



TRABAJO FIN DE GRADO

Tecnologías para procesadores cuánticos

Realizado por
Mario Espinosa Rodríguez

Para la obtención del título de
Grado en Ingeniería Informática - Ingeniería del Software

Dirigido por
Daniel Cascado Caballero

Realizado en el departamento de
Arquitectura y Tecnología de Computadores

Segunda Convocatoria, curso 2022/23

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi tutor, quien me ha alentado durante todo el proceso de este Trabajo de Fin de Grado y me ha proporcionado una ayuda inestimable a la hora de perfeccionarlo; a mi familia, por apoyar en todo momento las decisiones que he tomado de cara a mi futuro profesional; y a mis amigos, por proporcionar el mejor apoyo emocional que jamás podría haber pedido en cualquiera de los aspectos de mi vida.

También quiero agradecer a Chiyomaru Shikura por crear la emocionante saga de ficción de la que me enamoré a primera vista, y que pasó a ser la razón por la que finalmente me decanté por esta carrera.

Resumen

El área de la computación cuántica es una de las más prometedoras en la búsqueda de un nuevo paradigma de computación post-Moore.

En este trabajo se proporciona la información necesaria para conocer los principios de mecánica cuántica en los que se basa este campo de las ciencias de la computación, partiendo del bloque más básico de los computadores cuánticos, el qubit, y ascendiendo en nuestra escala de abstracción a través de conceptos como las puertas cuánticas, los conjuntos universales de puertas o los criterios para la correcta implementación de un ordenador cuántico.

Acto seguido, se realiza una revisión de los conceptos diferenciativos, la historia y el estado del arte de tres de las tecnologías cuánticas de capa física más avanzadas en el área: trampas de iones, superconductores y fotónicas, y también se dedica una sección al resto de tecnologías físicamente implementadas que no ha sido posible tratar en más detalle. También se definen algunas de las métricas y algoritmos más utilizados a la hora de comparar y acotar las capacidades de distintos computadores cuánticos, tras lo cual se proporciona un vistazo al estado actual del software diseñado para máquinas cuánticas, y finalmente se concluye el trabajo con una opinión sobre el aspecto del futuro cercano de este campo.

Palabras clave: computación cuántica, revisión, trampas de iones, superconductores, qubits fotónicos, óptica lineal, computadores NISQ, software cuántico

Abstract

The field of quantum computing is one of the most promising ones in the search of a post-Moore new computing paradigm.

In this paper we give some insight about the fundamental quantum mechanics underlying the principles of this area of computer sciences, starting from the most basic building block of quantum computers, the qubit, and going up through the concepts of quantum gates, universal gate sets and the criteria that must be met in order to properly implement a quantum computer.

After that, we review the differentiating concepts, history and state-of-the-art of three of the most advanced approaches in this field: ion-traps, superconducting and photonic qubit computers, and also dedicate a section to the rest of physically implemented technologies that were not possible to address in more detail. We also define some of the most used metrics and algorithms for comparing and benchmarking quantum computers, then give a brief look at the state-of-the-art of software built for quantum machines, and finally conclude the paper with our opinion on the aspect of the near future for this field.

Keywords: quantum computing, review, ion-traps, superconducting qubits, photonic qubits, linear optics, NISQ computers, quantum software

Índice general

1. Descripción del proyecto	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	1
1.3. Objetivos	2
2. Estudio Previo	4
2.1. Introducción al dominio del problema	4
2.1.1. Qubits	5
2.1.2. Puertas cuánticas	6
2.1.3. Criterios de DiVincenzo	11
2.1.4. La búsqueda de un ordenador cuántico universal	12
2.2. Metodología de búsqueda de fuentes	13
3. Desarrollo	18
3.1. Revisión de tecnologías de capa física	18
3.1.1. Trampas de iones	18
3.1.2. Superconductores	24
3.1.3. Qubits fotónicos	30
3.1.4. Otras tecnologías de capa física	35
3.2. Métricas y benchmarks	38
3.2.1. Número de qubits	38
3.2.2. Conectividad	40
3.2.3. Tasas de error	41
3.2.4. Tiempo de decoherencia y costes operacionales	42
3.2.5. Algoritmos para la medición de prestaciones	43
3.2.6. Sobre la eficiencia energética	45
3.2.7. Sobre la madurez tecnológica	45
3.3. Revisión de software	47
3.3.1. Conjuntos de instrucciones	47
3.3.2. Lenguajes de programación	48
3.3.3. Kits de desarrollo de software y librerías	50
3.4. Conclusiones	52
4. Cierre del proyecto	54
4.1. Conclusiones finales	54
4.2. Trabajo futuro	55
5. Bibliografía	56
A. Clasificación bibliográfica fase 3a	66
B. Hoja de ruta de IBM	68

Índice de figuras

2.1.	Esfera de Bloch. Se ven representados en el eje z los estados fundamentales $ 0\rangle$ y $ 1\rangle$, así como el estado genérico $ \psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) 0\rangle + e^{i\varphi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) 1\rangle = a_0 0\rangle + a_1 1\rangle$.  <i>Smite-Meister</i>	6
2.2.	Puerta Pauli-X.  <i>Rxtreme</i>	8
2.3.	Puerta Pauli-Y.  <i>Rxtreme</i>	8
2.4.	Puerta Pauli-Z.  <i>Rxtreme</i>	8
2.5.	Puerta Hadamard.  <i>Rxtreme</i>	8
2.6.	Puerta CNOT.  <i>Rxtreme</i>	9
2.7.	Puerta SWAP.  <i>Rxtreme</i>	9
2.8.	Puerta Toffoli.  <i>Rxtreme</i>	9
2.9.	Puerta S.  <i>Rxtreme</i>	10
2.10.	Puerta T.  <i>Rxtreme</i>	10
3.1.	Trampa individual de iones “Pine trap”, de Alpine Quantum Technologies [1].	19
3.2.	Representación gráfica de potencial eléctrico en forma de silla[2]. Trabajando con un ion positivamente cargado, el eje azul representa la región de nuestro potencial que no puede cruzar el ion, y el eje rojo representa la región hacia la que intenta escapar. Para evitar esto, hacemos girar nuestro potencial alrededor de un tercer eje perpendicular a los otros dos.	19
3.3.	Vista esquemática de una trampa de Paul[3]. Nótese la presencia de varias partículas en su interior, en lugar de una sola.	21
3.4.	Representación gráfica de la formación de parejas de Cooper[4].	24
3.5.	Esquema del procesador Osprey de IBM[5].	28
3.6.	Interpretación gráfica de un qubit fotónico[6].	31
3.7.	El computador fotónico Borealis de Xanadu[7].	34
3.8.	Disposiciones espaciales de átomos neutrales mediante redes ópticas[8].	37
3.9.	Esquema de conectividad de los dos computadores comparados en el experimento de N. Linke[9].	40
3.10.	Esquema del circuito cuadrado utilizado para el cálculo del volumen cuántico[10].	44
3.11.	Ciclo de sobreexpectación de Gartner en diversos apartados de la computación cuántica, a fecha de 2022[11]. Nótese que el campo de la eficiencia energética se representa como el menos desarrollado de todos.	46

1. Descripción del proyecto

1.1. Introducción

La computación cuántica es un nuevo paradigma de computación consistente en la definición de arquitecturas de computadores de alto rendimiento que funcionan bajo principios relativos a la mecánica cuántica.

Históricamente, la primera propuesta reconocida como la gran puesta en marcha de este campo de la informática a nivel global fue la de Richard Feynman en 1981[12]. En su charla, titulada *Simulating Physics with Computers*, Feynman exponía la imposible tarea que suponía simular un sistema cuántico en un computador clásico mediante métodos probabilísticos, para la cual proponía un novedoso modelo de máquina de computación denominado computador cuántico.

Tras este evento, dio comienzo el flujo constante de avances en el campo. Si algo hay que destacar en estos avances, es la cantidad de propuestas diferentes que existen a la cuestión de cómo implementar un computador cuántico. En la actualidad existe un gran número de tecnologías cuánticas de capa física claramente diferenciadas entre sí, y el progreso en paralelo en todas ellas suele dificultar la visión del estado general de la computación cuántica como conjunto.

En este Trabajo de Fin de Grado se realizará una revisión del estado del arte de varias áreas de la computación cuántica, buscando no solo mostrar la actualidad del hardware y el software de este paradigma de computación, sino llegar a la conclusión de cuál de las tecnologías cuánticas de capa física que existen se puede considerar más tecnológicamente madura, siguiendo una serie de métricas de uso común en este campo de la informática a fecha de 2023.

1.2. Motivación

Para ilustrar la utilidad de la computación cuántica en la informática, se ha de hablar de la observación conocida como ley de Moore. La ley de Moore recibe su nombre de Gordon Moore, quien formuló en 1965[13] (y ajustó diez años más tarde) que el número de transistores en circuitos integrados aumentaba a un ritmo exponencial. La versión de la ley de Moore utilizada desde 1975 indica que el número de transistores se duplica cada dos años.

En la actualidad, la Ley de Moore que ha descrito correctamente durante casi 60 años el progreso en las capacidades de los procesadores clásicos se encuentra, por primera vez, en una posición perjudicada. Desde hace más de diez años se puede observar una ralentización en el aumento del número de transistores.[14].

Aunque actualmente existen discrepancias sobre si se puede considerar que la ley de Moore ha “muerto” o no, lo cierto es que las arquitecturas clásicas se han topado con un ominoso techo de cristal fruto de las limitaciones físicas de los procesadores de hoy, y mientras se idean constantemente formas de *empujar* dicho techo (mediante técnicas de aceleración de hardware, computación en paralelo o similares) para atrasar en la medida de lo posible la fecha en la que esta ley inevitablemente deje de resultar relevante, también se investigan frenéticamente alternativas radicales a este problema, completos cambios de paradigma en la computación.

La computación cuántica se sitúa como uno de los principales nuevos paradigmas que se investigan a día de hoy como una posible solución al problema de la ley de Moore, razón por la que se ha optado realizar este Trabajo de Fin de Grado.

1.3. Objetivos

Los objetivos que se espera lograr con este trabajo se pueden concretar en los siguientes puntos:

- **Aprendizaje propio.** El primer y más evidente objetivo es la adquisición de conocimientos relativos al campo de la computación cuántica. Los avances en las búsquedas de nuevos paradigmas de computación son un tema que despierta mi interés, aunque bien es cierto que mis conocimientos en el dominio de este TFG podían calificarse de superficiales previamente al inicio del mismo. En este trabajo he visto una gran oportunidad para aprender sobre uno de los ámbitos de la informática que más llama mi atención.
- **Primer paso para la implementación de un simulador de procesador cuántico.** Se podría considerar que este es el objetivo principal del trabajo. La propuesta inicial de este TFG llama a la colaboración de varias personas para lograr llevar a cabo algo de mayor alcance que lo que será tratado aquí. Desarrollar un simulador de procesador cuántico es una gran tarea que puede ser dividida en varias fases, todas ellas imprescindibles, y la primera de ellas viene a ser la elección de una tecnología cuántica de capa física concreta de entre todas las alternativas actuales. Ha de tenerse en cuenta que, ya se decida implementar un simulador cuántico o un computador al completo, los principios cuánticos en los que se base han de ser tenidos en cuenta, por lo que la elección de la tecnología guarda relevancia en ambos casos.

En este trabajo se contribuye a dicha tarea, proporcionando un vistazo a la trayectoria de las tres tecnologías de capa física más prometedoras de la actualidad, en la que se podrá ver claramente a qué obstáculos se han enfrentado y qué logros han alcanzado, y se hará énfasis tanto en las ventajas fundamentales de unas tecnologías frente a otras, como de los puntos débiles que las sitúan por detrás en otros ámbitos, de tal forma que facilite en la medida de lo posible la toma de tal decisión.

Con motivo de mantener la objetividad, el alcance de este trabajo se limita a la enumeración de características previamente comentada, y se remite la elección de la tecnología a implementar a un posible trabajo futuro.

- **Documentación del estado del arte.** En este trabajo se espera recopilar y documentar el estado del arte de las tecnologías cuánticas de capa física más prominentes de la actualidad, buscando poder realizar una representación inmortalizada de dicho estado que refleje la realidad de la forma más fiel y detallada posible. El campo de la computación cuántica es relativamente joven, y está sometido a constantes cambios y avances, de tal forma que en un solo año se pueden lograr adelantos revolucionarios que cambien el panorama rápidamente.

Se espera que la correcta documentación del estado actual de las tecnologías tratadas permita prolongar la utilidad de este trabajo en el tiempo en la medida de lo posible.

- **Revisión de software** De forma similar al objetivo principal del trabajo, se proporcionará un vistazo a los conjuntos de instrucciones, lenguajes de programación y otras iniciativas de software que existen en la actualidad, con motivo de ilustrar a modo de introducción el siguiente paso a tomar tras la decisión de la tecnología de capa física.

2. Estudio Previo

En este capítulo se busca dar contexto sobre los temas a tratar durante el trabajo, de forma que se pueda considerar esta memoria como autocontenida, facilitando la lectura de la misma sin necesidad de buscar información de manera externa.

2.1. Introducción al dominio del problema

Sabiendo que la computación cuántica se trata de una aplicación en informática de las propiedades de la mecánica cuántica, se considera que una buena forma de comenzar esta introducción al dominio del trabajo puede ser precisamente hablando de dichas propiedades cuánticas fundamentales en las que se basa este paradigma:

- **Superposición.** La superposición es la capacidad de las partículas cuánticas de presentar varios estados a la vez. Se trata de la propiedad que popularmente se ejemplifica con el ejemplo del gato de Schrödinger.

En computación clásica, un bit puede valer 0 o 1 únicamente, mientras que en computación cuántica se pueden llevar los “bits cuánticos” a un estado de superposición en el que, hasta que se colapse el sistema para proceder a medirlo, estos presenten, a efectos prácticos, ambos estados, 0 y 1.

- **Entrelazamiento.** El entrelazamiento se trata de la capacidad de las partículas cuánticas de ser “unidas” en una relación de dependencia, de tal forma que disponiendo de dos partículas entrelazadas, se puede saber el estado de una de ellas midiendo el de la otra y viceversa. Estas relaciones de dependencia pueden llegar a extenderse a grandes distancias, no solo a escala microscópica, cualidad descrita por la famosa frase “Actividad espeluznante a distancia” (Spooky action at a distance), la cual se atribuye popularmente a Albert Einstein.

Esta curiosa propiedad de la mecánica cuántica resulta de gran utilidad para la computación cuántica, ya que permite la transmisión de información tanto de forma interna entre los distintos módulos de un procesador, como de forma externa, en el campo conocido como comunicación cuántica.

- **Interferencia.** La última propiedad de la mecánica cuántica relevante en este campo es la interferencia, la cual define la capacidad de las partículas cuánticas de presentar cualidades propias de las ondas, pudiendo ser modificadas mediante agentes externos constructivos o destructivos. El experimento más conocido que ilustra esta propiedad es el de la doble rendija.

En computación cuántica, esta propiedad se utiliza como contraparte de la superposición. Es decir, se suelen utilizar interferencias destructivas para influir en las

probabilidades de los estados superpuestos de nuestros bits cuánticos, reduciendo las de los estados no deseados y favoreciendo las del estado que se busca.

2.1.1. Qubits

Teniendo en mente las propiedades previamente descritas. Podemos basarnos en estas para comenzar a definir los cimientos de la computación cuántica: los *qubits*, o bits cuánticos.

Sin embargo, previamente es necesario realizar la aclaración de que el concepto de qubit es una abstracción que puede ser implementada de diversas formas. La principal diferencia entre las distintas tecnologías cuánticas de capa física existentes reside en cómo definen estas el qubit, de tal forma que una vez pasada la barrera de la capa física se disponga de una nomenclatura común sobre la que poder teorizar y operar.

Para ilustrar la mayor diferencia entre un bit cuántico y uno clásico, se propone el siguiente ejemplo:

En computación clásica, un bit tiene dos estados posibles: 0 y 1, de tal forma que cuando disponemos de 2 bits podemos representar 4 estados distintos: 00, 01, 10 y 11. En este caso, el acto de medición consiste en comprobar en qué estado se encuentra cada uno de los bits del sistema.

En computación cuántica, un qubit posee también dos estados posibles: $|0\rangle$ y $|1\rangle$, de tal forma que disponiendo de dos qubits podemos de forma análoga representar 4 estados distintos: $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ y $|11\rangle$. La diferencia fundamental reside en el hecho de que estos estados coexisten al mismo tiempo debido a la superposición. Es por esta razón que a la hora de medir el estado del sistema, éste colapsará en uno de los cuatro estados posibles con una probabilidad determinada por el coeficiente de probabilidad de cada estado posible.

Podemos ilustrar este ejemplo con la siguiente generalización del caso expuesto:

$$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = a_0 |00\rangle + a_1 |01\rangle + a_2 |10\rangle + a_3 |11\rangle$$

donde los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 y a_3 son números complejos, y el cuadrado de sus módulos representa la probabilidad de medir su estado correspondiente al observar el sistema.

$|\psi\rangle$ representa en este caso un valor de dos qubits, y viene dado por los cuatro coeficientes de probabilidad de sus estados posibles. De esta explicación se extrae que **un sistema con n qubits se representa con 2^n números complejos**.

La notación utilizada hasta ahora para referirnos a los bits cuánticos recibe el nombre de $\langle bra|ket\rangle$. En esta notación, un $|ket\rangle$ representa un vector columna, y es

el estándar utilizado en computación cuántica para representar los estados posibles de uno o varios qubits. Partiendo del ejemplo anterior, a la hora de representar un qubit realmente nos referimos a los coeficientes que definen las probabilidades de que se encuentre en cada estado posible concreto, y no a los estados en sí, de tal forma que, mientras que en computación clásica podemos decir que los bits se representan con un 0 o un 1, en el paradigma cuántico un qubit se representa como $|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ o $|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$.

Esta representación da también a entender que estos se tratan de estados fundamentales en los que la probabilidad de que un qubit $|\psi\rangle$ valga 0 o 1 son totales, pero se ha de recordar que existen infinitos estados posibles de superposición en función de los coeficientes que se asignen al qubit $|\psi\rangle$.

Al tratarse un qubit de una combinación lineal de números complejos, puede ser representado utilizando los parámetros de su forma trigonométrica en un espacio conocido como esfera de Bloch.

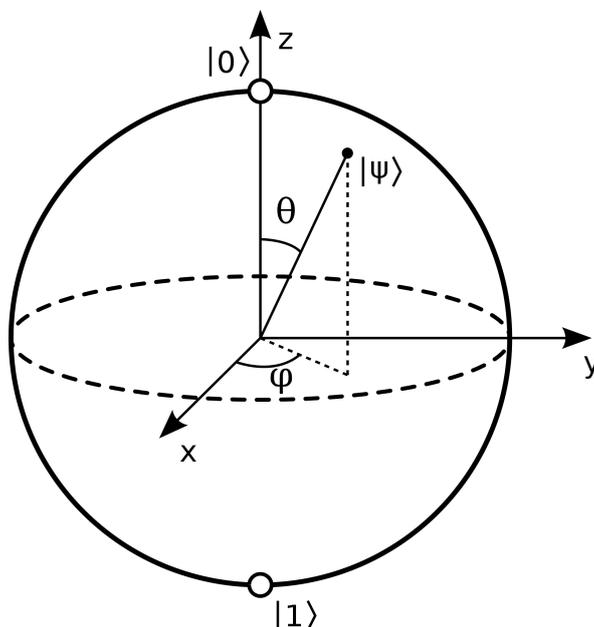


Figura 2.1: Esfera de Bloch. Se ven representados en el eje z los estados fundamentales $|0\rangle$ y $|1\rangle$, así como el estado genérico $|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle$.
 © ⓘ ⓘ Smite-Meister.

2.1.2. Puertas cuánticas

Ahora que hemos definido los qubits como el elemento operacional más atómico que nos concierne, el siguiente paso es definir las operaciones que se pueden realizar sobre los mismos. Las puertas cuánticas no son más que una representación abstracta de dichas operaciones. Esta definición trae consigo el hecho de que una puerta cuántica **no necesariamente representa un circuito**, sino una serie de transformaciones en el tiempo de los qubits implicados. Se puede entender como un tipo de diagrama de flujo.

Lo primero a destacar de las puertas cuánticas es el hecho de que están sometidas a ciertas restricciones que no necesariamente tienen por qué aplicar a sus equivalentes en computación clásica. Las principales restricciones a destacar son las siguientes:

- La restricción más importante a la que están sometidas las puertas es la necesidad de trazabilidad en sus operaciones. Es decir, las puertas cuánticas obligatoriamente deben representar operaciones reversibles, en las que no se pierda información, de tal forma que para cada puerta exista siempre una inversa encargada de realizar la operación contraria.

Esta restricción, sin embargo, permite la definición de las puertas cuánticas mediante el uso de operadores lineales como las matrices.

Una consecuencia directa de esta restricción es la necesidad de usar de qubits auxiliares (llamados qubits ancilla) en algunas operaciones para las que no se cumpliría la trazabilidad si no se almacenasen datos adicionales de alguna forma.

- Una característica más que nos concierne es el hecho de que no existen puertas cuánticas con tiempo de respuesta nulo, ya que todo cambio producido en un qubit ocurre en un plazo de tiempo finito, por pequeño que este pueda ser.

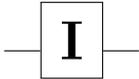
La consecuencia que se extrae de esta restricción es que **todas las puertas cuánticas conllevan un coste operacional**, el cual se ha de tener en cuenta a la hora de realizar operaciones sobre un conjunto de qubits.

Listado de puertas cuánticas.

A continuación, se expondrán las puertas cuánticas más ampliamente conocidas, junto con una breve explicación de la utilidad de cada una, un ejemplo de funcionamiento sobre qubits individuales (si aplica) y sus representaciones gráficas y matriciales:

- **Puerta identidad.** Elemento neutro de las operaciones sobre un qubit. Su representación matricial es la matriz identidad.

$$|0\rangle \longrightarrow |0\rangle, \quad |1\rangle \longrightarrow |1\rangle$$



$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Puertas Pauli.** Representan una rotación de 180° en un eje concreto de la esfera de Bloch. Son puertas de 1 qubit.

- Pauli-X: También conocida como puerta NOT.

$$|0\rangle \longrightarrow |1\rangle, \quad |1\rangle \longrightarrow |0\rangle$$

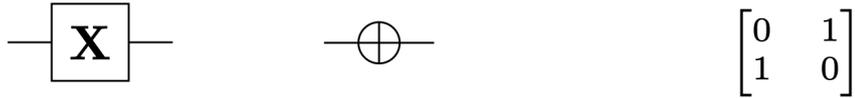


Figura 2.2: Puerta Pauli-X. *Rxtreme*.

◦ Pauli-Y:

$$|0\rangle \longrightarrow -i|1\rangle, \quad |1\rangle \longrightarrow i|0\rangle$$



Figura 2.3: Puerta Pauli-Y. *Rxtreme*.

◦ Pauli-Z:

$$|0\rangle \longrightarrow |0\rangle, \quad |1\rangle \longrightarrow -|1\rangle$$



Figura 2.4: Puerta Pauli-Z. *Rxtreme*.

