendría que comprobar un promedio de unos 500.000 elementos, un ordenador cuántico lo podría hacer solo comprobando unos 1.000, y tan solo necesitaría 20 cúbits. Es lo que se denomina *mejora cuadrática*, que no es tan impresionante como la del algoritmo de Shor, pero que daría una ventaja decisiva a la empresa que domine la tecnología.

Ahora bien, estos algoritmos están escritos pensando en ordenadores cuánticos ideales. En la realidad, las cosas son bastante más complicadas. Los ordenadores cuánticos actuales todavía no son lo suficientemente avanzados para estar a prueba de fallos ni son lo bastante grandes para lograr la «supremacía cuántica». Estamos aún en lo que John Preskill (2018) denomina «era NISQ» (*noisy intermediate-scale quantum*) y se debe avanzar mucho, tanto en el desarrollo de nuevos algoritmos como en la mejora del hardware, para que los ordenadores cuánticos puedan llegar a hacer lo que algunos prometen.

3. Posibles aplicaciones de la computación cuántica

A pesar de que los ordenadores cuánticos, tal como hemos visto, todavía están en sus inicios, ya se están empezando a probar para resolver algunos problemas específicos. Hoy en día, muchos de estos problemas también se pueden solucionar con ordenadores clásicos, pero el hecho de que se puedan resolver también con ordenadores cuánticos confirma las posibilidades que se abren. Cuando se puedan aplicar a problemas de tipo similar, pero más complejos y que requieran más capacidad de cálculo, es probable que los ordenadores clásicos se queden atrás.

Además, hay algunos problemas que, como hemos visto, solo se podrían resolver en un tiempo razonable con ordenadores cuánticos. Son los problemas de optimización combinatoria, que consisten en encontrar la combinación de un conjunto de elementos que optimiza algún parámetro concreto. Mientras que los ordenadores clásicos para resolver estos problemas necesitan probar cada una de las combinaciones una tras otra, los ordenadores cuánticos pueden probar muchas simultáneamente. A medida que el número de elementos crece, solo los ordenadores cuánticos son capaces de encontrar la solución. Esto abre una amplia gama de posibles aplicaciones en un futuro más o menos cercano que ya se están desarrollando (Bova *et al.*, 2021; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019). A continuación, veremos algunos ejemplos.

Uno de los ámbitos donde la optimización combinatoria es clave y en el que parece claro que la computación cuántica puede resultar disruptiva es el de la **ciberseguridad** (ID QUANTIQUE SA, 2020). La potencia del algoritmo de Shor a la hora de resolver el problema de la factorización implica que, en el momento en el que haya ordenadores cuánticos que lo puedan aplicar, todo el sistema actual de criptografía RSA basado en claves públicas y privadas será inservible. Un ordenador cuántico podrá encontrar fácilmente las claves privadas y descifrar la información. Cabe añadir que, si no se prevé, esto puede ser catastrófico para la economía y la sociedad en general. Por ello, ya hay gobiernos y empresas que están desarrollando nuevos sistemas de encriptación a prueba de ordenadores cuánticos, puesto que se basan en esta misma tecnología.

En el campo de las **operaciones** hay toda una serie de situaciones que se asimilan al TSP (*travelling salesman problem* o problema del viajante). La idea del TSP es encontrar en qué orden un viajante de comercio tiene que visitar toda una serie de ciudades de forma que siga la ruta más corta, y siempre y cuando visite todas las ciudades y acabe volviendo a la ciudad de partida. Es claramente otro problema de optimización combinatoria, que tiene aplicación clara en la logística de reparto de mercancías, el diseño de circuitos o la optimización de rutas por parte de los navegadores GPS.

Los problemas asimilables al TSP no los vemos solo en el mundo de las operaciones. Aunque parezca un campo muy alejado, el ámbito de las **finanzas** también se puede beneficiar de la capacidad de los ordenadores cuánticos para resolver este tipo de problemas (Egger *et al.* 2020; Orús *et al.*, 2019). Por ejemplo, a la hora de encontrar la composición óptima de los portafolios de inversión a partir de la gran cantidad de activos financieros que hay actualmente. Este tipo de cálculos se hace hoy en día con ordenadores clásicos mediante lo que se conoce como simulaciones Monte Carlo, pero el gran número de posibilidades provoca que una optimización que tenga en cuenta todos los factores solo

se pueda llevar a cabo con ordenadores cuánticos. Otro de los ámbitos donde sería útil la computación cuántica es en la decisión de conceder créditos por parte de los bancos. Es una decisión complicada, puesto que hay que tener en cuenta todos los factores para intentar no dar créditos a quienes posiblemente no los puedan devolver y, en cambio, dárselos a aquellos que probablemente puedan hacerlo. Incluso es posible la optimización cuántica en las decisiones de arbitraje que aprovechan los cambios de divisas.

