

Dossier: «Innovació i transformació digital: reptes i oportunitats» coordinat per Mihaela Enache Zegheru i Ramon González Cambray

UNA REVISIÓ DE POSSIBLES APLICACIONS

Innovació quàntica: la propera onada de transformació digital?

Agustí Canals

Professor agregat dels Estudis d'Economia i Empresa (UOC)

RESUM Els ordinadors quàntics reben cada vegada més atenció en els mitjans de comunicació, amb la promesa d'esdevenir una revolució en la computació i les comunicacions digitals. A hores d'ara, no es pot saber del cert si aquesta promesa es complirà, però sí que és possible fer-se una idea de per on podrien anar les coses. L'objectiu d'aquest article és donar una breu panoràmica de les tecnologies de la informació quàntica i de les seves possibilitats de futur. Després d'un resum concís dels fonaments de la computació quàntica i de l'estat actual de la tecnologia, es fa un repàs dels principals àmbits en els quals la tecnologia pot donar lloc a innovacions que millorin substancialment les prestacions de la tecnologia actual. Finalment, s'apunten alguns possibles efectes del desenvolupament de la computació quàntica en l'economia i la societat actuals.

PALAULES CLAU informació quàntica; computació quàntica; ordinadors quàntics; transformació digital; economia; societat

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

Introducció

Les tecnologies relacionades amb la informació quàntica reben cada vegada més atenció en els mitjans de comunicació, amb la promesa d'esdevenir una gran font d'innovació disruptiva en la computació i les comunicacions digitals. Els premis Nobel de Física del 2022 (The Nobel Prize, s/d), atorgats no fa gaire a tres investigadors pioners en el camp de la informació quàntica: Alain Aspect, John F. Clauser i Anton Zeilinger, han contribuït a aquesta popularitat i han fet que s'especulés encara més en les possibilitats d'aquesta tecnologia.

Fa temps que en mitjans especialitzats es va començar a parlar de la possibilitat de construir ordinadors basats en les propietats quàntiques de la matèria. Aquests ordinadors quàntics hipotètics podrien superar en teoria els ordinadors convencionals més potents. Ara bé, la gran dificultat tècnica a l'hora de construir en la pràctica aquests aparells feia que la idea no tingués gaire ressò públic.

Tanmateix, en els darrers anys, la tecnologia quàntica ha avançat considerablement i hem vist com s'ha iniciat una cursa per construir l'ordinador quàntic més potent per part dels governs més poderosos, com ara els dels Estats Units i de la Xina, les grans empreses tecnològiques, com ara IBM, Google, Amazon o Microsoft, i diverses start-ups del sector.

Anuncis com el de Google en el 2019 que afirmaven haver desenvolupat el Sycamore (Dargan, 2022a), el primer ordinador a assolir la «supremacia quàntica» o el d'IBM en el 2022 on van presentar el processador quàntic Osprey (IBM, 2021), amb 433 qbits, podrien fer pensar que estem a punt de presenciar l'eclosió d'aquestes tecnologies en forma de múltiples aplicacions pràctiques dels ordinadors quàntics i fins i tot de la Internet quàntica.

Però fins a quin punt són reals aquestes possibilitats de les tecnologies de la informació quàntica? Som ja en el punt de començar a veure les seves aplicacions? Entre els experts de l'àmbit, hi ha opinions molt diverses sobre aquestes qüestions i en aquest article no hi podem donar una resposta definitiva. No obstant això, sí que intentarem esbossar una breu panoràmica dels fonaments i les possibles aplicacions de la computació quàntica, i de les conseqüències que poden tenir per a empreses i institucions en el futur.

1. L'estranya realitat quàntica

Ningú no sap com és la realitat. De fet, no sabem ni si la realitat existeix. Però el que és ben clar és que si existeix, la realitat no és com nosaltres la percebem. Això és el que ens ensenyen les dues grans teories de la física moderna que van aparèixer a començaments del segle passat, quan semblava que quedava poc per descobrir: la relativitat i la mecànica quàntica. La primera es fa palesa quan ens fixem en magnituds molt grans, com ara la distància entre galàxies, el temps que fa que l'univers existeix o la massa dels estels. La segona, en canvi, es manifesta quan ens fixem en magnituds extraordinàriament petites, com ara la mida dels nuclis atòmics, el temps de vida de partícules que es desintegren ràpidament o la massa de les partícules elementals. A hores d'ara, encara no sabem com fer compatibles aquestes dues teories.

