



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

**QUANTUM COMPUTING-AS-A-SERVICE: ESTUDIO COMPARATIVO DE LA DIFUSIÓN DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA FRENTE A LA COMPUTACIÓN TRADICIONAL**

Clave: 201702614

MADRID | Marzo 2022

## Abstracts

[ES] Este trabajo tiene por objetivo el estudio y comparación de los dos principales modelos de difusión para la tecnología de computación cuántica: *on-premise* y *quantum computing as-a-service*, partiendo del ejemplo de la adopción de la computación clásica en la segunda mitad del siglo XX. Para ello, se realiza un análisis de los conceptos técnicos fundamentales de esta nueva tecnología, se explora la historia de la computación clásica y cuántica, se profundiza en el estado de la tecnología y su industria en la actualidad, y se procede a evaluar cada una de las ventajas e inconvenientes resultantes de un modelo centralizado de difusión de la tecnología. Los resultados del trabajo muestran que los retos económicos y de modelo de negocio derivados de la fragilidad a nivel técnico de la computación cuántica favorecen una estructura de difusión de la tecnología centralizada en la cual el acceso a esta se pueda complementar con el uso de ordenadores clásicos, proponiendo así una estructura híbrida de las anteriores. Entre las principales razones que sostienen esta conclusión encontramos las ventajas a nivel económico, financiero y sinergias con otros servicios en la nube que hacen del *quantum computing-as-a-service* (QCaaS) el modelo de negocio que dominará la industria según vaya madurando.

[EN] This paper aims to study and compare the two main diffusion models for quantum computing technology through the on-premise and as-a-service models, starting from the example of the adoption of classical computing in the second half of the twentieth century. To this end, an analysis of the fundamental technical concepts of this new technology is carried out, the history of classical and quantum computing is explored, the state of the technology and its industry today is examined in-depth, and each of the advantages and disadvantages resulting from a centralized model of technology diffusion is evaluated. The results of the work show that the economic and business model challenges derived from the technical fragility of quantum computing favor a centralized technology diffusion structure in which access to the technology can be complemented with the use of classical computers, thus proposing a hybrid structure. Among the main reasons supporting this conclusion are the economic and financial advantages and synergies with other cloud services that make quantum computing-as-a-service (QCaaS) the business model that will dominate the industry as it matures.

**Keywords**

[ES] Quantum Computing; Quantum Computing-as-a-Service; servicios en la nube, difusión.

[EN] Quantum Computing; Quantum Computing-as-a-Service; cloud services, diffusion.

# Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Estado del arte: la industria de la computación cuántica en el siglo XXI.....</b>	<b>8</b>
2.1. La historia de la computación clásica y la aparición del primer ordenador cuántico. 8	
2.2. Conceptos clave de la mecánica cuántica. ....	10
2.2.1. El principio de superposición .....	11
2.2.2. El fenómeno de entrelazamiento cuántico.....	12
2.2.3. Los qubits y la polarización de fotones .....	13
2.3. Principales tecnologías actuales de computación cuántica.....	14
2.4. Evolución de la industria, actores principales y fuentes de financiación. ....	16
2.5. Estudio del grado de desarrollo actual de la tecnología de computación cuántica.	18
2.6. Principales usos de la computación cuántica y estudio de su demanda potencial.	20
2.7. Introducción a los servicios en la nube y a la computación cuántica como servicio (QCaaS) .....	25
2.7.1. Integración de QCaaS con el ecosistema de servicios en la nube. ....	27
<b>3. Objetivos del estudio. ....</b>	<b>29</b>
<b>4. Metodología.....</b>	<b>30</b>
<b>5. Resultados .....</b>	<b>31</b>
5.1. Símbolos y diferencias entre la computación clásica y la computación cuántica.....	31
5.2. Sinergias generadas mediante la inclusión de Quantum Computing as-a-service (QCaaS) en la oferta de servicios en la nube.....	33
5.3. Principales desafíos para la viabilidad de Quantum Computing as-a-service (QCaaS). ....	36
5.4. Revisión y propuesta de una estrategia de pricing para Quantum Computing as-a-service (QCaaS).....	37
<b>6. Conclusión.....</b>	<b>40</b>
6.1. Quantum Computing As-a-service como modelo económico y técnico preferente de difusión.....	40
6.2. Alcance e impacto del estudio .....	42

## 1. Introducción

A lo largo de la década de 2010 se ha producido un incremento gradual en la atención prestada al desarrollo de la tecnología de la computación cuántica como solución a los límites físicos del progreso de la computación clásica. Tradicionalmente, el incremento en la potencia de los procesadores venía dada por mejoras en la frecuencia alcanzada por cada uno de los núcleos o a través del aumento del número de procesadores capaces de procesar información en paralelo; los ordenadores se pueden clasificar a su vez según la taxonomía de Flynn en cuatro tipos distintos: SISD<sup>1</sup>, SIMD<sup>2</sup>, MIMD<sup>3</sup> y MISD<sup>4</sup> (Barney, 2010). En todo caso, uno de los mayores retos de la arquitectura de microchips ha sido la constante miniaturización de los transistores que los conforman. Esta se ve limitada por el denominado efecto túnel: este consiste en un fenómeno cuántico por el cual un electrón cambia la trayectoria que sería predecible mediante modelos clásicos al atravesar barreras físicas en el caso de que estas sean lo suficientemente pequeñas. Como consecuencia, la miniaturización de los transistores se encuentra limitada por el tamaño en el cual se manifiesta este efecto —en torno a los 3 nanómetros—, ya que da lugar a errores de funcionamiento (Lu & Seabaugh, 2014). La segunda década del siglo XXI viene caracterizada por la incipiente necesidad de procesar volúmenes enormes de información con el fin de poder, por ejemplo, entrenar modelos de lenguaje como GPT3. Tomando los vehículos autónomos, por ejemplo, los elementos fundamentales que hacen viable su funcionamiento son principalmente los sensores, el software, la conexión a las redes de telecomunicación (4G/5G), los servidores de almacenamiento de la información y, no menos importante, las instancias (*multi-access edge computing*) que permiten el procesamiento de la información que será enviada al vehículo en tiempo real (Carlier et al., Nov 2020). Si bien nuestras capacidades actuales de computación nos permiten gestionar un número reducido de vehículos autónomos en desplazamiento, en un futuro cercano se prevé alcanzar el denominado *bottleneck* de procesamiento, asumiendo que todos los vehículos dispongan de esta capacidad. A su vez, el problema se vería agravado según Alted (2010) por las limitaciones en la velocidad de transferencia de datos entre la unidad de cómputo y las memorias actuales. Este ejemplo sirve como base para entender un

---

<sup>1</sup> SISD: Single Instruction Single Data.

<sup>2</sup> SIMD: Single Instruction Multiple Data.

<sup>3</sup> MIMD: Multiple Instruction Multiple Data.

<sup>4</sup> MISD: Multiple Instruction Single Data.

problema real a medio plazo que las empresas han de resolver para poder seguir progresando en el avance de una era marcada por el *data analytics*.

La solución propuesta al problema que suponen los límites físicos de la miniaturización es la investigación y desarrollo de una nueva forma de computación basada en los descubrimientos sobre mecánica cuántica de los siglos XX y XXI. A grandes rasgos, un ordenador cuántico realiza las operaciones empleando el qubit como unidad básica de información. A diferencia del bit clásico, tiene 3 estados posibles: 1, 0 o en una superposición de los anteriores (Ladd et al., 2010). El aspecto más revolucionario de los qubits es permitir un incremento exponencial de la capacidad de procesamiento frente a los bits tradicionales, ya que la superposición (es decir, no estar limitados a solo dos estados, sino poder representar múltiples a la vez) permite obtener una potencia de cálculo equivalente a 2 elevado al número de qubits aislados presentes en el sistema. La mecánica de funcionamiento de los qubits supone a su vez el mayor reto al que se enfrenta el desarrollo de esta tecnología, ya que los requisitos para lograr la estabilidad y el aislamiento de estos se traduce en la práctica en sistemas por el momento aparatosos y de elevado coste.

El objetivo general de este trabajo es la propuesta de un modelo de negocio preferente a la hora de difundir la tecnología, fundamentado en la selección de un consumidor objetivo y estableciendo las bases para la paulatina penetración en otros segmentos de clientes. Así pues, se estudiarán los símiles y diferencias existentes entre los dos tipos de computación existentes (clásica y cuántica), se analizarán las posibles sinergias resultantes de la integración de la computación cuántica en la red de servicios existentes en la nube, se explorarán las limitaciones consecuentes a su introducción como servicio en la nube y se formulará una aproximación a una estrategia de *pricing* que maximice la generación de valor para todos los *stakeholders*. En base a estos objetivos específicos se podrá llegar, finalmente, a una conclusión sobre la superioridad de la penetración de mercado a través de *quantum-as-a-service* frente a *quantum computing on-premise*.

En verano de 2020, tras el comienzo de la pandemia, los gigantes de la nube como Amazon Web Services, Microsoft Azure y Google Cloud anunciaron al mundo la creación de los primeros equipos y divisiones destinados a hacer realidad la integración de la computación cuántica como otro elemento más de su vasto repertorio de servicios en la nube<sup>5</sup>. Sin embargo, las bases académicas de las ventajas derivadas de acceder a la tecnología como servicio no se encuentran tan desarrolladas como sí lo está el aspecto técnico de la cuestión. Teniendo en cuenta los enormes recursos (e.g., financieros, humanos, energéticos...) que requiere el desarrollo de esta tecnología y la imperante necesidad de impulsarla, es preciso realizar un análisis desde el punto de vista económico que revele cuál es la forma más propicia de focalizar los recursos para la investigación y su implantación en el tejido empresarial. La apuesta por un modelo de negocio no óptimo podría conllevar el abandono de esta tecnología debido a una percepción de baja rentabilidad o la reducción de los insumos destinados a la computación cuántica; ambos escenarios serían tan negativos como un problema de carácter técnico mayor, por lo que es importante no obviar el aspecto empresarial de la cuestión.

Con el fin de poder responder a los objetivos planteados con anterioridad, se procederá a realizar el análisis aplicando un enfoque de marcado carácter cualitativo; si bien se consultará y hará referencia a otras obras académicas de carácter cuantitativo para afrontar el objetivo referente a la maximización de generación de valor mediante una propuesta de *pricing* viable para este servicio en concreto. De esta forma, se acudirá a *papers* de carácter técnico para explicar los principales conceptos teóricos que suponen la base de esta tecnología y de los cuales se puedan derivar ciertos efectos económicos a tener en cuenta más adelante a la hora de comparar modelos de negocio. En lo referente a la recolección y tratamiento de datos de fuente primaria de empresas, esto se sustituirá por la revisión de *reports* recientes especializados en la investigación del grado de aceptación de la computación cuántica por parte de empresas que por sus dimensiones puedan ser calificadas como *Enterprise*.

---

<sup>5</sup> <https://press.aboutamazon.com/news-releases/news-release-details/aws-announces-general-availability-amazon-braket/>

La estructura del trabajo consta de dos partes claramente diferenciadas: la primera está destinada a entender todo aspecto relevante relativo a la computación cuántica como tecnología, y la segunda hace énfasis en los modelos de negocio que le son aplicables. Así pues, en esa primera parte de carácter más técnico encontramos una breve revisión de los conceptos técnicos necesarios como base, y después, la historia de los dos tipos de computación (clásica y cuántica). En segundo lugar, se presenta el estado de la cuestión comenzando por las distintas tecnologías disponibles actualmente para conseguir qubits estables y funcionales, así como el análisis de las distintas fases del desarrollo de la tecnología y su proyección a futuro. Acto seguido, se analizarán las principales limitaciones presentes en las soluciones disponibles actualmente y se hará una introducción a las aplicaciones teorizadas de esta tecnología en actividades empresariales. Una vez explorados los aspectos técnicos como aquellos más generales de esta tecnología, se procede a la revisión de los principales modelos de negocio con especial énfasis en el *quantum-as-a-service* que llevará en última instancia a la revisión de su impacto según criterios económicos, tecnológicos y financieros. Finalmente, se presentará la conclusión a la tesis planteada como objetivo vertebrador del trabajo acerca de la superioridad teórica de *quantum-as-a-service* como modelo de negocio preferente para la difusión de la computación cuántica.

