

# Propuestas sobre la enseñanza de la informática cuántica

Ricardo Pérez-Castillo  
Facultad de Ciencias Sociales &  
Tecnologías de la información  
Universidad de Castilla-La Mancha  
Talavera de la Reina  
ricardo.pdelcastillo@uclm.es

Manuel A. Serrano y Mario Piattini  
Escuela Superior de Informática

Universidad de Castilla-La Mancha  
Ciudad Real  
manuel.serrano@uclm.es  
mario.piattini@uclm.es

## Resumen

Estamos asistiendo a una nueva revolución en la que la que los computadores cuánticos empiezan a ser una realidad para resolver problemas difíciles, no resolubles con los actuales computadores “clásicos”. La computación cuántica abre nuevos perfiles profesionales en la informática y aparecen ofertas de trabajo a todos los niveles. Este artículo trata la problemática de que la mayoría de los *computing curricula* no contemplan este nuevo tipo de paradigma, exceptuando algunos pocos planes de estudios y cursos de tipo MOOC (*Massive Online Open Courses*) ya ofrecen cierta formación en computación cuántica. En este artículo se presenta un análisis de la situación actual y se propone la inclusión de la materia de Informática Cuántica (y sus correspondientes asignaturas) en los planes de estudio de Ingeniería Informática.

## Abstract

We are immersed in a new revolution in which quantum computers have become a real as these can solve difficult problems, not solvable with the current "classic" computers. Quantum computing opens up new professional profiles and roles in computer science, with many job positions offered at different levels. The problem addressed by this paper lies in the fact that most of the computing curricula do not reflect this change since these curricula do not encompass this new type of computation paradigm. Exceptionally, only some few curricula and MOOC courses (Massive Online Open Courses) already offer some training in quantum computing. This article presents an analysis of the current situation and proposes the inclusion of the subject of Quantum Computing in the Computer Engineering curricula.

## Palabras clave

Informática cuántica, quantum computing, plan de estudio, perfiles profesionales.

## 1. Informática cuántica

Históricamente podemos identificar diferentes “revoluciones” industriales: la primera revolución que tuvo lugar a finales del SXVIII con la creación de la máquina de vapor y el telégrafo; la segunda (en la primera década del SXIX) con el motor de combustión alimentado por petróleo, la electricidad, el teléfono y la radio; y la tercera provocada por la informática y la difusión de Internet. En las últimas dos décadas hemos asistido a otra confluencia de tecnologías: redes sociales, móviles, big data y analítica de datos, computación en la nube, inteligencia artificial, impresión 3D, realidad virtual y aumentada, robótica, blockchain, Internet de las cosas (IoT) y de “cualquier cosa” (*Internet of everything*). que están provocando una auténtica “revolución/transformación” digital en las organizaciones.

En la actualidad, está ya asomando la siguiente revolución que resulta de la combinación de la nano y biotecnologías, la genómica y la computación cuántica. De hecho, ya se puede utilizar ordenadores cuánticos y sacar provecho de su enorme capacidad de computación para resolver problemas considerados muy difíciles para los ordenadores “clásicos”, utilizando principios tan contrarios a la intuición como la superposición o el entrelazamiento.

Esto es gracias a que, a principio del siglo pasado, coincidió un conjunto excepcional de científicos: Planck, Einstein, Bohr, Schrödinger, Born, Dirac, De Broglie, Heisenberg y Pauli entre otros. (varios de los cuales ganaron el premio Nobel) que establecieron las bases de una nueva teoría física: la mecánica cuántica. Este campo describe el comportamiento de la naturaleza a niveles subatómicos (como fotones o electrones) para los cuales la mecánica clásica no ofrece explicaciones satisfactorias. En 1982 Richard Feynman se preguntó “¿Qué tipo de ordenador se utilizaría para simular la física?” [9], inaugurando así la “segunda revolución cuántica”, en la que se origina la idea de un ordenador cuántico y de la computación cuántica.