Gràcies a la relativitat s'han pogut desenvolupar grans innovacions com la navegació a través de GPS o els tubs de raigs catòdics de les pantalles antigues, a més de la conversió de massa en energia a les centrals nuclears o, malauradament, amb les bombes nuclears. Tanmateix, la llista d'innovacions basades en la mecànica quàntica que utilitzem diàriament és encara molt més llarga: transistors, làsers, fibra òptica, microscòpia electrònica, generació d'imatges per ressonància magnètica, plaques solars, superconductors, entre d'altres.

Totes aquestes aplicacions de la física quàntica es fonamenten en una sèrie de postulats teòrics que van desenvolupar durant les primeres dècades del segle xx un grup de científics brillants com Niels Bohr, Werner Heisenberg o Erwin Schrödinger, i constitueixen el gruix del que de vegades s'anomena la «primera revolució quàntica» (Rovelli, 2020). Avui dia, però, l'aplicació dels mateixos postulats juntament amb la capacitat tecnològica que tenim de manipular objectes a escala atòmica està permetent fer un salt qualitatiu tot obrint la possibilitat de treballar amb informació en l'àmbit quàntic. És el que alguns anomenen la «segona revolució quàntica» (Latorre, 2017). La clau d'aquesta revolució és la construcció d'ordinadors quàntics, que en comptes de treballar amb bits com els ordinadors convencionals, treballen amb qbits (bits quàntics), que són molt més complexos i difícils de gestionar, però que poden proporcionar a aquests nous ordinadors unes capacitats tan impressionants com perquè esdevinguin una innovació realment disruptiva.

A diferència dels bits convencionals que poden prendre només dos possibles estats (0 i 1), els qbits poden prendre el valor 0, el valor 1 i qualsevol valor entre mig. A més, tenen la particularitat que aquest valor no està determinat,

sempre que no interactui amb res. Podríem dir que conté simultàniament tots els valors infinits entre 0 i 1. És el que es coneix com una «superposició» d'estats. Així, quan es fa un càlcul amb un qbit s'estan fent càlculs infinits alhora. D'aquí la gran potència de càlcul que pot proporcionar un ordinador quàntic. I d'aquí també la dificultat de construir-los, ja que a escala atòmica, la superposició d'estats es pot trencar fàcilment quan accidentalment el qbit interactua amb algun altre objecte i, per tant, el càlcul ja no és vàlid.

Tot això fa que sigui molt més complex treballar amb qbits que amb els bits normals. Els ordinadors quàntics han de poder manipular els qbits per fer càlculs, però sense que es trenqui la superposició d'estats. Això es pot aconseguir a força d'utilitzar qbits addicionals per a la correcció dels errors que inevitablement es produeixen i també gràcies a una propietat «gairebé màgica» dels objectes a escala quàntica que s'anomena *entrellaçament* (*entanglement*) i que permet transferir la informació d'un qbit a un altre sense trencar la superposició (Brody, 2020).

2. L'estadi actual de la computació quàntica

Un dels primers que va suggerir la idea d'ordinadors quàntics va ser el físic teòric Richard Feynman en una sèrie de conferències que va donar el 1981 al Caltech de Califòrnia i al MIT de Boston (Feynman, 1996). En aquell moment, però, ningú no tenia gaire idea de com s'hauria de construir en la pràctica el maquinari dels ordinadors quàntics ni dels nous algorismes que haurien de constituir la base del seu programari. En els darrers anys, la possibilitat de construir ordinadors quàntics ha anat prenent força (Gribbin, 2014; Katwala, 2021).

Pel que fa al maquinari, a mitjans dels anys noranta del segle passat, a partir de la tecnologia de «trampes d'ions» desenvolupada anteriorment per a altres utilitats, es va poder fer el primer disseny d'un ordinador quàntic. A partir de llavors, s'han fet diverses propostes tecnològiques, algunes de les quals han tingut més recorregut que d'altres.