## **2. Estado del arte: la industria de la computación cuántica en el siglo XXI.**

### *2.1. La historia de la computación clásica y la aparición del primer ordenador cuántico.*

La historia de la computación clásica tiene por origen la creación de los primeros dispositivos capaces de llevar a cabo cálculos u operaciones matemáticas, siendo creadas las formas más primitivas durante la Segunda Guerra Mundial (William H. Dutton, et al., 1987). Los primeros dispositivos en ser comercializados con éxito fueron los LEO en 1951, los cuales lo lograron tiempo antes que su contraparte americana (los UNIVACs). De hecho, a pesar del impulso posterior que se llevó a cabo en Estados Unidos a la difusión y avance de los ordenadores, la era de la computación digital comenzó con algo de retraso frente a Europa (en Alemania Konrad Zuse creó el primer ordenador digital en 1941) mediante la invención del ENIAC por parte de Eckert y Mauchly. En 1947, se inventó el transistor en los laboratorios Bell lo cual permitiría en 1958 a Jack Kilby y Robert Noyce la creación del circuito integrado. En las sucesivas décadas los ordenadores irían reduciéndose en tamaño a



la par que aumentando su potencia gracias a la creación de nuevos componentes como “chips de memoria dinámica de acceso aleatorio” y a la reducción de tamaño de los transistores utilizados en los circuitos electrónicos (O'Regan, 2021).

El funcionamiento de un ordenador electrónico clásico se basa en el control de la circulación de la corriente eléctrica mediante transistores, lo cual resulta en dos posibles estados que se denotan como 0 o 1 según se corte el paso de la corriente o no (Tatnall, 2012). Tanto el diseño de los circuitos como la codificación de los estados de los transistores siguen lo que se denomina lógica Booleana, según la cual toda la información se representa como verdaderos (1) o falsos (0). Debido al enorme tamaño y al coste asociado a los primeros ordenadores, esta industria tuvo por clientes fundamentalmente a gobiernos, empresas e instituciones de distintos tipos (William H. Dutton, et al., 1987). El primer ordenador destinado al consumidor —el Altair— no llegaría hasta 1974, pero el boom de los ordenadores personales llegaría de la mano del Apple II, del TRS-80 y del PET, las cuales se caracterizaban por usar procesadores de 8-bits (O'Regan, 2021). En la actualidad, los nuevos procesadores tienen por lo general arquitectura de 64-bits en la gran mayoría de dispositivos electrónicos complejos (e.g. ordenadores, móviles, tablets...). Esta mejora en la capacidad de procesamiento de los ordenadores ha seguido la denominada “*Ley de Moore*” formulada en 1965 por Gordon Moore, según la cual cada 18-24 meses se duplica aproximadamente el número de transistores en un microprocesador. Sin embargo, en los últimos años la reducción del tamaño de los transistores que ha permitido que la capacidad de procesamiento de los ordenadores pudiese seguir creciendo log-linealmente siguiendo la *ley de Moore* se ha topado con un nuevo reto: el tamaño mínimo que un transistor basado en silicio puede alcanzar desde un punto de vista teórico es de 0,6 nanómetros (Shalf, 2020). Una vez alcanzado dicho tamaño, el progreso tendrá que provenir necesariamente de chips de mayor tamaño, de la mejora del procesamiento en paralelo (RISC, CISC, superescalar) o del desarrollo de una forma alternativa de plantear el funcionamiento de un ordenador la utilización de la mecánica cuántica (Leiserson et al., 2020).

Los ordenadores cuánticos fueron propuestos por primera vez a nivel teórico por Richard Feynman y Yuri Manin en 1980 (Hidary, 2021). Las limitaciones del hardware clásico a la hora de simular los estados de una partícula según la mecánica cuántica motivaron las primeras teorías sobre la creación de circuitos basados en qubits. A diferencia de los bits, estas unidades pueden asumir tres estados: 0, 1 o una superposición de ambos. Sin embargo, el primer algoritmo diseñado para que su ejecución en un ordenador cuántico fuera superior a su equivalente en uno tradicional no aparecería hasta 1994, cuando Peter Shor introdujo el denominado algoritmo de Shor (LaPierre, 2021). En 1998, el primer ordenador cuántico sería creado con tan solo 2 qubits operativos (Hassija et al., 2020). Aproximadamente veinte años más tarde, en 2017, IBM presentó el primer ordenador cuántico de uso comercial con 20 qubits operativos: el IBM *Q System One*<sup>6</sup>. Los esfuerzos por lograr una versión reducida de un ordenador cuántico que pudiera emular el éxito de los ordenadores personales clásicos de la década de 1980 han dado sus frutos en el anuncio del primer ordenador cuántico para particulares de la compañía china SpinQ, el cual en su modelo Gémini ofrece 2 qubits por un precio de \$50.000 (Hou et al., 2021). Por lo tanto, si comparamos el progreso experimentado por la computación clásica frente al ritmo al que se incrementa el número de qubits utilizables en los ordenadores cuánticos, vemos que estos últimos evolucionan a menor velocidad debido a dificultades derivadas de los mismos fenómenos en los que se fundamenta su propia existencia: la superposición y el entrelazamiento cuántico.

## *2.2. Conceptos clave de la mecánica cuántica.*

Para poder entender el funcionamiento de un qubit es necesario primero introducir ciertos conceptos clave del campo de la física cuántica que permiten su particular existencia. El comportamiento de las partículas que conforman a su vez los átomos ya sean compuestas — protón, electrón y neutrón—o elementales (e.g., muones, quark arriba, gluones) viene definido por la dualidad onda-partícula (Selleri, 2012). Este concepto tiene varias implicaciones contradictorias con la física clásica o del mundo macroscópico, teniendo como consecuencia efectos cuánticos como la introducción del principio de superposición, de incertidumbre y la ruptura de la visión determinista de los sistemas físicos que se daba por

---

<sup>6</sup> <https://research.ibm.com/interactive/system-one/>

sentada desde la física clásica (Ladd et al., 2010). Puesto que el comportamiento de las funciones de onda rompe con el determinismo, la interpretación comúnmente aceptada para describir la posición y la trayectoria de una partícula se realiza mediante la probabilidad; es decir, en un instante dado no es posible ubicar con certeza una partícula, sino que cada una de las posibles posiciones en el espacio que la rodea tiene asociada una probabilidad diferente (Schwabl, 2007). Además, debido al principio de incertidumbre de Heisenberg, la interacción con la partícula en el momento de su observación se verá condicionada por la imposibilidad de conocer al mismo tiempo su posición y su momento, es decir, la relación entre la energía y el tiempo (Deffner & Campbell, 2017).

### *2.2.1. El principio de superposición*

La imposibilidad de determinar la posición de una partícula en cualquier momento previo a su observación conlleva aceptar necesariamente la posibilidad de que dicha partícula se encuentre en varios estados (o posiciones) al mismo tiempo, cada uno con una probabilidad asociada (Chernega et al., 2018). Esto es, si un fotón X pudiese adoptar tan solo dos estados equiprobables A o B, sería posible afirmar que el fotón se encuentra de forma simultánea en ambas posiciones hasta el momento de la observación (N D Hari Dass, 2013). Según la interpretación de Copenhague, la resolución de la superposición tiene lugar en el momento en el que el observador lleva a cabo la medición de la onda y entonces determina cuál ha sido su resultado, eliminando el resto de posibles opciones anteriormente superpuestas (Schwabl, 2007). Este principio fue criticado y expandido a un sistema a gran escala por el físico austríaco Erwin Schrödinger con el experimento mental del gato de Schrödinger: se plantea un escenario en el que se introduce a un gato en una cámara de acero cerrada junto a un átomo radioactivo con la misma probabilidad de emitir radiación o de no hacerlo. Según el estado en el que colapse la superposición del átomo radioactivo, sería posible que el gato siguiese con vida o estuviese muerto, lo cual lleva a la conclusión de que hasta que la cámara fuese abierta para realizar la observación de lo que había ocurrido en su interior tanto el sistema cuántico (el átomo radioactivo) como el sistema a gran escala (el gato) se encontraban en una superposición estable/decaído y vivo/muerto respectivamente (Villars, 1986).

En el caso de los ordenadores cuánticos el fenómeno de superposición es el elemento clave que permite teóricamente alcanzar potencias de cómputo mayores para ciertos cálculos que los ordenadores clásicos, al ser el fundamento del qubit. Sin embargo, el control tanto de la generación del estado de superposición de unas partículas concretas en el ordenador como conseguir que el sistema a mayor escala pueda beneficiarse de este efecto resulta una tarea delicada, debido a que la medición de la partícula que se encuentra en el estado de superposición provoca su colapso en uno de los estados posibles (Rahaman & Masudul Islam, 2016). Además, esta fragilidad se ve incrementada por otro efecto de la mecánica cuántica: el entrelazamiento cuántico.

### *2.2.2. El fenómeno de entrelazamiento cuántico*

En 1935 Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) predijeron de forma teórica la existencia de un fenómeno de la mecánica cuántica que nombraron entrelazamiento cuántico a través de la formulación de la denominada paradoja EPR (Horodecki et al., 2009). El funcionamiento indica que, si una partícula A se entrelaza con otra B y después se sitúa a una gran distancia en el plano espacial, sería posible describir tanto la posición o el espín de una de las partículas entrelazadas a través de la medición de la otra partícula de la pareja (Horodecki et al., 2009; Schwabl, 2007). Esto supone dos problemas fundamentales: por un lado, la no localidad de la mecánica cuántica (es decir, que es posible interferir con el estado de una partícula a distancia) y el problema derivado de la medición del estado de una partícula en un momento dado.

Aplicado a la computación cuántica, este fenómeno permite explorar nuevas vías como la transmisión de información a gran distancia mediante entrelazamiento cuántico (Bokulich & Jaeger, 2010). Además, el estado entrelazado supone esencialmente una superposición de estados de diferentes qubits, de tal manera que no pueden ser factorizados en un producto tensorial de estados individuales, como el estado de Bell (Horodecki et al., 2009). Al lograrse el entrelazamiento, los qubits exhiben correlaciones no clásicas que pueden usarse para romper las desigualdades de Bell, lo cual resulta imposible para estados no entrelazados con correlaciones alcanzables bajo operaciones locales y comunicación

clásica. Las *QPU*<sup>7</sup> basan su funcionamiento en el entrelazamiento y es esta característica la que les confiere una gran capacidad de procesamiento: al definirse el estado de un qubit, lo hace también su par bajo unas condiciones específicas. Estas últimas constituyen las puertas lógicas cuánticas que funcionan en cualquier estado de la superposición y, como en la computación tradicional, operan con elementos lógicos como AND OR y NOT (Ladd et al., 2010). Esto es a su vez un inconveniente, puesto que implica que la potencia total de cómputo no está linealmente relacionada con incremento en el número de qubits en el sistema debido a la dificultad de mantener el estado de entrelazamiento deseado entre los pares de qubits.

Este fenómeno permite distintas aplicaciones únicas a la computación cuántica, entre las cuales destacan la codificación superdensa, la teleportación cuántica y la criptografía cuántica. Entre estas tres destaca la criptografía cuántica por su aplicación para resolver algunos problemas existentes en la computación en la nube actual. Esto se debe a que permite a dos partes intercambiar las claves necesarias para descryptar la información previamente encriptada a través de un canal seguro: el estado del qubit entrelazado (Yin et al., 2020).

### 2.2.3. *Los qubits y la polarización de fotones*

Los qubits son el elemento más básico de toda unidad de procesamiento cuántica. Fueron descritos en primer lugar en 1940 por Claude Shannon, un científico de Bell, quien ideó un *bit* que se adhiriese a las reglas de la mecánica cuántica como si su comportamiento fuese análogo al de una onda-partícula (Bhasin & Tripathi, 2021). La representación de cada qubit se lleva a cabo por medio de la denominada esfera de *Bloch*, en la cual el bit 1 indica el norte y su opuesto 0 el sur. Esto permite que, en el momento de la superposición, el vector que representa al qubit pueda encontrarse en un estado de combinación lineal de las anteriores posiciones. Sin embargo, el valor colapsado del qubit es desconocido hasta el momento en el cual se produce la medición de este mediante la proyección de un fotón a través de un filtro que permite obtener un *spin* específico y que puede tomar los valores vertical, horizontal y

---

<sup>7</sup> QPU: Quantum Processing Unit

diagonal (Rahaman & Masudul Islam, 2016). El qubit según la esfera de *Bloch* se ve representado en la Figura 1.

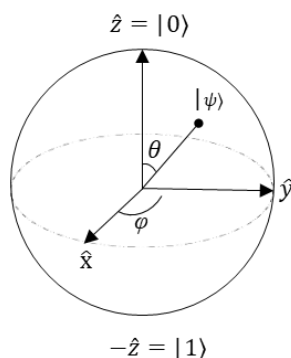


Figura 1. Esfera de Bloch. Elaboración propia a partir de Rahaman & Masudul Islam, 2016.