En las últimas tres décadas, ha aumentado considerablemente nuestra comprensión sobre los “ordenadores cuánticos” así como los intentos de crearlos [14]. De hecho, en la actualidad, como señala Knight [13]: “*The thing driving the hype is the realization that quantum computing is actually real ... It is no longer a physicist’s dream—it is an engineer’s nightmare.*”

De hecho, diversos países (especialmente China, pero también EE. UU., Japón o Rusia) y empresas (Google, IBM, Microsoft, Intel, Atos o Alibaba), ya “se han despertado”, invirtiendo inmensas cantidades de recursos en las tecnologías cuánticas [12]. Según datos del BCG (Boston Consulting Group) en 2024 la informática cuántica generará entre 1.880 y 4.520 millones de euros anuales, y se prevé que en 2050 los ingresos de la computación cuántica sean de entre 406.035 y 766.955 millones de euros anuales [8].

También la UE reaccionó mediante la iniciativa “*Quantum Manifesto and Quantum Technologies Flagship*” [17] cuya visión a largo plazo es desarrollar la denominada “web cuántica”, que permita conectar ordenadores, simuladores y sensores cuánticos mediante redes de comunicación cuánticas; y ha venido financiando varios proyectos<sup>1</sup> en tecnologías cuánticas en diferentes áreas. Dentro de esta iniciativa que consta de seis paquetes de trabajo, el cuarto se dedica a “*Education, Training and Outreach*”, y persigue promover un currículo en ingeniería cuántica y coordinar una serie de actividades educativas. También el congreso de EE. UU. ha ordenado a la *National Science Foundation* construir cinco institutos para formar a personas con el fin de trabajar en informática cuántica.

Además, en 2020 se ha publicado “*The Talavera Manifesto for Quantum Software Engineering and Programming*” [16] donde se demanda tomar en consideración no sólo la tecnología y los ordenadores cuánticos, sino el software cuántico que debe ser desarrollado para cumplir con las numerosas y prometedoras aplicaciones de la computación cuántica. Este nuevo tipo de software, con una naturaleza muy diferente al software actual, debe ser producido con métodos y técnicas de ingeniería del software que garanticen su producción industrial en escala a la vez que se garantiza su calidad y mantenibilidad.

A nivel tecnológico ya disponemos de herramientas para programar sistemas cuánticos, ya sean simuladores u ordenadores, como: Composer de IBM Q, Quantum Computing Playground de Google o LIQUi de Microsoft. Incluso varias plataformas de software abierto [10].

## 2. Nuevos perfiles profesionales en informática cuántica

El surgimiento de la computación cuántica, y sobre todo la maduración de la tecnología, hace que la demanda mundial de expertos en el área vaya en aumento, y todas las estimaciones parecen indicar que seguirá creciendo de forma exponencial [15].

Además de los puestos de post doctorales y de profesores sobre teoría de la información cuántica, sensores cuánticos, TI, aprendizaje automático cuántico, etc. que se pueden encontrar en varios sitios (por ejemplo, quantiki<sup>2</sup>), ya se solicitan por parte de empresas diversos “ingenieros informáticos cuánticos”.

Como se señala en [7] los informáticos cuánticos se encuentran muy demandados y varias empresas tienen importantes problemas para poder contratarlos. Esto se debe a que, como señala Gambetta [11] “se ha pasado de explorar la ciencia fundamental de la información cuántica, a demostrar que es posible construir un ordenador cuántico y ponerlo gratuitamente a disposición en la nube”, transición que denomina “*from quantum science to quantum ready*”.