Actualment, la tecnologia que utilitzen la majoria de les iniciatives que estan desenvolupant ordinadors quàntics és la dels qbits de superconductors. És el cas, per exemple, de Google i IBM. Aquesta tecnologia es basa a integrar els qbits en una arquitectura de xips de silici similars als que s'utilitzen en els computadors convencionals. Això fa que la tecnologia sigui relativament fàcil de miniaturitzar i d'escalar. En aquest cas, el problema és que els qbits de superconductors només funcionen a temperatures de 10 milikelvins, molt a prop del zero absolut, i, per tant, requereixen condicions físiques complicades de mantenir. Microsoft, en canvi, aposta per una tecnologia basada en els qbits topològics, que serien més robustos pel que fa a mantenir els estats de superposició. En aquest cas, el problema és que es basen en una idea teòrica, la de les partícules de Majorana, que encara no se sap segur si poden existir realment. Darrerament, han sorgit altres iniciatives noves, com la de l'empresa Universal Quantum, que aposta per una combinació de superconductivitat i trampes d'ions.

Som en un estadi inicial del cicle de vida de la tecnologia de computació quàntica i, per tant, encara no sabem quina de les arquitectures acabarà essent la guanyadora. Ara bé, el que sembla clar és que prevaldrà la solució que aconsegueixi minimitzar els errors deguts a la pèrdua dels estats de superposició. Aquesta probablement serà una de les claus per obtenir una «supremacia quàntica» real sobre els ordinadors clàssics.

L'altre pilar necessari per al bon funcionament dels ordinadors quàntics és el desenvolupament de programari específic que n'aprofiti les particularitats. El principal avantatge que poden tenir els ordinadors quàntics sobre els clàssics és la possibilitat de resoldre en un temps raonable alguns problemes que trigarien potser milers o milions d'anys a resoldre's en ordinadors convencionals. Això sí, sempre que es desenvolupin els algorismes adequats. Perquè no es tracta simplement d'un ordinador com els habituals, però més ràpid. Un ordinador quàntic només és més efectiu per a qüestions determinades, és a dir, problemes que tenen una estructura que els fa susceptibles de ser resolts amb eficiència utilitzant les característiques especials dels qbits i amb els algorismes adequats.

Un d'aquests problemes és el de la factorització de grans nombres, que és una qüestió clau per als sistemes d'criptació que actualment garanteixen la seguretat i la privacitat de les transaccions en línia. Un algorisme dissenyat per Peter Shor el 1994 a Bell Labs permetria millorar dràsticament l'efectivitat del procés de factorització. Tècnicament, consistiria a passar de temps exponencials a temps polinomials per tal de resoldre el problema de descompondre un nombre molt gran en els dos factors primers que el formen. La conseqüència d'això seria que, de cop i volta, els sistemes d'criptació actual serien fàcilment desxifrables amb un ordinador quàntic, amb la disrupció que això significaria en les comunicacions a través d'Internet i en la seguretat dels arxius electrònics encriptats.

Un altre dels problemes interessants que es podrien resoldre amb un ordinador quàntic és el de la cerca dins d'una base de dades no ordenada. Lev Grover, també de Bell Labs, va dissenyar el 1996 un algorisme per a computadors quàntics que reduïa dràsticament el temps de cerca, de manera que si per trobar l'element adequat en una base de dades d'un milió de registres un ordinador clàssic hauria de comprovar una mitjana d'uns 500.000 elements, un ordinador quàntic ho podria fer només comprovant-ne uns 1.000, i per a això necessitaria només 20 qbits. És el que s'anomena *millora quadràtica*, que no és tan impressionant com la de l'algorisme de Shor, però que donaria un avantatge decisiu a l'empresa que dominés la tecnologia.

Ara bé, aquests algorismes estan escrits pensant en ordinadors quàntics ideals. En la realitat, les coses són força més complicades. Els ordinadors quàntics actuals encara no són prou avançats per estar a prova de fallades ni són prou grans per assolir la «supremacia quàntica». Som encara en el que John Preskill (2018) anomena «era NISQ» (*noisy intermediate-scale quantum*) i encara s'haurà d'avançar molt, tant en el desenvolupament de nous algorismes com en la millora del maquinari, perquè els ordinadors quàntics puguin arribar a fer el que alguns prometen.

3. Possibles aplicacions de la computació quàntica

Tot i que els ordinadors quàntics, tal com hem vist, encara són als inicis, ja s'estan començant a provar per resoldre alguns problemes específics. Ara per ara, molts d'aquests problemes també es poden solucionar amb ordinadors clàssics, però el fet que es puguin resoldre també amb ordinadors quàntics confirma les possibilitats que s'obren. Quan es puguin aplicar a problemes de tipus similar, però més complexos i que requereixin més capacitat de càlcul, és probable que els ordinadors clàssics quedin enrere.