- **Puerta Hadamard.** Impone un estado de superposición en un qubit. La interpretación espacial de esta puerta es que lleva al vector de un qubit a apuntar al ecuador de la esfera de Bloch.

$$|0\rangle \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle), \quad |1\rangle \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$



Figura 2.5: Puerta Hadamard. *Rxtreme*.

- **Puerta CNOT.** Es el equivalente en computación cuántica a una puerta lógica XOR. El punto sólido en la representación gráfica recibe el nombre de *control*, dado que es el que produce un resultado auxiliar que almacenar en un qubit ancilla (es decir, un qubit que no se utiliza para almacenar el resultado que nos concierne de la operación, sino un subproducto que nos permita mantener la

trazabilidad de la operación), mientras que la circunferencia recibe el nombre de *target*, dado que representa al qubit en el que se almacena el resultado útil de la misma.

Control IN	Target IN	Control OUT	Target OUT
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$

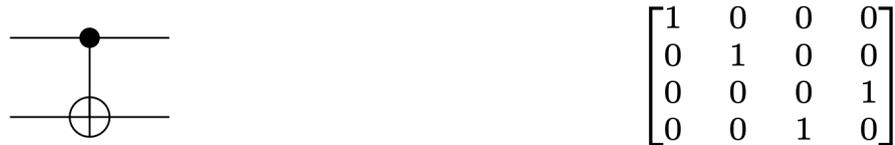


Figura 2.6: Puerta CNOT. *Rxtreme*.

- **Puerta SWAP.** Tal y como indica su nombre, esta puerta representa un intercambio entre los valores de dos qubits.

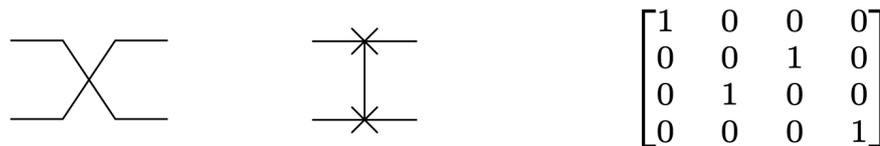


Figura 2.7: Puerta SWAP. *Rxtreme*.

- **Puerta Toffoli.** Puerta cuántica de 3 qubits. Dados a , b y c , qubits de entrada de esta puerta, la salida que devuelve es a , b y $c \oplus ab$, respectivamente.

Ctrl1 IN	Ctrl2 IN	Target IN	Ctrl1 OUT	Ctrl2 OUT	Target OUT
$ 0\rangle$					
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$				

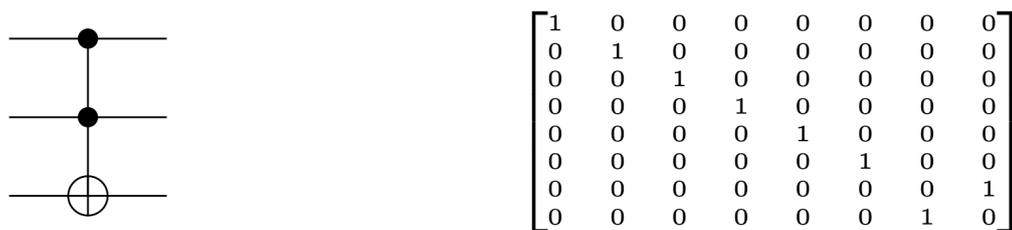


Figura 2.8: Puerta Toffoli. *Rxtreme*.

- **Puertas de rotación.** Son puertas paramétricas. Representan una variación de θ radianes en el eje correspondiente de la esfera de Bloch.

$$\begin{array}{l}
 \boxed{R_x(\theta)} \quad \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & -i \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ -i \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{bmatrix} \\
 \boxed{R_y(\theta)} \quad \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & -\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{bmatrix} \\
 \boxed{R_z(\theta)} \quad \begin{bmatrix} e^{-i\frac{\theta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\theta}{2}} \end{bmatrix}
 \end{array}$$

- **Otras puertas.** Existen infinidad de implementaciones de puertas cuánticas en la actualidad. En esta categoría se incluyen aquellas que se usan con frecuencia pero cuyo comportamiento no resulta sencillo de describir como las anteriores.

◦ Puerta S:

$$\boxed{\mathbf{S}} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$$

Figura 2.9: Puerta S.  *Rxtreme*.

◦ Puerta T:

$$\boxed{\mathbf{T}} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}$$

Figura 2.10: Puerta T.  *Rxtreme*.

Conjuntos de puertas

A la hora de la verdad, existen infinitas puertas cuánticas aplicables sobre un qubit, de tal forma que resultaría imposible definir de forma exhaustiva todas las operaciones posibles existentes. Surge entonces el problema de descomponer una transformación sobre un qubit como un conjunto finito de puertas cuánticas conocidas.

Como respuesta a este dilema se han definido una serie de conjuntos de puertas capaces de aproximar todos los circuitos posibles, entre los que se destacan:

- **Conjunto universal.** Formado por las puertas I, X, Y, Z, H y CNOT.
- **Clifford.** Formado por las puertas H, CNOT y S. A cambio de ser un conjunto más limitado que el universal, resulta altamente eficiente a la hora de simularse.
- **Clifford+T.** Formado por las puertas usadas en el conjunto Clifford y la puerta T. Puede construirse con tolerancia a fallos, aunque define circuitos muy lentos.

Cabe destacar que los conjuntos aquí mostrados son los que se consideran universales a nivel teórico. A la hora de la verdad, no existe un estándar sobre qué conjunto de puertas concreto debe presentar un computador cuántico. Esto desemboca en el hecho de que no es extraño ver computadores comercialmente disponibles en la actualidad que utilizan puertas cuánticas diseñadas por la propia empresa, definiendo un conjunto de puertas propio que es necesario conocer si se quiere utilizar dicho procesador.

Existen ejemplos tanto de computadores que utilizan una mezcla de puertas ampliamente conocidas y otras propias[15, 16], como de computadores cuyo conjunto de operaciones incluye únicamente puertas cuánticas no tratadas en este apartado[17].

2.1.3. Criterios de DiVincenzo

Los llamados criterios de DiVincenzo constituyen una lista de 7 requisitos que deben ser satisfechos para poder implementar un computador cuántico. Reciben el nombre de su creador David P. DiVincenzo. Los primeros 5, relativos al concepto de computación cuántica, fueron definidos en 1998[18], y figuran a continuación:

1. Un sistema físico escalable con una correcta definición de sus qubits.
2. La habilidad de inicializar los qubits en un estado fiduciario simple y fácil de interpretar, por ejemplo $|000\rangle$.
3. Tiempos de decoherencia relevantemente largos, en comparación con el tiempo de operación de las puertas utilizadas. El tiempo de decoherencia representa el plazo temporal máximo para el cual un sistema cuántico funciona de forma deseada. Una vez pasado este tiempo, este se considera “contaminado”, ya que pasa de presentar un comportamiento explicable en términos de mecánica cuántica, a uno explicable en términos de mecánica clásica.

Se trata de un fenómeno inevitable, ya que a pesar de que un sistema perfectamente aislado podría mantener su coherencia indefinidamente, el hecho de realizar mediciones sobre el mismo inherentemente anula este aislamiento.

4. Un conjunto universal de puertas cuánticas.
5. La capacidad de medir los estados finales de cada qubit.

Los dos criterios restantes son relativos al concepto de comunicación cuántica, y fueron definidos en el año 2000[19]:

6. La habilidad de transformar (o *traducir*) los qubits estacionarios (es decir, los que se encuentran en un estado propicio para realizar cálculos) en qubits en movimiento y viceversa.
7. La habilidad de transmitir fielmente los qubits en movimiento de un punto a otro sin perder información.

2.1.4. La búsqueda de un ordenador cuántico universal

Dicho esto, a día de hoy los computadores cuánticos se hallan lejos de alcanzar la universalidad que se busca lograr. Nos encontramos en la era NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum)[20], este título destaca dos de los mayores retos a superar si se quiere lograr dicho objetivo final:

- **Noisy.** Uno de los mayores problemas de la computación cuántica en general es el bajo porcentaje de fidelidad de todas las tecnologías de capa física siendo desarrolladas. El término *noisy* hace referencia principalmente a las interferencias o ruidos a los que son altamente vulnerables los qubits de gran parte de estos acercamientos, para los cuales se aplica la solución temporal de operar a temperaturas criogénicas, lo cual reduce en gran medida dichas interferencias. La idea es lograr dotar a los computadores cuánticos del futuro de mayor inmunidad a este fenómeno, de tal forma que se pueda ir aumentando paulatinamente la temperatura de operación, y por ende reduciendo el consumo de energía necesario para mantener dichas temperaturas.

En las tecnologías de capa física en las que no existen estos problemas, y por tanto se puede operar directamente a temperatura ambiente, existen otra serie de complicaciones específicas de cada implementación que se acaban traduciendo en unas tasas de fidelidad similarmente bajas, por lo que este adjetivo es también aplicable a todas ellas, aunque la razón de esto no sea necesariamente el ruido exterior.

- **Intermediate-Scale.** Los ordenadores actuales presentan un número muy reducido de qubits, y si bien este número ya es en la mayoría de los casos el suficiente para comenzar a resolver problemas prácticos, actualmente esto se traduce en una pérdida en la capacidad de generalización de problemas de dichos ordenadores.

Escalar masivamente el número de qubits es una tarea necesaria, tanto para que los futuros computadores cuánticos sean capaces de resolver un amplio número de problemas, como para poder aplicar algoritmos de corrección de errores mediante técnicas estadísticas que ayuden a subsanar el problema del punto anterior.

Supremacía cuántica

Una meta a corto plazo que existe en la actualidad es la de la supremacía cuántica, o ventaja computacional. Este término fue acuñado en el año 2012 por John Preskill[21], a quien también se le atribuye el término NISQ[20].

Una declaración de supremacía cuántica es la correcta demostración de que un computador cuántico ha logrado resolver en un tiempo relativamente pequeño una tarea que a un superordenador clásico le tomaría más tiempo del que se pueda considerar “factible”. Esta definición es intencionalmente laxa, y no hace ningún tipo de distinción en el tipo de algoritmo utilizado para dicha comparación, por lo que las declaraciones de supremacía cuántica que existen en la actualidad se han demostrado mediante el uso de algoritmos especialmente diseñados para resultar inviables en arquitecturas clásicas, los cuales comúnmente presentan poca o nula utilidad práctica[7, 22–24].

Dada la naturaleza “permissiva” del término, existe cierto escepticismo sobre la utilidad de las declaraciones de ventaja computacional previamente citadas, aunque bien es cierto que una declaración de este estilo promueve la atención mediática al campo de la computación cuántica, cosa que supone una ayuda inestimable a la hora de fomentar las inversiones económicas en el mismo.

2.2. Metodología de búsqueda de fuentes

Dado el carácter de investigación de este trabajo, una de las tareas que se deben documentar debidamente es la recopilación y clasificación de fuentes para la bibliografía del mismo. En esta sección se detallará el proceso seguido a la hora de realizar la búsqueda y selección de dichas fuentes.

Este proceso se puede separar en tres fases claramente diferenciadas:

- **Primera fase (Febrero).** Esta fase comprende la recopilación inicial de datos relativos al dominio del trabajo, centrada principalmente en la adquisición de conocimientos, más que en la obtención de fuentes.

Inicialmente se recibió formación introductoria en forma de la grabación de una charla impartida por mi tutor, y las transparencias usadas en la misma, en la que explicaba los fundamentos de la computación cuántica y exponía las principales tecnologías cuánticas de capa física junto con una serie de métricas asociadas a las mismas[25].

Tras esto, se dio el paso a familiarizarse con las tecnologías que iban a ser utilizadas para la realización del trabajo: Mendeley para la gestión de la bibliografía y Overleaf para la realización de la memoria.

Finalmente, se comenzó a expandir la información obtenida mediante la búsqueda de artículos recientes que hablaran sobre computación cuántica. El proceso

seguido en esta fase se podría calificar como caótico e informal, y principalmente se podrían definir las siguientes actividades en él:

- Búsqueda de datos fuera de referencias académicas, es decir, búsqueda de información relativa a los últimos computadores cuánticos físicamente implementados, mediante el uso de la lista proporcionada en la página de Wikipedia *List of quantum processors*, así como de las fichas técnicas de computadores cuánticos comerciales que pudieron ser encontradas[15, 17].
- Búsqueda de artículos adicionales mediante Mendeley. No se restringió mucho la búsqueda en cuanto a términos de filtrado. Se buscaron artículos centrados en tecnologías individuales, buscando que fueran recientes, relativamente relevantes y que presentaran apartados introductorios a alto nivel para una mayor comprensión de los mismos. Las métricas usadas para medir la relevancia de un artículo en esta fase han sido el número de citas y el de lectores de un artículo, ambas proporcionadas por el buscador de la aplicación; y el año de los artículos, el cual se procuró que fuera lo más reciente posible en todo caso.

A pesar de la informalidad de esta etapa concreta de búsqueda de fuentes, sin duda ha representado una parte esencial en el desarrollo de este trabajo, por lo que se ha visto pertinente y necesario comentarla.

- **Segunda fase (Marzo-Abril).** En esta fase se incluyen las primeras referencias académicas obtenidas teniendo en cuenta el objetivo concreto del trabajo. Una vez concluida la fase anterior, ya se disponían de conocimientos generales suficientes en el dominio del problema como para empezar a dar forma a la memoria del mismo. Es este, por tanto, el momento en el que se definió la estructura del mismo y se comenzaron a redactar los apartados de estudio previo.

En lo que a referencias respecta, he de agradecer la ayuda recibida de parte de mi tutor a la hora de comenzar a buscarlas de forma seria, debido a que previamente al comienzo de este trabajo carecía de experiencia en lo que a búsqueda de artículos científicos se refiere. Con la ayuda de mi tutor, en esta etapa se seleccionaron una serie de artículos de revisión recientes[11, 26–29], de no más de 4 años de antigüedad, sobre los que comenzar a recopilar información. Para cada artículo se resaltaron las referencias bibliográficas que fueron utilizadas para tratar temas relacionados con el objetivo del trabajo, siguiendo un código de prioridad en función de las tecnologías de capa física representadas. Esto es debido a que a lo largo de esta etapa se fueron definiendo paulatinamente las tecnologías a tratar en función de lo aprendido sobre el estado de las mismas a través de estos artículos.

Finalmente, un aspecto más a destacar de esta fase es el aprendizaje sobre la herramienta *Journal Citation Reports* de la empresa Clarivate y las métricas de categorización de revistas científicas, así como la familiarización con el uso de la misma. Estos conocimientos se pudieron poner en práctica de cara a la siguiente y última etapa.

- **Tercera fase (Abril-Junio).** La última fase comprende la recopilación final de fuentes, esta vez de forma ordenada y con objetivos de búsqueda claros. Es en esta fase en la que se añadieron la gran mayoría de las referencias usadas.

De nuevo podemos destacar dos actividades principales pertenecientes a esta etapa de recopilación:

- Fase 3a: Revisión de bibliografías destacadas en la última fase.

La metodología de selección y filtrado utilizada esta vez fue más robusta. Para cada fuente a considerar, se anotaba el cuartil en el que se encuentra la revista en la que fue publicado, independientemente de la categoría a la que pertenezca esta. Esto se utilizó primeramente para descartar a priori las referencias con un valor anotado de Q3 o Q4. Cabe destacar que para este cálculo se utilizó la métrica *Journal Impact Factor* (JIF), proporcionada por la herramienta *Journal Citation Reports*. Por motivos tanto temporales como relativos a la base tan reciente del campo de la que disponía en esta fase, todas las referencias publicadas como libros bajo alguna editorial también fueron directamente descartadas, dejando únicamente aquellas que fueran artículos científicos o actas de conferencias.

Una vez realizado este primer filtrado, se anotaron las fuentes restantes en un fichero excel (proporcionado en el anexo A), en el cual se anotaron, para cada una, los siguientes campos:

- Artículo “Padre” y número de referencia. Artículo del cual proviene el artículo en cuestión, y número que presenta en la bibliografía del mismo. Cabe destacar que estos dos campos solo tienen sentido en el caso en el que el artículo provenga de un artículo de revisión de la fase anterior.
- Categoría. Campo utilizado para ordenar las referencias en función del tema que tratan principalmente.
- Utilidad. En este campo se apuntó un resumen del valor que este aporta (o se espera que aporte) al trabajo. Esta información se infería previamente a la lectura completa del artículo, sirviéndose tanto del resumen del artículo, como del motivo por el que se citó en el artículo de revisión padre (si aplica).
- Revista y cuartil.
- Prioridad. Campo numérico definido de 1 a 4 utilizado para ordenar el proceso de lectura de los artículos del fichero. Elegido en función de los campos categoría y utilidad principalmente. En los casos en los que dos artículos aportaban utilidades similares, se utilizó el campo cuartil a modo de “desempate”, dejando el artículo con un valor menor de cuartil un nivel de prioridad por debajo del otro.
- Veredicto. Campo en el que se decide finalmente si añadir o no un

artículo a la bibliografía tras leerlo detenidamente.

- Justificación. Campo en el que se aporta la razón para la decisión de un veredicto negativo respecto a un artículo concreto. En los casos en los que se decidió añadir un artículo concreto, la justificación se aportó directamente en el campo *Anotaciones* que este presenta en Mendeley una vez añadido a la biblioteca de conocimiento de la herramienta.
- Fase 3b: Búsqueda de artículos que tratasen temas concretos que se querían cubrir en el trabajo y para los que aún se carecían de fuentes suficientes. Esta actividad comenzó una vez revisadas todas las referencias de prioridad 1 de la actividad anterior, tras lo cual se procedió a continuar ambas en paralelo.

En estos casos la metodología seguida fue similar:

1. Según el tema a expandir, se partía de la página de Wikipedia que lo tratase:
 - Para expandir sobre la trayectoria histórica de cada tecnología, *Timeline of quantum computing and communication*.
 - Para ampliar el número de empresas de las que se habla en cada apartado de estado del arte, *List of companies involved in quantum computing or communication*.
 - Para ampliar el número de lenguajes de programación tratados en la sección de revisión de software, *Quantum programming*.
2. Partiendo de la información recopilada en cada caso, se procedió a constatar cada detalle apuntado mediante la búsqueda de información externa que hablara de ellos.
 - En el caso de los apartados de historia de cada tecnología, adicionalmente se utilizaron tanto los artículos de revisión de la fase anterior como los artículos nuevos añadidos en la revisión de bibliografías de los mismos para realizar dicho contraste, prestando especial atención a qué artículos se solían mencionar más en la introducción de estos, donde por norma general se suele dar un resumen de los descubrimientos más importantes de la tecnología a tratar.

Debido a la antigüedad de algunas de las referencias añadidas en este caso, se decidió no utilizar la métrica JIF para realizar una criba previa, lo cual podría dar lugar a ignorar referencias fundamentales que hubieran sido publicadas en revistas que han perdido relevancia con el paso de los años.

- En el caso de los apartados de actualidad de cada tecnología, se procedió a acceder a la página web de cada empresa anotada, y par-

tiendo de ahí se buscaron referencias útiles adicionales, como artículos científicos en los que se anunciaban computadores concretos, o dosieres comerciales con especificaciones de productos ofrecidos.

Cabe destacar que la métrica JIF tampoco se ha podido utilizar en estos casos. Obviando el hecho de que las páginas web y dosieres comerciales son evidentemente ajenos a la métrica, muchas de las referencias recopiladas en este caso podían no haber sido publicadas en revistas de gran envergadura, por lo que de nuevo se estimó contraproducente aplicar esta criba inicial.

- En el caso de la sección de revisión de software, se procedió de forma similar a la actualidad de cada tecnología.

Tras terminar ambos procesos de esta fase, finalmente se disponían de referencias suficientes para abordar todos los contenidos que abarca el trabajo.

Como se ha podido apreciar, la formalidad del proceso de recopilación de fuentes ha ido en aumento de forma paulatina durante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado, llegando a un punto mucho más ordenado en la última de lo que lo estaba en la primera.

Se destaca el aprendizaje sobre la métrica JIF de Journal citation Reports, no únicamente respecto a su utilidad para filtrar fuentes con poca relevancia actual, sino también respecto a la capacidad para desestimarla cuando resulta oportuno no realizar este tipo de filtrado, como ha sido el caso para los temas tratados en la fase 3b.

3. Desarrollo

En este capítulo se desarrollará el contenido del trabajo. Para ello, previamente se expondrán las principales tecnologías cuánticas de capa física de la actualidad, haciendo inciso en sus cualidades distintivas, así como trayectoria histórica y estado del arte. Acto seguido, se expondrán las principales métricas y algoritmos utilizados en la actualidad a la hora de comparar diversos computadores cuánticos. Finalmente, se dedicará una sección al estado actual del software para dichas tecnologías, abogando en todo momento del proceso por mantener la máxima objetividad posible.

3.1. Revisión de tecnologías de capa física

En este apartado se expondrán las tecnologías de capa física de computación cuántica escogidas para el trabajo bajo el objetivo de ilustrar tanto la trayectoria histórica de cada una como el progreso de las mismas logrado en la actualidad.

Para cada tecnología escogida, se explicarán los fundamentos bajo los que están definidas, se proporcionará una breve historia desde que se planteó inicialmente hasta la actualidad, y se expondrá con más detalle el estado actual de los procesadores creados bajo dichas tecnologías.

Finalmente, se dedicará una pequeña sección a otras tecnologías tratadas en menor detalle.

3.1.1. Trampas de iones

Fundamentos

En las tecnologías de capa física que siguen este principio, se definen los estados de un qubit en función de dos estados electrónicos internos de un ion previamente escogidos[30]. El componente que da su nombre a esta tecnología son las trampas electromagnéticas de iones, las cuales permiten aislar individualmente iones (previamente generados a partir de átomos neutrales) mediante la creación de zonas de potencial eléctrico variable, con las que se aprovecha el desequilibrio de cargas de dichos iones para mantenerlos en un punto concreto.

Entrando en detalles, para cada ion se genera un potencial eléctrico en forma de silla, el cual contiene a la partícula en una dirección, pero le permite escapar en la dirección perpendicular a esta. La solución a este problema consiste en generar campos eléctricos variables en el tiempo, de tal forma que nuestro potencial resultante



Figura 3.1: Trampa individual de iones “Pine trap”, de Alpine Quantum Technologies [1].

se encuentre en constante rotación, a una frecuencia lo suficientemente alta como para evitar que nuestro ion pueda escapar en cualquier dirección.