Así, solo como ejemplo, IBM ya está buscando perfiles como los siguientes:

- Quantum Control Researchers
- Quantum Error Correction Researchers
- Quantum Computer Architects
- Quantum Complexity Theorists
- Quantum Algorithms Researchers
- Quantum Cryogenic Engineers
- Quantum Microwave Engineers
- Quantum FPGA Engineers
- Quantum Software Developers
- Quantum Community Builders
- Quantum User Experience Designers

De esta manera, se observa que el espectro de perfiles cuánticos es amplio abarcando diferentes roles en este nuevo paradigma de computación. Los futuros puestos de trabajo abarcan desde puestos de investigación y teóricos, centrados más en aspectos de complejidad, verificación, completitud y diseño de nuevos algoritmos e investigación de nuevos paradigmas de programación hasta perfiles centrados en los usuarios como los orientados a la evangelización y la generación de comunidades de entusiastas de la computación cuántica, pasando por múltiples puestos intermedios desde experimentación de bajo nivel, la reducción del ruido y la decoherencia cuántica y la creación de

<sup>1</sup> <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/projects-quantum-technology>

<sup>2</sup> <https://www.quantiki.org/>

nuevos computadores cuánticos o analistas, diseñadores y programadores cuánticos.

Todos estos perfiles, por la novedad de la tecnología y su rápida evolución, no se suelen encontrar en los planes de estudios e incluso los planes de estudios más afines, como la Ingeniería Informática no disponen de materias afines a estos nuevos roles.

### 3. Informática cuántica en los planes de estudio

Esta sección ofrece una revisión de los principales currículos internacionales de referencia (sección 3.1), así como de otros currículos y planes de estudio específicos en diferentes universidades y centros de estudio (sección 3.2). Finalmente, se incluye los estudios ofrecidos por algunas de las plataformas de aprendizaje online más conocidas (sección 3.3).

#### 3.1. Currículos ACM/IEEE/AIS/IFIP

*Quantum Computing* no es mencionado en ninguno de los currículos internacionales más prestigiosos de referencia, tales como:

- Software Engineering 2014 Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Software Engineering [2]
- MSIS 2016 Global Competency Model for Graduate Degree Programs in Information Systems [4]
- Information Technology Curricula [5]

La excepción la encontramos en:

- Computer Engineering Curricula CE2016 [3]

En la sección “4.2 *Strategies for Emerging Technologies*”, y más en concreto en el apartado de “4.2.1 *Applied Emerging Technologies*” quantum es mencionado. En concreto, este currículo menciona lo siguiente: “*Los ingenieros informáticos deben conocer las tecnologías emergentes aplicadas. Estas tecnologías ya existen en el mercado, pero son lo suficientemente nuevas como para que su influencia en la sociedad no se conozca por completo. Los estudiantes deben poder identificar algunas tecnologías emergentes aplicadas e indicar sus efectos en la ingeniería informática [...] Los ingenieros informáticos ya están interaccionando (o pronto lo harán) con computadoras ópticas, biológicas o cuánticas o diseñarán sistemas robóticos de última generación. Estas nuevas tecnologías emergentes presentan desafíos para los estudiantes y profesionales de ingeniería informática que podrían involucrar cambios económicos y éticos que afectarán la práctica profesional en un mundo cambiante*”. Aunque la computación cuántica es mencionada, no se propone ningún tema específico respecto a la computación cuántica.

Temas relacionados como la criptografía cuántica si se consideran en currículos como:

- Computer Science Curricula [1]
- Cybersecurity Curricula [7]

En el currículo de Ciencia de la computación, la criptografía cuántica es un tema incluido dentro del área de conocimiento “Information Assurance and Security (IAS)”. Este currículo incluye como un resultado de aprendizaje “Describir la criptografía cuántica y el impacto de la computación cuántica en los algoritmos criptográficos”. De forma similar, el currículo de ciberseguridad define el área de conocimiento “Data Security” que contiene una unidad de conocimiento denominada criptografía donde se menciona como conceptos avanzados lo siguiente: “desarrollos avanzados recientes: encriptación monomórfica total, ofuscación, criptografía cuántica, y esquema KLJN”

En resumen, sólo la criptografía cuántica es considerada -parcialmente- como un tema de los currículos de computación internacionales de referencia.