A més, hi ha alguns problemes que, com hem vist, només es podrien resoldre en un temps raonable amb ordinadors quàntics. Són els problemes d'optimització combinatòria, i que consisteixen a trobar la combinació d'un conjunt d'elements que optimitza algun paràmetre concret. Mentre que els ordinadors clàssics per resoldre aquests problemes necessiten provar cadascuna de les combinacions una darrere l'altra, els ordinadors quàntics en poden provar moltes simultàniament. A mesura que el nombre d'elements creix, només els ordinadors quàntics són capaços de trobar la solució. Això obre una àmplia gamma de possibles aplicacions en un futur més o menys pròxim que ja s'estan desenvolupant (Bova *et al.*, 2021; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019). Tot seguit, en veurem alguns exemples.

Un dels àmbits on l'optimització combinatòria és clau i en què sembla clar que la computació quàntica pot resultar disruptiva és el de la **ciberseguretat** (ID QUANTIQUE SA, 2020). La potència de l'algorisme de Shor a l'hora de resoldre el problema de la factorització fa que, en el moment que hi hagi ordinadors quàntics que el puguin aplicar, tot el sistema actual de criptografia RSA basat en claus públiques i privades serà inservible. Un ordinador quàntic podrà trobar fàcilment les claus privades i desxifrar la informació. No cal dir que, si no es preveu, això pot ser catastròfic per a l'economia i la societat en general. Per això ja hi ha governs i empreses que estan desenvolupant nous sistemes d'encryptació a prova d'ordinadors quàntics, ja que estan basats en aquesta mateixa tecnologia.

En el camp de les **operacions** hi ha tota una sèrie de situacions que s'assimilen al TSP (*travelling salesman problem* o problema del viatjant). La idea del TSP és trobar en quin ordre un viatjant de comerç ha de visitar tota una sèrie de ciutats de manera que segueixi la ruta més curta, i sempre que visiti totes les ciutats i acabi tornant a la ciutat de partida. És un altre problema clarament d'optimització combinatòria, que té aplicació clara en la logística de repartiment de mercaderies, el disseny de circuits, o l'optimització de rutes per part dels navegadors GPS.

Els problemes assimilables al TSP no els veiem només en el món de les operacions. Encara que sembli un camp molt allunyat, l'àmbit de les **finances** també es pot beneficiar de la capacitat dels ordinadors quàntics per resoldre aquest tipus de problemes (Egger *et al.*, 2020; Orús *et al.*, 2019). Per exemple, a l'hora de trobar la composició òptima dels portafolis d'inversió a partir de la gran quantitat d'actius financers que hi ha actualment. Aquest tipus de càlculs es fa avui dia amb ordinadors clàssics mitjançant el que es coneix com simulacions Monte Carlo, però el gran nombre de possibilitats fa que una optimització que tingui en compte tots els factors només es pugui fer amb ordinadors quàntics. Un altre dels àmbits on seria útil la computació quàntica és en la decisió per part dels bancs de concedir crèdits. És una decisió complicada, ja que cal tenir en compte tots els factors per intentar no donar crèdits a qui possiblement no els pugui tornar i, en canvi, donar-ne a tots els que probablement podran fer-ho. Fins i tot és possible l'optimització quàntica en les decisions d'arbitratge que aprofiten els canvis de divises.

El disseny de noves molècules és clau en el descobriment de nous materials i en el desenvolupament de medicaments. Aquest tipus de problema d'**enginyeria química** requereix l'optimització combinatòria tant dels tipus d'àtoms

que componen la molècula com de les seves posicions, i fins i tot de les reaccions químiques en les quals pot intervenir. Quan la molècula té una certa mida, només amb una capacitat de càlcul formidable és possible resoldre el problema. Com que l'estructura i el comportament de les molècules són determinants en les propietats que acaba tenint el material o el medicament dissenyats, la computació quàntica pot ser d'un gran ajut en aquest àmbit. Una tècnica especialment útil en aquest cas és el procés de *quantum annealing* (alineament quàntic), que permet explotar la capacitat dels sistemes quàntics de considerar simultàniament múltiples solucions.

Un dels problemes principals en el món de la **fabricació avançada** de productes és el control de la qualitat a partir de la identificació de possibles fallades o defectes. Els ordinadors quàntics es poden utilitzar per analitzar grans quantitats de dades sobre les errades en sistemes de fabricació complexos per identificar quines parts del sistema poden haver contribuït en incidents que es tradueixin en fallades de producte. Clarament, això pot implicar grans estalvis en algunes empreses.