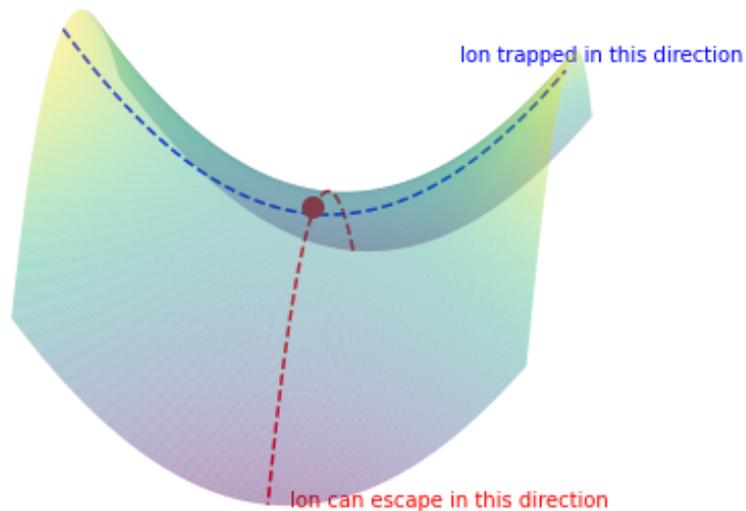


Figura 3.2: Representación gráfica de potencial eléctrico en forma de silla[2]. Trabajando con un ion positivamente cargado, el eje azul representa la región de nuestro potencial que no puede cruzar el ion, y el eje rojo representa la región hacia la que intenta escapar. Para evitar esto, hacemos girar nuestro potencial alrededor de un tercer eje perpendicular a los otros dos.

Se trata de un tipo de tecnología de capa física con varios acercamientos muy heterogéneos, en los que el factor constante que los hace pertenecer a la misma categoría es el ya comentado aislamiento de los distintos iones en celdas individuales:

- En función del fenómeno concreto que se tome como referencia para definir los estados de un qubit, existen cuatro variantes de esta tecnología[30]: qubits de Zeeman, qubits hiperfinos, qubits ópticos (no confundir con las tecnologías de capa física completamente ópticas, que veremos más adelante) y qubits de estructura fina.

- En adición a esto, existen también diversas formas de implementar puertas cuánticas a la hora de utilizar trampas de iones[30]: puertas de Raman, puertas ópticas y puertas de microondas.
- De forma similar, también existen diversos tipos de iones que podemos elegir como objetivos para nuestras trampas[2]. El consenso parece ser utilizar iones monovalentes del Grupo II de la tabla periódica, como Calcio-40, Berilio-9 o Bario-138. Otro ion fuera de este conjunto, el Iterbio-171, es utilizado por las empresas IonQ y Quantinuum en sus computadores.

Todo esto da lugar a muchas posibilidades a la hora de crear un procesador cuántico bajo esta tecnología.

En la actualidad, posiblemente se trata de la tecnología cuántica de capa física con más madurez tecnológica en el mercado, y también resulta la más longeva de esta sección. Como características a destacar, resulta una de las tecnologías que más tiempo de decoherencia y tasas de fidelidad presentan a día de hoy. Esto sumado a que es una de las tecnologías que mayor grado de conectividad presenta entre sus qubits (siendo en algunos casos total)[15, 16, 30], sitúa a los computadores de trampas de iones como una de las tecnologías más fiables y prometedoras que existen.

El mayor problema que parece presentar este acercamiento (y esto parece estar presente independientemente de los componentes utilizados de entre todas las variantes que existen) es la escalabilidad. El progreso en trampas de iones está fuertemente ligado a los avances en los métodos de escalado de qubits, los cuales requieren infraestructuras más complejas para ser utilizados que otras propuestas[30–33].

Historia

A la hora de hablar de la historia de esta tecnología, se estima oportuno hablar primeramente de los fundamentos bajo los que opera. El concepto de “trampa de iones” fue formulado en la década de 1950 por Wolfgang Paul[3]. En este primer acercamiento se lograba atrapar varias partículas cargadas en la misma celda mediante el uso de radiofrecuencias.

Estos componentes comenzaron a ser utilizados en varios ámbitos de la ciencia en la década de 1980, recibiendo el nombre de “trampas de Paul”[34], y constituyen el motivo por el que Wolfgang Paul recibió el premio Nobel de física en 1989.

La primera vez que se comenzó a hablar de trampas de radiofrecuencia en computación cuántica fue en 1995, cuando Juan Ignacio Cirac, de la Universidad de Castilla-La Mancha, y Peter Zoller, de la Universidad de Innsbruck, propusieron una realización experimental de una puerta CNOT mediante esta tecnología. Más tarde ese mismo año, Christopher Monroe et al. lograron demostrar experimentalmente el esquema propuesto por Cirac y Zoller[35], dando paso a la subida en popularidad de esta tecnología de capa física que marcaría formalmente el comienzo de gran número de investigaciones al respecto a nivel global.

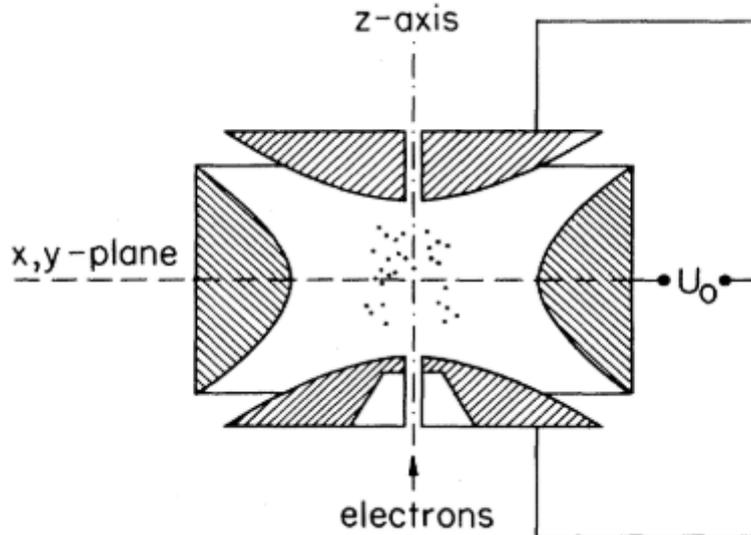


Figura 3.3: Vista esquemática de una trampa de Paul[3]. Nótese la presencia de varias partículas en su interior, en lugar de una sola.

El problema que representaba la propuesta con las trampas de Paul es la inviabilidad de escalar dicho sistema manteniendo todos los qubits en la misma trampa[36], por lo que en los años siguientes se concentraron esfuerzos en utilizar comunicación cuántica para lograr alcanzar computadores de mayor envergadura mediante la conexión de varios sistemas de trampas de iones. Entre estos acercamientos cabe destacar el de David Kielpinski et al., de 2002, en el que se realizaba una distinción entre “zonas de almacenamiento”, en las que se atrapaban individualmente los qubits, y “zonas de interacción”, en las que se realizaban operaciones de varios qubits[31].

Los próximos años estuvieron marcados por el progreso constante en la tecnología, si bien cabe recordar que este progreso destaca por la heterogeneidad de propuestas realizadas en las últimas dos décadas. Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, las tecnologías de trampas de iones presentan diversas disciplinas y acercamientos distintos. A modo de resumen, se destacan algunos de los avances realizados durante este periodo:

- En 2010 se propuso la primera implementación de la variante de trampas ópticas de esta tecnología[37].
- Ese mismo año, se propuso una disposición espacial de trampas de iones que más adelante sería conocida como “pista de carreras”, dada la peculiar forma de esta estructura[38]. A día de hoy sigue siendo una topología ampliamente utilizada[16, 39].
- En 2014 fue propuesto un modelo arquitectónico modular que utilizaba trampas de iones para definir sus qubits “estáticos”, y fotones para definir qubits “transmisores”, utilizados para conectar varios módulos similares, permitiendo un fácil escalado[40].

- En 2017 fue propuesta por primera vez la variante de esta tecnología que funciona con puertas de microondas, las cuales proporcionan una mayor escalabilidad que las puertas basadas en láseres[32].
- También el mismo año fue demostrado experimentalmente el entrelazado múltiple de hasta 5 qubits simultáneos[41], un logro de suma importancia para el escalado de la tecnología, ya que facilita la comunicación cuántica en acercamientos modulares.

La última fecha importante que apremia destacar en este trayecto es 2020, cuando la empresa IonQ, especializada en trampas de iones, anunció la comercialización de uno de sus computadores para realizar operaciones en este a través de la nube, marcando la entrada en el mercado de esta tecnología de capa física a nivel global.

Estado del arte

A continuación figura un listado de las empresas y organizaciones más importantes del sector:

- **AQTION.** El proyecto AQTION (Advanced Quantum computing with Trapped IONs) es una propuesta europea para la construcción de un computador de trampas de iones de gran envergadura. Está coordinado por la Universidad de Innsbruck (la cual recordemos que es de gran relevancia en la historia del campo) y reúne los esfuerzos de varias instituciones académicas, entre las que se encuentra la Universidad Complutense de Madrid, y algunas empresas del sector[42].

Como logro a destacar, en 2021 anunciaron la construcción de un demostrador cuántico (esto es, un ordenador cuántico con fines educativos, orientado a facilitar el aprendizaje en computación cuántica) de 50 qubits, lo cual sería el mayor número de qubits logrado en esta tecnología de capa física una vez esté terminado[33].

- **Alpine Quantum Technologies.** AQT opera en varios apartados del mercado de la computación cuántica.
 - Por un lado, ofrecen la posibilidad de utilizar simuladores cuánticos y varios de sus computadores en la nube[43].
 - Además, ofrecen componentes cuánticos para uso en tecnologías de trampas de iones, entre los que destacan componentes ópticos para el control de qubits y trampas individuales de iones[1].
 - Finalmente, son una empresa activa en la investigación de la tecnología. Su computador más reciente, denominado PINE, presenta 20 qubits con conectividad total y tasas de error *previas* a la aplicación de corrección de errores en el rango $1e-5$ ($1e-7$ tras aplicar dichos algoritmos), opera a temperatura ambiente y consume tan poca energía que es posible alimentarlo

desde un enchufe corriente[44].

- **eleQtron.** Esta empresa, de reciente creación, está centrando sus esfuerzos en desarrollar un computador de trampas de iones que funcione bajo una tecnología desarrollada por la propia empresa, la cual recibe el acertado nombre MAGIC (MAGnetic Gradient Induced Coupling)[45], y consiste en el control de los qubits iónicos mediante el uso de ondas de alta frecuencia.
- **Infineon Technologies.** Infineon es una empresa de gran envergadura y madurez que se especializa en la fabricación de chips electrónicos de todo tipo. Además de esto, también provee diversos componentes utilizados en tecnologías cuánticas de superconductores, semiconductores (puntos cuánticos en silicio) y trampas de iones, con énfasis en esta última. En adición a su rol de proveedor, también presenta un rol activo en la investigación de estas tecnologías de capa física, y otro como consumidor de las mismas, trabajando en la integración de la computación cuántica en el funcionamiento interno de la empresa[46].
- **IonQ.** IonQ es una de las empresas más influyentes en lo que a tecnologías de trampas de iones respecta, y una de las que más modelos de computadores con esta tecnología de capa física ofrece comercialmente a través de la nube: Harmony, de 9 qubits, lanzado en 2020, y Aria y Forte, de 21 y 32 qubits respectivamente, lanzados en 2022.
- **Quantinuum.** En base a sus logros más recientes, se podría afirmar que Quantinuum es en este momento la empresa líder en la tecnología de trampas de iones, y una de las más influyentes en todos los ámbitos de la computación cuántica. Anteriormente llamada Honeywell, esta empresa se especializa en elaborar computadores completos, mejorando el rendimiento de estos al ritmo propuesto de 10 veces al año. Los modelos más destacables son los llamados *H-Series*, de los cuales actualmente existen los siguientes:
 - System Model H1. Lanzado en 2020, es la primera generación de ordenadores H-Series. Actualmente existen dos modelos bajo esta tecnología[15], H1-1 y H1-2, de 20 qubits cada uno y con conectividad total. Son dos de los computadores cuánticos que más volumen cuántico (ver apartado 3.2.5) presentan en la actualidad, habiendo alcanzado la cifra de 2^{15} .
 - System Model H2. Lanzado en 2023, esta es la generación más avanzada de computadores de Quantinuum. Actualmente presenta un único modelo[16], H2-1, el cual presenta 32 qubits totalmente interconectados, y a día de hoy es el computador cuántico con mayor volumen cuántico alcanzado que existe (2^{16})[39].
- **Universal Quantum.** UQ es una empresa con las vistas puestas en el futuro a más largo plazo. Actualmente no ofrece ningún computador como servicio en la nube, pero están trabajando en el desarrollo de un computador modular de trampas de iones que permita el escalado de esta tecnología más allá de los límites que presenta actualmente[47].

3.1.2. Superconductores

Fundamentos

Las tecnologías de superconductores se proponen como una alternativa a las de trampas de iones, bajo la premisa de que resulta complicado atrapar y modificar átomos naturales de forma eficiente[4]. El fenómeno en el que se basan estas tecnologías de capa física es el hecho de que los materiales superconductores tienden a presentar cualidades cuánticas a temperaturas criogénicas, permitiendo así “emular” el funcionamiento de átomos reales.

Entrando en detalles, cuando en un material superconductor se alcanzan temperaturas de alrededor de 10mK, la distribución de cargas positivas del material pasa a organizarse en forma de ondas periódicas, conocidas como *fonones*. Es en las regiones de carga positiva alta donde se forman parejas de electrones conocidas como *pares de Cooper*, las cuales podemos medir para definir los estados de nuestros qubits, siendo el estado de estos que hayamos definido como *fundamental* equivalente al valor $|0\rangle$, y el estado que hayamos definido como *excitado* equivalente al valor $|1\rangle$. Estos qubits pueden ser modificados mediante señales eléctricas en circuitos integrados, dándoles a estos computadores gran semejanza con los clásicos[48].

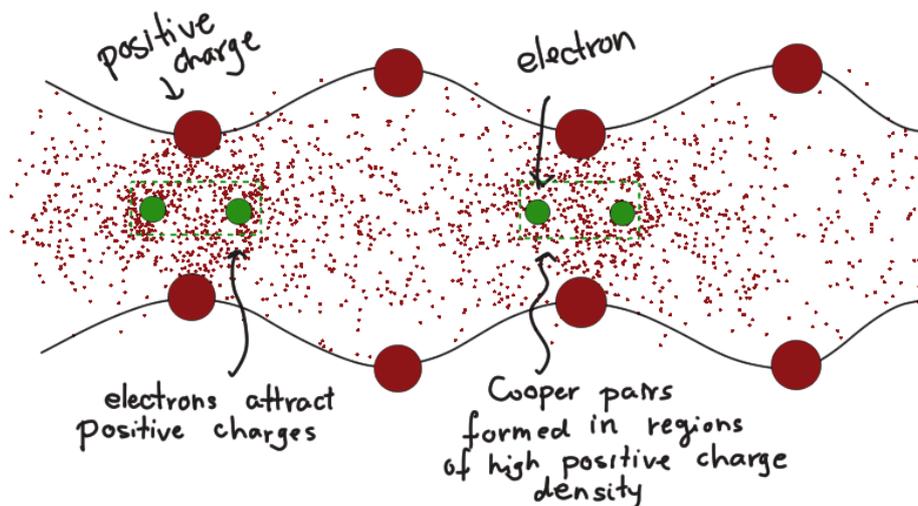


Figura 3.4: Representación gráfica de la formación de parejas de Cooper[4].

Un componente esencial en los circuitos de superconductores son los conocidos como *uniones de Josephson*. Los electrones presentan numerosos estados posibles más allá de los dos que escogamos como fundamental y excitado, por lo que para el correcto uso y modificación de estos estados evitando llevar nuestros electrones a uno no deseado se utilizan diferenciales energéticos no uniformes, emulando de esta forma los estados posibles en átomos naturales, cuyos diferenciales tampoco son uniformes. Es este componente el que nos permite lograr dichas “irregularidades” en los niveles de energía de nuestro circuito de superconductores, permitiendo así que este emule a la perfección el comportamiento cuántico de los átomos[4].

Esta se trata de una tecnología relativamente más reciente que la de trampa de iones, pero no por ello está menos desarrollada. En la actualidad es la tecnología cuántica en la que más empresas invierten simultáneamente, esto se podrá ver claramente en el apartado 3.1.2. De hecho, gran parte del progreso más reciente en esta tecnología ha estado marcado por la rivalidad comercial entre Google e IBM, las cuales especializan su investigación en computación cuántica en el campo de los superconductores.

La gran ventaja que presentan los superconductores frente a otras tecnologías de capa física es la similitud en la fabricación de sus componentes con la de los componentes electrónicos utilizados en las tecnologías CMOS clásicas, lo cual permite a empresas dedicadas a esta última área a expandirse al campo de la computación cuántica con ajustes relativamente pequeños en sus procesos de fabricación, un hecho que también está contribuyendo al rápido avance de los procesadores de esta tecnología[48, 49].

Una desventaja de peso, sin embargo, es la ya mencionada necesidad de llevar los superconductores a temperaturas criogénicas para lograr que presenten propiedades cuánticas. Esta es actualmente la tecnología de capa física que a más bajas temperaturas funciona, y se ha de tener en cuenta que alcanzar dichas temperaturas conlleva un coste energético más elevado.

Historia

De forma similar a las trampas de iones, a la hora de hablar de esta tecnología apremia comentar previamente la trayectoria histórica de los componentes y principios en los que está basada.

El primer concepto relevante relativo a esta tecnología, las parejas de Cooper, reciben su nombre del de quien las describió en primera instancia en 1956, Leon Cooper[50]. Este evento es de suma importancia, no solo para este ámbito de la computación cuántica, sino para muchos otros ámbitos de la ciencia, ya que todo el fenómeno de la superconductividad funciona partiendo de este principio.

El siguiente hecho trascendental para los superconductores es la creación del componente conocido como *unión de Josephson*, nombrado en honor a quien predijo su funcionamiento en 1962, Brian Josephson[51]. No fue, sin embargo, hasta el año siguiente cuando se pudo demostrar experimentalmente este concepto[52]. Recordemos que las uniones de Josephson constituyen uno de los componentes más esenciales para las tecnologías de superconductores, hasta el punto de que sin estas no es posible emular correctamente el funcionamiento de átomos naturales mediante pares de Cooper[4].

Una vez expuestos los anteriores eventos, el próximo punto crítico en la historia de la tecnología no es otro que la primera demostración teórica de la caracterización de un qubit utilizando circuitos de uniones de Josephson, en 1999, de la mano de Yasunobu Nakamura et al.[53]. Este hecho constituye el primer contacto de la computación cuántica con los fundamentos de los superconductores, y el esquema propuesto en este artículo pasaría a recibir el nombre de “Caja de pares de Cooper”, sugerido por los autores del mismo.

Tras aquel artículo de 1999, el progreso en la tecnología estuvo relativamente pausado, sin abundancia de grandes descubrimientos, hasta el año 2007, cuando se alcanzaron dos importantes logros:

- Por una parte, Robert J. Schoelkopf et al. en la Universidad de Yale diseñaron el circuito conocido como transmón[54], una mejora del diseño de caja de pares de Cooper que presenta una menor sensibilidad al ruido. Este circuito pasaría a ser el estándar en ordenadores de superconductores durante los siguientes años.
- Por otro lado, este fue el año en el que se logró realizar por primera vez la implementación de una puerta CNOT en la tecnología, de mano de Jelle Plantenberg et al., en la Universidad de Tecnología de Delft, Países Bajos[55]. Cabe recordar que, dada la importancia de la puerta CNOT a la hora de definir un conjunto de puertas universal, este supone un gran logro para cualquier tecnología de capa física emergente.

Los años siguientes a los anteriores eventos estuvieron marcados por el enfoque en la corrección de errores[56–58], un problema que resulta especialmente visible en esta tecnología, debido a que es una de las más sensibles a interferencias externas.

El próximo punto de inflexión en esta trayectoria sucedió en 2016 cuando IBM anunció su servicio IBM Quantum Experience, mediante el cual ofrecía acceso a través de la nube a uno de sus computadores de 5 qubits. Esta constituye la primera vez en la historia de la computación cuántica, independientemente de la tecnología de capa física utilizada, que se ofrecía un servicio como este. La comunidad científica no dudó en dar uso a este anuncio, y en los próximos meses se produjo un flujo de artículos de parte de laboratorios que no disponían de computadores cuánticos propios pero que investigaban en el área, algunos de estos incluso demostrando varias teorías en el mismo artículo [9, 59].

La última parada de este recorrido por la historia de los computadores de superconductores es 2019, cuando Google afirmó haber alcanzado supremacía cuántica con su procesador de transmones más reciente, el Sycamore, el cual presentaba 53 qubits[17]. En un artículo publicado en la página web de la NASA, con la cual trabaja de forma conjunta, se ponía a prueba al Sycamore resolviendo un problema conocido como muestreo aleatorio de circuitos, logrando resolverlo en alrededor de 200 segundos, y afirmaban que el supercomputador clásico Summit necesitaría “10.000 años” para lograr dar con la solución del algoritmo[22]. La validez de este artículo, sin embargo, fue puesta en duda rápidamente por parte de IBM, alegando que el procesador Sycamore solo era capaz de resolver el algoritmo presentado debido a que había sido construido con ello en mente y carecía de capacidad de generalizar a otros problemas. Para más inri, tan solo un mes después de este anuncio varios ingenieros de IBM publicaron un artículo en el que afirmaban que, tras optimizar el algoritmo a resolver, el Summit era capaz de dar con la solución en aproximadamente dos días y medio[60], lo cual, aunque seguía siendo comparativamente mucho más lento que los tiempos del Sycamore, resultaba factible, terminando de desmentir las afirmaciones de Google sobre supremacía cuántica.

Poco después de esta controversia Google acabó retirando su artículo de la página de la NASA, y a día de hoy la validez de su afirmación sigue puesta en duda, pero es indiscutible que la “carrera mediática” por anunciar la supremacía cuántica la ganaron con creces, y este hecho es el verdaderamente importante a la hora de referirnos a la tecnología en sí. El anuncio de Google, aunque poco después fuera desmentido, indudablemente puso a los computadores cuánticos en la mira mediática, y esta posiblemente sea la razón por la que las tecnologías de superconductores son las que reciben mayor atención por las empresas del sector, basta con comprobar la envergadura del apartado siguiente frente al de la tecnología anterior.

Estado del arte

A continuación figura un listado de las empresas y organizaciones más importantes del sector:

- **Alice & Bob.** Esta empresa tiene como objetivo lograr una metodología robusta y escalable de corrección de errores en superconductores[61] y, acto seguido, centrar sus esfuerzos en ponerla en práctica mediante la construcción de un computador de gran escala.
- **Amazon.** Amazon tiene un papel muy activo en el panorama de la computación cuántica, y esto lo demuestran la gran cantidad de iniciativas en investigación y servicios que ofertan. Se destacan los siguientes tres:
 - El Centro AWS para Computación Cuántica es un laboratorio en el que se investiga la tecnología de superconductores bajo el objetivo de construir un computador propio[62].
 - El servicio Amazon Braket de AWS es un sistema de administración de acceso a computadores cuánticos a través de la nube[63]. Este servicio, ideado bajo la idea de acelerar la investigación en computación cuántica, permite a otras empresas del sector gestionar la oferta de computadores que ponen a disposición de sus clientes, cumpliendo el papel de intermediario. Actualmente Amazon Braket ofrece acceso a los computadores de 5 empresas distintas: IonQ, Oxford Quantum Circuits, Rigetti, Xanadu y QuEra, lo cual suma un total de 4 tecnologías cuánticas de capa física diferentes.
 - Finalmente, la iniciativa Amazon Quantum Solutions Lab promueve la formación de grupos de investigación en computación cuántica que compartan un mismo objetivo o idea a desarrollar, facilitando el aprendizaje y la obtención de resultados, ya sea con motivos empresariales o personales[64].
- **Bleximo.** Esta empresa de reciente creación elabora computadores de superconductores con un enfoque algo distinto: mientras que la mayoría de empresas se centran en el escalado de la tecnología y la corrección de errores con el objetivo de lograr la universalidad en la misma, Bleximo fabrica computadores con características específicas para cada aplicación, sacrificando la capacidad de abs-

tracción de sus productos a cambio de un mayor rendimiento de los mismos[65].