El diseño de nuevas moléculas es clave en el descubrimiento de nuevos materiales y en el desarrollo de medicamentos. Este tipo de problema de **ingeniería química** requiere la optimización combinatoria tanto de los tipos de átomos que componen la molécula como de sus posiciones, e incluso de las reacciones químicas en las que puede intervenir. Cuando la molécula tiene una cierta medida, solo con una capacidad de cálculo formidable es posible resolver el problema. Como la estructura y el comportamiento de las moléculas son determinantes en las propiedades que acaba teniendo el material o el medicamento diseñados, la computación cuántica puede ser de gran ayuda en este ámbito. Una técnica especialmente útil en este caso es el proceso de *quantum annealing* (alineamiento cuántico), que permite explotar la capacidad de los sistemas cuánticos de considerar simultáneamente múltiples soluciones.

Uno de los problemas principales en el mundo de la **fabricación avanzada** de productos es el control de la calidad a partir de la identificación de posibles fallos o defectos. Los ordenadores cuánticos se pueden utilizar para analizar grandes cantidades de datos sobre los errores en sistemas de fabricación complejos para identificar qué partes del sistema pueden haber contribuido en incidentes que se traduzcan en fallos de producto. Claramente, esto puede suponer grandes ahorros en algunas empresas.

Muchas de las aplicaciones de la **inteligencia artificial** suponen un proceso de optimización combinatoria de grandes cantidades de datos que sirvan para afinar nuestras predicciones y tomar decisiones más esmeradas. Se puede pensar, por ejemplo, en el reconocimiento facial o la detección del fraude. La computación cuántica abre muchas oportunidades en este ámbito también, a pesar de que quizás la realización práctica está todavía un poco lejos. No obstante, actualmente se está trabajando en el llamado *quantum machine learning* en la identificación de modos con los que los algoritmos cuánticos puedan ayudar a mejorar las técnicas de inteligencia artificial (Biamonte *et al.*, 2017).

En el ámbito de **investigación y desarrollo**, es indudable que los ordenadores cuánticos tendrían que constituir una ayuda inestimable en la simulación de sistemas complejos. Cómo postuló Richard Feynman en su visión primigenia, la mejor manera de simular los sistemas reales, que son cuánticos, debe ser con ordenadores también cuánticos. Esto ya se ha llevado a cabo con éxito, por ejemplo, en la simulación de átomos o moléculas pequeñas como el hidrógeno o la molécula de dihidrógeno, pero se está trabajando intensamente para extenderlo en otros sistemas mucho más complicados, como las colisiones de partículas a altas energías que se producen en el CERN, la determinación de la estructura de las proteínas modelando el proceso de plegamiento (*protein folding*) o la simulación del proceso de fotosíntesis de las plantas.

Además de los que hemos mencionado, hay muchos más ámbitos en los que se espera que la utilización de la computación cuántica dé lugar a grandes progresos. A modo de ejemplo, podemos mencionar el desarrollo de **sensores cuánticos** o de **sistemas de comunicación** total o parcialmente cuánticos (Pozo, 2022).

4. Efectos en la economía y la sociedad

Es difícil predecir los efectos que tendrá finalmente la computación cuántica en la economía y la sociedad. Sin embargo, hay algunos que ya se están manifestando actualmente y que, en los últimos años, han ganado importancia. En el mundo de la I+D se está invirtiendo cada vez más en la construcción de nuevos prototipos de ordenadores cuánticos y en el desarrollo de algoritmos para estos ordenadores. Y no solo por parte de gobiernos, de centros de investigación o de grandes corporaciones como IBM, Google o Microsoft. Están surgiendo también una gran cantidad de start-ups que, junto con los anteriores, están constituyendo un ecosistema muy dinámico (Dargan, 2022b; Gibney, 2019). La empresa Honeywell afirma que, en tres décadas, la industria de la computación cuántica puede llegar a lograr un valor de un billón —europeo— de dólares.