### 2.3. Principales tecnologías actuales de computación cuántica

Con el fin de poder producir un sistema de qubits estable que permita funcionar a un ordenador cuántico, los investigadores han buscado una serie de materiales que faciliten el acceso y control de la superposición de forma simultánea al entrelazamiento de sus partículas (Ladd et al., 2010). El control se logra, por lo general, a través de la creación de “interferencias” — esto es, la generación de amplitudes que combinen con las del qubit para cancelar aquellas de amplitud negativa que extingan su existencia— a través de la manipulación de fotones u ondas electromagnéticas (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine et al., 2019). Por lo general, muchos sistemas se basan en el control del *spin* de electrones individuales a través de microondas. Sin embargo, existe otra vía que ha ganado relevancia en los últimos años debido a los avances en el diseño de nuevos materiales: la generación de qubits en materiales superconductores (Kjaergaard et al., 2020)

Los materiales superconductores son aquellos que, por definición, no ofrecen ninguna resistencia al paso de los electrones a través de ellos (Devoret et al., 2004). La superconductividad se descubrió gracias al denominado efecto *Meissner*, por el cual al enfriar un material a una determinada temperatura es posible convertirlo en un superconductor de tipo I o II y que, por tanto, anula el campo magnético en su interior; en consecuencia, se elimina toda resistencia (Hirsch, 2012). Esto permite la manifestación de las propiedades cuánticas deseadas para poder producir los qubits del sistema, lo cual en la actualidad se ha

logrado a través del enfriamiento hasta aproximadamente el cero absoluto de las denominadas *juntas Josephson*, que son estructuras en forma de sándwich compuestas por metal-aislante-metal (Likharev, 2022). El principal problema de esta solución para crear *qubits* radica en la frágil naturaleza del sistema en relación con la temperatura a la que está expuesto ya que cualquier incremento, por gradual que sea, conlleva la reducción de los electrones superconductores y la limitación del control que se puede ejercer sobre ellos. En la realidad, esto implica costosos y aparatosos diseños para el desarrollo de los ordenadores cuánticos actuales, además de su monitorización por parte de personal especializado. A nivel empresarial, esto implica una estructura de costes difícilmente asumible por la gran mayoría de las empresas teniendo en cuenta el *output* o productividad resultante de operarlo. Por ello, han surgido nuevas propuestas basadas en el uso de nuevos materiales como, por ejemplo, el grafeno ABC de tres capas, que muestra una configuración más eficiente como superconductor que algunos de los metales utilizados con anterioridad (Gao et al., 2020). Los avances en la utilización del carbono ha permitido crear a su vez otra nueva vía para la manipulación de los electrones más allá de la creación de materiales superconductores bidimensionales como el grafeno, esto es, la creación de *qubits* vía “defectos”.

En física, los defectos son espacios vacíos en la estructura atómica de un material en los cuales debería haber un átomo o en los que se encuentra un átomo que no debería encontrarse en esa posición (Zhang et al., 2020). Dependiendo del material, estos espacios pueden ayudar a “capturar” electrones, lo cual permite el control de su *spin*. Su principal fortaleza radica en que, a diferencia de los *qubits* obtenidos con materiales superconductores, los *qubits* obtenidos mediante defecto no requieren temperaturas cercanas al cero absoluto para ser operativos, lo cual mejora el aislamiento frente a las interferencias externas (mejora de la “coherencia”) y posibilita la reducción de los costes asociados al mantenimiento y uso del ordenador cuántico. Esta solución podría hacer de la producción a escala de ordenadores cuánticos de tamaño reducido una realidad, ya que los materiales necesarios para ello como el nitruro de aluminio o el carburo de silicio se producen en la actualidad en masa para su aplicación en otras tecnologías como las luces LED (Koehl et al., 2011). Este procedimiento para generar *qubits* se encuentra en un estado incipiente, puesto que todavía se encuentra en fase de prueba en laboratorio, pero podría alcanzar los mercados en un horizonte de 5 años.

#### 2.4. Evolución de la industria, actores principales y fuentes de financiación.

El primer ordenador cuántico comercial fue presentado al público en 2011 por D-Wave Systems, quien en la actualidad es uno de los principales fabricantes de ordenadores cuánticos del mundo (Cohen & Tamir, 2014). Los ordenadores comerciales se clasifican fundamentalmente en aquellos que utilizan puertas lógicas cuánticas —y que por tanto funcionan de forma similar a las puertas lógicas de un ordenador clásico— y aquellos basados en *annealer* cuántico —que se programan de manera algo más sencilla y no requieren interacción directa con el *qubit* en el desarrollo de nuevo código— (Hauke et al., 2020). A pesar del progreso experimentado a lo largo de las dos primeras décadas del siglo XXI, el problema a solventar es el de la decoherencia cuántica que ocurre cuando se pierde el estado cuántico del objeto en el que se “producen” los *qubits* debido a las interferencias o “ruido” generadas en su amplitud de onda por las interacciones de los anteriores con su entorno.

Los ordenadores cuánticos son objeto de investigación y producción por parte de tres agentes sociales fundamentalmente: gobiernos, empresas privadas y entidades académicas. Entre los fabricantes de hardware cuántico más importantes, destacan *D-Wave Systems*, *IBM Quantum Computing*, *Google Research*, *Microsoft Quantum Computing*, *Rigetti*, *IonQ*, *Honeywell*, *SpinQ* y otras compañías<sup>8</sup>. La relación entre los productores del hardware y los comercializadores se encuentra fuertemente marcada por dos tendencias principales según el grado de integración deseado por parte de estos sistemas con otros recursos de computación clásica (Ménard et al., 2020). Por un lado, están aquellas compañías que desarrollan hardware propio y cuyo cliente objetivo son empresas que adquieren el equipamiento para utilizarlo en sus operaciones o incluso a usuarios particulares en el caso de los modelos con menor número de *qubits*; y, por otro, están aquellas compañías que venden su hardware o lo producen con el objetivo de que otra empresa lo arrende a través de la nube como servicio en la nube integrado de nombre *Quantum Computing-As-A-Service*. En el caso de estas últimas, problemas como la integración con otros servidores y la arquitectura para uso principalmente remoto suponen otros retos extra que condicionan las decisiones de diseño por parte del fabricante.

---

<sup>8</sup> <https://www.cioinsight.com/innovation/quantum-computing-companies/>



Por tanto, la industria se sustenta actualmente en un mix en el cual los fondos públicos juegan un papel importante. Concretamente, el desarrollo de esta tecnología se vertebra a través de proyectos incluidos en los presupuestos del Estado de países como Estados Unidos, Reino Unido, Japón, Alemania, China o Francia juegan un importante papel. Según cifras de McKinsey (Biondi et al., 2021), China fue en 2021 el principal inversor público en tecnología de computación cuántica (\$15 mil millones) seguido de la Unión Europea (\$7,2 mil millones), Estados Unidos (\$1,3 mil millones) y Reino Unido (\$1 mil millones). Contrariamente al grado de inversión de los Estados anteriormente nombrados, las compañías estadounidenses acaparan la gran mayoría de esta financiación, seguidas por las canadienses y las británicas.

En el lado de la inversión privada, el crecimiento del capital destinado a los distintos fabricantes y start-ups relacionados con la computación cuántica por parte de los fondos de capital riesgo ha aumentado desde los \$93,5 millones en 2015 hasta más de \$1.019,3 millones en 2021 según la plataforma PitchBook (2022). El incremento en el capital invertido y las altas valoraciones llevan a que algunas de estas start-ups empiecen a ser consideradas los primeros “unicornios” — es decir, que están valorados en más de mil millones de dólares americanos — de *quantum computing*. Según un informe de McKinsey (Biondi et al., 2021) el 65% de la inversión en 2021 se destinó a compañías especializadas en la producción de *hardware* cuántico, a pesar de que el único segmento de la industria que ha mostrado ser rentable por el momento es la fabricación de los componentes necesarios para ensamblar los ordenadores.

Atendiendo al incremento en la financiación destinada al desarrollo de la industria, el consecuente aumento en el número de startups especializadas en el diseño y producción de *Quantum Processor Units (QPU)*, la demanda creciente por este tipo de servicios podría afirmarse que la industria de la computación cuántica se encuentra aún en una fase inicial debido a las complejidades técnicas del producto pero podría, a corto plazo, comenzar a adentrarse en la denominada fase de crecimiento según el *framework* del ciclo de vida de las industrias (Audretsch & Feldman, 1996). Esto implica que la industria todavía puede afrontar un gran número de cambios en base a los últimos descubrimientos y que, desde el punto de vista empresarial, todavía no se ha cristalizado la visión acerca de cuál es el mejor modelo

de negocio para este producto teniendo en cuenta sus frágiles condiciones para el funcionamiento.

### 2.5. Estudio del grado de desarrollo actual de la tecnología de computación cuántica.

El profesor Thomas S. Kuhn apunta en 1970 en su libro “*The Structure of Scientific Revolutions*” que, por lo general, el progreso científico se ha producido a través de la sucesión de etapas claramente marcadas por un paradigma en concreto en el cual el cambio se da a través de momentos de crisis tras periodos de refinamiento de las técnicas existentes. En el caso de la computación, podemos diferenciar claramente entre los paradigmas correspondientes a la computación tradicional y a la cuántica. Sin embargo, es posible ir más allá y utilizar este marco conceptual para evaluar el progreso de la computación cuántica a través del diseño de nuevas soluciones para la generación y manipulación de los qubits. Así pues, el *framework* (Kuhn, 1970) comienza por el *preparadigm*, seguido por la etapa de *normal science*, la *anomaly*, *paradigm shift* y, por último, el *post paradigm* donde se produce el cambio al siguiente estadio del conocimiento. En el caso de la computación cuántica, el paradigma actual se encuentra altamente influenciado por el desarrollo de algoritmos que permitan el empleo del hardware cuántico para la resolución de distintos problemas y, también, de la mejora en la arquitectura de las unidades de procesamiento para aumentar su potencia total real. El estudio de la tecnología se puede estructurar haciendo uso para ello del *framework* de la curva “S”, por la cual existen una serie de etapas claramente diferenciadas a lo largo del plano temporal en las que se produce un cambio de paradigma según se transiciona a la siguiente. Estas fases han sido propuestas (Langione et al., 2019) en la aplicación de la curva “S” al desarrollo de la computación cuántica dando lugar a lo que son, fundamentalmente, tres etapas de desarrollo para los ordenadores cuánticos de carácter comercial (Figura 2).

En primer lugar, encontramos la fase en la que actualmente se encuentra el desarrollo de esta tecnología que recibe el apelativo de “*Noisy Intermediate Scale Quantum (NISQ)*”. Entre las principales limitaciones que impiden el salto a la siguiente etapa, encontramos el problema originado por la denominada decoherencia o, lo que es lo mismo, las interferencias sufridas a la hora de manipular la amplitud de onda de la unidad de procesamiento por parte de otras ondas del entorno. Esto da lugar a los denominados qubits “imperfectos”, que llevan al

fracaso en la resolución de tareas de cómputo y dificultan la ampliación del número de qubits de los sistemas actuales. Como solución, se están desarrollando herramientas específicas de *debugging* que puedan corregir por *software* los errores provocados por el alto nivel de ruido presente (Preskill, 2018). En esta fase, lo más importante para el impulso de la tecnología es el desarrollo de un producto mínimo viable (MVP) basado en las necesidades de los segmentos de mercado *público* de modo que se pueda atraer más financiación y se incremente el tamaño total de la industria.




La segunda etapa, de nombre *Broad Quantum Advantage (BQA)*, se alcanzaría en el momento en el que se reduzcan los problemas técnicos que impiden reducir el nivel de interferencias en los sistemas y se logren sistemas con decoherencia mínima (Langione et al., 2019). En esta fase, ya sería posible centrar todos los esfuerzos en el incremento de la capacidad de cómputo bruta de las unidades de procesamiento de forma que fuese posible su uso para la resolución de problemas específicos de distintas industrias como la optimización, simulación, diseño molecular, etc. La innovación y difusión de la tecnología recibiría un notorio impulso al alinearse con las necesidades de las grandes empresas y podría alcanzarse la denominada “época dorada” del software tal y como ocurrió con la computación clásica. Sin embargo, este escenario podría encontrarse todavía a una distancia temporal de entre 5 a 8 años desde la actualidad. Para alcanzar este escenario, es necesario un modelo de negocio que cuente con una serie de ventajas competitivas que imprima el impulso necesario para el cambio de paradigma tecnológico.