- **Google QuAIL.** Quantum Artificial Intelligence Laboratory (QuAIL) es el nombre del laboratorio fundado en colaboración entre Google, NASA y USRA en 2013[66]. Como bien describe el nombre, el principal enfoque de este laboratorio es investigar cómo la computación cuántica puede ayudar con diversos problemas de inteligencia artificial y aprendizaje máquina. Inicialmente trabajaban con los ordenadores de D-Wave, una empresa de la que se hablará en el apartado 3.1.4, pero actualmente utilizan los computadores propios de Google.

Cabe destacar que desde el anuncio del Sycamore en 2019 no han anunciado nuevos modelos, por lo que en lo que a hardware respecta no están tan a la cabeza como hace unos años, si bien tienen un papel activo en el desarrollo de software y lenguajes de programación.

- **IBM.** IBM se sitúa actualmente de forma indiscutible a la cabeza del progreso en esta tecnología. Su computador más reciente, el Osprey, presenta un total de 433 qubits[5], y en la hoja de ruta de la empresa[67], la cual se proporciona en el anexo B, podemos ver datos muy prometedores, como el computador Condor, de 1.121 qubits, el cual debería ser anunciado en algún punto de este año, o el Kookaburra, de 4.158 qubits, el cual está planificado para 2025.

A día de hoy IBM es la empresa que ha logrado alcanzar el mayor volumen cuántico en la tecnología (ver apartado 3.2.5), siendo este de 2^9 [68]. Cabe comentar, sin embargo, que este logro no ha sido formalizado aún en ningún artículo científico, por lo que consta como un anuncio informal o divulgativo.

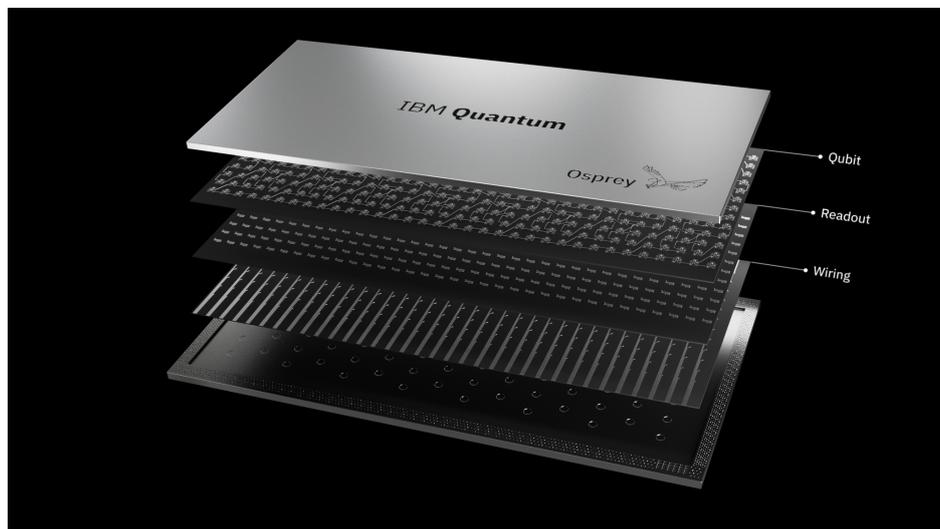


Figura 3.5: Esquema del procesador Osprey de IBM[5].

- **imec.** Esta empresa se especializa en la fabricación de componentes de tecnologías CMOS, es decir, componentes electrónicos no cuánticos basados en semiconductores. También tienen un papel activo en la investigación de diversas tecnologías cuánticas de capa física, entre las que destacan las de puntos cuánticos en silicio y superconductores. En lo relativo a esta última, actualmente trabajan en una

metodología para la fabricación de uniones de Josephson utilizando únicamente materiales y técnicas compatibles con las tecnologías CMOS actuales, pudiendo así aprovechar la fiabilidad y reproductibilidad ofrecida por estas[49].

- **IQM Quantum Computers.** De forma similar a Bleximo, en IQM se fabrican computadores de superconductores con características específicas para cada aplicación. Dicho esto, en IQM ofrecen gran variedad de servicios relacionados con la manufactura de computadores cuánticos, bajo la premisa de que disponer localmente de un ordenador resulta más fiable que depender de la disponibilidad de servicios en la nube.

En el folleto de productos de la empresa[69] se destacan los siguientes: servicios de instalación de sus computadores, pudiendo elegir el conjunto de componentes internos de entre los que fabrica la empresa; actualización de los componentes de computadores ya instalados; soluciones software para operar sus computadores, así como para integrarlos en la infraestructura de la empresa cliente.

Adicionalmente a lo arriba expuesto, esta empresa pone también a disposición de ingenieros y estudiantes de computación cuántica un curso gratuito en el que aprender los fundamentos de esta, llamado IQM Academy[70].

- **Oxford Quantum Circuits.** OQC se dedica a la manufactura de computadores completos, mediante una tecnología propietaria denominada Coaxmon[71]. El Coaxmon es una arquitectura de procesador tridimensional que permite un fácil escalado del procesador sin comprometer la calidad de sus operaciones. Cabe recordar que OQC es una de las empresas que ofrecen acceso a sus ordenadores a través de Amazon Braket.
- **Quantum Circuits Inc.** Esta empresa no ofrece ningún producto al público aún. Están desarrollando una metodología de escalado mediante la unión de varios módulos de superconductores[72]. Cada módulo dispone de corrección de errores incorporada, de forma que no se tienen que aplicar algoritmos mediante software para ello. Adicionalmente, están trabajando en el desarrollo de un entorno software completo para sus futuros computadores.
- **Raytheon BBN.** Raytheon es una empresa con más de 70 años de veteranía en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías. Entre los logros que se atribuyen a esta corporación se destacan la creación de ARPANET (el precursor de internet) o el envío del primer email[73]. No resulta ningún misterio que actualmente se dediquen también a la investigación en computación cuántica.

Los campos en los que se especializan son[74]: tecnologías de superconductores, computación clásica criogénica (campo necesario para realizar una arquitectura híbrida, ya que los computadores clásicos actuales no operan correctamente a las temperaturas a las que deben estar refrigerados los de superconductores), desarrollo de sensores cuánticos y comunicación cuántica mediante componentes ópticos.

- **Rigetti Computing.** Rigetti es, junto con Google e IBM, una de las empresas

que se encuentran indiscutiblemente a la cabeza de la innovación en el sector. Con un historial de 12 modelos de procesador desarrollados en el plazo de 6 años[75], mantienen un progreso constante en la mejora de sus productos.

El procesador más reciente de esta empresa recibe el nombre de Aspen-M-3, el cual fue desplegado el 2 de diciembre de 2022, y presenta un total de 80 qubits. Su próximo computador, denominado Ankaa-1, se encuentra desplegado de forma interna en los laboratorios de la compañía para realización de pruebas y se espera añadir al catálogo de procesadores disponibles en Amazon Braket para mediados de este año[76].

- **SEEqc.** Esta empresa se encuentra actualmente desarrollando e implementando diversas tecnologías aplicables a tecnologías de superconductores, con vistas a comercializar sus propios computadores una vez finalizada la construcción de estos. La filosofía de construcción es específica para cada aplicación, y también desarrollan modelos híbridos de computación cuántica y clásica[77].
- **Silicofeller.** De forma similar a Amazon Braket, esta empresa también gestiona el acceso a los computadores de Rigetti a través de la nube, y también ofrece diversos cursos de aprendizaje para lenguajes de programación cuánticos tales como Qisqit, Q# o Cirq. Además de esto, ofrecen un servicio de consultoría en computación cuántica[78].
- **USTC.** Aunque la Universidad de Ciencia y Tecnología de China centra sus esfuerzos en las tecnologías fotónicas, también investigan las de superconductores. En junio de 2021 anunciaron haber demostrado supremacía cuántica con su computador Zuchongzhi 2.0, de 66 qubits, el cual logró ejecutar en 1,2h lo que a un supercomputador clásico le tomaría aproximadamente 8 años[79]. Además, el algoritmo utilizado para este cálculo fue el de muestreo aleatorio de circuitos, el mismo escogido por Google para la demostración del Sycamore, excepto que con un grado de complejidad computacional entre 100 y 1000 veces mayor.

Tres meses después de esto, anunciaron una nueva versión de su computador, el Zuchongzhi 2.1, el cual además de mejorar sus tasas de fidelidad, fue capaz de resolver el mismo algoritmo, con un coste computacional incrementado (aproximadamente 1.000.000 veces mayor al resuelto por el Sycamore), en 4,2h, tarea que tomaría a un supercomputador clásico aproximadamente $4,8 * 10^4$ años[24].

3.1.3. Qubits fotónicos

Fundamentos

Las tecnologías ópticas, o de qubits fotónicos, reciben el nombre precisamente del hecho de que en estas la abstracción del qubit se define como la polarización de un fotón, es decir, el valor de un qubit se declara en función de si dicho fotón se mide como horizontal o vertical, representando los valores $|0\rangle$ y $|1\rangle$ respectivamente[6].

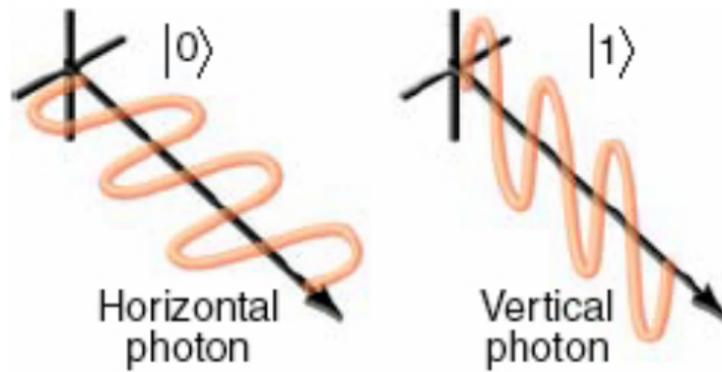


Figura 3.6: Interpretación gráfica de un qubit fotónico[6].

La gran característica diferenciativa de esta tecnología de capa física frente a las dos previamente mostradas es el hecho de que los fotones son inherentemente inmunes al ruido que tanto esfuerzo requiere para contrarrestar en estas. Esto se traduce en la innecesidad de operar a temperaturas criogénicas para aumentar la fidelidad, permitiendo que los computadores implementados mediante esta tecnología puedan operar a temperatura ambiente[6, 80, 81].

No obstante, también presenta sus propios problemas en lo relativo a la fidelidad de puertas (apremia más comentarlos en el siguiente apartado), los cuales se podría decir que contrarrestan lo hablado en el párrafo anterior.

Comparativamente hablando, las tecnologías fotónicas son bastante más recientes que las de superconductores y trampas de iones. No obstante, esta afirmación se refiere únicamente al concepto de tecnologías de capa física basadas totalmente en mecanismos ópticos, dado que el uso de componentes ópticos en ordenadores de otras tecnologías cuánticas es una práctica que se lleva haciendo desde años antes de que se planteara la primera implementación completamente fotónica. Esto viene a significar que, aunque técnicamente no sea una tecnología tan madura como las otras dos tratadas, lo cierto es que sería poco acertado considerar este campo de la computación cuántica como *inmaduro*.

Historia

La historia de los computadores fotónicos está cargada de altos y bajos muy marcados. Es por esto que podemos fácilmente realizar un resumen de la misma utilizando dichos puntos críticos como nexos.

La primera fecha que debemos destacar en la trayectoria de este campo es 1988, cuando Kazuhiro Igeta y Yoshihisa Yamamoto proponen la realización física de un computador cuántico en el que se utilizan componentes fotónicos para protocolos de transmisión de qubits[82], y aunque este artículo concreto no lograra tener mucha tracción, bien es cierto que marcó un precedente. A día de hoy, se siguen utilizando componentes fotónicos para desempeñar esta tarea.

La década siguiente no hubo mucho avance en el campo más allá de la mejora de dichos componentes. Si bien es cierto que ya estaba en el aire la duda de si era posible llevar a cabo un acercamiento puramente fotónico, los intentos realizados en estos años se topaban con el mismo muro: las tecnologías fotónicas no son deterministas[83]. Los componentes encargados de producir fotones tienen una probabilidad entre el 5 y el 10 % de realizar esta tarea con resultados impredecibles[81]. Los intentos realizados de puertas cuánticas fotónicas parecen presentar el mismo predicamento[6]. La existencia de componentes que inducen no determinismo en un circuito hace que la fidelidad de sus operaciones se desplome exponencialmente con cada cálculo. Este es el problema que se comentó en el apartado anterior. A pesar de que las tecnologías fotónicas no sufren los problemas de interferencias de las otras dos y pueden operar a temperatura ambiente, lo cierto es que tienen sus propios problemas con los que lidiar en lo relativo a las tasas de fidelidad, y esta es la razón por la que durante más de una década las tecnologías fotónicas se consideraron completamente inviables.

El panorama dio un vuelco de 180 grados en 2001, cuando surgieron no una, sino dos grandes propuestas para alcanzar la viabilidad de la tecnología. Por una parte, Emanuel H. Knill et al. definieron por primera vez una propuesta teóricamente viable de lo que llevaba años planteado: un computador cuántico realizado en su totalidad con fuentes y detectores fotónicos, y circuitos ópticos lineales relativamente sencillos[83]. El mismo año, Robert Raussendorf y Hans Jürgen Briegel definieron una metodología para lograr aproximar un funcionamiento determinista de un sistema fotónico, mediante la creación de un clúster de qubits masivamente entrelazados previamente al comienzo de las operaciones a realizar, lo cual reducía enormemente los problemas anteriormente comentados[84].

La siguiente fecha a destacar en este apartado sería 2004. Partiendo de los dos estudios tan trascendentales de tres años atrás, Michael A. Nielsen propuso un acercamiento a la computación cuántica óptica combinando ideas de ambos [85].

2008 fue un año que, al igual que 2001, marcó un antes y un después en el campo de las tecnologías fotónicas. En este año se demostró por primera vez el funcionamiento de una puerta CNOT en un circuito integrado utilizando principios fotónicos[86], dando lugar a la siguiente etapa en el curso de la tecnología: el paso de las demostraciones teóricas a las prácticas. Tras este punto de inflexión el progreso en el campo pasó a ser más constante y paulatino durante la década siguiente.

La última fecha importante a destacar en esta trayectoria viene a ser 2020, cuando un grupo de investigadores de la Universidad de Ciencia y Tecnología de China (USTC), liderado por Pan Jian-Wei y Lu Chaoyang, logró construir un computador cuántico fotónico que logró demostrar supremacía cuántica[23], algo que hasta la fecha solo había reclamado el Sycamore de Google. El Jiuzhang, ordenador cuyo nombre honoraba el un famoso texto matemático chino, poseía 76 qubits y era capaz de ejecutar el algoritmo de Gaussian Boson Sampling (ver 3.2.5) a una velocidad que no solo era inalcanzable para cualquier superordenador clásico, sino que también desempeñaba mejor esta tarea que sus ordenadores cuánticos contemporáneos.

Si bien esto último es un gran logro, cabe destacar que el Jiuzhang estaba expre-

samente configurado para resolver dicho algoritmo, y no era capaz de resolver ningún otro problema, mientras que muchos de los computadores cuánticos a los que superaba en la ejecución del Boson Sampling, incluidos los de la empresa Xanadu, con los que compartía principios arquitectónicos (se hablará más a fondo de esto en el siguiente apartado), tenían cierta flexibilidad a la hora de ser programados para realizar otras tareas. No obstante, este evento fue capaz de poner a las tecnologías fotónicas, las cuales llevaban décadas en segundo plano, por primera vez en el foco de mira. Es a partir de este punto que se puede considerar que las tecnologías fotónicas son uno de los acercamientos que van a la cabeza del progreso en el campo de la computación cuántica.

Estado del arte

A continuación figura un listado de las empresas y organizaciones más importantes del sector:

- **NTT Laboratories.** Los laboratorios de NTT investigan un amplio abanico de disciplinas de base cuántica, siendo la computación fotónica una de estas. No tienen carácter comercial.
- **PsiQuantum.** Esta empresa me genera grandes expectativas. Si bien es cierto que no tiene ningún logro trascendental que lucir de momento, cumple una labor complementaria a las demás que se tratarán a continuación. PsiQuantum tiene la mira puesta en la última estación del trayecto marcado para la computación cuántica: la construcción de un ordenador cuántico universal. Es por esto que sus esfuerzos actuales están centrados en el escalado masivo de las tecnologías fotónicas, bajo el objetivo de alcanzar cuanto antes la meta del millón de qubits, pudiendo aplicar metodologías de corrección de errores a una escala que permita hacer realidad dicha meta[87].

Si se me permite hacer un comentario personal al respecto, por muy noble que suene el objetivo de esta empresa, hay que reconocer que los riesgos que conlleva cargar con una meta a tan largo plazo evitando centrarse en logros intermedios son altos. La verdadera razón por la que tengo esperanzas en este proyecto es que las personas que se encuentran a la cabeza han tenido gran importancia en el área durante años, concretamente se destaca a Jeremy O'Brien, a quien se atribuyen varias de las referencias utilizadas para el apartado de esta tecnología[6, 48, 88]. Otros nombres importantes son Mark Thompson, Terry Rudolph y Pete Shadbolt, todos ellos con gran cantidad de artículos publicados en el área.

- **Quandela.** Quandela es una empresa polivalente en el sector. Principalmente se dedica a la manufactura de gran variedad de componentes ópticos: fuentes de fotones, demultiplexores fotónicos, unidades de control de qubits fotónicos, módulos de moldeo de láseres, etc[89]., aunque también ofrecen una plataforma de código abierto para el desarrollo de software para ordenadores fotónicos bajo el nombre *Perceval*[90]. Además, también ofrecen servicio de manufactura de ordenadores cuánticos modulares en el rango de 2-12 qubits[91].

- **USTC.** Tras el éxito del Jiuzhang, la Universidad de Ciencia y Tecnología de China ha continuado investigando en el área fotónica. En 2021 anunciaron la nueva iteración de su anterior ordenador: El Jiuzhang 2.0, el cual presenta 113 qubits y cierto grado de programabilidad, al contrario que la versión anterior[92].
- **Xanadu.** Se podría decir que Xanadu es la empresa que actualmente se encuentra a la cabeza de las tecnologías de capa física ópticas. Fundada en 2016 y con sede en Toronto, esta empresa canadiense desarrolla tanto hardware como software. En el ámbito de hardware, podemos destacar los siguientes avances:
 - Los ordenadores X-Series son un conjunto de computadores ópticos completamente programables diseñados para ser utilizados a demanda a través de la nube[93].
 - El ordenador Borealis presenta 216 qubits, es completamente programable y ha reclamado supremacía cuántica[7]. A día de hoy es indiscutiblemente el mejor computador fotónico que existe, y durante un tiempo tras su creación cargó con el título de mejor ordenador cuántico, hasta que el Osprey de IBM reclamó el título luciendo aproximadamente el doble de qubits.

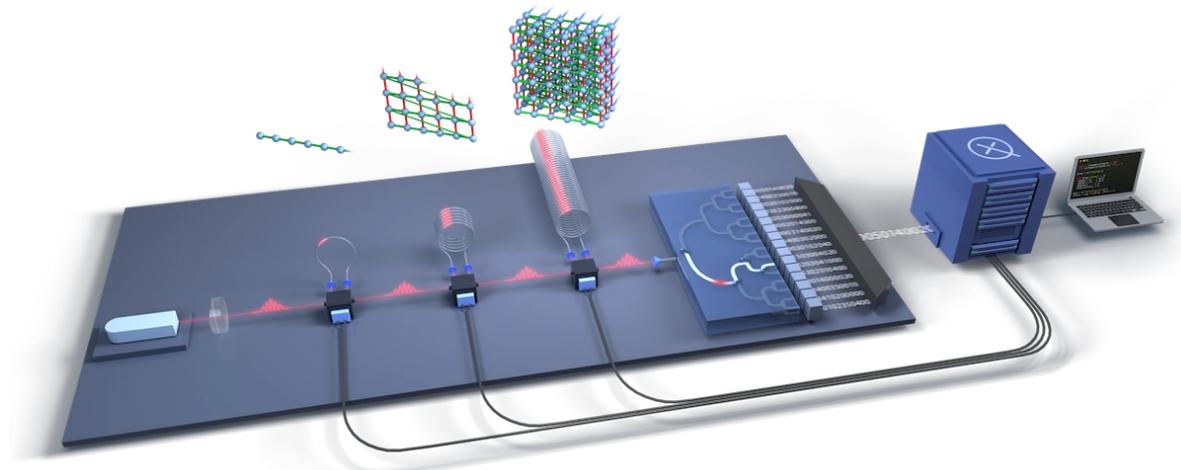


Figura 3.7: El computador fotónico Borealis de Xanadu[7].

- **XeedQ.** Esta empresa está fijando sus esfuerzos en la manufactura de computadores cuánticos personales, de tamaño reducido y limitado número de qubits. Actualmente ofrecen los modelos *XQ1* y *XQ1i*, los cuales presentan un número mínimo de 4 qubits, con posibilidad de ampliar a más, y prometen escalar paulatinamente las capacidades de los modelos ofrecidos hasta la meta de 256 qubits para 2026[94].
- **Empresas dedicadas a la manufactura de componentes.** Además de las anteriormente comentadas, existe un número de empresas del sector que se dedican únicamente a la manufactura de componentes ópticos concretos, por lo que no poseen ordenadores completos como tal. No obstante, son igualmente una parte importante del área fotónica. Entre este tipo de empresas se destacan las siguientes:

- AEGIQ es una empresa que en este momento se especializa en fuentes de emisión de fotones, aunque se plantean ampliar el alcance de su oferta[95].
- En AUREA Technology fabrican dispositivos de medición de fotones[96].
- Nu Quantum se especializa en el desarrollo de componentes y protocolos para la creación de redes de comunicación fotónicas, algo que recordemos no es únicamente útil para el ámbito de las tecnologías de capa física ópticas, sino que es usado en gran variedad de disciplinas cuánticas[97].

3.1.4. Otras tecnologías de capa física

A fecha de 2022, existen numerosos acercamientos distintos a la hora de implementar una capa física de qubits, y realizar una búsqueda exhaustiva de los mismos supondría un alejamiento de lo que se entiende originalmente como el alcance de este trabajo. No obstante, en este apartado se enumerarán otras tecnologías de capa física prominentes actualmente con motivo de complementar a la selección anteriormente expuesta:

- **Qubits topológicos.** Las tecnologías topológicas (también comúnmente llamadas tecnologías aniónicas para evitar confusión con el concepto de topología en el resto de tecnologías[36]) son actualmente uno de los acercamientos más prometedores y revolucionarios a la computación cuántica. Como definición de qubit, utilizan el spin (una propiedad cuántica intrínseca de las partículas subatómicas relacionada con el electromagnetismo) de un fermión de Majorana[25].