#### 3.2. Otros currículos y planes de estudios

La Universidad de Waterloo en colaboración con el *Institute for Quantum Computing* (IQC), ofrece programas de formación interdisciplinarios de información cuántica que dan lugar a grados de MMath, MSc, MASc, y un PhD (doctorado). Los cursos que ofrecen son:

- Quantum Information Processing Devices
- Quantum Electronics and Photonics
- Applied Quantum Cryptography
- Applications of Operator Algebras in QIT
- Advanced Topics in Quantum Optics
- Quantum Error Correction and Fault Tolerance
- Programming Quantum Computers
- Quantum Information Processing
- Theory of Quantum Information
- Nanoelectronics for Quantum Information Processing
- Modern Quantum Optics and Nanophotonics
- Spin-Based Quantum Information Processing
- Approximate Representation Theory of Groups and Non-Local Games
- Introduction to Noise Processes
- Matter Wave Optics and Interferometry

El EHT de Zurich oferta un Máster en *Science in Quantum Engineering* de 120 créditos ECTS que agrupa cursos de tres departamentos diferentes, Tecnología de la Información, Ingeniería Eléctrica y Física.

La Duke University, ofrece una intensificación en computación cuántica. La intensificación se ofrece tanto enfocado a investigación (Master of Science, MS) como a industria (Master of Engineering, MEng). A su vez, la intensificación tiene especializaciones en software y hardware. La especialización software “*prepara al estudiante para programar y controlar los dispositivos de información cuántica*”, mientras que la especialización hardware “*se centra en el diseño, fabricación y prueba de los dispositivos cuánticos*”. Los cursos de información cuántica que incluye esta intensificación de forma troncal (tanto software como hardware) son:

- Introduction to Quantum Engineering,
- Quantum Information and Computation,
- Quantum Information Theory
- Quantum Error Correction.

Por otro lado, QuSoft (*Research Center for Quantum Software*) ofrece un máster en el que incluye los cursos de:

- Quantum Computing
- Quantum Cryptography
- Quantum Information Theory
- Quantum in Business and Society

A nivel nacional también existen varias propuestas, bien de másteres o bien como asignaturas dentro de planes de estudios de Ingeniería Informática o similares.

La Universidad Politécnica de Madrid oferta un máster en “Ciencias y tecnologías de la computación” que incluye una asignatura optativa de 6 créditos denominada “Computación cuántica y computación natural”. Como se deduce del nombre, esta asignatura agrupa estos dos conceptos, dedicando aproximadamente la mitad del temario a computación cuántica (4 primeros temas de 7) que incluye:

- Información Cuántica
- Criptografía Cuántica
- Computación Cuántica
- Líneas de investigación

En la Universidad Autónoma de Madrid, y en particular dentro del grado en Ingeniería Informática, existe una optativa de 6 créditos denominada “Complejidad y Computación” que dedica su última unidad (de un total de 4) a la computación cuántica.

En la Universidad Politécnica de Cataluña, existe una asignatura optativa de 6 créditos denominada “Computación y criptografía cuánticas” dentro del grado en Ingeniería Informática. Esta asignatura es impartida por el departamento de Física, y el temario incluye:

- Física cuántica

- Qubits
- Criptografía cuántica
- Lógica Cuántica. Puertas y algoritmos cuánticos sencillos
- Algoritmo de Grover de búsqueda de elementos en una base de datos no estructurada.
- Algoritmo de factorización de Shor

Por último, también se observa que la computación cuántica empieza a formar parte de otros planes de estudios. Por ejemplo, la Universidad Carlos III oferta un grado en Ingeniería de Sonido e Imagen que contempla una asignatura optativa de 3 créditos denominada “Introducción a la comunicación y la computación cuántica”

### 3.3. Plataformas de aprendizaje online

Diversas plataformas de aprendizaje online imparten diversos cursos relacionados con la computación cuántica:

- UDEMY. Incluye un curso de “*Quantum Physics for Quantum Computing*” y otro similar de prerrequisitos matemáticos (“*Math Prerequisites for Quantum Computing*”), así como otro más orientado a la parte de física cuántica “*Quantum Computing & Quantum Physics for Beginners*”, además de un “*Master Quantum Computing, Quantum Cryptography, and Quantum Physics with Microsoft Q# (Q Sharp) & IBM Quantum Experience*”.
- edX. Ofrece los cursos de la Delft University of Technology, así como su “*Professional Certificate in Quantum 101: Quantum Computing & Quantum Internet*”, que incluye tanto formación sobre el hardware de un ordenador cuántico, como la arquitectura, algoritmos y protocolos de un ordenador cuántico y de la Internet cuántica. También hay disponible un curso de *quantum machine learning* de la Universidad de Toronto, y un conjunto de cursos del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT): “*Quantum Information Science I*”, (con tres partes, Part 1 to 3), “*Quantum Information Science II*”, con dos partes: “*Efficient Quantum Computing - fault tolerance and complexity*”, y “*Advanced quantum algorithms and information theory*”
- Brilliant. Mediante la colaboración de Microsoft y Alphabet X, ofrece el plan de cursos online más completo de los existentes: Introducción, Información, Circuitos, Algoritmos fundamentales, Algoritmos a medio plazo, Algoritmos avanzados, Qubits físicos.
- Coursera. Ofrece un curso de introducción de la Universidad Estatal de San Petersburgo

## 4. La materia de Informática Cuántica

A raíz del análisis de los currículos internacionales de referencia, así como otros planes de estudio internacionales y nacionales, se ha observado que la informática cuántica no es tratada de forma sistemática y transversal en los planes de ingeniería informática. Existiendo en la actualidad planes de estudio o cursos específicos para computación cuántica, pero no dentro de los planes de ingeniería informática. O bien, cuando es considerada en estos planes lo hace de forma testimonial en forma de algunos créditos optativos.

Por lo anterior, este trabajo propone una materia de informática cuántica compuesta de varias asignaturas, que se podría incluir dentro los planes de estudios de Ingeniería Informática, a fin de conseguir dicha especialización.

El nombre propuesto para la materia es 'Informática Cuántica' y se compone de 6 asignaturas. A continuación, se presentan las asignaturas propuestas con una lista de descriptores para cada una de ellas.

### CC: Computación Cuántica (6 créditos)

- Fundamentos de la mecánica cuántica
- Entrelazamiento y superposición
- Cúbits y su medición
- Corrección de errores cuánticos
- Ordenadores cuánticos
- Teleportación y redes cuánticas

### PC: Programación Cuántica (6 créditos)

- Lógica cuántica
- Microarquitecturas, compiladores y lenguajes de programación para procesadores cuánticos
- Principales puertas cuánticas
- Diseño de circuitos cuánticos
- Traducción de circuitos cuánticos a código cuántico
- Principales algoritmos cuánticos: factorización de Shor y búsqueda de Grover entre otros.
- Complejidad de estados cuánticos

### DSC: Desarrollo de Sistemas Cuánticos (6 créditos)

- Metodologías de desarrollo software cuántico
- Análisis y diseño de sistemas cuánticos
- Implementación e integración de sistemas cuánticos y clásicos
- Mejora e integración continua en el desarrollo de sistemas cuánticos

- Testing de sistemas cuánticos
- Evolución y mantenimiento de software cuántico

### IAC: Soporte Cuántico a la Inteligencia Artificial (3 créditos)

- Algoritmos cuánticos para machine learning
- Resolución de problemas de optimización con computación cuántica
- Clustering cuántico

### SC: Seguridad cuántica (6 créditos)

- Fundamentos de ciberseguridad
- Nociones de criptografía clásica y limitaciones
- Criptografía cuántica
- Protocolos de seguridad basados en entrelazamiento
- Seguridad de la criptografía cuántica