Por último, encontramos la tercera etapa denominada *Full-Scale Fault Tolerance Era (FSFT)* en la cual los problemas de estabilidad y escalabilidad se habrían logrado resolver dando lugar a nuevos dispositivos basados en procesadores cuánticos que podrían incluso alcanzar la capacidad de ser portátiles<sup>9</sup>. Cabe destacar que esta fase podría confluir con la etapa de madurez del mercado de ordenadores cuánticos, lo cual supondría un gran aliciente para que las compañías optasen por seguir innovando a través de la aplicación de los fundamentos de la tecnología para el desarrollo de otros productos relacionados. En todo caso, esta fase podría tener lugar no antes del 2030, por lo cual muchas de estas afirmaciones podrían verse superadas por la aceleración en el desarrollo de la tecnología según la industria

---

<sup>9</sup> <https://www.bcg.com/publications/2019/quantum-computers-create-value-when>

vaya recibiendo una mayor cantidad de inversión y mejore su capacidad de atracción de talento (Langione et al., 2019).

	<b>Etapa NISQ</b> 1-3 años	<b>Etapa BQA</b> +5 años	<b>Etapa FSFT</b> +15 años
 <b>Logro técnico</b>	Mitigación de errores	Corrección de errores	Arquitectura Modular
 <b>Ejemplo de impacto empresarial</b>	Simulaciones que permitan acelerar el cálculo por fuerza bruta en laboratorio.	Optimización de riesgos en tiempo real para el sector financiero (e.g. fondos cuantitativos)	Uso para diseño molecular aplicable a fármacos y a nuevos materiales.
 <b>Valor esperado de la industria</b>	1,8-4,5 mil millones de euros.	22,8-45,5 mil millones de euros.	410-775 mil millones de euros.

*Figura 2.* Etapas de madurez de la industria. Elaboración propia a partir de Langione et al., 2019.

## 2.6. Principales usos de la computación cuántica y estudio de su demanda potencial.

A pesar de la etapa temprana en la que se encuentra la industria, los investigadores de computación cuántica han propuesto algunos algoritmos que podrían ser utilizados por estas máquinas para resolver problemas de naturaleza exponencial como son la optimización de carteras, la simulación del comportamiento de las partículas a través de la mecánica cuántica, la simulación fiel de moléculas que permita crear nuevos materiales y fármacos, la optimización de las rutas logísticas usando a una gran base de *datasets*, *machine learning*, rediseño de los sistemas actuales de criptografía, etc (Bayerstadler et al., 2021). Sin embargo, la llegada de las denominadas *quantum databases* podría verse demorada por la necesidad de mejorar el ancho de banda de los medios en los cuales se almacene la información,

suponiendo así un claro cuello de botella en el caso de uso de un ordenador cuántico para realizar consultas (Roy et al., 2013).

La primera gran aplicación para la computación cuántica es la simulación cuántica. Esta tiene en concreto aplicación para un gran número de industrias, entre las cuales destaca la nuclear (Blatt & Roos, 2012). Su importancia deriva de la sustitución de los denominados *superordenadores* y de su elevado coste tanto de adquisición como de uso por otra tecnología que permita reducir costes a través de un tiempo de cómputo significativamente menor. Esta aplicación fue la razón fundamental que inspiró al profesor Richard Feynman a idear el concepto del ordenador cuántico, ya que en su investigación del comportamiento de las partículas fue consciente del problema derivado del estudio de un fenómeno de alta complejidad mediante el uso de los ordenadores clásicos (Hidary, 2021). Por ejemplo, para estudiar una partícula que se pudiera encontrar en dos estados superpuestos y tuviese 41 posibles posiciones sería necesario calcular  $2.19 \times 10^{12}$  posibilidades, lo cual en la actualidad seguiría siendo imposible de calcular en un tiempo razonable de forma exhaustiva. Otras áreas del conocimiento que podrían beneficiarse del acceso a esta aplicación del hardware cuántico son las diversas áreas de química, biología, electromagnetismo, física de alta energía o la cosmología. En resumen, cualquier tarea de cálculo que suponga la necesidad de aplicar fuerza bruta para su realización sería objeto de aplicación de la computación cuántica.

La optimización asistida por mecánica cuántica resulta otra aplicación fundamental para el mundo empresarial en la era del *Business Intelligence*, puesto que la optimización de las distintas actividades que tienen lugar en la empresa permite la obtención de ventajas competitivas tales como la reducción de costes o la mejora en la calidad del servicio, entre otras (Li et al., 2020). Dentro del campo de la optimización se encuentra también el funcionamiento de los motores de búsqueda utilizados en las bases de datos, que según el diseño de estas puede resultar poco práctico en caso de que se caractericen por un alto grado de normalización (El Gaily & Imre, 2021; Roy et al., 2013). Sin embargo, en tanto y en cuanto los medios físicos empleados como soporte para almacenar la información no experimenten aumentos sustanciales, los incrementos en la capacidad de procesamiento surgidos por el uso de un ordenador cuántico se verían muy limitados por el volumen de datos recibido. En la computación clásica, los problemas de optimización se resuelven

estableciendo unos límites que acoten las opciones posibles —especialmente cuando se trata de problemas de carácter exponencial— de modo que se pueda llegar a una solución próxima al óptimo a pesar de las limitaciones del sistema en un periodo de tiempo razonable (Feige et al., 2007). Con el objeto de poder mejorar aún más la capacidad de optimización de las empresas, se han creado algoritmos como el “*Algoritmo de Optimización Aproximada Cuántica*” o el “*Quantum Eigensolver*” (Wang et al., 2019). Si bien los problemas de decoherencia de la etapa actual limitan la complejidad de los procesos a optimizar y conllevan el trabajo híbrido junto a un ordenador clásico, el salto a la siguiente etapa permitirá finalmente su uso aislado. Un ejemplo de aplicación que podría beneficiarse enormemente del acceso a esta tecnología es la optimización de carteras en las cuales se valore la venta en corto de los títulos (Bayerstadler et al., 2021). En este proceso de optimización, el total de posibilidades a evaluar por el optimizador en caso de no existir restricción alguna será igual a 3 —las tres posibles opciones con respecto a la gestión de un título: ir largo, corto o no invertir— elevado al número de títulos que se desea tener en la cartera. Siguiendo este caso, el beneficio resultante de la diversificación llevaría al inversor o gestor a incluir el mayor número de títulos posible para diversificar el riesgo de forma óptima, pero no sería posible de forma exhaustiva a partir de un número de títulos distintos tan “reducido” como podría ser 25. Teniendo en cuenta que algunos de los índices más importantes como el S&P500 representan 500 títulos, una cartera de 500 valores en los cuales se pudiese comprar o vender en corto daría lugar a  $3,63601 \cdot 10^{238}$  posibilidades (Tarrazo, 2016). En los últimos veinte años la solución para este problema ha sido la aproximación mediante distintos tratamientos matemáticos que han permitido encontrar soluciones aproximadas para carteras con un número menor de valores. Sin embargo, la industria financiera podría beneficiarse enormemente de la viabilidad de la optimización en bruto siempre y cuando los costes de hacerlo, en cuanto a recursos y tiempo se refiere, pudiesen reducirse al máximo posible.

Una tercera aplicación para los ordenadores cuánticos es el muestreo cuántico, que consiste en la utilización de hardware cuántico para generar muestras a partir de una distribución de probabilidad ya conocida (Lund et al., 2017). El algoritmo de muestreo cuántico de Grover permite reducir el número de pasos requerido por la computación clásica para calcular un número elevado de posibilidades a razón de la raíz cuadrada de dicha

magnitud. Por ejemplo, esto se ha podido aplicar con éxito a las adaptaciones de la simulación de Monte Carlo o el muestreo de Bosones (Montanaro, 2015). Cuanto mayor sea el número de algoritmos destinados a la resolución de este tipo de problemas que hayan sido exitosamente adaptados para su funcionamiento en un ordenador cuántico, mayor será el número de verticales de negocio que podrán explotar las aplicaciones de la computación cuántica y la estadística a través de *machine learning*.

La cuarta aplicación ideada para los ordenadores cuánticos es el diseño de la denominada inteligencia artificial cuántica; es decir, inteligencia artificial diseñada para poder tomar decisiones de forma mucho más rápida considerando una base de datos significativamente mayor, haciendo uso para ello de la capacidad de procesamiento superior del procesador cuántico (Wichert, 2020). Esto permitiría también acortar el tiempo de entrenamiento de los nuevos sistemas de inteligencia artificial comparado con los superordenadores más potentes existentes en la actualidad. Esto podría tener aplicaciones revolucionarias en industrias como la automoción, donde los sistemas de autopilotaje diseñados para los nuevos vehículos necesitan de un extenso periodo de aprendizaje para evitar los errores a la hora de interpretar los datos provenientes de los sensores en tiempo real a la hora de tomar decisiones como acelerar, frenar o cambiar de carril entre otras (Gabor et al., 2020).

La última categoría de aplicaciones de la computación cuántica actualmente es la factorización de números primos (Jiang et al., 2018). En internet, las comunicaciones punto a punto están protegidas criptográficamente: el cifrado de los mensajes que se envían a través de la red pública y que tan sólo pueden ser descifrados por el receptor suponen la base de la ciberseguridad. Este cifrado se lleva a cabo, por lo general, a través de algoritmos criptográficos como el RSA, que potencialmente pueden ser “rotos” a través de la factorización en números primos permite obtener la clave privada a partir de la pública (Bernstein et al., 2017). Se conoce por *non deterministic polynomial time* o NP al conjunto de problemas cuya resolución es posible en tiempo polinómico mediante uso de una máquina de Turing no determinista; esto es, que el tiempo de ejecución del algoritmo es menor al resultado obtenido a partir del uso de una forma polinómica con N variables de entrada. Debido al elevado número de posibilidades que brinda un problema de naturaleza *non*

*deterministic polynomial time* o NP, no existe en la actualidad ningún algoritmo funcional en un sistema clásico que permita descifrar la solución de forma rápida y eficaz (Jiang et al., 2018). Sin embargo, el algoritmo diseñado por Peter Shor para ordenadores cuánticos sí permitiría descifrar estos mensajes a través de prueba y error en un periodo de tiempo reducido, lo cual podría suponer un problema de ciberseguridad significativo al vulnerar el principal mecanismo del que se valen las telecomunicaciones en la red actualmente para la transmisión de datos de forma privada y segura (LaPierre, 2021).

Una vez vistas las aplicaciones, es necesario incidir en las razones fundamentales por las cuales la demanda de este producto por parte del sector empresarial se prevé vaya a crecer a un ritmo vertiginoso a lo largo de la próxima década. En primer lugar, encontramos la posibilidad de que la computación cuántica impacte de forma muy positiva en el desempeño de actividades centrales para empresas de diversas industrias que verían una mejora en su cuenta de resultados por partida doble: por un lado, la mejora en el tiempo de procesamiento podría llevar a la mejora en la calidad de los servicios prestados o incluso a la creación de nuevas líneas de producto aumentando así los ingresos y, por otro lado, sería posible reducir los costes que necesariamente serían incurridos para facilitar lo anterior (McKinsey & Company, 2021; Ménard et al., 2020). La reducción en el denominado “*Time-to-market*” es un objetivo prioritario para las empresas en la actualidad, ya que la intensidad de la competencia en múltiples mercados maduros provoca la búsqueda continua de una ventaja competitiva que permita a la empresa en cuestión mejorar su cuota de mercado y, en algún caso, la supervivencia. Esto es esencial en industrias como la automovilística, la farmacéutica, la química y el sector financiero. Según un informe de McKinsey de 2020, para 2035 las industrias que podrían beneficiarse en mayor medida de la introducción de esta tecnología en cuanto a usos posibles serían en orden de grado de beneficio: el sector financiero (28%), la industria energética y de materiales (16%), las industrias avanzadas (11%), la industria farmacéutica (9%), la industria de telecomunicaciones (9%), el sector público (7%), el sector hospitalario (6%), el sector logístico (6%), las aseguradoras (4%) y la industria de bienes de consumo (3%).