Su mayor cualidad distintiva frente a las demás tecnologías de capa física es el hecho de que no se requiere la aplicación activa de técnicas de corrección de errores, dado que los sistemas diseñados bajo esta tecnología están inherentemente protegidos de la decoherencia[26]. Otro detalle a comentar es el hecho de que esta tecnología resulta ser el enfoque de Microsoft en el campo de la computación cuántica, y es en la que se especializa su laboratorio Microsoft Research Station Q[98].

Habiendo expuesto esto cabría pensar que merece la pena tratar este acercamiento con más detalle, sin embargo a día de hoy posiblemente se trate de uno de los campos de estudio más recientes de los aquí mostrados, y aunque el progreso en el mismo es continuo y prometedor, se ha estimado que aún no ha alcanzado un estado de madurez suficiente como para poder compararse justamente con el resto de las tecnologías de capa física elegidas.

No obstante, se hace énfasis en lo dicho respecto al progreso en este acercamiento. Si se realizase una tarea de documentación similar a esta en un par de años, informarse sobre el estado de este campo debería ser una de las primeras tareas a realizar.

- **Implementaciones basadas en diamante.** Las impurezas en diamantes han

mostrado ser un candidato útil para la definición de qubits, siendo los centros nitrógeno-vacantes (NV-centers) el acercamiento más estudiado en este campo [48].

La principal característica de estas tecnologías es la facilidad que presentan dichos centros a la hora de ser entrelazados con fotones[36], resultando uno de los métodos más efectivos a la hora de “transmitir” la información entre qubits estacionarios (átomos, superconductores, etc.) y qubits móviles (fotones), un proceso necesario a la hora de implementar comunicación cuántica en cualquier tecnología de capa física.

A pesar de esta notable ventaja, se trata de un tipo de tecnología mucho menos desarrollado que el resto, y aún no se han logrado alcanzar tasas de fidelidad útiles en los computadores realizados mediante esta tecnología (aunque sí que existen demostraciones experimentales de computadores realizados completamente bajo esta tecnología[99]). No obstante, teniendo en cuenta que se requieren infraestructuras mucho menos sofisticadas al utilizar diamantes que con otros acercamientos, se espera una mayor afluencia de arquitecturas híbridas en el futuro que combinen esta tecnología para comunicaciones junto con otras alternativas para computación[36].

- **Puntos en silicio.** Los acercamientos de esta tecnología de capa física se basan en atrapar electrones utilizando corrientes electromagnéticas en materiales semiconductores, emulando de esta forma el funcionamiento de los átomos naturales, de forma similar a como funcionan las tecnologías de superconductores[36, 48].

También de forma homóloga a los superconductores, los procesadores de esta tecnología guardan suficiente parentesco con los clásicos como para permitir diseñar técnicas de fabricación similares, facilitando la optimización de estos procesos (recordemos que esta tecnología es otra a la que se dedica la empresa fabricante de chips CMOS imec).

Queda destacar que esta tecnología es aún muy reciente (si bien no tanto como la topológica), por lo que no se dispone de suficiente información como para tratarla en más detalle[36].

- **Resonancia magnética nuclear.** Nuclear Magnetic Resonance, o NMR, es el nombre que reciben las emisiones de campos magnéticos que se producen en núcleos atómicos en respuesta a campos magnéticos externos. Las características intrínsecas de estas emisiones magnéticas pueden ser codificadas para definir qubits, los cuales pueden ser alterados externamente mediante la aplicación de resonancias por radio-frecuencias[80]. Estos son los fundamentos en los que se basan las tecnologías cuánticas de capa física de este campo.

La razón por la que no se ha introducido esta tecnología en la comparativa es el hecho de que no se obtuvo suficiente información al respecto durante las dos primeras fases de recopilación de fuentes, sino que se dio con ella durante la búsqueda de otras tecnologías una vez definido el conjunto sobre el que trabajar.

- Átomos neutrales.** De forma similar al acercamiento de las trampas de iones, en esta tecnología de capa física se define el concepto de qubit en base a estados electromagnéticos internos concretos de cada átomo, y para su correcta lectura y modificación, estos deben ser aislados de alguna forma. Es en este punto donde difieren ambas tecnologías: mientras que las de trampas de iones se sirven de campos electromagnéticos para esta tarea, los átomos neutrales pueden ser atrapados en una estructura geométrica de láseres cruzados, una red óptica[48]. Más allá de esta diferencia, comparte las ventajas de usar átomos naturales con la otra tecnología: tiempos de decoherencia largos y tasas de fidelidad altas.

Una característica curiosa derivada del método de captura de los átomos es el alto grado de configurabilidad de la disposición espacial de los mismos. Esto sumado al hecho de que se pueden aplicar puertas cuánticas de dos qubits entre dos átomos cercanos cualesquiera da lugar a un gran número de posibilidades a la hora de idear la disposición inicial de estos[8] (aunque también deriva en la necesidad de optimizar la misma).

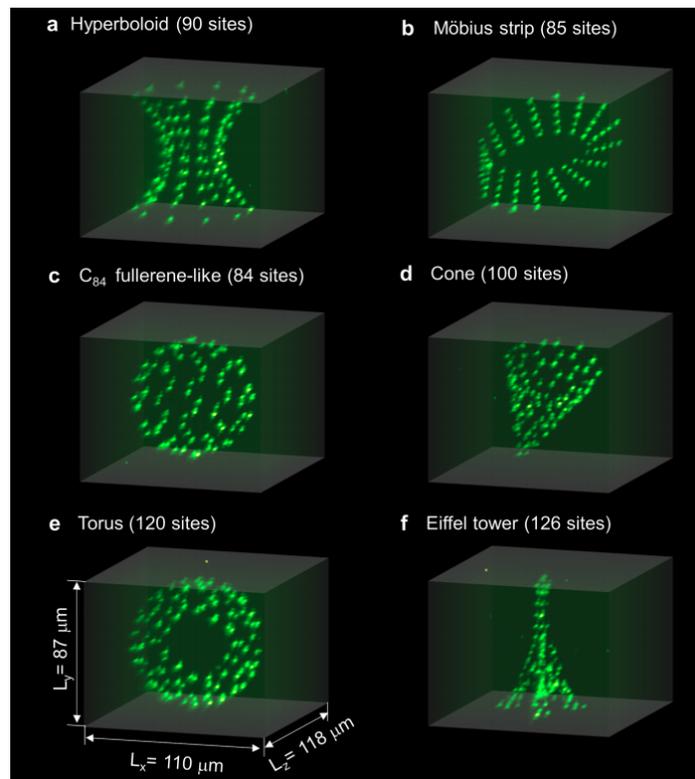


Figura 3.8: Disposiciones espaciales de átomos neutrales mediante redes ópticas[8].

Dicho esto, resulta una tecnología de capa física comparativamente más inmadura que las tres mostradas en detalle, razón por la que ha quedado relegada a esta sección.

- Computación adiabática.** La computación adiabática, también conocida como quantum annealing, es un modelo de computación cuántica que difiere enormemente del resto de los presentados en este trabajo, los cuales están basados en el uso de puertas cuánticas para realizar operaciones.

En computación adiabática, se aprovechan las propiedades cuánticas de los qubits para resolver problemas de optimización, en una analogía al proceso metalúrgico (de ahí el nombre *annealing*, que se traduciría como *templado*), de acuerdo al siguiente proceso[25]:

1. Se utiliza el principio de entrelazamiento para definir las relaciones entre los qubits de nuestro sistema, modelando así nuestra función objetivo.
2. Se induce a todos los qubits a un estado de superposición dependiente de un campo externo, por el que pasan a encontrarse “en todas partes de nuestro espacio objetivo, al mismo tiempo”.
3. Se va reduciendo la influencia del campo externo, “enfriando” el estado de superposición de nuestros qubits.
4. Finalmente, se mide el estado final del sistema, obteniendo una aproximación de nuestra solución.

En la actualidad, la empresa D-Wave es la que lidera el campo, y constantemente anuncia nuevos computadores adiabáticos con los que bate sus propios récords. Su modelo más reciente, denominado Advantage, dispone de más de 5.000 qubits[100], una cifra que resulta desorbitada si se compara con cualquier otro computador tratado anteriormente en este trabajo, si bien cabe hacer inciso en que, mientras que los computadores de otras tecnologías presentan al menos cierto grado de programabilidad, los modelos adiabáticos no son de propósito general, y prácticamente solo resultan útiles a la hora de resolver problemas de optimización.

Un último apunte que se ha de hacer respecto a estos ordenadores, es que funcionan bajo tecnología de superconductores, si bien al tratarse de un modelo de computación completamente distinto se ha decidido no incluir a D-Wave en dicha sección, sino dedicarle la suya propia.

3.2. Métricas y benchmarks

En este apartado se explicarán las métricas más utilizadas de cara a la comparativa de tecnologías de capa física en el mercado, así como dos de los algoritmos más usados para medir la utilidad de los computadores cuánticos de la actualidad.

3.2.1. Número de qubits

El recuento de qubits es seguramente una de las métricas más asequibles y directas en lo relativo a especificaciones de procesadores cuánticos.

En el estado actual en el que se encuentra el mundo de la computación cuántica, ya no solo existen científicos formulando teoremas e ingenieros llevándolos a la práctica, sino que también hay un número considerable de empresas dedicadas a comercializar dichos avances, y todo descubrimiento sobre el que se tenga control es una ventaja en el mercado. Es por esto que muchas empresas con procesadores ya desarrollados se suelen mostrar reacias a dar demasiada información sobre las especificaciones de los mismos, más allá de alguna que otra métrica sencilla de entender que permita demostrar de alguna forma dicho progreso frente a la competencia.

El número de qubits entraría en esta categoría, siendo el equivalente cuántico a los caballos en automovilística, o al número de megapíxeles en cámaras fotográficas[101]. El hecho de que sea una métrica fácil de obtener no desacredita la utilidad que posee a la hora de comparar procesadores cuánticos, aunque bien es cierto que de por sí sola no proporciona información suficiente para ello.

Dos factores de peso que a efectos prácticos “disminuyen” el número de qubits de un computador cuántico son los siguientes:

- **Qubits ancilla.** Se recuerda cuando en el capítulo anterior se habló de la necesidad de trazabilidad en las puertas cuánticas (sección 2.1.2), razón por la que en muchas de ellas es necesario utilizar qubits ancilla para almacenar información adicional que permita esto. La existencia de estos qubits auxiliares es algo que puede afectar al recuento total de qubits de un procesador en función de cómo se definan estos en la topología del mismo (es decir, si se dedican qubits concretos a cumplir esta tarea únicamente, o si se van utilizando qubits cercanos al lugar donde se apliquen estas puertas de manera dinámica).
- **Corrección de errores.** Una forma muy común de aliviar las tasas de error de los computadores NISQ actuales es mediante algoritmos estadísticos de corrección de errores. Poniendo un ejemplo hiperbolizado, es posible que para mejorar los resultados de una tecnología de capa física concreta se decida que cada qubit visible por conjuntos de instrucciones y lenguajes de programación (qubits lógicos), se utilizarán 9 qubits reales (qubits físicos), tal que el valor representado en los qubits lógicos sea el más presente, o la media de valores de sus qubits físicos correspondientes, de tal forma que el número total de qubits “útiles” de este computador concreto, de cara al usuario, sea 9 veces menor a número de qubits que realmente posee.

Resumiendo, un número de qubits alto es una condición *necesaria* que satisfacer para lograr construir un computador cuántico universal, pero no es condición *suficiente*. Se podría entender esta métrica como una medida del “potencial” máximo de un computador cuántico, es decir, es una métrica optimista de cómo debería funcionar un computador cuántico si no existieran otros factores que afectan al rendimiento del mismo[101]. Recordemos que nos encontramos en la era NISQ, y un computador cuántico actual con un número arbitrario qubits, aunque sea capaz de resolver ciertos algoritmos a mucha mayor velocidad que uno clásico, presenta un rendimiento muy inferior al que ofrecería una versión ideal del mismo con idéntico número de qubits.

3.2.2. Conectividad

Uno de los factores que más estrechamente relacionado está con el número de qubits de un computador cuántico es la conectividad de estos. Pongamos un ejemplo hiperbolizado para ilustrar esto:

Supongamos dos computadores cuánticos A y B, el computador A posee 5000 qubits, un número más que suficiente para poder realizar algoritmos de gran envergadura, pero estos están organizados en fila, de tal forma que cada qubit tiene únicamente dos vecinos, a excepción de los extremos, que tienen 1 cada uno. El computador B, en cambio, tan solo dispone de 20 qubits, pero estos presentan conectividad total, es decir, cada qubit está conectado a los otros 19 del sistema. Imaginemos un algoritmo en el que se utilizan 20 qubits, y en un punto de este se requiere aplicar una puerta cuántica de dos entradas a los qubits 2 y 19. En el caso del computador B, esta tarea puede ser llevada a cabo en una sola operación, dado que ambos qubits se encuentran conectados, mientras que en el ordenador A deberemos previamente trasladar el estado de estos dos qubits a otros dos que se encuentren uno al lado del otro, acabando con un total de 18 operaciones, tan solo en este punto concreto del algoritmo.

En 2017, Norbert Linke et al. realizaron un experimento similar al anterior supuesto, en el que compararon dos computadores con mismo número de qubits, pero distintos esquemas de conectividad[9]. El computador “A” de dicho experimento se trataba de un ordenador de superconductores de 5 qubits puesto a disposición de la comunidad científica a través de la nube cortesía de IBM, como parte de su programa Quantum Experience, y presentaba conectividad en forma de estrella, es decir, uno de sus qubits tenía como vecinos al resto, mientras que los otros 4 solo estaban conectados con el central. El contendiente “B” era un computador de trampas de iones de la empresa IonQ con conectividad total. Los resultados obtenidos tras aplicar una serie de algoritmos, por norma general, mostraron una ventaja para la topología de conectividad total.

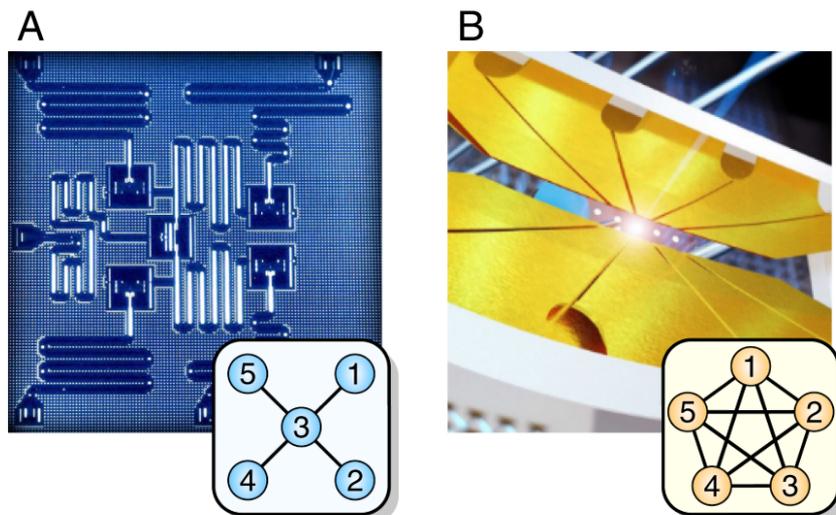


Figura 3.9: Esquema de conectividad de los dos computadores comparados en el experimento de N. Linke[9].

3.2.3. Tasas de error

Dada la naturaleza errática de los computadores NISQ, resulta una tarea necesaria anotar exhaustivamente todos los tipos de error que se pueden llegar a producir en estos y la probabilidad de que esto ocurra. A continuación se exponen los errores más comunes en computación cuántica:

- **Error de puertas individuales.** Esta métrica representa la probabilidad de obtener un estado no esperado al aplicar una puerta individual a un qubit cualquiera. La forma más descriptiva de proporcionar esta información sería mostrando el error medio de todos los qubits del computador, junto con el máximo y el mínimo obtenidos, aunque también existe la mala práctica de proporcionar únicamente la mediana de estos errores, enmascarando de forma efectiva los valores extremos, los cuales suponen datos muy significativos[101].
- **Error de puertas de dos qubits.** De forma similar al caso anterior, esta métrica representa la probabilidad de obtener un estado no esperado al aplicar una puerta de dos entradas a una pareja de qubits. Por norma general, este error suele ser más probable que el anterior, al involucrar un mayor número de qubits en el proceso. También se recuerda, volviendo a nuestro anterior ejemplo ficticio de los computadores A y B, que los traslados de estados que se debían realizar en el computador A previamente a poder aplicar la puerta cuántica deseada también son puertas cuánticas en sí (concretamente puertas SWAP, ver sección 2.1.2). Este ejemplo viene a demostrar que, con una mala conectividad, el uso de puertas de dos qubits también se ve afectado al alza, y cada operación aplicada aumenta las probabilidades de obtener un error.

Todo esto se traduce en que por norma general esta tasa de error guarda mayor importancia como métrica, debido a que, a la hora de hablar de tasas de error, la más significativa es la peor de las obtenidas, dado que será la que mayormente limite a nuestro computador[101].

- **Error de Preparación y Medición de estados (SPAM).** Este error, como su nombre indica, engloba dos probabilidades, la de generar erróneamente nuestro estado inicial y la de medir incorrectamente el estado final tras aplicar las operaciones deseadas. Se trata de un error que no depende del número de puertas aplicadas en nuestro circuito, debido a que solo se puede producir en estos dos puntos. Sin embargo, es dependiente del número de qubits de nuestro sistema, debido a que esta probabilidad hace referencia a la generación y medición incorrecta de cada qubit individual de nuestro sistema. Esto se traduce en que se trata de un tipo de error de suma importancia a la hora de plantearse el escalado de cualquier tecnología de capa física[101].
- **Error espectador.** Este error se produce cuando al aplicar una puerta a un qubit o conjunto de qubits, se produce un cambio espontáneo indeseado en el estado de otro qubit al que no se le ha aplicado ninguna puerta[102].

3.2.4. Tiempo de decoherencia y costes operacionales

Los computadores cuánticos, independientemente de la tecnología en la que estén basados, están acotados temporalmente por el tiempo de decoherencia de los sistemas sobre los que operan. Es por esto que lograr una razón lo suficientemente grande entre el tiempo de decoherencia de nuestro sistema y el tiempo que invertimos en cada puerta cuántica resulta una tarea de suma importancia. Recordemos, de hecho, que figura como uno de los criterios de DiVincenzo para la construcción de un computador cuántico útil (sección 2.1.3).

A la hora de proporcionar dichas cotas de la coherencia del sistema, existen las siguientes métricas[101]:

- **Esperanza de vida de los qubits, T_1 .** Esta cota mide el tiempo máximo en el que se puede diferenciar correctamente los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$ de nuestro sistema.
- **Tiempo de coherencia de los qubits, T_2 .** Esta otra cota mide el tiempo máximo en el que se puede saber correctamente la fase de los qubits del sistema, los cuales recordemos que están definidos en la esfera de Bloch, por lo que pueden tomar valores complejos.

De forma similar a las tasas de error, a la hora de calcular la razón de decoherencia del sistema se utiliza el menor de los dos tiempos arriba definidos. Al otro lado de nuestra razón se encuentra la velocidad de puertas cuánticas, el cual figura como denominador del cálculo de dicha razón, y de nuevo de forma homóloga a las tasas de error, los tiempos de operación de las puertas de varios qubits suelen ser peores que los de qubits individuales, por lo que suele ser la métrica utilizada en el cálculo (aunque recordemos que esto verdaderamente depende de las características de la tecnología del sistema a medir).

Como ejemplo para ilustrar esta relación, nos remitimos al estado en el que se encontraban las tecnologías de trampas de iones y superconductores hace cuatro años[30]:

- Por un lado, al utilizar las tecnologías de trampas de iones átomos “naturales” para definir sus qubits, estos presentan menos problemas que otros acercamientos al mantener sus propiedades cuánticas, y con costes de puertas de dos qubits en el rango de 1-100 μ s, la razón de decoherencia mostrada rondaba el valor de las 10⁶ operaciones por ciclo de vida.
- Por la misma razón antes mostrada, las tecnologías de superconductores presentan tiempos de decoherencia mucho menores en comparación a las trampas de iones, al utilizar un estado cuántico artificial para definir sus qubits, el cual se “relaja” de forma natural rápidamente[101]. Como compensación a esto, los qubits superconductores permiten realizar operaciones a mucha mayor velocidad que los naturales, logrando mantener una razón de decoherencia útil, aunque comparativamente menor, de aproximadamente 10⁴ operaciones por ciclo de vida.

3.2.5. Algoritmos para la medición de prestaciones

En los anteriores apartados de esta sección hemos ilustrado cómo están relacionados el número de qubits, su conectividad, los distintos errores de un sistema, el tiempo de vida del mismo y el tiempo invertido en cada cálculo. Dicho esto, para poder comparar correctamente distintos modelos de computador cuántico se requiere un marco de referencia que proporcione un dato en base a todas estas métricas que nos resulte fácil de interpretar.

Es en este caso en el que entran los algoritmos de cota de sistemas cuánticos. A la hora de la verdad, la mejor forma de evaluar el hardware es hacerlo resolver un problema concreto y anotar los resultados obtenidos[101]. Al fin y al cabo, si todas estas características se interrelacionan para lograr que un computador cuántico funcione correctamente, la ejecución de algoritmos es la forma más directa de responder a las preguntas de más alto nivel sobre el mismo: ¿Cómo de rápido y fiable es este sistema? ¿Qué algoritmos académica o comercialmente relevantes puede resolver? ¿Proporciona mejores resultados que otros del mercado?

Veamos a continuación un repaso de los algoritmos más utilizados a día de hoy para medir estas prestaciones, tanto antiguos como recientes.

Factorización de Shor

Uno de los primeros algoritmos utilizados para medir la utilidad de un computador cuántico fue el de factorización en números primos de Peter W. Shor[103], publicado en 1995. Se trata de uno de las primeras demostraciones del verdadero valor de la computación cuántica.

La búsqueda de factores primos en números enteros es un problema que siempre ha sido tratado con sumo interés dada la complejidad computacional de todos los algoritmos propuestos para esta tarea. Con su algoritmo de factorización, Shor demostró que lo que se considera computacionalmente infactible para los ordenadores clásicos, puede no serlo para los que funcionan con principios cuánticos.

Los números primos guardan gran valor para aplicaciones de criptografía, por lo que los computadores cuánticos actuales especializados en la ejecución del algoritmo de Shor están comenzando a ser utilizados para este propósito.

Boson sampling

El algoritmo de muestreo de bosones es otro de los más utilizados en la actualidad. Ideado por Scott Aaronson y Alex Arkhipov en 2010[104], se trata de una tarea computacional específicamente pensada para presentar una complejidad elevada.