Incluso la industria de la computación clásica se ve afectada por esta tendencia. Para hacer frente a la «amenaza» de los ordenadores cuánticos, los fabricantes de ordenadores convencionales están trabajando en la optimización de sus diseños de futuros hardware y se están desarrollando nuevos algoritmos más rápidos y potentes. En muchos casos, estos algoritmos están inspirados en ideas de la información cuántica, aunque vayan por encima de los ordenadores clásicos. Algunos están trabajando también en el diseño de sistemas mixtos de ordenadores clásicos y cuánticos que aprovechen las ventajas de ambos.

Cómo hemos visto en la sección anterior, la computación cuántica puede acabar afectando a muchos ámbitos de la economía, por lo que muchas grandes empresas se centran en ello a la hora de definir sus planteamientos estratégicos de cara al futuro. La información cuántica representará probablemente un componente clave de la transformación digital. Goldman Sachs, por ejemplo, no hace mucho que anunció que en el plazo de cinco años podrían estar utilizando algoritmos cuánticos para determinar los precios de sus instrumentos financieros.

Uno de los efectos que parecen más inevitables tanto a escala económica como social es la reformulación que se debe producir en el campo de la ciberseguridad. Si, como parece probable, los ordenadores cuánticos hacen inservibles los sistemas actuales de encriptación, las comunicaciones electrónicas actuales ya no serán seguras y —todavía más preocupante— los miles de millones de documentos almacenados desde hace tiempo en bases de datos quedarán desprotegidos. Esto hace que gobiernos y grandes empresas se estén preparando intensamente para poner remedio. Este puede ser un sector de gran crecimiento en un futuro cercano.

Las posibilidades de futuro de la computación cuántica tienen también implicaciones geopolíticas. En su objetivo de convertirse en la primera potencia mundial, China, por ejemplo, está llevando a cabo inversiones astronómicas en I+D en información cuántica y está trabajando en el establecimiento de una red de comunicaciones cuánticas por satélite que sería una pieza clave para un Internet cuántico seguro. Evidentemente, las otras potencias tampoco se quedarán atrás.

Conclusión

Las extrañas propiedades del mundo cuántico hasta hace poco solo eran de interés para los físicos profesionales y para los interesados en el mundo de la ciencia. Sin embargo, desde hace unos años el desarrollo de la tecnología de la computación cuántica ha desvelado el interés de mucha más gente debido a las implicaciones económicas y sociales que puede tener la aparición de ordenadores cuánticos funcionales.

Las posibilidades que se abren son, en teoría, extraordinarias. Habrá que ver si el adelanto continúa al ritmo actual y todas estas posibilidades finalmente se confirman y acaban formando parte de los procesos de transformación digital. De momento, parece que hay algunas que podrían estar más cerca, como por ejemplo la encriptación cuántica segura (aunque sea en ordenadores clásicos), el descubrimiento de nuevos materiales y medicamentos, y nuevos algoritmos cuánticos para ordenadores clásicos. A largo plazo, los campos de aplicación posibles son mucho más amplios. Algunos los hemos señalado en este artículo. Pero seguramente las aplicaciones más impresionantes de la tecnología de la información cuántica aún no nos las podamos ni llegar a imaginar.

Referencias bibliográficas

- BIAMONTE, Jacob; WITTEK, Peter; PANCOTTI, Nicola; REBENTROST, Patrick; WIEBE, Nathan; LLOYD, Seth (2017). «Quantum machine learning». *Nature*, vol. 549, n.º 7671, págs. 195-202. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature23474>
- BOVA, Francesco; GOLDFARB, Avi; MELKO, Roger (2021). «Quantum Computing Is Coming. What Can It Do». *Harvard Business Review* [en línea]. Disponible en: <https://hbr.org/2021/07/quantum-computing-is-coming-what-can-it-do>
- BOVA, Francesco; GOLDFARB, Avi; MELKO, Roger G. (2021). «Commercial applications of quantum computing». *EPJ Quantum Technol*, vol. 8, n.º 1. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00091-1>
- BRODY, Jed (2020). *Quantum entanglement*. Cambridge: MIT Press.
- EGGER, Daniel J.; GAMBELLA, Claudio; MARECEK, Jakub; MCFADDIN, Scott; MEVISSSEN, Martin; RAYMOND, Rudy; SIMONETTO, Andrea; WOERNER, Stefan; YNDURAIN, Elena (2020). «Quantum Computing for Finance: State-of-the-Art and Future Prospects». *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, vol. 1, n.º 3101724, págs. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.1109/TQE.2020.3030314>
- DARGAN, James (2022a). «Quantum Journey From the Search Engine to Google Sycamore» [en línea]. En: *The Quantum Insider*. Disponible en: <https://thequantuminsider.com/2022/07/14/google-sycamore/>
- DARGAN, James (2022b). «81 Quantum Computing Companies: The Ultimate List for 2023». *The Quantum Insider* [en línea]. Disponible en: <https://thequantuminsider.com/2022/09/05/quantum-computing-companies-ultimate-list-for-2022/>
- FEYNMAN, Richard P. (1996). *Feynman lectures on computation*. Reading: Addison-Wesley.