Moltes de les aplicacions de la **intel·ligència artificial** comporten un procés d'optimització combinatòria de grans quantitats de dades que serveixin per afinar les nostres prediccions i prendre decisions més acurades. Podem pensar, per exemple, en el reconeixement facial o la detecció del frau. La computació quàntica obre moltes oportunitats en aquest àmbit també, tot i que potser la realització pràctica és encara una mica lluny. Actualment, però, s'està treballant dins de l'anomenat *quantum machine learning* en la identificació de maneres en què els algorismes quàntics puguin ajudar a millorar les tècniques d'intel·ligència artificial (Biamonte *et al.*, 2017).

En l'àmbit de **recerca i desenvolupament**, és indubtable que els ordinadors quàntics haurien de constituir un ajut inestimable en la simulació de sistemes complexos. Com va postular Richard Feynman en la seva visió primigènia, la millor manera de simular els sistemes reals, que són quàntics, ha de ser amb ordinadors també quàntics. Això ja s'ha fet amb èxit, per exemple, en la simulació d'àtoms o molècules petites com l'hidrogen o la molècula de dihidrogen, però s'està treballant intensament per estendre-ho a altres sistemes molt més complicats, com les col·lisions de partícules a altes energies que es produeixen en el CERN, la determinació de l'estructura de les proteïnes modelant el procés de plegament (*protein folding*) o la simulació del procés de fotosíntesi de les plantes.

A banda dels que hem esmentat, hi ha molts altres àmbits en els quals s'espera que la utilització de la computació quàntica doni lloc a avenços importants. A tall d'exemple, podem esmentar el desenvolupament de **sensors quàntics** o de **sistemes de comunicació** totalment o parcialment quàntics (Pou, 2022).

4. Efectes en l'economia i la societat

És difícil predir els efectes que tindrà finalment la computació quàntica en l'economia i la societat. N'hi ha alguns, però, que ja s'estan manifestant actualment i que, en els darrers anys, han guanyat importància. En el món de la R+D s'està invertint cada cop més en la construcció de nous prototips d'ordinadors quàntics i en el desenvolupament d'algorismes per a aquests ordinadors. I no només per part de governs, de centres de recerca o de grans corporacions com IBM, Google o Microsoft. Estan sorgint també una gran quantitat de start-ups que, conjuntament amb els anteriors, estan constituint un ecosistema molt dinàmic (Dargan, 2022b; Gibney, 2019). L'empresa Honeywell afirma que, d'aquí a tres dècades, la indústria de la computació quàntica pot arribar a assolir un valor d'un bilió – europeu – de dòlars.

Fins i tot la indústria de la computació clàssica es veu afectada per aquesta tendència. Per fer front a l'«amença» dels ordinadors quàntics, els fabricants d'ordinadors convencionals estan treballant en l'optimització dels seus dissenys de maquinari futurs i s'estan desenvolupant nous algorismes més ràpids i potents. En molts casos, aquests algorismes estan inspirats en idees de la informació quàntica, encara que corrin sobre ordinadors clàssics. Alguns estan treballant també en el disseny de sistemes mixtos d'ordinadors clàssics i quàntics que aprofitin els avantatges de tots dos.

Com hem vist en la secció anterior, la computació quàntica pot acabar afectant molt àmbits de l'economia, per la qual cosa moltes grans empreses hi tenen un ull posat a l'hora de definir els seus plantejaments estratègics de cara al futur. La informació quàntica esdevindrà probablement un component clau de la transformació digital. Goldman Sachs, per exemple, no fa gaire que ha anunciat que en el termini de cinc anys podrien estar utilitzant algorismes quàntics per determinar els preus dels seus instruments financers.

Un dels efectes que semblen més inevitables tant a escala econòmica com social és la reformulació que s'ha de produir en el camp de la ciberseguretat. Si, com sembla probable, els ordinadors quàntics fan inservibles els sistemes actuals d'criptació, les comunicacions electròniques actuals ja no seran segures i –encara més preocupant– els milers de milions de documents emmagatzemats des de fa temps en bases de dades quedaran desprotegits. Això fa

que governs i grans empreses s'estiguin preparant intensament per posar-hi remei. Aquest pot ser un sector de gran creixement en un futur pròxim.