### SIC: Sistemas de Información Cuánticos (3 créditos)

- Áreas de aplicación de los sistemas cuánticos.
- Aspectos legales y éticos de la computación cuántica
- Gobierno y alineación estratégica de sistemas de información cuánticos
- Operación de sistemas de información cuánticos

Aunque en un futuro (lejano todavía), la materia se podría proponer como una especialización alternativa, se cree que a corto plazo puede ser más recomendable integrarlas con las diferentes especializaciones que existen en la actualidad. Así, el Cuadro 1 muestra una propuesta de inclusión de las asignaturas de la materia propuesta respecto a las especializaciones del grado en Ingeniería Informática.

## 5. Conclusiones

Los nuevos avances en tecnología cuántica han propiciado la aparición de nuevos ordenadores cuánticos que son utilizables desde la nube por los ingenieros para resolver problemas especialmente difíciles que no son abordables por los ordenadores clásicos. Esta situación está propiciando la demanda de nuevos perfiles profesionales de ingenieros en informática cuántica que abarcan desde perfiles muy teóricos o de investigación hasta perfiles de programadores cuánticos. Esta demanda se incrementa día a día, pero los principales currículos de informática no incluyen estos temas, dejando a los ingenieros informáticos con la necesidad de ser autodidactas o de cursar algunos de los escasos cursos MOOC que existen para adaptarse a este nuevo horizonte profesional.

Grado / Especialización	Asignaturas					
	CC	PC	DSC	IAC	SC	SIC
Ciencias de la Computación	♦	♦		♦		
Tecnologías de la Información		♦	♦			♦
Tecnología de Ordenadores	♦	♦				
Ingeniería del Software		♦	♦			♦
Sistemas de Información			♦		♦	♦
Ciencia (e Ingeniería) de Datos	♦	♦		♦		
(Ingeniería de la) Ciberseguridad	♦				♦	♦

Cuadro 1. Materia de informática cuántica propuesta

El artículo aborda esa problemática, para lo cual se propone la inclusión de la materia de Informática Cuántica en los planes de estudio de Ingeniería Informática, mediante la inclusión de 6 asignaturas (Computación Cuántica, Programación Cuántica, Desarrollo de Sistemas Cuánticos, Soporte Cuántico a la Inteligencia Artificial, Seguridad cuántica y Sistemas de Información Cuánticos). Estas nuevas asignaturas son susceptibles de ser incorporadas en los diferentes planes de estudio de ingeniería en informática, adaptándolas a las distintas especializaciones o intensificaciones ya existentes, o en los diferentes grados. De esta forma, no en todos los grados o intensificaciones sería necesaria la incorporación de todas estas asignaturas, sino que podría variar de entre 3 a 4 asignaturas (15 a 18 ECTS). Por lo tanto, esta propuesta representa unas líneas guía que pueden ser consideradas como una aproximación para la instanciación concreta en cada uno de los diferentes planes de estudios actuales.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido soportado por los proyectos BIZDEVOPS-Global (RTI2018-098309-B-C31) y ECLIPSE (RTI2018-094283-B-C31) financiados por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (MINECO) & Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