Existen diversas versiones de este algoritmo, pero la más ampliamente utilizada es

el muestreo gaussiano de bosones (GBS)[105], el cual, al igual que la versión original, tiene base fotónica. Las tecnologías fotónicas son, por tanto, los mejores candidatos para resolver este problema, y de hecho es el algoritmo por defecto utilizado a la hora de demostrar supremacía cuántica en este campo[7, 23, 92].

Un problema que presenta este algoritmo, en comparación con el anterior, es su escasa utilidad. Mientras que el algoritmo de Shor es de valor en el campo de la criptografía, el muestreo de bosones no presenta ninguna aplicación práctica, dado que no fue ideado con ese objetivo en mente, y se trata de un modelo expresamente creado para medir el rendimiento de computadores cuánticos frente a clásicos. No obstante, parece ser que esto no aplica de la misma forma para la versión gaussiana de este experimento, y actualmente existen esfuerzos tanto en la búsqueda como en la recopilación de aplicaciones prácticas para este algoritmo[106].

Volumen cuántico

El volumen cuántico es una métrica propuesta por varios ingenieros de IBM[10] en 2019 que engloba todos los factores anteriormente expuestos en una única cifra. Está basada en el algoritmo de circuitos cuadrados aleatorios, siguiendo un esquema muy concreto[107]. En el esquema utilizado, se generan circuitos de d capas actuando sobre d qubits. En cada capa, primero se realiza una permutación aleatoria sobre todos los qubits (denotada por π en la figura 3.10), y luego se aplica una puerta cuántica de dos qubits a cada pareja del circuito (denotada por $SU(4)$ en la figura 3.10). Para circuitos con d impar no se realiza esta operación sobre el último qubit.

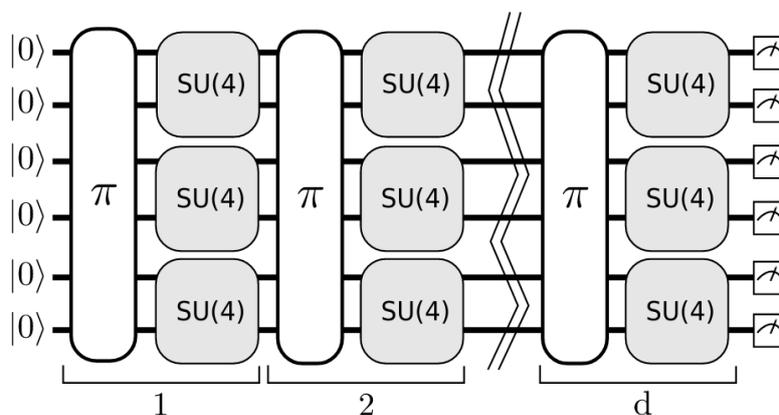


Figura 3.10: Esquema del circuito cuadrado utilizado para el cálculo del volumen cuántico[10].

Lo que mide el algoritmo de volumen cuántico es la capacidad de un computador para simular estos circuitos cuadrados, de tal forma que el volumen cuántico de un computador será el tamaño d del mayor circuito cuadrado que pueda ejecutarse de forma fiable sobre el mismo, ilustrado mediante la siguiente fórmula[107]:

$$\log_2 V_Q = \operatorname{argmax}_m \min(m, d(m))$$

Donde $m \leq n$ ($n = n^0$ de qubits del computador) representa un número de qubits, y $d(m)$ es el tamaño del mayor circuito cuadrado que se puede ejecutar en el sistema estudiado, con m qubits, y con fiabilidad mayor a $2/3$.

Cabe destacar que, pese a que esta es la fórmula original del volumen cuántico, muchas veces se suele proporcionar directamente el dato V_Q , en lugar de aplicar el logaritmo. Esta métrica proporciona la misma información, por lo que no se ha de confundir con otra.

Finalmente, un dato muy prometedor sobre esta métrica es que parece estar ganando fama recientemente, y varias empresas la proporcionan como una de las especificaciones de sus computadores. Actualmente, los computadores de trampas de iones de la empresa Quantinuum son los que mayor volumen cuántico han logrado alcanzar, siendo la cifra récord de $V_q = 2^{16}$, por el H2-1[39].

3.2.6. Sobre la eficiencia energética

Personalmente, la eficiencia energética de los computadores cuánticos es un tema en el que me habría gustado poder indagar con mayor detalle. Este posiblemente sea el aspecto más subjetivo de este trabajo, pero en mi humilde opinión, no se puede considerar que realmente exista progreso si se logra construir un procesador x veces más potente que las soluciones clásicas, pero utilizarlo consume x^2 veces más energía, por poner un ejemplo hiperbolizado.

Como ya se ha hablado anteriormente, esto no parece ser realmente un problema en la actualidad, ya que los computadores cuánticos resultan por naturaleza más eficientes que los clásicos. Sin embargo, este hecho supone a la vez un alivio y una preocupación, dado que la eficiencia energética es en la actualidad posiblemente el campo de la computación cuántica que menos atención recibe[11]. Esto se traduce en que los computadores cuánticos, aunque más eficientes que los clásicos, actualmente no están completamente optimizados en este aspecto, y es algo que en mi humilde opinión merecería la pena comenzar a investigar de cara al futuro.

Debido al estado actual de este campo de la computación cuántica, ha resultado imposible encontrar datos numéricos sobre el consumo de prácticamente todos los ordenadores actuales mencionados en los apartados de estado del arte de las tres tecnologías de capa física revisadas en la sección anterior. Disponiendo de estos datos, se podría realizar rápidamente una razón entre el coste energético y el temporal de cada computador para poder razonar si la mejoría es lo suficientemente significativa respecto a los ordenadores clásicos como para desestimar la necesidad de optimizar el consumo.

3.2.7. Sobre la madurez tecnológica

Otro aspecto de la computación cuántica que merece mención es la madurez tecnológica. Dada la naturaleza frenética y multidisciplinar del progreso en computación

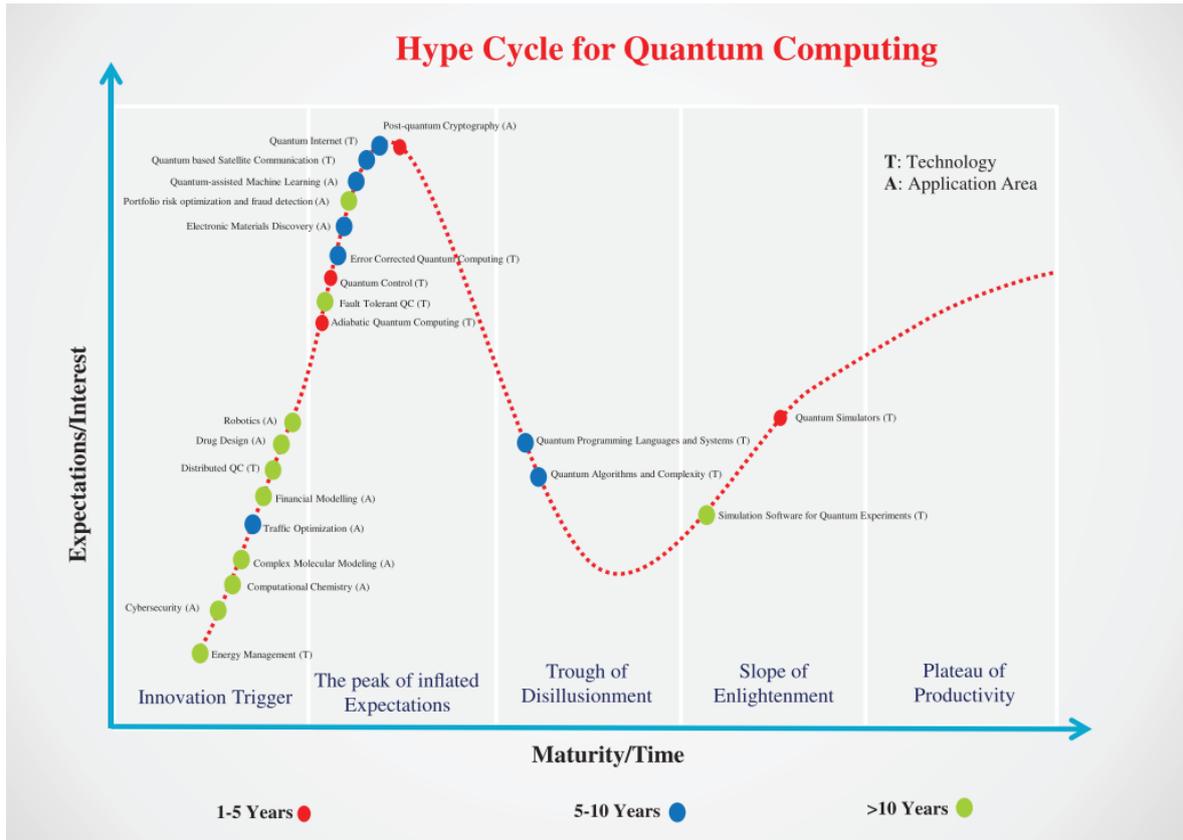


Figura 3.11: Ciclo de sobreexpectación de Gartner en diversos apartados de la computación cuántica, a fecha de 2022[11]. Nótese que el campo de la eficiencia energética se representa como el menos desarrollado de todos.

cuántica, resulta difícil asignar un valor concreto en la escala de madurez tecnológica (TRL) a las tecnologías de capa física tratadas en la sección de revisión de hardware. Dada la ausencia de contexto en este ámbito, cuando en este trabajo se ha hablado de “madurez” no se ha hecho en referencia al marco TRL, sino a la siguiente serie de factores:

- **F1.** Antigüedad de la tecnología. Para este punto, de cada tecnología de capa física se ha escogido la primera fecha relevante en su historia estrictamente relacionada con la computación cuántica.
- **F2.** Número de empresas de carácter comercial que ofrecen en el mercado procesadores ya fabricados, utilizando la tecnología en cuestión.
- **F3.** Máximo volumen cuántico alcanzado en la tecnología.

En base a estos factores, se ha realizado la siguiente comparativa básica de las tecnologías de capa física tratadas:

Tecnología	F1	F2	F3
Trampas de iones	1995	3	2^{16} [39]
Superconductores	1999	5	2^9 [68]
Qubits fotónicos	2001	3	N/A

Siguiendo este marco comparativo, se podría decir que la tecnología más madura de las revisadas es la de trampas de iones. No solo es la más antigua de las tres tratadas en detalle, sino que es la que mayor volumen cuántico ha logrado alcanzar, con diferencia. Es decir, se corona como la tecnología número uno en dos de los tres factores considerados.

En el caso de la tecnología de superconductores, no solo es la segunda con mayor antigüedad, sino que es la que mayor número de empresas presenta en el sector, por lo que se ha decidido considerarla la segunda de mayor madurez de entre las tratadas.

Por último, respecto a las tecnologías fotónicas, salta a la vista que resulta complicado hablar de su madurez tecnológica en base a las condiciones propuestas, ya que actualmente no existen empresas en el sector que hayan proporcionado métricas de volumen cuántico sobre sus computadores. Se estima que esto puede deberse a que los resultados obtenidos no sean buenos. No sería una idea muy descabellada asumir que las empresas dedicadas a la fabricación de computadores fotónicos sí que calculen esta métrica, pero se nieguen a anunciar los datos obtenidos por resultar “poco vistosos”. La razón de esto podría ser que las tecnologías fotónicas no están optimizadas para la resolución de este algoritmo de medición de prestaciones.

3.3. Revisión de software

Tras haber ilustrado las tecnologías de capa física más relevantes de la computación cuántica, y las diversas métricas existentes para documentar y clasificar las especificaciones de estas, el siguiente paso lógico vendría a ser revisar el estado actual del software que se puede ejecutar en estos computadores.

Esta sección está dividida en tres subsecciones en función de la naturaleza del software a mostrar: conjuntos de instrucciones, lenguajes de programación cuánticos, y librerías y kits de desarrollo para facilitar el uso de lenguajes cuánticos.

3.3.1. Conjuntos de instrucciones

Los conjuntos de instrucciones representan el nivel más bajo en la pila de software. Son los encargados de hacer de intermediarios entre lenguajes de más alto nivel y la tecnología de capa física específica del computador sobre el que se ejecuten. Un término que se suele utilizar para hablar de estos lenguajes de bajo nivel es *Quantum Assembly Language*, QASM. Los más conocidos y usados a día de hoy son los siguientes:

- **Blackbird.** Blackbird es un conjunto de instrucciones de código abierto desarrollado por la empresa Xanadu para operar sus ordenadores fotónicos[108]. Está pensado para utilizarse junto con el kit de desarrollo Strawberry Fields, del cual hablaremos en el apartado 3.3.3.

- **cQASM.** Common Quantum Assembly Language, abreviado como cQASM, es un lenguaje ensamblador cuántico diseñado por ingenieros de Intel y de la Universidad de Tecnología de Delft, con el objetivo de poder ser utilizado con cualquier hardware cuántico en el mercado, independientemente de los principios físicos en los que esté basado su tecnología[109].
- **OpenQASM.** Como bien indica el nombre, OpenQASM es un lenguaje ensamblador cuántico de código abierto. Fue diseñado por IBM para ser utilizado en sus computadores de superconductores en conjunto con el kit de desarrollo Qiskit[110].
- **Quil.** De forma similar a cQASM, Quil es un conjunto de instrucciones diseñado para ser agnóstico a la tecnología de capa física sobre la que se ejecuta[111]. Más allá de esto, este conjunto fue definido con la idea en mente de poder ejecutarse tanto en arquitecturas cuánticas como en clásicas, en las que actúa como base para implementar simuladores cuánticos. Un ejemplo prominente de simulador cuántico es el creado por la empresa Rigetti utilizando este conjunto de instrucciones[111].

Apremia aclarar que esta lista está lejos de ser exhaustiva. Se han limitado las alternativas mostradas a únicamente las que con seguridad se utilizan ampliamente a día de hoy, ya sea porque suponen un conjunto de instrucciones agnóstico al hardware de relativa fama, o porque forman parte del backend de una empresa importante en el sector. El número real de conjuntos de instrucciones cuánticos que existe actualmente es abrumadoramente mayor a los 4 mostrados, y estos abarcan desde conjuntos que han quedado obsoletos con el paso del tiempo hasta diversos proyectos de investigación de alcance reducido.

3.3.2. Lenguajes de programación

En esta categoría entran los lenguajes de programación creados para ejecutarse en computadores cuánticos, funcionando por encima de conjuntos de instrucciones predefinidos. Se ha decidido clasificarlos en dos grupos en función del alcance que presentan.

Lenguajes de ámbito académico

Estos lenguajes se caracterizan por tener un alcance reducido, dado que muchos de ellos son presentados como pruebas de concepto para trabajos de investigación o tesis doctorales, y suelen quedar relegados para uso interno de la universidad de origen sin que ganen mucha fama a nivel global. No obstante, cabe destacar que el entorno académico es el primero por el que debe pasar una tecnología antes de ganar madurez y comenzar a verse propuestas comerciales, por lo que en esta categoría se encuentran también los lenguajes cuánticos más longevos. A continuación figura una lista de los lenguajes cuánticos de corte académico más relevantes a nivel histórico.

- **Ket.** Ket es un lenguaje imperativo de código abierto basado en Python. Fue diseñado por Evandro Chagas y Rafael de Santiago en la Universidad Federal de Santa Catalina, Brasil, en 2021[112]. Se destaca como uno de los pocos lenguajes de programación cuánticos de corte académico que se ofrece como parte de un kit de desarrollo, llamado Ket Quantum Programming.
- **LanQ.** LanQ es un lenguaje de programación imperativo con enfoque en la ejecución de procesos en paralelo. Fue desarrollado como por Hynek Mlnarík en 2006[113], y presentado como tesis doctoral al año siguiente.
- **Pseudocódigo cuántico.** La primera propuesta de pseudocódigo para algoritmos cuánticos fue definida por Emanuel Knill en 1996[114] (recordemos que Knill es una persona de gran importancia en la trayectoria histórica de las tecnologías fotónicas[83]). En su propuesta, utilizó el pseudocódigo para definir el funcionamiento de una máquina denominada Quantum Random Access Machine (QRAM, no confundir con una RAM cuántica).
- **QCL.** Quantum Computation Language figura como uno de los primeros lenguajes de programación cuántica de alto nivel. Es de paradigma imperativo y fue desarrollado por Bernhard Ömer en 1998 como tesis de fin de máster en física teórica[115]. Guarda gran semejanza en su sintaxis con el lenguaje C.
- **QFC / QPL.** QFC y QPL son dos lenguajes cuánticos funcionales diseñados por Peter Selinger[116]. Se incluyen en el mismo punto debido a que se podrían entender como dos aspectos del mismo lenguaje, dado que en funcionamiento son idénticos. La diferencia que los define es el hecho de que QFC presenta una sintaxis basada en diagramas de flujo, mientras que la de QPL es textual.
- **qGCL** Quantum Guarded-Command Language, o qGCL, es un lenguaje de programación imperativo desarrollado por Paolo Zuliani como tesis doctoral[117]. A pesar de ser un lenguaje que a día de hoy no recibe mucha atención, merece la pena mencionarlo por una particularidad que presenta: está basado en el lenguaje GCL, el cual fue definido por Edsger Dijkstra con la idea de funcionar bajo principios no deterministas. Siendo qGCL desarrollado en 2004, resulta una propuesta muy interesante de solución para los obstáculos que existían en las tecnologías fotónicas de la época (si bien llegó algo tarde, posible causa de que no lograra “despegar” como concepto).
- **QML.** El nombre de este lenguaje induce a confusión. Actualmente existe un área de la computación cuántica llamada Quantum Machine Learning, comúnmente abreviada como QML. Este lenguaje, sin embargo, no tiene relación alguna con el área de la inteligencia artificial.

QML fue desarrollado como tesis doctoral por Jonathan Grattage, sigue un paradigma funcional, y presenta gran similitud con el lenguaje Haskell[118]. Una característica que lo diferencia de otros lenguajes es la presencia de operadores tanto clásicos como cuánticos.

- **Silq.** Silq es un lenguaje imperativo desarrollado recientemente por la Escuela

Politécnica Federal de Zúrich[119]. Actualmente es uno de los lenguajes cuánticos de más alto nivel, dado que ha sido diseñado con el objetivo de presentar una semántica intuitiva y fácil de utilizar.

Lenguajes de ámbito comercial

Estos lenguajes destacan por estar desarrollados por empresas de gran importancia en el sector, en lugar de por individuos o grupos de investigación. Por norma general, forman parte de algún kit de desarrollo ofrecido por la empresa desarrolladora de la tecnología, por lo que suelen presentar una documentación mucho más extensa que facilita más el aprendizaje frente a los lenguajes de corte académico, hecho que inevitablemente los hace ser más utilizados en el sector.

- **LIQUi|}**. Este lenguaje, de paradigma funcional y pronunciado liquid, está siendo desarrollado en el laboratorio Research Station Q de Microsoft[98]. Está basado en el lenguaje de código abierto F#, también creado por la misma empresa, y está más orientado a la comunidad especializada en el apartado teórico de la computación cuántica, que en las implementaciones físicas[120].
- **Q#**. Este lenguaje imperativo ha sido diseñado por Microsoft y forma parte de su Quantum Development Kit, del cual hablaremos más adelante. Una característica notable de este lenguaje es la interoperabilidad con lenguajes de computación clásica que ofrece, como C# o Python[121].
- **QMASM**. Quantum Macro Assembler es un lenguaje de programación imperativo específicamente diseñado para generar programas de computación adiabática [122]. Se ofrece como parte del kit de desarrollo Ocean de D-Wave.

3.3.3. Kits de desarrollo de software y librerías

En esta categoría se incluyen las librerías, entornos de desarrollo y otros programas pensados para funcionar en computadores clásicos con acceso a computadores o simuladores cuánticos a través de la nube. Por norma general son proyectos de código abierto y todos permiten la ejecución del código generado en simuladores cuánticos. De forma similar al apartado anterior, se muestran en dos grupos en función del enfoque con el que se han desarrollado.

De propósito general

En este grupo se incluyen los kits de desarrollo que permiten la ejecución de programas en computadores de más de una empresa y, por norma general, en más de un tipo de tecnología de capa física. No resulta ningún misterio que las alternativas más utilizadas se encuentren en esta categoría, ya que ofrecen más posibilidades de ejecución una vez se ha aprendido a utilizarlas.

- **Cirq.** Cirq está desarrollado por Google[123]. Está basado en Python y los computadores de varias empresas y tecnologías de capa física distintas, entre las que destacan Alpine Quantum Technologies, IonQ, Pascal (empresa especializada en computadores de átomos neutrales) y Rigetti, ofrecen soporte a los programas escritos mediante este framework.
- **Ket Quantum Programming.** Ket Quantum Programming es un kit de desarrollo relativamente reciente de origen académico[112]. Ofrece, además del lenguaje Ket ya comentado anteriormente, una librería denominada Libket, compatible con C/C++ y Rust, y un simulador cuántico de nombre Ket Bitwise.
- **PennyLane.** Esta librería de Python desarrollada por Xanadu permite la conexión a computadores de otras empresas, concretamente los de Alpine Quantum Technologies, Google, IBM, Quantinuum, y Rigetti[124].
- **Qibo.** Este proyecto de reciente anuncio reúne los esfuerzos de varios laboratorios con el objetivo de lograr un esquema de control de computadores cuánticos de forma agnóstica al hardware implicado[125].
- **Qiskit.** Este kit de desarrollo cuántico basado en Python creado por IBM es uno de los más utilizados actualmente. Funciona sobre el conjunto de instrucciones OpenQASM, y se puede utilizar tanto para acceder a los computadores de superconductores de IBM ofrecidos a través de su programa Quantum Experience, como ejecutar código en local mediante simuladores cuánticos[126]. Actualmente también ofrece soporte para las tecnologías de trampas de iones, y puede ser utilizado para operar los ordenadores de IonQ.
- **Quantum Development Kit.** Kit de desarrollo hecho por Microsoft para ser utilizado junto al lenguaje de programación Q#. Tiene soporte oficial en los IDEs Visual Studio y VSCode. Actualmente ofrece soporte para operar sobre los ordenadores de Quantinuum, IonQ y Pascal[121].
- **t|ket>.** Este entorno de desarrollo está centrado en la optimización de circuitos cuánticos[127]. Esto lo realiza mediante la modificación de la topología inicial de los qubits del sistema objetivo, reduciendo el número de operaciones que han de ser realizadas. Funciona de forma agnóstica al hardware sobre el que se quiere ejecutar.

De enfoque especializado

En esta categoría se incluyen los kits de desarrollo centrados únicamente en la tecnología concreta de la empresa que los ha diseñado. Al tener un enfoque más cerrado que los de la categoría anterior, inevitablemente resultan menos utilizados, por norma general. No obstante, cabe recordar que todos los aquí mostrados son ampliamente utilizados en el mercado, gracias a que permiten el acceso a computadores de empresas de gran envergadura y, al estar optimizados para la tecnología de capa física de estos, resultan la mejor opción para desarrollar programas para dichos computadores.