- GIBNEY, Elizabeth (2019). «The quantum gold rush». *Nature*, vol. 574, n.º 7776, págs. 22-24. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02935-4>
- GRIBBIN, John (2014). *Computing with Quantum Cats: From Alan Turing to Teleportation*. Bantam Press.
- IBM (2021). «Quantum-centric supercomputing: The next wave of computing, 2021». *IBM Research Blog* [en línea]. Disponible en: <https://research.ibm.com/blog/next-wave-quantum-centric-supercomputing>
- ID QUANTIQUE SA (2020). *Understanding Quantum Cryptography* [en línea]. Disponible en: https://www.quantumcom-mshub.net/wp-content/uploads/2020/09/Understanding-Quantum-Cryptography_White-Paper.pdf
- KATWALA, Amit (2021). *Quantum computing: how it works, and why it could change the world*. Londres: Random House Business.
- LATORRE, José Ignacio (2017). *Cuántica: Tu futuro en juego*. Barcelona: Ariel.
- NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE (2019). «Quantum Computing: Progress and Prospects». *The National Academies Press* [en línea]. Disponible en: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/25196/quantum-computing-progress-and-prospects>
- ORÚS, Román; MUGEL, Samuel; LIZASO, Enrique (2019). «Quantum computing for finance: Overview and prospects». *Reviews in Physics*, vol. 4, pág. 100028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.revip.2019.100028>
- POU, Toni (2022). «L'anell quàntic de Collserola». *Ara.cat* [en línea]. Disponible en: https://www.ara.cat/ciencia-medi-ambient/tecnologia/anell-quantic-collserola-xarxa-comunicacio-barcelona_130_4586025.html
- PRESKILL, John (2018). «Quantum computing in the NISQ era and beyond». *Quantum*, vol. 2, pág. 79. DOI: <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>
- ROVELLI, Carlo (2020). *Helgoland*. Milán: Adelphi Edizioni.
- THE NOBEL PRIZE (s. f.). «Nobel Prizes 2022». *NobelPrize.org* [en línea]. Disponible en: <https://www.nobelprize.org/all-nobel-prizes-2022/>

Cita recomendada: CANALS, Agustí. «Innovación cuántica: ¿la próxima ola de transformación digital?». *Oikonomics* [en línea]. Mayo 2023, n.º 20. ISSN 2330-9546. DOI: <https://doi.org/10.7238/o.n20.2302>



Agustí Canals

acanalsp@uoc.edu

Profesor agregado de los Estudios de Economía y Empresa (UOC)

Es licenciado y tiene un máster en Ciencias Físicas por la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB). Es MBA y doctor en Management Sciences por ESADE (Universidad Ramon Llull). Fue investigador visitante en la Warwick Business School de la Universidad de Warwick, en la Wharton School de la Universidad de Pensilvania y en la Saïd Business School de la Universidad de Oxford. Su investigación actual se centra en temas relacionados con la gestión estratégica de la información y el conocimiento, las redes sociales, la inteligencia competitiva, la innovación y la complejidad en las organizaciones. Es investigador principal del grupo de investigación consolidado KIMO sobre la gestión de la información y el conocimiento en las organizaciones y dirige el máster universitario en Gestión Estratégica de la Información y el Conocimiento en las Organizaciones de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC).

Los textos publicados en esta revista están sujetos –si no se indica lo contrario– a una licencia de Reconocimiento 4.0 Internacional de Creative Commons. Puede copiarlos, distribuirlos, comunicarlos públicamente, hacer obras derivadas siempre que reconozca los créditos de las obras (autoría, nombre de la revista, institución editora) de la manera especificada por los autores o por la revista. La licencia completa se puede consultar en https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es_ES.