## 2.7. Introducción a los servicios en la nube y a la computación cuántica como servicio (QCaaS)

Los servicios en la nube son un modelo de acceso a recursos computacionales en el cual una parte, el proveedor de servicios en la nube, dispone de una serie de recursos tecnológicos accesibles por parte de los usuarios a través de internet a cambio de una contraprestación que varía en función del servicio concreto (Surbiryala & Rong, Aug 2019). La computación en la nube consiste en la integración de múltiples servicios organizados en, fundamentalmente, cuatro niveles distintos según sus características y el grado de control por parte del usuario (Vargas-Torres-Céliz et al., 2022). En la base, encontramos *Infrastructure As-a-service* (IaaS) que consiste en un servicio de provisionamiento de recursos esenciales de procesamiento, almacenamiento y redes<sup>10</sup>. El siguiente tipo de servicios en base al grado de control es el de *Platform as-a-service* (PaaS), que engloba la oferta de IaaS y añade sistemas de *Business Intelligence (BI)*, *middleware* y herramientas de desarrollo, entre otros. Avanzando un nivel más se encuentra el *Software as-a-service (SaaS)*<sup>11</sup>, que consiste en el arrendamiento de una aplicación a la cual los usuarios se pueden conectar a través de internet y para la que el proveedor gestiona todos los recursos físicos necesarios para brindar el servicio. En última instancia encontramos los servicios *serverless*, que supone una evolución de los servicios *SaaS* con un aún menor grado de tareas administrativas de los recursos por parte del usuario<sup>12</sup>. Consecuentemente, la evolución de los servicios en la nube ha llevado a la creación de un ecosistema de servicios con un alto grado de interconexión que permite a los usuarios almacenar información, procesarla, protegerla, generar gráficos, realizar *data analytics*, *machine learning* o instanciar máquinas virtuales entre otros (Hoefler & Karagiannis, 2010). En la actualidad, el sector se encuentra dominado globalmente por *Amazon Web Services* conocido por sus siglas como *AWS*, seguido de *Microsoft Azure* y de *Google Cloud*.

---

<sup>10</sup> <https://azure.microsoft.com/es-es/overview/what-is-iaas/>

<sup>11</sup> <https://azure.microsoft.com/es-es/overview/what-is-saas/>

<sup>12</sup> <https://azure.microsoft.com/es-es/overview/serverless-computing/>

Entre las principales ventajas ofrecidas por el *cloud computing* encontramos en primera instancia la oferta de flexibilidad, escalabilidad y alta redundancia para los usuarios (Avram, 2014). Para las empresas, la planificación de la compra e instalación de un sistema de servidores propios u *on-premise* supone un ejercicio de proyección a futuro de las necesidades que tendrán en base al tráfico que esperan recibir y la cantidad de datos que deban almacenar a un plazo medio de entre 2 y 5 años vista (Avram, 2014; Surbiryala & Rong, Aug 2019). Además de los gastos derivados de la compra e instalación del equipamiento y de su posterior mantenimiento —e.g., electricidad, personal cualificado, daños por ataques la empresa debe hacer frente también a los costes derivados de la falta o exceso de la capacidad instalada en base a las previsiones del pasado. Por tanto, el modelo de los servicios en la nube resulta altamente conveniente al ofrecer recursos “alquilados” *on demand* que no requieren un nivel de planificación tan elevado y que a baja escala permiten una importante reducción de costes (Avram, 2014; Vargas-Torres-Céliz et al., 2022). Asimismo, las empresas que cuentan con servidores propios corren el riesgo de la pérdida de sus datos o, peor aún, de la caída total de su sistema en caso de que su centro de datos sufra algún tipo de desastre natural o de problema relacionado al suministro de energía, mientras que el diseño altamente redundante de los centros de datos que conforman las zonas de disponibilidad de los proveedores de servicios en la nube permite la réplica y funcionamiento simultáneo de los servicios contratados por la empresa en cuestión (Robinson et al., 2014).

La idea de la computación cuántica como servicio —de ahora en adelante QCaaS— consiste en el acceso *on demand* a ordenadores cuánticos propiedad de los proveedores de servicios en la nube que permiten el envío de órdenes que ejecutar para obtener el output deseado (Ravi et al., Nov 2021). En la actualidad, estos servicios son utilizados fundamentalmente por investigadores que logran tener acceso de forma sencilla y económica a sistemas que por naturaleza son muy intensivos en capital, facilitando el desarrollo de algoritmos cuánticos. Debido a la variedad de problemas que pueden ser resueltos de forma más eficiente mediante uso de estos sistemas, destaca también la facilidad de acceso a los recursos para los distintos departamentos de una empresa que necesiten hacer uso de ellos, frente a la utilización de los recursos propios (Vargas-Torres-Céliz et al., 2022).

### 2.7.1. Integración de *QCaaS* con el ecosistema de servicios en la nube.

Como se estableció con anterioridad, las limitaciones actuales de los ordenadores cuánticos provocadas por las interferencias o ruido que desembocan en errores en los outputs producidos —fenómeno de decoherencia— supone el principal desafío de la era *NISQ* de la computación cuántica (Langione et al., 2019; Preskill, 2018). Este es el motivo principal por el cual su uso debe ser acompañado necesariamente por recursos de computación clásica en un sistema híbrido para poder alcanzar resultados aceptables. Debido a las altas barreras de entrada generadas por la intensidad de capital de los ordenadores cuánticos, las empresas proveedoras de servicios en la nube han sido actores fundamentales para el desarrollo de la tecnología y del software necesario para poder interactuar con el hardware cuántico (Hidary, 2021). Los *Software Development Kits* o SDK desarrollados por las compañías *cloud* son, por tanto, ejemplo de esta labor de integración del nuevo equipamiento con los sistemas disponibles.

La generación de sinergias mediante la interconexión de los ordenadores cuánticos con el resto de los servidores resulta aparente en la optimización de la logística de un cliente. En este ejemplo, los datos necesarios se pueden encontrar en un *data warehouse* ubicado en la nube, que después se pueden transmitir evitando problemas originados por arquitecturas incompatibles al ordenador cuántico que deba procesar la información. Posteriormente, se envía el output al panel de información accesible a través de una aplicación web que se encuentre en otro servidor del mismo proveedor (Ravi et al., Nov 2021). Esto cobra aún mayor relevancia en el caso de necesitar una conexión directa entre la instancia o unidad de procesamiento clásica y la unidad de procesamiento cuántica, ya que la comunicación entre ellas podría variar significativamente en función de la tecnología utilizada para el control del *spin* de los electrones que permite la simulación de los *qubits* y el sistema operativo del ordenador clásico (Ladd et al., 2010; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine et al., 2019; Ravi et al., Nov 2021). Al requerir una mayor cantidad de máquinas a su disposición, el proveedor tiene la capacidad de “fomentar” u optar por una tecnología más prometedora realizando pedidos exclusivos a un fabricante o acuerdos de cooperación para el desarrollo de la tecnología, lo cual permite homogeneizar el tipo de unidades de procesamiento cuántico utilizadas por las empresas.

Según indican Rahaman e Islam (2015) los beneficios de la integración de la computación cuántica como servicio en la nube podrían ir más allá que la simplicidad en la interconexión de distintos recursos tecnológicos o el acceso económico a estos. La industria de los servicios en la nube tiene entre sus principales dificultades la posibilidad de que la comunicación entre el cliente y la nube sea comprometida por un ataque, llevando consecuentemente al robo de datos por parte de terceros. Igualmente, la aparentemente inexistente privacidad de los datos almacenados en los servidores supone otro *pain point* a resolver para poder aumentar el valor añadido aportado con estos servicios a los clientes (Abdalla & Varol, 2019). Gracias a la computación cuántica como servicio, sería posible resolver este problema a través de dos vías: la computación “a ciegas” y la criptografía cuántica. La computación “a ciegas” consiste en la generación de un qubit por parte del usuario que es el único conocedor del estado original de este, el cual se entrelaza posteriormente con el otro generado por el ordenador cuántico y la información queda protegida al ser dichos estados iniciales la llave necesaria para poder interpretar cualquier información comunicada entre el usuario y el servidor cuántico. La criptografía cuántica (Zbinden et al., 1998) fue propuesta por Wiesner (1983) por Charles H. Bennett de IBM (1984) y Gilles Brassard de la universidad de Montreal (1985). El concepto detrás de esta es que en el momento en el cual se produce una medición la partícula entrelazada debería colapsar en una posición determinada. Esto es, si se produce una transmisión de la clave de encriptación entre dos puntos A y B en el momento el que una tercera parte C intentase obtenerla, esta acción provocaría que el set de *bits* que representase a la clave colapsara dando lugar a un set de *bits* completamente distinto e inservible.

### 3. Objetivos del estudio.

Desde la llegada de la pandemia provocada por el SARS-Cov-2, han aumentado las necesidades de diseño de nuevas moléculas y tratamientos farmacéuticos. A su vez, la puesta en marcha de nuevas rutas logísticas adaptadas a la situación sanitaria ha contribuido también al desarrollo de nuevas tecnologías de procesamiento de información. De esta manera, se ha hecho más notoria la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías que permitan superar el cuello de botella provocado por las limitaciones físicas en la reducción del tamaño de los transistores de las unidades de procesamiento (CPU) actuales. Sin embargo, las peculiaridades de la computación cuántica suponen un reto a nivel empresarial para poder hacer de este recurso una fuente de generación de valor en el seno de las empresas. Ante el planteamiento de esta cuestión, el desarrollo de la historia de la computación clásica parece apuntar a la concentración de recursos por parte de empresas proveedoras de servicios en la nube como forma preferente de acceso a *hardware* potente de última generación por parte de los usuarios.

El objetivo general de este trabajo es demostrar la superioridad de la computación cuántica como servicio como vía de difusión preferente de esta tecnología para su permeación en el tejido empresarial. Este objetivo busca contribuir a la resolución del reto que supone la búsqueda de un modelo de negocio competitivo que permita la atracción de los recursos de capital y humanos necesarios para el desarrollo de la industria cuántica maximizando a su vez su capacidad de creación de valor. La idoneidad de *QCaaS* como el mejor modelo de negocio en base a las características propias de esta tecnología se estimará en comparación con los modelos tradicionales que han permitido el desarrollo de la industria de la computación clásica. Por tanto, se evaluarán las diferencias en los retos que introduce cada tecnología y la capacidad de creación de valor frente al cliente final como criterios aceptados para la formulación de la conclusión.

En cuanto a los objetivos específicos o de apoyo del principal se refiere, se buscará a) encontrar y definir los símiles o diferencias existentes en el desarrollo de cada tipo de computación, b) analizar las sinergias generadas por el uso de la computación cuántica como servicio en la nube, c) explorar las limitaciones de este sistema frente al modelo *on-premise* y d) formular una aproximación a la estrategia de *pricing* que maximice la generación de valor para los stakeholders. Cada uno de estos objetivos permite entender a nivel fundamental las diferencias necesarias en el modelo de negocio a aplicar al tener en cuenta las particularidades de la computación clásica y de su contrapartida, haciendo la tarea de proponer el modelo de negocio más eficiente para el desarrollo de la industria de computación cuántica algo más objetivo en base al criterio de generación de valor para todos los *stakeholders*.

#### **4. Metodología**

A fin de poder encontrar respuestas a los objetivos fijados en el apartado anterior, se llevó a cabo este estudio con un enfoque cualitativo a partir de la revisión de obras académicas de distintas disciplinas, entre las cuales destacan las ciencias empresariales y económicas, las finanzas, la ingeniería electrónica, la física cuántica y las tecnologías de información. A su vez, se recurrió a artículos con contenido cuantitativo con el fin de atender a objetivos específicos que así lo requieran tal y como ocurre en el caso d) sobre la formulación de una estrategia de *pricing* adecuada para maximizar la generación de valor para todas las partes implicadas. De esta manera, se busca obtener una comprensión general de las circunstancias específicas a la industria de la computación cuántica que permita concluir una aproximación teórica a la forma de penetración de mercado más adecuada para esta en base a lo formulado en el objetivo general.

Con estos objetivos en mente, el trabajo contiene una primera parte de carácter notoriamente técnico en el cual se plantea una revisión conceptual de los principales elementos relacionados al campo de la mecánica cuántica que permiten el funcionamiento de la tecnología y que tienen efectos traducibles en términos empresariales, además de la necesaria revisión de los acontecimientos históricos que afectaron al desarrollo de su modelo de negocio. De este modo, se logra entender cómo las limitaciones técnicas tienen su

traducción directa en limitaciones a nivel empresarial para el crecimiento de la industria y, poder así, proponer soluciones a los principales *pain points* presentados por la comercialización de esta tecnología. Posteriormente, el análisis toma un punto de vista completamente empresarial según el cual se pueden evaluar los principales impactos generados por la introducción de estos productos en el tejido empresarial ya existente en función de su forma de penetración del mercado.