Les possibilitats de futur de la computació quàntica tenen també implicacions geopolítiques. En el seu objectiu d'esdevenir la primera potència mundial, la Xina, per exemple, està duent a terme inversions astronòmiques en la R+D en informació quàntica i està treballant en l'establiment d'una xarxa de comunicacions quàntiques per satèl·lit que seria una peça clau per a una Internet quàntica segura. Evidentment, les altres potències tampoc no es quedaran enrere.

Conclusió

Les estranyes propietats del món quàntic fins fa poc només eren d'interès per als físics professionals i per als interessats en el món de la ciència. Des de fa uns anys, però, el desenvolupament de la tecnologia de la computació quàntica ha desvetllat l'interès de molta més gent degut a les implicacions econòmiques i socials que pot tenir l'aparició d'ordinadors quàntics funcionals.

Les possibilitats que s'obren són, en teoria, extraordinàries. Caldrà veure si l'avenç continua al ritme actual i totes aquestes possibilitats finalment es confirmen i acaben formant part dels processos de transformació digital. De moment, sembla que n'hi ha algunes que podrien ser més a la vora, com ara l'encriptació quàntica segura (encara que sigui en ordinadors clàssics), el descobriment de nous materials i medicaments, i nous algorismes quàntics per a ordinadors clàssics. A més llarg termini, els camps d'aplicació possibles són molt més amplis. Alguns els hem apuntat en aquest article. Però segurament les aplicacions més impressionants de la tecnologia de la informació quàntica encara no ens les podem ni arribar a imaginar.

Referències bibliogràfiques

- BIAMONTE, Jacob; WITTEK, Peter; PANCOTTI, Nicola; REBENTROST, Patrick; WIEBE, Nathan; LLOYD, Seth (2017). «Quantum machine learning». *Nature*, vol. 549, núm. 7671, pàg. 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 línia]. Disponible a: <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, núm. 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, núm. 3101724, pàg. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.1109/TQE.2020.3030314>
- DARGAN, James (2022a). «Quantum Journey From the Search Engine to Google Sycamore». *The Quantum Insider* [en línia]. Disponible a: <https://thequantuminsider.com/2022/07/14/google-sycamore/>
- DARGAN, James (2022b). «81 Quantum Computing Companies: The Ultimate List for 2023» [en línia]. A: *The Quantum Insider*. Disponible a: <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, núm. 7776, pàg. 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 línia]. Disponible a: <https://research.ibm.com/blog/next-wave-quantum-centric-supercomputing>

- ID QUANTIQUE SA (2020). *Understanding Quantum Cryptography* [en línia]. Disponible a: https://www.quantum-commshub.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 línia]. Disponible a: <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, pàg. 100028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.revip.2019.100028>
- POU, Toni (2022). «L'anell quàntic de Collserola». *Ara.cat* [en línia]. Disponible a: 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, pàg. 79. DOI: <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>
- ROVELLI, Carlo (2020). *Helgoland*. Milà: Adelphi Edizioni.
- THE NOBEL PRIZE (s/d). «Nobel Prizes 2022». *NobelPrize.org* [en línia]. Disponible a: <https://www.nobelprize.org/all-nobel-prizes-2022/>

Citació recomanada: CANALS, Agustí. «Innovació quàntica: la propera onada de transformació digital?». *Oikonomics* [en línia]. Maig 2023, núm. 20. ISSN 2330-9546. DOI: <https://doi.org/10.7238/o.n20.2302>



Agustí Canals

acanalsp@uoc.edu

Professor agregat dels Estudis d'Economia i Empresa (UOC)

Llicenciat i màster en Ciències Físiques per la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). MBA i doctor en Management Sciences per ESADE (Universitat Ramon Llull). Ha estat investigador visitant a la Warwick Business School de la Universitat de Warwick, a la Wharton School de la Universitat de Pennsilvània i a la Saïd Business School de la Universitat d'Oxford. La seva investigació actual se centra en temes relacionats amb la gestió estratègica de la informació i del coneixement, les xarxes socials, la intel·ligència competitiva, la innovació i la complexitat en les organitzacions. És investigador principal del grup de recerca consolidat KIMO sobre la gestió de la informació i del coneixement en les organitzacions i dirigeix el màster universitari en Gestió Estratègica de la Informació i el Coneixement a les Organitzacions de la UOC.

Els textos publicats en aquesta revista estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement 4.0 Internacional de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los, comunicar-los públicament i fer-ne obres derivades sempre que reconegueu els crèdits de les obres (autoria, nom de la revista, institució editora) de la manera especificada pels autors o per la revista. La llicència completa es pot consultar a <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ca>.