## Referencias

- [1] CC (2013). Computer Science Curricula 2013 Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Science December 20, 2013 The Joint Task Force on Computing Curricula Association for Computing Machinery (ACM) IEEE Computer Society.
- [2] CC (2015). Software Engineering 2014 Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Software Engineering A Volume of the Computing Curricula Series 23 February 2015. Joint Task Force on Computing Curricula IEEE Computer Society Association for Computing Machinery.
- [3] CC (2016). Computer Engineering Curricula 2016 (CE2016). Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Engineering. A Report in the Computing Curricula Series Joint Task Force on Computer Engineering Curricula Association for Computing Machinery (ACM) IEEE Computer Society.
- [4] CC (2017a) MSIS 2016 Global Competency Model for Graduate Degree Programs in Information Systems. The Joint ACM/AIS MSIS 2016 Task Force, 23 mayo 2017.
- [5] CC (2017b). Information Technology Curricula 2017 (IT2017). Curriculum Guidelines for Baccalaureate Degree Programs in Information Technology A Report in the Computing Curricula Series Task Group on Information Technology Curricula Association for Computing Machinery (ACM) IEEE Computer Society (IEEE-CS). 10 diciembre 2017.
- [6] CC (2017c). Cybersecurity Curricula 2017. Curriculum Guidelines for Post-Secondary. Degree Programs in Cybersecurity. A Report in the Computing Curricula Series. Joint Task Force on Cybersecurity Education. Association for Computing Machinery (ACM), IEEE Computer Society (IEEE-CS), Association for Information Systems Special Interest Group on Information Security and Privacy (AIS SIGSEC), International Federation for Information Processing Technical Committee on Information Security Education (IFIP WG 11.8).

- [7] Chen, S. (2018). Quantum Computing Will Create Jobs. But Which Ones? WIRED, 8/6/2018. <https://www.wired.com/story/national-quantum-initiative-quantum-computing-jobs/>
- [8] Fernández, A. (2019). La computación cuántica, el futuro de la tecnología. La Razón, 24/11/2019. <https://www.larazon.es/tecnologia/20191124/rlg3zuvt7jdcjf4d472vmjr26e.html>
- [9] Feynman, R. P. (1986). Quantum mechanical computers. *Foundations of Physics*, 16(6), 507-531. doi:10.1007/BF01886518
- [10] Fingerhuth, M., Babej, T., & Wittek, P. (2018). Open source software in quantum computing. *PloS one*, 13(12), e0208561.
- [11] Gambetta, J. (2018). The Hitchhiking Cat's Guide to Getting a Job in Quantum Computing. <https://medium.com/qiskit/the-hitchhiking-cats-guide-to-getting-a-job-in-quantum-computing-da7e3bb9ff64>.
- [12] Humble, T.S. and DeBenedictis, E.P. (2019). Quantum Realism. *IEEE Computer* vol 52 N° 6, June 2019
- [13] Knight, W. (2018). Serious quantum computers are finally here. What are we going to do with them?. *MIT Technology Review*, 21 February 2018. <https://www.technologyreview.com/s/610250/serious-quantum-computers-are-finally-here-what-are-we-going-to-do-with-them/>
- [14] Maslov, D., Nam, Y., & Kim, J. (2019). An Outlook for Quantum Computing [Point of View]. *Proceedings of the IEEE*, 107(1), 5-10. doi:10.1109/JPROC.2018.2884353
- [15] Peterssen, G. (2020). Quantum technology impact: the necessary workforce for developing quantum software. Paper presented at the QANSWER'20 - QuANTum SoftWare Engineering & pROgramming, Talavera de la Reina. <http://ceur-ws.org/Vol-2561/paper1.pdf>
- [16] Piattini, M., G. Peterssen, R. Perez-Castillo, J.L. Heviaç, M.A. Serrano, G. Hernández, I.G.R.d. Guzmán, C.A. Parabela, M. Polo, E. Murina, L. Jiménez, J.C. Marqueño, R. Gallego, J. Tura, F. Phillipson, J.M. Murillo, A. Niño, and M. Rodríguez, The Talavera Manifesto for Quantum Software Engineering and Programming, in QANSWER 2020. QuANTum SoftWare Engineering & pROgramming, M. Piattini, et al., Editors. 2020, CEUR-WS (2561): Talavera de la Reina. p. 1-5. <http://ceur-ws.org/Vol-2561/paper0.pdf>
- [17] De Touzalin, A., Marcus, C., Heijman, F., Cirac, I., Murray, R., & Calarco, T. (2016). Quantum manifesto. A new era of technology. European Commission, 20.