## 5. Resultados

### 5.1. *Símiles y diferencias entre la computación clásica y la computación cuántica*

En base a la revisión de la literatura acerca del desarrollo de cada tipo de computación, resulta evidente que los mecanismos físicos que sustentan cada tecnología suponen la mayor fuente de diferencias a nivel empresarial tanto en su desarrollo como en su implementación. Si bien es cierto que la computación tradicional requirió de una fuerte inversión privada y pública —demás de varias décadas— para poder ser comercialmente viable, en el caso de la computación cuántica, su complejidad va a demorar aún más la replicación de los avances análogos en su difusión. Esto se debe a la complejidad del problema físico a resolver: mientras que en la computación clásica el principal problema a resolver fue el diseño y miniaturización de elementos que permitieran controlar la circulación de electrones por un circuito a voluntad, en la cuántica el problema principal es el control de partículas para simular los qubits logrando su entrelazamiento con otras partículas manipuladas por el sistema. En base a la revisión de literatura académica sobre los retos técnicos a los cuales se enfrenta la computación cuántica parece claro que, salvo descubrimiento de un nuevo material o tratamiento que facilite la superconductividad del chip cuántico, el progreso en este campo previsiblemente será más lento que el experimentado por la computación tradicional.

A pesar de estas diferencias, es posible encontrar puntos en común que permitirían aplicar algunas lecciones del pasado al desarrollo de la incipiente industria de computación cuántica. En primer lugar, cabe destacar el *trickle-down model* utilizado por empresas como IBM para incrementar el interés y la generación de flujos de caja con sus primeros productos al considerar desde un primer momento a las grandes entidades con amplios fondos como el *target* fundamental de sus productos. La capacidad de generar valor a pesar del bajo nivel de

desarrollo de la tecnología permite a las principales compañías de la industria atraer más capital de carácter no especulativo, logrando así aumentar su capacidad de perdurar y llevar a cabo inversiones en I+D. En el caso de la computación cuántica esto es imitable ofreciendo el acceso a estos ordenadores a aquellas compañías que tengan problemas ya abordables mediante uso de la tecnología en su estado actual; además de generar el denominado “círculo virtuoso” que permite evitar el “valle de la muerte” de las tecnologías emergentes. Una mayor difusión de la computación cuántica permitiría a su vez una mayor velocidad de desarrollo de software y aplicaciones específicas. Además, cabe esperar que las mejoras en la simulación de qubits físicos puedan seguir un patrón parecido al de la *Ley de Moore*, siendo así posible evaluar el progreso de esta tecnología en base al incremento de los anteriores siempre y cuando la tasa de error en el control de las puertas lógicas sea lo suficientemente baja. Un último punto de encuentro entre ambas corresponde a la evolución de los modelos de difusión de la computación tradicional de modo que algunas etapas no óptimas puedan ser omitidas. Así, cabe sugerir la integración de los recursos de computación cuántica como otro modelo “*as-a-service*” como punto de partida de la industria con el fin de aprovechar las ventajas del modelo para todos sus *stakeholders* para poder sobrevenir las dificultades económicas iniciales que en la actualidad experimentan los principales fabricantes del mercado. Bajo esta propuesta, los ordenadores cuánticos actuales pueden instalarse en los centros de datos que conforman las *availability zones (AZ)*<sup>13</sup> de los proveedores de servicios en la nube, logrando así solventar el problema relacionado con el gran tamaño de los dispositivos cuánticos actuales y mejorar su acceso a través de internet desde instalaciones acondicionadas con este objetivo en mente.

En cuanto a las principales diferencias, destaca el elevado coste asociado a la operativa de un ordenador cuántico debido a las excepcionales condiciones físicas a las que debe ser sometido el chip para alcanzar el *efecto Meissner*. El coste por qubit de un ordenador cuántico supone, por ende, el principal reto de su viabilidad económica<sup>14</sup>. En el caso de la computación tradicional el descubrimiento de los materiales semiconductores permitió el diseño de los transistores que utilizan las máquinas actuales y la rápida expansión de la industria, pero incluso con un descubrimiento equivalente un ordenador cuántico con

---

<sup>13</sup> [https://aws.amazon.com/es/about-aws/global-infrastructure/regions\\_az/](https://aws.amazon.com/es/about-aws/global-infrastructure/regions_az/)

<sup>14</sup> <https://www.theguardian.com/technology/2019/aug/02/quantum-supremacy-computers>



millones de qubits podría ver su utilidad diezmada por la incapacidad de almacenamiento del *output* producido o también por la dificultad asociada a la negación de todas las fuentes de “ruido” que pudieran introducir distorsiones en la amplitud de onda. Asimismo, cabe destacar que la utilidad de la computación cuántica se verá previsiblemente limitada por las tecnologías de transferencia y almacenamiento de datos, las cuales podrían experimentar una curva de crecimiento menor.

### *5.2. Sinergias generadas mediante la inclusión de Quantum Computing as-a-service (QCaaS) en la oferta de servicios en la nube.*

Más allá de las ventajas relacionadas con el modelo de negocio de los servicios en la nube como forma de acceso preferente a recursos tecnológicos según el caso, conviene evaluar cómo las particularidades técnicas con implicaciones económicas de los chips cuánticos podrían ver su impacto negativo reducido. Para ello, se proponen las sinergias surgidas a raíz del uso híbrido de esta tecnología junto a recursos punteros de computación tradicional como la posibilidad de reducir el impacto de los problemas en la cadena de suministro de semiconductores, la rapidez en la implantación de los recursos en la actividad económica de la empresa, su asignación más eficiente para afrontar el coste derivado de la rápida evolución y la sustitución de los sistemas cuánticos a los que las compañías podrían tener acceso.

El estado actual de las aplicaciones de la computación cuántica y las limitaciones existentes en el uso del hardware cuántico hacen de su empleo híbrido junto a recursos de computación tradicional algo necesario para poder ser operativos. A pesar de las ventajas que puede ofrecer a nivel de procesamiento, estos ordenadores no tienen componentes específicos que puedan aprovechar los mismos fenómenos físicos para emular a su contraparte de computación tradicional; esto en sí supone un reto para su uso independiente o sin apoyo en los recursos tecnológicos ya disponibles. Por ende, encontramos que elementos como el almacenamiento, las bases de datos o la infraestructura para transmitir los datos a otros terminales necesariamente corresponden a las soluciones ya disponibles en los ecosistemas *cloud* de los principales proveedores. De esta manera, la inclusión de *QCaaS* como otra rama importante de los *cloud services* podría suponer una doble mejora a nivel de diseño y de consumo: por un lado, el diseño de los sistemas a nivel de dimensiones, conexiones, materiales empleados y forma de emular los qubits podría estar enfocado a su uso conectado

a los servidores ya existentes; por otro, sería posible el desarrollo de arquitecturas de soluciones vía recursos en la nube más avanzados para poder resolver los problemas de cada cliente en base a sus necesidades específicas.

Según datos<sup>15</sup> de 2021, el 94% de las empresas grandes reconocían haber hecho uso de algún servicio en la nube durante el ejercicio anterior como parte de su *mix* de recursos tecnológicos. De hecho, el peso de la factura asociada a los *cloud services* en las anteriores era de entorno al 30%, y se espera que su peso siga aumentando a medida que se realice la migración de sus procesos. Esta tendencia se ha visto reforzada a lo largo del último año y media por el shock de oferta que comenzó con la pandemia del SARS-CoV-2 en 2020, que supuso al mismo tiempo una disrupción de la cadena de suministro de microprocesadores y un incremento en la demanda de estos, dando lugar a escenarios de escasez y precios crecientes para estos productos. En el caso de los procesadores y chips de memoria, por ejemplo, los avances logrados por el comienzo de la producción de chips con arquitecturas de 7 nanómetros e inferiores ha conllevado a su vez un incremento en la potencia de procesamiento posible. Este hecho los ha convertido en bienes de interés para aquellas compañías que deseen ahorrar en el coste por tiempo de procesamiento, aumentando su demanda. Notablemente, los proveedores de servicios en la nube han aprovechado esta situación para incrementar su abanico de servicios tal y como ocurrió con el servicio de minado de criptomonedas haciendo uso para ello de los recursos de la nube ante el problema de escasez de tarjetas gráficas (GPU). Otro sector que fue seriamente perjudicado por los problemas en la cadena de suministro de la industria de los semiconductores fue el automovilístico, el cual se vio forzado a reducir la producción de sus modelos por la escasez de los componentes necesarios para los sistemas electrónicos e incluso al rediseño de sus líneas futuras para simplificar al máximo el número de componentes electrónicos utilizados. Teniendo en cuenta lo anterior, las tres grandes compañías de la nube (AWS, Microsoft Azure y Google) tienen una posición aventajada frente a cualquier compañía al tener acuerdos con las fundiciones — es decir, fábricas de chips— para reservar parte de su capacidad de producción para los microprocesadores diseñados específicamente para sus servidores como ocurre en el caso del chip Graviton de AWS<sup>16</sup>. Por tanto, la situación actual

---

<sup>15</sup> <https://techjury.net/blog/how-many-companies-use-cloud-computing/#gref>

<sup>16</sup> [https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/oip/cloud\\_alliance](https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/oip/cloud_alliance)

hace más sencillo y dinámico para una organización de grandes dimensiones acceder a recursos de computación cuántica a través de un servicio en la nube frente a llevar a cabo el estudio y ejecución de un plan *on-premise*. Además, la presencia de múltiples regiones compuestas por distintas *availability zones* supone una doble garantía: no solo se asegura una latencia mínima para todas las regiones del mundo en las cuales pueda operar una compañía, sino que también se logra de este modo una mayor velocidad de implementación de los recursos en el proceso productivo consiguiendo así evitar los costes de oportunidad causados por posibles demoras.

Por último, encontramos que la vida útil de los recursos tecnológicos no sólo se encuentra acotada por su eventual obsolescencia en términos de potencia, sino que los procesos físicos en los que se basan acarrear un desgaste gradual del silicio. Según datos de la encuesta de la industria de centros de datos de 2020 publicada por Uptime Institute (2020), las compañías podrían estar paradójicamente ampliando el ciclo de vida de sus servidores debido a la poca rentabilidad resultante de la inversión en nuevos sistemas en un contexto de mejoras en la eficiencia energética decrecientes. Esto refuerza la tesis de que las compañías deben necesariamente optar por un modelo *as-a-service* en caso de necesitar *upgrades* constantes de forma económicamente viable. En el caso de la computación cuántica, resulta evidente que al encontrarse en un estadio temprano de madurez las compañías que quieran integrarla a corto plazo en sus procesos tendrán que hacer frente a un coste de oportunidad elevado derivado de la posibilidad de que un nuevo ordenador más estable, con menos errores o con un número significativamente mayor de qubits físicos pueda ser lanzado al mercado en cualquier momento. Asimismo, teniendo en cuenta los tiempos internos para la toma de decisiones y su ejecución en el seno de las compañías grandes acrecienta el problema relacionado con la rápida obsolescencia de los sistemas que podrían ser adquiridos en un modelo *on-premise*. Las economías de escala y acuerdos preferentes con los principales productores de chips cuánticos permiten a los proveedores de servicios ofrecer el acceso a los ordenadores actualizados con un coste muy inferior al que se tendría en el caso *on-premise*. Además, se ofrece el servicio a dispositivos con distintas formas de simular los qubits y de distinto fabricante, lo cual incrementa el valor añadido del servicio al aumentar las opciones en cuanto a máquinas con las cuales las empresas pueden experimentar y desarrollar o ejecutar nuevos algoritmos.

### 5.3. Principales desafíos para la viabilidad de *Quantum Computing as-a-service* (*QCaaS*).

Si bien la computación cuántica como servicio podría parecer una opción ideal en base a la revisión de la literatura técnica y económica sobre esta tecnología, lo cierto es que presenta una serie de retos inherentes al modelo de negocio en cuestión. Entre las principales dificultades experimentadas por *QCaaS* encontramos que la falta de control y la dependencia de un proveedor en particular suponen dos grandes problemas que, por lo general, han ralentizado la adopción de los servicios en la nube por parte de las empresas. Además, existen otros grandes problemas como el *downtime*, los riesgos de seguridad y privacidad, la vulnerabilidad a los ataques y, según el servicio, los costes extraordinarios incurridos por tener acceso a los recursos frente a la propiedad de los anteriores.