- **Forest.** Desarrollado por Rigetti, este kit de desarrollo basado en Python funciona sobre el conjunto de instrucciones Quil y permite ejecutar el código en los equipos de la empresa[111].
- **Ocean.** Ocean es un conjunto de herramientas desarrollado por la empresa D-Wave para facilitar el uso de sus computadores adiabáticos[128].
- **Perceval.** Este kit de desarrollo creado por la empresa Quandela está centrado en las tecnologías fotónicas[90, 129]. Permite la ejecución del código en los computadores de la empresa a través de la nube.
- **ProjectQ.** Este proyecto de código abierto ha sido desarrollado en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich. Se trata de una librería de Python que permite la ejecución del código en los computadores de IBM[130, 131].
- **Strawberry Fields.** Strawberry Fields es otra librería de Python de código abierto desarrollada por Xanadu[108], centrada en los computadores de la misma. Funciona sobre el conjunto de instrucciones Blackbird, y es la librería ofrecida para ejecutar código en los computadores cuánticos de la empresa.

Como se ha podido ver, los lenguajes mostrados en ambos grupos de esta sección presentan características muy similares entre sí: la gran mayoría son de código abierto, permiten crear código tanto para simuladores como para computadores cuánticos, y en cuanto a tecnologías de capa física soportadas se especializan en la de los computadores de la empresa, o se centran en ofrecer soporte a varias, con el objetivo de lograr ser declarado como estándar en el mercado a futuro.

Lo que se quiere ilustrar con esto es precisamente la ausencia de estándar que hay ahora mismo en este ámbito. Mientras que para el dilema de qué tecnología de capa física es “mejor” existen menos contendientes y estos tienen por norma general cierta madurez, en lo que a software respecta, ese número de contendientes se dispara, ya que para cada tecnología se diseñan varios conjuntos de instrucciones y lenguajes (a veces incluso la misma empresa desarrolla más de uno, como hemos podido ver), y constantemente surgen nuevas opciones que considerar junto al resto, por lo que resulta complicado realizar un análisis exhaustivo de este área de la computación cuántica.

Dicho esto, lo que se ha mostrado en esta sección es un mero listado de las características principales de cada opción. Para una correcta comparativa de varias de ellas, remitimos al siguiente artículo[132].

3.4. Conclusiones

A modo de conclusión de este capítulo, se ofrece un resumen de lo aquí tratado en cada uno de los apartados de esta sección:

- **tecnologías de capa física.** En base a la definición de madurez tecnológica

proporcionada en el apartado 3.2.7, se resumen las tecnologías cuánticas de capa física tratadas ordenadas en base a dicha métrica:

1. **Trampas de iones.** Se trata de la tecnología que mejores métricas presenta en general: mayor tiempo de decoherencia, tasas de fidelidad, trayectoria histórica y volumen cuántico alcanzado. El obstáculo que se ha de superar para poder avanzar en este acercamiento es el escalado de las propuestas actuales. Se ha concluido que es la tecnología de capa física con mayor madurez tecnológica de las tratadas.
 2. **Superconductores.** Es la tecnología que posee mayor número de empresas invirtiendo en ella. El mayor problema que presenta es la necesidad de operar a bajas temperaturas, lo cual conlleva un coste energético elevado, aunque su similitud con las arquitecturas CMOS se traduce en unos costes de fabricación comparativamente menores, así como en una mayor capacidad de mejora.
 3. **Qubits fotónicos.** Esta tecnología anda ligeramente por detrás de las otras dos mostradas, aunque en su trayectoria ha demostrado que el progreso en este acercamiento suele ocurrir a grandes pasos. No se ha de olvidar que los componentes ópticos son a día de hoy necesarios en prácticamente todas las otras tecnologías cuánticas de capa física que existen. Se recuerda también que los computadores fotónicos son inmunes al ruido externo y operan a temperatura ambiente, por lo que merece la pena seguir de cerca los descubrimientos que se hagan en ellos.
 4. **Otras tecnologías de capa física.** Existen gran cantidad de tecnologías cuánticas, todas ellas con sus puntos fuertes y débiles. Se destacan: las topológicas son inmunes al concepto de decoherencia, y se esperan grandes avances en el futuro próximo; los centros nitrógeno-vacantes son grandes candidatos para tecnología por excelencia en el campo de la comunicación cuántica; los átomos neutrales presentan una gran capacidad de optimización en base a la disposición espacial de los mismos; y por último, la computación adiabática es un modelo de computación muy prometedor, reinado por la empresa D-Wave, la cual mantiene un ritmo constante en el desarrollo de nuevos computadores que batan un récord tras otro en el número de qubits.
- **Métricas.** Se ha ilustrado la relación que existe entre el número de qubits, su conectividad, los errores presentes en un sistema cuántico, el tiempo de vida del mismo y el tiempo invertido en sus cálculos. De forma similar, se han mostrado los algoritmos más utilizados para medir las prestaciones de los equipos cuánticos, haciendo énfasis en el volumen cuántico, y finalmente se ha podido llegar a la conclusión de cuál de las tecnologías de capa física tratadas presenta mayor madurez tecnológica.
 - **Software.** Finalmente, se ha podido observar el estado del software para computadores cuánticos, tanto los más modernos como aquellos con importancia histórica, clasificándolos según su nivel y su alcance.

4. Cierre del proyecto

4.1. Conclusiones finales

Con todo lo tratado en este Trabajo de Fin de Grado se procede a su cierre echando la vista atrás a los objetivos que se propusieron para el mismo al principio de esta memoria.

El grado de satisfacción con el primer objetivo propuesto es inmejorable. Estoy muy agradecido de haber optado por realizar el Trabajo de Fin de Grado sobre este campo de la computación, y siento que me ha servido para adquirir gran cantidad de conocimientos en un área que despertaba mi interés pero a la que nunca me había atrevido a adentrarme. Quisiera agradecer la inestimable ayuda recibida por mi tutor en este aspecto, quien no solo me dio un empujón inicial con el que poder adquirir una base necesaria para poder defenderme por mi cuenta en el mundo de la investigación, sino que me ha ido acompañando en todo el proceso que ha sido la realización del trabajo, en el cual ambos hemos aprendido.

Respecto a los objetivos segundo y tercero tengo sentimientos encontrados. Si bien estoy altamente satisfecho con cómo han resultado las explicaciones sobre los fundamentos de la computación cuántica, los fundamentos de cada tecnología de capa física tratada y las secciones de historia de cada una, lo cierto es que inicialmente se esperaba poder obtener suficiente información cuantitativa del estado de cada tecnología de capa física como para poder compararlas de una forma más completa y objetiva, y de esta forma facilitar aún más la decisión sobre qué tecnología resultaría más beneficiosa. No obstante, a pesar de las dificultades encontradas se han podido proporcionar listas lo suficientemente extensas y completas de las principales empresas y proyectos académicos en el sector, y gracias a esto ha sido posible realizar una comparativa menos exhaustiva de la esperada, pero satisfactoria. Una previsión optimista que se estima de aquí a futuro es que esta tarea pase a resultar más asequible gracias a la posible estandarización de la métrica del volumen cuántico.

Finalmente, resulta muy gratificante haber podido dedicar tiempo a revisar el estado del software para computadores cuánticos que existe actualmente, y se espera que esto pueda ser de ayuda para futuros trabajos que tengan un mayor enfoque en este ámbito.

4.2. Trabajo futuro

Dando por concluido este Trabajo de Fin de Grado, se recuerda una vez más que esto representa tan solo el primer paso en el camino de la posible construcción de un computador o simulador cuántico en la Universidad de Sevilla, uno de muchos que se han de dar para lograr este propósito.

Una vez elegida una tecnología de capa física concreta, resultaría oportuno tratar en más detalle las distintas opciones de software que existen, dado que en este trabajo se ha hecho una mera revisión de los conjuntos de instrucciones, lenguajes de programación y kits de desarrollo que existen, sin entrar en la realización de ninguna comparativa. Se ha estimado que para poder realizar una correcta comparativa de qué opción resultaría más beneficiosa se debería tener ya en mente la tecnología de capa física por la que se va a optar, y por supuesto en dicha deliberación de opciones posibles debería considerarse la formulación de un conjunto de instrucciones propio de la Universidad de Sevilla.

Otro aspecto que se ha de comentar de esta rama de las ciencias de la computación es el alto grado de interdisciplinariedad que presenta. Para poder investigar y desarrollar avances de forma plena en computación cuántica se requieren conocimientos avanzados no solo de informática, sino también de álgebra y física. Resultaría interesante atajar este problema desde el punto de vista educativo, elaborando un plan de estudios para un perfil de ingeniero de computación cuántica, en el que se diera una base física más avanzada que la que ya se enseña en esta carrera.

Por último, se advierte también de la naturaleza aún joven, sujeta a cambios repentinos y avances constantes de este campo de la informática, por lo que en pocos años este trabajo podría perder su relevancia, si bien se espera haber explicado de forma correcta los fundamentos de la computación cuántica y de las tecnologías de capa física tratadas, aspectos menos sensibles al paso del tiempo que el estado del arte.

5. Bibliografía

- [1] “Qc modules - aqt — alpine quantum technologies.” <https://www.aqt.eu/qc-modules/>.
- [2] “Trapped ion quantum computers - pennylane.” https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_trapped_ions.
- [3] W. Paul, “Electromagnetic traps for charged and neutral particles,” *Reviews of Modern Physics*, vol. 62, pp. 531–540, 7 1990.
- [4] “Quantum computing with superconducting qubits - pennylane.” https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_sc_qubits.
- [5] “Ibm unveils 400 qubit-plus quantum processor and next-generation ibm quantum system two.” <https://tinyurl.com/IBMOsprey>.
- [6] J. L. O’Brien, “Optical quantum computing,” *Science*, vol. 318, 3 2008.
- [7] L. S. Madsen, F. Laudenbach, M. F. Askarani, F. Rortais, T. Vincent, J. F. F. Bulmer, F. M. Miatto, L. Neuhaus, L. G. Helt, M. J. Collins, A. E. Lita, T. Gerrits, S. W. Nam, V. D. Vaidya, M. Menotti, I. Dhand, Z. Vernon, N. Quesada, and J. Lavoie, “Quantum computational advantage with a programmable photonic processor,” *Nature*, vol. 606, pp. 75–81, 6 2022.
- [8] “Quantum computation with neutral atoms - pennylane.” https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_pasqal.
- [9] N. M. Linke, D. Maslov, M. Roetteler, S. Debnath, C. Figgatt, K. A. Landsman, K. Wright, and C. Monroe, “Experimental comparison of two quantum computing architectures,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, pp. 3305–3310, 3 2017.
- [10] A. W. Cross, L. S. Bishop, S. Sheldon, P. D. Nation, and J. M. Gambetta, “Validating quantum computers using randomized model circuits,” *Physical Review A*, vol. 100, 11 2018.
- [11] S. S. Gill, A. Kumar, H. Singh, M. Singh, K. Kaur, M. Usman, and R. Buyya, “Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions,” *Software: Practice and Experience*, vol. 52, pp. 66–114, 1 2022.
- [12] R. P. Feynman, “Simulating physics with computers,” *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, pp. 467–488, 6 1982.
- [13] G. Moore, “Cramming more components onto integrated circuits,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, pp. 82–85, 1 1998.
- [14] A. A. Chien and V. Karamcheti, “Moore’s law: The first ending and a new beginning,” *Computer*, vol. 46, pp. 48–53, 12 2013.

- [15] “Quantinuum system model h1 product data sheet.” https://assets.website-files.com/62b9d45fb3f64842a96c9686/64763900fe3bde6e3da3fb94_Quantinuum%20H1%20Product%20Data%20Sheet.pdf, 2 2022.
- [16] “Quantinuum system model h2 product data sheet.” https://assets.website-files.com/62b9d45fb3f64842a96c9686/6459acc9b999bb7fb526c4bf_Quantinuum%20H2%20Product%20Data%20Sheet.pdf, 2023.
- [17] “Quantum computer datasheet.” <https://quantumai.google/hardware/datasheet/weber.pdf>, 5 2021.
- [18] D. P. DiVincenzo and D. Loss, “Quantum information is physical,” *Superlattices and Microstructures*, vol. 23, 10 1997.
- [19] D. P. DiVincenzo, “The physical implementation of quantum computation,” *Fortschritte der Physik*, vol. 48, pp. 771–783, 9 2000.
- [20] J. Preskill, “Quantum computing in the nisq era and beyond,” 1 2018.
- [21] J. Preskill, “Quantum computing and the entanglement frontier,” 3 2012.
- [22] F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, R. Barends, R. Biswas, S. Boixo, F. G. S. L. Brandao, D. A. Buell, B. Burkett, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, R. Collins, W. Courtney, A. Dunsworth, E. Farhi, B. Foxen, A. Fowler, C. Gidney, M. Giustina, R. Graff, K. Guerin, S. Habegger, M. P. Harrigan, M. J. Hartmann, A. Ho, M. Hoffmann, T. Huang, T. S. Humble, S. V. Isakov, E. Jeffrey, Z. Jiang, D. Kafri, K. Kechedzhi, J. Kelly, P. V. Klimov, S. Knysh, A. Korotkov, F. Kostritsa, D. Landhuis, M. Lindmark, E. Lucero, D. Lyakh, S. Mandrà, J. R. McClean, M. McEwen, A. Megrant, X. Mi, K. Michielsen, M. Mohseni, J. Mutus, O. Naaman, M. Neeley, C. Neill, M. Y. Niu, E. Ostby, A. Petukhov, J. C. Platt, C. Quintana, E. G. Rieffel, P. Roushan, N. C. Rubin, D. Sank, K. J. Satzinger, V. Smelyanskiy, K. J. Sung, M. D. Trevithick, A. Vainsencher, B. Villalonga, T. White, Z. J. Yao, P. Yeh, A. Zalcman, H. Neven, and J. M. Martinis, “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor,” *Nature*, vol. 574, pp. 505–510, 10 2019.
- [23] H.-S. Zhong, H. Wang, Y.-H. Deng, M.-C. Chen, L.-C. Peng, Y.-H. Luo, J. Qin, D. Wu, X. Ding, Y. Hu, P. Hu, X.-Y. Yang, W.-J. Zhang, H. Li, Y. Li, X. Jiang, L. Gan, G. Yang, L. You, Z. Wang, L. Li, N.-L. Liu, C.-Y. Lu, and J.-W. Pan, “Quantum computational advantage using photons,” *Science*, vol. 370, 12 2020.
- [24] Q. Zhu, S. Cao, F. Chen, M.-C. Chen, X. Chen, T.-H. Chung, H. Deng, Y. Du, D. Fan, M. Gong, C. Guo, C. Guo, S. Guo, L. Han, L. Hong, H.-L. Huang, Y.-H. Huo, L. Li, N. Li, S. Li, Y. Li, F. Liang, C. Lin, J. Lin, H. Qian, D. Qiao, H. Rong, H. Su, L. Sun, L. Wang, S. Wang, D. Wu, Y. Wu, Y. Xu, K. Yan, W. Yang, Y. Yang, Y. Ye, J. Yin, C. Ying, J. Yu, C. Zha, C. Zhang, H. Zhang, K. Zhang, Y. Zhang, H. Zhao, Y. Zhao, L. Zhou, C.-Y. Lu, C.-Z. Peng, X. Zhu, and J.-W. Pan, “Quantum computational advantage via 60-qubit 24-cycle random circuit sampling,” *Science Bulletin*, vol. 67, pp. 240–245, 2 2022.

- [25] D. Cascado, C. F. D. D. Rio, and J. R. L. Giráldez, “Panorama general a la computación cuántica.”
- [26] L. Gyongyosi and S. Imre, “A survey on quantum computing technology,” *Computer Science Review*, vol. 31, pp. 51–71, 2 2019.
- [27] A. A. Khan, A. Ahmad, M. Waseem, P. Liang, M. Fahmideh, T. Mikkonen, and P. Abrahamsson, “Software architecture for quantum computing systems - asystematic review,” *SSRN Electronic Journal*, 2022.
- [28] K. Demertzis, G. D. Papadopoulos, L. Iliadis, and L. Magafas, “A comprehensive survey on nanophotonic neural networks: Architectures, training methods, optimization, and activations functions,” *Sensors*, vol. 22, p. 720, 1 2022.
- [29] M. Swan, F. Witte, and R. P. dos Santos, “Quantum information science,” *IEEE Internet Computing*, vol. 26, pp. 7–14, 1 2022.
- [30] C. D. Bruzewicz, J. Chiaverini, R. McConnell, and J. M. Sage, “Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges,” *Applied Physics Reviews*, vol. 6, p. 021314, 6 2019.
- [31] D. Kielpinski, C. Monroe, and D. J. Wineland, “Architecture for a large-scale ion-trap quantum computer,” *Nature*, vol. 417, pp. 709–711, 6 2002.
- [32] B. Lekitsch, S. Weidt, A. G. Fowler, K. Mølmer, S. J. Devitt, C. Wunderlich, and W. K. Hensinger, “Blueprint for a microwave trapped ion quantum computer,” *Science Advances*, vol. 3, 2 2017.
- [33] I. Pogorelov, T. Feldker, C. D. Marciniak, L. Postler, G. Jacob, O. Kriegelsteiner, V. Podlesnic, M. Meth, V. Negnevitsky, M. Stadler, B. Höfer, C. Wächter, K. Lakhmanskiy, R. Blatt, P. Schindler, and T. Monz, “Compact ion-trap quantum computing demonstrator,” *PRX Quantum*, vol. 2, p. 020343, 6 2021.
- [34] W. Neuhauser, M. Hohenstatt, P. E. Toschek, and H. Dehmelt, “Localized visible ba^+ mono-ion oscillator,” *Physical Review A*, vol. 22, pp. 1137–1140, 9 1980.
- [35] C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King, W. M. Itano, and D. J. Wineland, “Demonstration of a fundamental quantum logic gate,” *Physical Review Letters*, vol. 75, pp. 4714–4717, 12 1995.
- [36] R. V. Meter and S. J. Devitt, “Local and distributed quantum computation,” *Computer*, vol. 49, pp. 31–42, 5 2016.
- [37] C. Schneider, M. Enderlein, T. Huber, and T. Schaetz, “Optical trapping of an ion,” 1 2010.
- [38] J. M. Amini, H. Uys, J. H. Wesenberg, S. Seidelin, J. Britton, J. J. Bollinger, D. Leibfried, C. Ospelkaus, A. P. VanDevender, and D. J. Wineland, “Toward scalable ion traps for quantum information processing,” *New Journal of Physics*, vol. 12, p. 033031, 3 2010.

- [39] S. A. Moses, C. H. Baldwin, M. S. Allman, R. Ancona, L. Ascarrunz, C. Barnes, J. Bartolotta, B. Bjork, P. Blanchard, M. Bohn, J. G. Bohnet, N. C. Brown, N. Q. Burdick, W. C. Burton, S. L. Campbell, J. P. Campora, C. Carron, J. Chambers, J. W. Chan, Y. H. Chen, A. Chernoguzov, E. Chertkov, J. Colina, J. P. Curtis, R. Daniel, M. DeCross, D. Deen, C. Delaney, J. M. Dreiling, C. T. Ertsgaard, J. Esposito, B. Estey, M. Fabrikant, C. Figgatt, C. Foltz, M. Foss-Feig, D. Francois, J. P. Gaebler, T. M. Gatterman, C. N. Gilbreth, J. Giles, E. Glynn, A. Hall, A. M. Hankin, A. Hansen, D. Hayes, B. Higashi, I. M. Hoffman, B. Horning, J. J. Hout, R. Jacobs, J. Johansen, L. Jones, J. Karcz, T. Klein, P. Lauria, P. Lee, D. Liefer, C. Lytle, S. T. Lu, D. Lucchetti, A. Malm, M. Matheny, B. Mathewson, K. Mayer, D. B. Miller, M. Mills, B. Neyenhuis, L. Nugent, S. Olson, J. Parks, G. N. Price, Z. Price, M. Pugh, A. Ransford, A. P. Reed, C. Roman, M. Rowe, C. Ryan-Anderson, S. Sanders, J. Sedlacek, P. Shevchuk, P. Siegfried, T. Skripka, B. Spaun, R. T. Sprenkle, R. P. Stutz, M. Swallows, R. I. Tobey, A. Tran, T. Tran, E. Vogt, C. Volin, J. Walker, A. M. Zolot, and J. M. Pino, “A race track trapped-ion quantum processor,” 5 2023.
- [40] C. Monroe, R. Raussendorf, A. Ruthven, K. R. Brown, P. Maunz, L.-M. Duan, and J. Kim, “Large-scale modular quantum-computer architecture with atomic memory and photonic interconnects,” *Physical Review A*, vol. 89, p. 022317, 2 2014.
- [41] N. Friis, O. Marty, C. Maier, C. Hempel, M. Holzäpfel, P. Jurcevic, M. B. Plenio, M. Huber, C. Roos, R. Blatt, and B. Lanyon, “Observation of entangled states of a fully controlled 20-qubit system,” 11 2017.
- [42] “Aqtion: An ion-trap quantum computer for europe.” <https://www.aqtion.eu>.
- [43] “Qc systems - aqt — alpine quantum technologies.” <https://www.aqt.eu/qc-systems/>.
- [44] “Aqt — the world’s leading 19” rack-mounted quantum computer.” <https://www.aqt.eu/pine-system-19-rack-mounted-quantum-computer/>.
- [45] “Quantum computers from eleqtron.” <https://eleqtron.com/en/product/>.
- [46] “Infineon quantum computing.” <https://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/quantumcomputing/>.
- [47] “Universal quantum – solving the million qubit challenge.” <https://universalquantum.com/>.
- [48] T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, and J. L. O’Brien, “Quantum computers,” *Nature*, vol. 464, pp. 45–53, 3 2010.
- [49] J. Verjauw, R. Acharya, J. V. Damme, T. Ivanov, D. P. Lozano, F. A. Mohiyaddin, D. Wan, J. Jussot, A. M. Vadiraj, M. Mongillo, M. Heyns, I. Radu, B. Govoreanu, and A. Potočnik, “Path toward manufacturable superconducting qubits with relaxation times exceeding 0.1 ms,” *npj Quantum Information*, vol. 8, p. 93, 8 2022.