Comenzando por la falta de control, los servicios en la nube actuales, que son por naturaleza *fully managed*, restringen la cantidad de operaciones que se puede llevar a cabo con el *backend* en sí, imposibilitando de esta manera algunas acciones como la actualización del *firmware* o la mejora de capas de seguridad ya implementadas en el centro de datos en cuestión. Si bien es cierto que tiene su lado positivo al reducir la carga de gestión de los servidores por parte de la empresa, esto puede conllevar a su vez la exposición a posibles errores por parte del proveedor de los servicios que derive en una pérdida o robo de datos o incluso daños mayores al negocio como la caída de la página web corporativa, por ejemplo. En el caso de *QCaaS* la falta de control sobre el *hardware* cuántico limita el aprendizaje que puede tener la empresa sobre el funcionamiento del dispositivo y, por ende, ralentiza el desarrollo de nuevos algoritmos destinados a la resolución de los problemas ya sean de simulación, optimización, etc.

La dependencia de un proveedor o *vendor lock-in* puede considerarse otro problema de gran calado para la viabilidad de *QCaaS*, puesto que existe un número muy limitado de proveedores con la capacidad de ofrecer este servicio en la actualidad. Por consiguiente, esto genera un desequilibrio en el poder negociador entre los proveedores de servicio y las empresas que deseen experimentar con esta tecnología, llevándolas a aceptar condiciones de uso ligeramente sesgadas a favor del proveedor de este servicio. Al mismo tiempo, esta dependencia y los *switching costs* asociados pueden desincentivar la competencia por ofrecer

los mejores servicios posibles por parte de los proveedores, en detrimento del desarrollo general de la industria y de los intereses de todos sus *stakeholders*.

El *downtime* consiste en el corte del servicio provocado por un fallo en la conexión a los servidores o, incluso, en los servidores en sí que impide al usuario acceder a los recursos tecnológicos arrendados. Debido a la naturaleza de este problema, cualquier proveedor es susceptible de sufrir un parón en sus servicios a pesar de los sistemas de prevención que hayan implementado o de su cuota de mercado. En el caso de *QCaaS* este tipo de dificultad podría ser catastrófica debido a la forma en que funciona el sistema de colas para asignar un turno determinado a cada solicitud entrante por parte de un cliente: al haber un número muy limitado de ordenadores cuánticos *NISQ* operativos y accesibles a través de la nube, es imposible reservar la totalidad del tiempo de ejecución de uno de estos dispositivos a un cliente en particular. Por ello, se recurre a un sistema de solicitudes en cola por el cual el ordenador procesa las solicitudes provenientes de la red de clientes en orden cronológico de recepción de las anteriores. En el caso de coincidir con un problema de *downtime*, el cliente recibiría un peor servicio proveniente de la computación debido a un incremento significativo del tiempo de espera hasta recibir el resultado deseado.

La gestión de los costes asociados al servicio también podría resultar un problema para su comercialización, ya que los costes de mantenimiento y la inversión en hardware requerida por los proveedores de servicios en la nube podría empujarles a adoptar una estrategia de *pricing* más agresiva para mantener el servicio. Además, cabe destacar que los servicios en la nube suelen ser más económicos por lo general para aquellas compañías con cargas de trabajo uniformes y previsibles que puedan provisionar los recursos con antelación.

#### 5.4. *Revisión y propuesta de una estrategia de pricing para Quantum Computing as-a-service (QCaaS).*

La valoración del Quantum Computing as-a-service como vía preferente de difusión de la tecnología se fundamenta en su capacidad de generar y aportar un mayor valor añadido al cliente que cualquier otra opción posible. Un elemento fundamental para cualquier servicio o bien es la contrapartida exigida a cambio del anterior, lo cual en el caso del uso de los ordenadores cuánticos supone la principal barrera a superar para su difusión. Actualmente, el estado del arte se encuentra en una fase tan temprana que los distintos diseños y materiales

empleados son altamente costosos, poco prácticos y difíciles de operar. Esto tiene un claro impacto negativo en la capacidad de generar valor a través del uso de los algoritmos cuánticos disponibles para reducir costes en tiempo de procesamiento ya que, si bien es cierto que para determinadas tareas el número total de minutos de procesamiento será menor, si el coste medio por minuto procesado es proporcionalmente mayor a la reducción del tiempo entonces no sería una opción viable.

Es precisamente en la viabilidad económica donde la industria de la computación cuántica tiene su mayor reto a nivel empresarial, ya que para poder atraer un mayor capital humano y ser financieramente sostenible resulta esencial que se establezca el ecosistema de empresas proveedoras y clientes que en cada eslabón de la cadena garanticen la actividad económica de las demás. De este modo, es esencial la búsqueda de un modelo económico que permita a cada uno de los integrantes de la cadena aumentar el valor añadido a través de sus actividades a la par que se garantiza su sostenibilidad en el tiempo, aunque quizá a corto plazo la situación no permita llegar al *break-even*. Partiendo del ejemplo de la computación tradicional y otras tecnologías, con el paso del tiempo y de la evolución de la industria, el coste promedio de procesamiento fue reduciéndose a la par que las máquinas se lograban miniaturizar más y su coste de uso en recursos fue menor. En el caso de la computación cuántica, los dos problemas a nivel técnico que derivan en un mayor coste son lograr la superconductividad en el chip y la reducción del ruido que afecta al funcionamiento del sistema. Estos se podrían paliar a corto plazo mediante el avance en el diseño de materiales utilizados en chips cuánticos y el incremento en el número de algoritmos diseñados para los anteriores.

A pesar de los altos *switching costs* presentes entre los distintos proveedores debido a su *software* propio y demás limitaciones técnicas, el modelo de servicios en la nube se ha caracterizado por la continua reducción de los costes de los servicios en relación al uso hecho por parte del cliente según se han logrado economías de escala cada vez mayores. Desde la creación de la industria en 2006, la compañía líder (AWS) ha reducido el precio de su servicio en 107 ocasiones hasta 2021 guiada por los denominados *leadership principles* y ante la

intensidad de la competencia ofrecida por sus principales competidores<sup>17</sup>. Además, cabe destacar la uniformidad en la estrategia de *pricing* aplicada por los principales proveedores, quienes han seguido el camino elegido por la compañía con mayor cuota de mercado. En el caso de *Quantum Computing as-a-service*, los modelos de *pricing* fueron anunciados en verano de 2020 cuando se hizo público el comunicado de un futuro acceso a ordenadores cuánticos a través de la nube. Un breve análisis de las principales ofertas disponibles permite entrever filosofías distintas por parte de cada proveedor, encontrando algunas continuistas con respecto a las políticas de *pricing* de otros servicios en nube y otros que apuestan por un modelo mucho más simplificado para facilitar su adopción.

Así pues, AWS sigue una estrategia de *pricing* que depende de dos variables: el *shot* y la tarea. Con *shot* se refiere a la ejecución de un algoritmo cuántico en una QPU basada en puertas y cuya tarifa varía en función del fabricante del sistema utilizado<sup>18</sup>, es decir, es el componente que hace referencia al distinto coste resultante de operar los distintos chips cuánticos. De este modo, se garantiza la viabilidad de la oferta de un mayor número de sistemas distintos con los que experimentar. En cuanto al coste por tarea, este es un elemento que encontramos en los demás servicios relacionados al procesamiento en la nube de AWS y denota una voluntad por parte del proveedor de integrar el nuevo servicio bajo el paraguas de opciones de monetización ya conocido por sus clientes; además, se trata de un precio igual para todas las opciones: \$0,3 por tarea. En cambio, Azure Quantum apuesta por una configuración rupturista estructurada en base a dos tarifas: “Aprender y desarrollar” y Rendimiento a gran escala<sup>19</sup>. La idea detrás de cada opción es atraer tanto a aquellos que deseen iniciarse en el mundo de la computación cuántica como a las compañías que deseen utilizar las soluciones disponibles en la actualidad como parte de su actividad principal. En este caso, los precios ofrecidos varían usando el tiempo como métrica fundamental que determina tanto el “segmento de uso por horas” como el precio asociado al segmento de cada hora; sin embargo, la facturación se produce por segundo de proceso de modo que el pago por uso sea lo más flexible y equilibrado para todas las partes.

---

<sup>17</sup> <https://aws.amazon.com/es/blogs/aws-cost-management/amazon-ec2-15th-years-of-optimizing-and-saving-your-it-costs/>

<sup>18</sup> <https://aws.amazon.com/es/braket/pricing/>

<sup>19</sup> <https://azure.microsoft.com/es-es/pricing/details/azure-quantum/>

En base a las opciones disponibles, queda claro que existen múltiples vías de asegurar el equilibrio proveedor-cliente capaces de generar valor añadido por reducción de costes frente a la opción de implementar un sistema cuántico *on-premise*. Si bien es cierto que la facilidad para entender la factura de estos servicios es fundamental, la mayor complejidad de un sistema dependiente de varias variables como es el caso de AWS permite una reducción comparativa de los costes en casos específicos frente a un modelo más general. Sin embargo, ante la falta de datos públicos acerca de los costes reales que pueden asumir los proveedores de servicios por la adquisición y mantenimiento de los distintos sistemas cuánticos resulta difícil concretar una nueva propuesta específica que pudiese mejorar las ya existentes.

## **6. Conclusión**

### *6.1. Quantum Computing As-a-service como modelo económico y técnico preferente de difusión*

En base a la revisión de literatura académica resulta evidente que el reto económico al que se enfrenta la computación cuántica está al nivel del reto técnico que limita su evolución en la actualidad. Las conclusiones acerca de la situación actual de la industria, de los distintos tipos de chips existentes, de las aplicaciones y de los modelos de difusión de la tecnología indican que el futuro de la computación cuántica se encuentra en una situación delicada. Para asegurar su éxito, es necesario afrontar algunos de sus mayores problemas de viabilidad a corto plazo como la necesidad de alta flexibilidad o la concentración de recursos a través de un modelo que garantice que el uso de la computación cuántica sea óptimo. La continua mejora en la infraestructura de redes hace posible además el acceso desde cualquier punto a lugares recónditos en los que se pueda lograr el mejor aislamiento de los ordenadores cuánticos; esto se consigue a través de e.g., la protección de movimientos sísmicos, tránsito humano, fluctuaciones de la temperatura, cambios en el campo electromagnético circundante para reducir los problemas de decoherencia.



La computación cuántica como servicio resuelve muchos de los problemas planteados por el modelo tradicional *on-premise* en términos de generación neta de valor añadido. Tal y como se constató en el estudio de los objetivos específicos de este trabajo, los factores más determinantes a la hora de contribuir a la capacidad de generación de valor de esta industria son: la potencia y estabilidad del sistema, la reducción de costes por tarea frente a recursos tradicionales de computación y la flexibilidad para poder hacer *upgrades* a corto plazo sin enfrentar una curva de aprendizaje. En base a lo anterior, los modelos de *hardware-as-a-service*- y *platform-as-a-service* resultan las mejores opciones para todos los *stakeholders*, ya que favorecen que se produzca la actividad económica al minimizar la carga de los costes en un eslabón de la cadena en particular a la par que paliando la rápida obsolescencia que caracteriza a estos sistemas. Además, es posible acceder de esta forma a un efecto red en cuanto a desarrollo de algoritmos y SDK<sup>20</sup> se refiere al aumentar el número de usuarios que acceden y trabajan regularmente en un mismo entorno gestionado por el proveedor de servicios. Esto supone una gran ventaja al facilitar la transmisión de información entre organizaciones y aumentar el grado de conocimiento sobre la operativa de un ordenador cuántico en concreto.

La inclusión de la computación cuántica como servicio resulta razonable además por la necesidad de avanzar en la integración entre los recursos tradicionales de computación con los nuevos dispositivos cuánticos. En esta era de uso híbrido de los recursos de IT, resulta aparatoso además el rediseño de los sistemas *on-premise* ya presentes en las compañías tanto en cuanto a la interfaz para la transmisión de información entre dispositivos como a nivel de ubicación se refiere; atendiendo a la necesidad de máximo aislamiento para evitar problemas de decoherencia. Por todas estas características, es posible afirmar la superioridad del modelo *as-a-service* frente al *on-premise* como modelo preferente de difusión de la tecnología de computación cuántica.

---

<sup>20</sup> SDK: Software Development Kit

## 6.2. Alcance e impacto del estudio

Con motivo del estado temprano de la aplicación de la computación cuántica para procesos empresariales, la literatura académica relativa a esta desde una perspectiva económica resulta escasa. Al tratarse de un trabajo fundamentado en la revisión de literatura académica, este se encuentra limitado por la escasa disponibilidad de *market intelligence* relativa a la problemática planteada y, por ende, los *insights* son de un marcado carácter cualitativo. A pesar de esto, el desarrollo del estudio de caso de los modelos de difusión para esta tecnología es de extrema importancia, ya que permite dirimir la cuestión concerniente a la forma óptima de organizar las interacciones entre los diversos agentes competentes en la cadena de valor. Asimismo, este trabajo puede servir como referencia para otros investigadores que decidan profundizar más en los modelos de difusión posibles para esta nueva tecnología valiéndose para ello de estudios de mercado y otras fuentes de información cuantitativa.

## 7. Bibliografía

- Abdalla, P. A., & Varol, A. (2019). (2019). Advantages to disadvantages of cloud computing for small-sized business. Paper presented at the *2019 7th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)*, 1-6.
- Audretsch, D. B., & Feldman, M. P. (1996). Innovative clusters and the industry life cycle. *Review of Industrial Organization*, *11*(2), 253-273.
- Avram, M. (2014). Advantages and challenges of adopting cloud computing from an enterprise perspective. *Procedia Technology*, *12*, 529-534.
- Barney, B. (2010). Introduction to parallel computing. *Lawrence Livermore National Laboratory*, *6*(13), 10.
- Bayerstadler, A., Becquin, G., Binder, J., Botter, T., Ehm, H., Ehmer, T., Erdmann, M., Gaus, N., Harbach, P., Hess, M., Klepsch, J., Leib, M., Lubner, S., Luckow, A., Mansky, M., Mauerer, W., Neukart, F., Niedermeier, C., Palackal, L., . . . Winter, F. (2021). Industry quantum computing applications. *EPJ Quantum Technology*, *8*(1)<https://10.1140/epjqt/s40507-021-00114-x>
- Bernstein, D. J., Heninger, N., Lou, P., & Valenta, L. (2017). (2017). Post-quantum RSA. Paper presented at the *International Workshop on Post-Quantum Cryptography*, 311-329.

- Bhasin, A., & Tripathi, M. (2021). Quantum Computing at an Inflection Point: Are we Ready for a New Paradigm. *IEEE Transactions on Engineering Management*, , 1-12. <https://10.1109/TEM.2021.3103904>
- Blatt, R., & Roos, C. F. (2012). Quantum simulations with trapped ions. *Nature Physics*, 8(4), 277-284.
- Bokulich, A., & Jaeger, G. (2010). *Philosophy of quantum information and entanglement*. Cambridge University Press.
- Carrier, F., Fresse, V., Jamont, J., Rosay, A., & Pallardy, L. (Nov 2020). (Nov 2020). A Multi-Edge-Agent System approach for sharing heterogeneous computing resources. Paper presented at the 1-6. <https://10.1109/VTC2020-Fall49728.2020.9348722>  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9348722>
- Chernega, V. N., Man'ko, O. V., & Man'ko, V. I. (2018). God Plays Coins or Superposition Principle for Classical Probabilities in Quantum Suprematism Representation of Qubit States. *Journal of Russian Laser Research*, 39(2), 128-139. <https://10.1007/s10946-018-9699-z>
- Cohen, E., & Tamir, B. (2014). D-Wave and predecessors: From simulated to quantum annealing. *International Journal of Quantum Information*, 12(03), 1430002.
- Deffner, S., & Campbell, S. (2017). Quantum speed limits: from Heisenberg's uncertainty principle to optimal quantum control. *Journal of Physics. A, Mathematical and Theoretical*, 50(45), 453001. <https://10.1088/1751-8121/aa86c6>

- Devoret, M. H., Wallraff, A., & Martinis, J. M. (2004). Superconducting qubits: A short review. *arXiv Preprint Cond-Mat/0411174*,
- El Gaily, S., & Imre, S. (2021). (2021). Constrained quantum optimization algorithm. Paper presented at the *2021 20th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, 1-6.
- Feige, U., Jain, K., Mahdian, M., & Mirrokni, V. (2007). (2007). Robust combinatorial optimization with exponential scenarios. Paper presented at the *International Conference on Integer Programming and Combinatorial Optimization*, 439-453.
- Gabor, T., Sünkel, L., Ritz, F., Phan, T., Belzner, L., Roch, C., Feld, S., & Linnhoff-Popien, C. (2020). (2020). The holy grail of quantum artificial intelligence: major challenges in accelerating the machine learning pipeline. Paper presented at the *Proceedings of the IEEE/ACM 42nd International Conference on Software Engineering Workshops*, 456-461.
- Gao, Z., Wang, S., Berry, J., Zhang, Q., Gebhardt, J., Parkin, W. M., Avila, J., Yi, H., Chen, C., Hurtado-Parra, S., Drndić, M., Rappe, A. M., Srolovitz, D. J., Kikkawa, J. M., Luo, Z., Asensio, M. C., Wang, F., & Johnson, A. T. C. (2020). *Large-area epitaxial growth of curvature-stabilized ABC trilayer graphene*. Springer Science and Business Media LLC. <https://10.1038/s41467-019-14022-3>
- Hassija, V., Chamola, V., Saxena, V., Chanana, V., Parashari, P., Mumtaz, S., & Guizani, M. (2020). Present landscape of quantum computing. *IET Quantum Communication*, *1*(2), 42-48.

- Hauke, P., Katzgraber, H. G., Lechner, W., Nishimori, H., & Oliver, W. D. (2020). Perspectives of quantum annealing: Methods and implementations. *Reports on Progress in Physics*, 83(5), 054401.
- Hidary, J. D. (2021). A brief history of quantum computing. *Quantum Computing: An Applied Approach* (pp. 15-21). Springer.
- Hirsch, J. E. (2012). The origin of the Meissner effect in new and old superconductors. *Physica Scripta*, 85(3), 35704. <https://10.1088/0031-8949/85/03/035704>
- Hoefer, C. N., & Karagiannis, G. (2010). (2010). Taxonomy of cloud computing services. Paper presented at the *2010 IEEE Globecom Workshops*, 1345-1350.
- Horodecki, R., Horodecki, P., Horodecki, M., & Horodecki, K. (2009). Quantum entanglement. *Reviews of Modern Physics*, 81(2), 865-942. <https://10.1103/RevModPhys.81.865>
- Hou, S., Feng, G., Wu, Z., Zou, H., Shi, W., Zeng, J., Cao, C., Yu, S., Sheng, Z., & Rao, X. (2021). SpinQ Gemini: a desktop quantum computing platform for education and research. *EPJ Quantum Technology*, 8(1), 1-23.
- Jiang, S., Britt, K. A., McCaskey, A. J., Humble, T. S., & Kais, S. (2018). Quantum annealing for prime factorization. *Scientific Reports*, 8(1), 1-9.
- Kjaergaard, M., Schwartz, M. E., Braumüller, J., Krantz, P., Wang, J. I., Gustavsson, S., & Oliver, W. D. (2020). Superconducting qubits: Current state of play. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 11, 369-395.

- Koehl, W. F., Buckley, B. B., Heremans, F. J., Calusine, G., & Awschalom, D. D. (2011). Room temperature coherent control of defect spin qubits in silicon carbide. *Nature*, 479(7371), 84-87.
- Kuhn, T. S. (1970). *The structure of scientific revolutions*. Chicago University of Chicago Press.
- Ladd, T. D., Jelezko, F., Laflamme, R., Nakamura, Y., O’Brien, J. L., & Monroe, C. (2010). Quantum computers. *Nature (London)*, 464(7285), 45-53.  
<https://10.1038/nature08812>
- Langione, M., Tillemann-Dick, C., Kumar, A., & Taneja, V. (2019). Where will quantum computers create value—and when. *Boston Consulting Group*. URL: <https://www.bcg.com/de-at/publications/2019/quantum-computers-create-value-when>. [DI: 29.07.2020],
- LaPierre, R. (2021). Shor Algorithm. *Introduction to Quantum Computing* (pp. 177-192). Springer.
- Leiserson, C. E., Thompson, N. C., Emer, J. S., Kuszmaul, B. C., Lampson, B. W., Sanchez, D., & Schardl, T. B. (2020). There’s plenty of room at the Top: What will drive computer performance after Moore’s law? *Science*, 368(6495), eaam9744.
- Li, Y., Tian, M., Liu, G., Peng, C., & Jiao, L. (2020). Quantum optimization and quantum learning: A survey. *Ieee Access*, 8, 23568-23593.
- Likharev, K. K. (2022). *Dynamics of Josephson junctions and circuits*. Routledge.

- Lu, H., & Seabaugh, A. (2014). Tunnel field-effect transistors: State-of-the-art. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2(4), 44-49.
- Lund, A. P., Bremner, M. J., & Ralph, T. C. (2017). Quantum sampling problems, BosonSampling and quantum supremacy. *Npj Quantum Information*, 3(1), 1-8.
- McKinsey & Company. (2021, Sep). The Quantum Technology Monitor. *The McKinsey Quarterly*,
- Ménard, A., Ostojic, I., Patel, M., & Volz, D. (2020). A game plan for quantum computing. *McKinsey Quaterly*,
- Montanaro, A. (2015). Quantum speedup of Monte Carlo methods. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 471(2181), 20150301.
- N D Hari Dass. (2013). *The Superposition Principle in Quantum Mechanics -did the rock enter the foundation surreptitiously? Turbulent free shear layer dynamics View project General Relativity View project The Superposition Principle in Quantum Mechanics - did the rock enter the foundation surreptitiously?*
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Sciences, Division on Engineering and Physical, Board, I. C. S., Board, Computer Science and Telecommunications, Computing, Committee on Technical Assessment of the Feasibility and Implications of Quantum, Horowitz, M., & Grumbling, E. (2019). *Quantum Computing*. National Academies Press. <https://10.17226/25196>
- O'Regan, G. (2021). *A Brief History of Computing*. Springer International Publishing AG.



- Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79.
- Rahaman, M., & Masudul Islam, M. (2016). An Overview on Quantum Computing as a Service (QCaaS): Probability or Possibility. *International Journal of Mathematical Sciences and Computing*, 2(1), 16-22. <https://10.5815/ijmsc.2016.01.02>
- Ravi, G. S., Smith, K. N., Gokhale, P., & Chong, F. T. (Nov 2021). (Nov 2021). Quantum Computing in the Cloud: Analyzing job and machine characteristics. Paper presented at the 39-50. <https://10.1109/IISWC53511.2021.00015>  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9668289>
- Robinson, G., Vamvadelis, I., & Narin, A. (2014). Using Amazon web services for disaster recovery. *Amazon Web Services*, 22
- Roy, S., Kot, L., & Koch, C. (2013). (2013). Quantum databases. Paper presented at the *Proc. CIDR, (CONF)*
- Schwabl, F. (2007). *Quantum mechanics*. Springer Science & Business Media.
- Selleri, F. (2012). *Wave-particle duality*. Springer Science & Business Media.
- Shalf, J. (2020). The future of computing beyond Moore's law. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 378(2166), 20190061.
- Surbiryala, J., & Rong, C. (Aug 2019). (Aug 2019). Cloud Computing: History and Overview. Paper presented at the 1-7. <https://10.1109/CloudSummit47114.2019.00007>  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9045506>

- Tarrazo, M. (2016). Portfolio Heuristics, Linearity, and Qualitative Analysis. *Applied Economics and Finance*, 3(4)<https://10.11114/aef.v3i4.1802>
- Tatnall, A. (2012). History of computers: hardware and software development. *Encyclopedia of Life Support Systems*,
- Vargas-Torres-Céliz, E., Lara-Baltazar, G., Mollinedo-Chávez, L., & Ricaldi-Arauzo, R. (2022). *Computación Tradicional, Quantum y sus futuras aplicaciones*. Universidad Nacional de San Martín. <https://10.51252/rcsi.v2i1.201>
- Villars, C. N. (1986). The paradox of Schrodinger's cat. *Physics Education*, 21(4), 232.
- Wang, D., Higgott, O., & Brierley, S. (2019). Accelerated variational quantum eigensolver. *Physical Review Letters*, 122(14), 140504.
- Wichert, A. (2020). *Principles of quantum artificial intelligence: quantum problem solving and machine learning*. World Scientific.
- William H. Dutton, Everett M. Rogers, & Suk-Ho Jun. (1987). *Adoption Computers*
- Yin, J., Li, Y., Liao, S., Yang, M., Cao, Y., Zhang, L., Ren, J., Cai, W., Liu, W., & Li, S. (2020). Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120 kilometres. *Nature*, 582(7813), 501-505.
- Zbinden, H., Bechmann-Pasquinucci, H., Gisin, N., & Ribordy, G. (1998). Quantum cryptography. *Applied Physics B: Lasers & Optics*, 67(6)

Zhang, G., Cheng, Y., Chou, J., & Gali, A. (2020). *Material platforms for defect qubits and single-photon emitters*. AIP Publishing. <https://10.1063/5.0006075>