- [50] L. N. Cooper, “Bound electron pairs in a degenerate fermi gas,” *Physical Review*, vol. 104, pp. 1189–1190, 11 1956.
- [51] B. Josephson, “Possible new effects in superconductive tunnelling,” *Physics Letters*, vol. 1, pp. 251–253, 7 1962.
- [52] P. W. Anderson and J. M. Rowell, “Probable observation of the josephson superconducting tunneling effect,” *Physical Review Letters*, vol. 10, pp. 230–232, 3 1963.
- [53] Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, and J. S. Tsai, “Coherent control of macroscopic quantum states in a single-cooper-pair box,” *Nature*, vol. 398, pp. 786–788, 4 1999.
- [54] J. Koch, T. M. Yu, J. Gambetta, A. A. Houck, D. I. Schuster, J. Majer, A. Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf, “Charge-insensitive qubit design derived from the cooper pair box,” *Physical Review A*, vol. 76, p. 042319, 10 2007.
- [55] J. H. Plantenberg, P. C. de Groot, C. J. P. M. Harmans, and J. E. Mooij, “Demonstration of controlled-not quantum gates on a pair of superconducting quantum bits,” *Nature*, vol. 447, pp. 836–839, 6 2007.
- [56] J. Kelly, R. Barends, A. G. Fowler, A. Megrant, E. Jeffrey, T. C. White, D. Sank, J. Y. Mutus, B. Campbell, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, I.-C. Hoi, C. Neill, P. J. J. O’Malley, C. Quintana, P. Roushan, A. Vainsencher, J. Wenner, A. N. Cleland, and J. M. Martinis, “State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit,” *Nature*, vol. 519, pp. 66–69, 3 2015.
- [57] N. Ofek, A. Petrenko, R. Heeres, P. Reinhold, Z. Leghtas, B. Vlastakis, Y. Liu, L. Frunzio, S. M. Girvin, L. Jiang, M. Mirrahimi, M. H. Devoret, and R. J. Schoelkopf, “Extending the lifetime of a quantum bit with error correction in superconducting circuits,” *Nature*, vol. 536, pp. 441–445, 8 2016.
- [58] A. Córcoles, E. Magesan, S. J. Srinivasan, A. W. Cross, M. Steffen, J. M. Gambetta, and J. M. Chow, “Demonstration of a quantum error detection code using a square lattice of four superconducting qubits,” *Nature Communications*, vol. 6, p. 6979, 4 2015.
- [59] S. J. Devitt, “Performing quantum computing experiments in the cloud,” *Physical Review A*, vol. 94, p. 032329, 9 2016.
- [60] E. Pednault, J. A. Gunnels, G. Nannicini, L. Horesh, and R. Wisnieff, “Leveraging secondary storage to simulate deep 54-qubit sycamore circuits,” 10 2019.
- [61] J. Guillaud and M. Mirrahimi, “Repetition cat qubits for fault-tolerant quantum computation,” *Physical Review X*, vol. 9, 4 2019.
- [62] “Announcing the opening of the aws center for quantum computing.” <https://aws.amazon.com/es/blogs/quantum-computing/announcing-the-opening-of-the-aws-center-for-quantum-computing/>.

- [63] “Amazon braket - aws.” <https://aws.amazon.com/es/braket/>.
- [64] “Amazon quantum solutions lab.” <https://aws.amazon.com/es/quantum-solutions-lab/>.
- [65] “Bleximo.” <https://bleximo.com/#approach>.
- [66] “Nasa quantum artificial intelligence laboratory (quail) — nasa.” <https://www.nasa.gov/content/nasa-quantum-artificial-intelligence-laboratory-quail>.
- [67] “Ibm quantum 2022 updated development roadmap - youtube.” <https://www.youtube.com/watch?v=0ka20qanWzI>.
- [68] “Ibm further improves their quantum volume to 512 - quantum computing report.” <https://quantumcomputingreport.com/ibm-further-improves-their-quantum-volume-to-512/>.
- [69] “Iqm product offering.” <https://meetiqm.com/uploads/documents/IQM-Product-Offering.pdf>.
- [70] “Iqm academy.” <https://www.iqmacademy.com/>.
- [71] “Technology - oxfordquantumcircuits.” <https://oxfordquantumcircuits.com/technology>.
- [72] “Quantum circuits inc..” <https://quantumcircuits.com>.
- [73] “Raytheon bbn — raytheon intelligence & space.” <https://www.raytheonintelligenceandspace.com/what-we-do/bbn>.
- [74] “Quantum engineering and computing — raytheon intelligence & space.” <https://www.raytheonintelligenceandspace.com/what-we-do/advanced-tech/quantum>.
- [75] “Building scalable, innovative quantum systems — rigetti computing.” <https://www.rigetti.com/what-we-build>.
- [76] “Rigetti computing reports first quarter 2023 results — rigetti & co, llc.” <https://investors.rigetti.com/news-releases/news-release-details/rigetti-computing-reports-first-quarter-2023-results>.
- [77] “Quantum computing technology — seeqc.” <https://seeqc.com/technology>.
- [78] “Silicofeller - home.” <https://silicofeller.com/>.
- [79] Y. Wu, W.-S. Bao, S. Cao, F. Chen, M.-C. Chen, X. Chen, T.-H. Chung, H. Deng, Y. Du, D. Fan, M. Gong, C. Guo, C. Guo, S. Guo, L. Han, L. Hong, H.-L. Huang, Y.-H. Huo, L. Li, N. Li, S. Li, Y. Li, F. Liang, C. Lin, J. Lin, H. Qian, D. Qiao, H. Rong, H. Su, L. Sun, L. Wang, S. Wang, D. Wu, Y. Xu, K. Yan, W. Yang, Y. Yang, Y. Ye, J. Yin, C. Ying, J. Yu, C. Zha, C. Zhang, H. Zhang, K. Zhang, Y. Zhang, H. Zhao, Y. Zhao, L. Zhou, Q. Zhu, C.-Y. Lu, C.-Z. Peng, X. Zhu, and J.-W. Pan, “Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor,” *Physical Review Letters*, vol. 127, p. 180501, 10 2021.

- [80] K. Kumar, N. A. Sharma, R. Prasad, A. Deo, M. T. Khorshed, M. Prasad, A. Dutt, and A. S. Ali, “A survey on quantum computing with main focus on the methods of implementation and commercialization gaps,” pp. 1–7, IEEE, 12 2015.
- [81] J. Wang, F. Sciarrino, A. Laing, and M. G. Thompson, “Integrated photonic quantum technologies,” *Nature Photonics*, vol. 14, 5 2020.
- [82] K. Igeta and Y. Yamamoto, “Quantum mechanical computers with single atom and photon fields,” p. TuI4, Optica Publishing Group, 1988.
- [83] E. Knill, R. Laflamme, and G. J. Milburn, “A scheme for efficient quantum computation with linear optics,” *Nature*, vol. 409, pp. 46–52, 1 2001.
- [84] R. Raussendorf and H. J. Briegel, “A one-way quantum computer,” *Physical Review Letters*, vol. 86, pp. 5188–5191, 5 2001.
- [85] M. A. Nielsen, “Optical quantum computation using cluster states,” *Physical Review Letters*, vol. 93, 2 2004.
- [86] A. Politi, M. J. Cryan, J. G. Rarity, S. Yu, and J. L. O’Brien, “Silica-on-silicon waveguide quantum circuits,” *Science*, vol. 320, pp. 646–649, 2 2008.
- [87] “Psiquantum — fault tolerant quantum computing — photonics.” <https://psiquantum.com/>.
- [88] J. L. O’Brien, A. Furusawa, and J. Vučković, “Photonic quantum technologies,” *Nature Photonics*, vol. 3, pp. 687–695, 12 2009.
- [89] “Product catalogue 2023 quandela sas.” <https://www.quandela.com/wp-content/uploads/2023/01/Quandela-Product-Catalogue-2023-.pdf>, 2023.
- [90] “Perceval – quandela.” <https://www.quandela.com/perceval/>.
- [91] “Mosaiq – quandela.” <https://www.quandela.com/mosaiq/>.
- [92] H.-S. Zhong, Y.-H. Deng, J. Qin, H. Wang, M.-C. Chen, L.-C. Peng, Y.-H. Luo, D. Wu, S.-Q. Gong, H. Su, Y. Hu, P. Hu, X.-Y. Yang, W.-J. Zhang, H. Li, Y. Li, X. Jiang, L. Gan, G. Yang, L. You, Z. Wang, L. Li, N.-L. Liu, J. J. Renema, C.-Y. Lu, and J.-W. Pan, “Phase-programmable gaussian boson sampling using stimulated squeezed light,” *Physical Review Letters*, vol. 127, p. 180502, 10 2021.
- [93] J. M. Arrazola, V. Bergholm, K. Brádler, T. R. Bromley, M. J. Collins, I. Dhand, A. Fumagalli, T. Gerrits, A. Goussev, L. G. Helt, J. Hundal, T. Isacsson, R. B. Israel, J. Izaac, S. Jahangiri, R. Janik, N. Killoran, S. P. Kumar, J. Lavoie, A. E. Lita, D. H. Mahler, M. Menotti, B. Morrison, S. W. Nam, L. Neuhaus, H. Y. Qi, N. Quesada, A. Repeatingon, K. K. Sabapathy, M. Schuld, D. Su, J. Swinerton, A. Száva, K. Tan, P. Tan, V. D. Vaidya, Z. Vernon, Z. Zabaneh, and Y. Zhang, “Quantum circuits with many photons on a programmable nanophotonic chip,” *Nature*, vol. 591, 3 2021.

- [94] “Xeedq - the quantum transcendence.” <https://xeedq.com/>.
- [95] “Products - aegiq.” <https://www.aegiq.com/products/>.
- [96] “Home - auréa technology - photon counting solution.” <https://www.aureatechnology.com/en/>.
- [97] “Nu quantum.” <https://nu-quantum.com/>.
- [98] “Microsoft research station q.” <https://news.microsoft.com/stories/stationq/>.
- [99] N. Yao, L. Jiang, A. Gorshkov, P. Maurer, G. Giedke, J. Cirac, and M. Lukin, “Scalable architecture for a room temperature solid-state quantum information processor,” *Nature Communications*, vol. 3, p. 800, 4 2012.
- [100] “The advantage quantum computer — d-wave.” <https://www.dwavesys.com/solutions-and-products/systems/>.
- [101] “Comparing quantum computers: Metrics and monroney.” <https://ionq.com/resources/comparing-quantum-computers-metrics-and-monroney>.
- [102] A. D. Corcoles, A. Kandala, A. Javadi-Abhari, D. T. McClure, A. W. Cross, K. Temme, P. D. Nation, M. Steffen, and J. M. Gambetta, “Challenges and opportunities of near-term quantum computing systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 108, pp. 1338–1352, 8 2020.
- [103] P. Shor, “Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring,” pp. 124–134, IEEE Comput. Soc. Press, 1994.
- [104] S. Aaronson and A. Arkhipov, “The computational complexity of linear optics,” pp. 333–342, ACM, 11 2010.
- [105] C. S. Hamilton, R. Kruse, L. Sansoni, S. Barkhofen, C. Silberhorn, and I. Jex, “Gaussian boson sampling,” 12 2016.
- [106] T. R. Bromley, J. M. Arrazola, S. Jahangiri, J. Izaac, N. Quesada, A. D. Gran, M. Schuld, J. Swinarton, Z. Zabaneh, and N. Killoran, “Applications of near-term photonic quantum computers: software and algorithms,” *Quantum Science and Technology*, vol. 5, p. 034010, 5 2020.
- [107] “Quantum volume - pennylane.” <https://pennylane.ai/qml/demos/quantum-volume>.
- [108] N. Killoran, J. Izaac, N. Quesada, V. Bergholm, M. Amy, and C. Weedbrook, “Strawberry fields: A software platform for photonic quantum computing,” *Quantum*, vol. 3, p. 129, 3 2019.
- [109] N. Khammassi, G. G. Guerreschi, I. Ashraf, J. W. Hogaboam, C. G. Almudever, and K. Bertels, “cqasm v1.0: Towards a common quantum assembly language,” 5 2018.

- [110] A. W. Cross, L. S. Bishop, J. A. Smolin, and J. M. Gambetta, “Open quantum assembly language,” 7 2017.
- [111] R. S. Smith, M. J. Curtis, and W. J. Zeng, “A practical quantum instruction set architecture,” 8 2016.
- [112] E. C. R. D. Rosa and R. D. Santiago, “Ket quantum programming,” *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems*, vol. 18, pp. 1–25, 1 2022.
- [113] M. Hynek, “Introduction to lanq – an imperative quantum programming language,” *Syntax*, 2006.
- [114] E. Knill, “Conventions for quantum pseudocode,” 11 2022.
- [115] B. Ömer, “A procedural formalism for quantum computing,” *Master’s thesis, Department of Theoretical Physics*, 1998.
- [116] P. SELINGER, “Towards a quantum programming language,” *Mathematical Structures in Computer Science*, vol. 14, pp. 527–586, 8 2004.
- [117] P. Zuliani, “Non-deterministic quantum programming,” *Proceedings of the 2nd International Workshop on Quantum Programming Languages*, 2004.
- [118] T. Altenkirch and J. Grattage, “A functional quantum programming language,” 9 2004.
- [119] B. Bichsel, M. Baader, T. Gehr, and M. Vechev, “Silq: a high-level quantum language with safe uncomputation and intuitive semantics,” pp. 286–300, ACM, 6 2020.
- [120] D. Wecker and K. M. Svore, “Liqui|⟩: A software design architecture and domain-specific language for quantum computing,” 2 2014.
- [121] “What are q# and the quantum development kit? - microsoft azure.” <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/overview-what-is-qsharp-and-qdk>.
- [122] S. Pakin, “A quantum macro assembler,” pp. 1–8, IEEE, 9 2016.
- [123] “Cirq.” <https://doi.org/10.5281/zenodo.7465577>, 12 2022.
- [124] V. Bergholm, J. Izaac, M. Schuld, C. Gogolin, S. Ahmed, V. Ajith, M. S. Alam, G. Alonso-Linaje, B. AkashNarayanan, A. Asadi, J. M. Arrazola, U. Azad, S. Banning, C. Blank, T. R. Bromley, B. A. Cordier, J. Ceroni, A. Delgado, O. D. Matteo, A. Dusko, T. Garg, D. Guala, A. Hayes, R. Hill, A. Ijaz, T. Isaacson, D. Ittah, S. Jahangiri, P. Jain, E. Jiang, A. Khandelwal, K. Kottmann, R. A. Lang, C. Lee, T. Loke, A. Lowe, K. McKiernan, J. J. Meyer, J. A. Montañez-Barrera, R. Moyard, Z. Niu, L. J. O’Riordan, S. Oud, A. Panigrahi, C.-Y. Park, D. Polatajko, N. Quesada, C. Roberts, N. Sá, I. Schoch, B. Shi, S. Shu, S. Sim, A. Singh, I. Strandberg, J. Soni, A. Száva, S. Thabet, R. A. Vargas-Hernández, T. Vincent, N. Vitucci, M. Weber, D. Wierichs, R. Wiersema, M. Willmann, V. Wong, S. Zhang, and N. Killoran, “PennyLane: Automatic differentiation of hybrid quantum-classical computations,” 11 2018.

- [125] S. Efthymiou, S. Ramos-Calderer, C. Bravo-Prieto, A. Pérez-Salinas, D. García-Martín, A. Garcia-Saez, J. I. Latorre, and S. Carrazza, “Qibo: a framework for quantum simulation with hardware acceleration,” *Quantum Science and Technology*, vol. 7, p. 015018, 1 2022.
- [126] “Qiskit.” <https://qiskit.org>.
- [127] S. Sivarajah, S. Dilkes, A. Cowtan, W. Simmons, A. Edgington, and R. Duncan, “t—ket): a retargetable compiler for nisq devices,” *Quantum Science and Technology*, vol. 6, p. 014003, 1 2021.
- [128] “Ocean developer tools — d-wave.” <https://www.dwavesys.com/solutions-and-products/ocean/>.
- [129] N. Heurtel, A. Fyrrillas, G. de Gliniasty, R. L. Bihan, S. Malherbe, M. Pailhas, E. Bertasi, B. Bourdoncle, P.-E. Emeriau, R. Mezher, L. Music, N. Belabas, B. Valiron, P. Senellart, S. Mansfield, and J. Senellart, “Perceval: A software platform for discrete variable photonic quantum computing,” *Quantum*, vol. 7, p. 931, 2 2023.
- [130] D. S. Steiger, T. Häner, and M. Troyer, “Projectq: An open source software framework for quantum computing,” 12 2016.
- [131] T. Häner, D. S. Steiger, K. Svore, and M. Troyer, “A software methodology for compiling quantum programs,” 4 2016.
- [132] R. LaRose, “Overview and comparison of gate level quantum software platforms,” *Quantum*, vol. 3, p. 130, 3 2019.

A. Clasificación bibliográfica fase 3a

66

ARTÍCULO "PADRE"	Nº. REF.	CATEGORÍA	UTILIDAD PREVISTA	REFERENCIA	REVISTA	CUARTIL	PRIORIDAD	LEÍDO	VEREDICTO	JUSTIFICACIÓN (si no añadido)
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	-	Energía	A gran escala la demanda energética se dispara (P. 37). Gráfico hype-cycle	-	-	-	1	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	103	Fotónicos	Computación eficiente con linear optics. ARTÍCULO DE GRAN IMPORTANCIA.	E. Knill, R. Laflamme, G.J. Milburn, A scheme for efficient quantum computation with linear optics, Nature 409 (2001) 46.	NATURE	Q1	1	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	109	Fotónicos	Atributos principales de la computación cuántica óptica	J.L. O'Brien, Optical quantum computing, Science 318 (5856) (2007) 1567–1570, 12.	SCIENCE	Q1	1	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	110	Fotónicos	PRINCIPALES TECNOLOGÍAS FOTÓNICAS	J.L. O'Brien, A. Furusawa, J. Vuckovic, Photonic quantum technologies, Nature Photon. 3 (12) (2009) 887–896, 12.	NATURE PHOTONICS	Q1	1	✓	NO AÑADIR	Se ha encontrado un art. de revisión de arquitecturas fotónicas muy similar a este y más reciente (2020), DOI: 10.1038/s41566-019-0532-1
A Survey on quantum computing technology	268	Fotónicos	Artículo de importancia en fotónicos (2004)	Hayes AJF, Gilchrist A, Myers CR, Ralph TC. Utilizing encoding in scalable linear optics quantum computing. JOptBQuantum Semiclass Opt. 2004;6(12):533-541.	QUANTUM AND SEMICLASSICAL OPTICS	Q2	1	✓	NO AÑADIR	No se han encontrado otras referencias que respalden la importancia que el artículo padre atribuye a este artículo
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	42	Otro	Discusión de varios conceptos relevantes de la computación cuántica: qubits, entrelazamiento, etc. Habla de los retos de dos empresas del sector	Kumar K, Sharma NA, Prasad R. A survey on quantum computing with Main focus on the methods of implementation and commercialization gaps. Proceedings of the 2015 2nd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering (APWC on CSE 2015);2015:1-7.	N/A	N/A	1	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	-	Otro	No se necesita corrección de errores con las arquitecturas topológicas.	-	-	-	1	✓	AÑADIR	
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	266	Superconductores	ACTUALIDAD DE SUPERCONDUCTORES	Kelly J, Barends R, Fowler AG, et al. State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit. Nature. 2015;519(7541):66-69.	NATURE	Q1	1	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	8	Superconductores	Progreso en superconductores (2016). Vida útil de qubits extendida con corrección de errores	N. Ofek, et al., Extending the lifetime of a quantum bit with error correction in superconducting circuits, Nature 536 (2016) 441–445.	NATURE	Q1	1	✓	AÑADIR	
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	10	Trampas de iones	FUNDAMENTOS DE TRAMPAS DE IONES	Paul W. Electromagnetic traps for charged and neutral particles. Rev Mod Phys. 1990;62(3):531-540.	REVIEWS OF MODERN PHYSICS	Q1	1	✓	AÑADIR	
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	265	Trampas de iones	ACTUALIDAD DE TRAMPAS DE IONES	Frisi N, Marty O, Maier C, et al. Observation of entangled states of a fully controlled 20-qubit system. Phys Rev X. 2018;8(2):021012.	PHYSICAL REVIEW X	Q1	1	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	51	Otro	Céntros nitrógeno-vacantes (diamante)	N.Y. Yao, L. Jiang, A.V. Gorshkov, P.C. Maurer, G. Giedke, J.I. Cirac, M.D. Lukin, Scalable architecture for a room temperature solid-state quantum information processor, Nature Commun. 3 (2012) 800.	NATURE COMMUNICATIONS	Q1	1	✓	AÑADIR	
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	293	Energía	Problema de la gestión energética. High-energy / low-energy	Gill SS, BuyyaR. A taxonomy and future directions for sustainable cloud computing: 360 degree view. ACMComputSurv. 2018;51(5):1-33.	ACM COMPUTING SURVEYS	Q1	2	✓	NO AÑADIR	Este artículo no está relacionado con la computación cuántica
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	289	Errores	Técnicas de corrección de errores	Devitt S.J, Munro W.J, Nemoto K. Quantum error correction for beginners. Rep Prog Phys. 2013;76(7):076001.	REPORTS OF PROGRESS IN PHYSICS	Q1	2	✓	NO AÑADIR	Dada la estructura final del trabajo, se ha acabado estimando innecesario tratar la corrección de errores en más detalle
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	254	Fotónicos	Cavity quantum electrodynamics	Walther H, Varcoe BT, Englert BG, Becker T. Cavity quantum electrodynamics. Rep Prog Phys. 2006;69(5):1325-1382.	REPORTS OF PROGRESS IN PHYSICS	Q1	2	✓	NO AÑADIR	Ya se dispone de suficiente información sobre esta arquitectura
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	256	Otro	Arquitecturas basadas en diamante	Neumann P, Mizuochi N, Rempp F, et al. Multiparticle entanglement among single spins in diamond. Science. 2008;320(5881):1326-1329.	SCIENCE	Q1	2	✓	NO AÑADIR	Ya se dispone de suficiente información sobre esta arquitectura
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	257	Otro	Condensado de Bose-Einstein (átomos neutrales)	Anderlini M, Lee PJ, Brown BL, Sebby-Strabley J, Phillips WD, Porto JV. Controlled exchange interaction between pairs of neutral atoms in an optical lattice. Nature. 2007;448(7152):452-456.	NATURE	Q1	2	✓	NO AÑADIR	Ya se dispone de suficiente información sobre esta arquitectura
Software Architecture for Quantum Computing Systems - A systematic Review	45	Otro	Problema de la escalabilidad de ordenadores cuánticos	Antonio D Córcoles et al. Challenges and opportunities of near-term quantum computing systems. arXiv preprint arXiv:1910.02894, 2019.	PROCEEDINGS OF THE IEEE	Q1	2	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	229	Otro	Cuestiones fundamentales sobre la construcción de ordenadores cuánticos	R. Van Meter, C. Horsman, A blueprint for building a quantum computer, Commun. ACM 53 (10) (2013) 84–83.	COMMUNICATIONS OF THE ACM	Q1	2	✓	NO AÑADIR	Este artículo es de carácter divulgativo, y trata temas que ya se tienen cubiertos
A Survey on quantum computing technology	288	Otro	Límites fundamentales de la computación (fabricación, energía, espacio físico, esfuerzo de diseño y verificación, y algoritmos)	I.L. Markov, Limits on fundamental limits to computation, Nature 512 (7513) (2014) 147–154.	NATURE	Q1	2	✓	NO AÑADIR	Este artículo se refiere a los límites que existen en computación clásica, aunque proporciona buenas referencias para el problema de la ley de Moore
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	12	Otro	Redes ópticas	Grimm R, Weidemüller M, Ovchinnikov YB. Optical dipole traps for neutral atoms. In: Berman PR, Lin CC, Arimondo E, eds. Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics. Vol 42. Academic Press; 2000:95-170.	ADVANCES IN ATOMIC MOLECULAR AND OPTICAL PHYSICS	Q2	2	✓	NO AÑADIR	Ya se dispone de suficiente información sobre esta arquitectura
A Survey on quantum computing technology	42	Superconductores	Progreso en superconductores (2015). Demostración de detección de errores.	A.D. Córcoles, et al., Demonstration of quantum error detection code using a square lattice of four superconducting qubits, Nature Commun. 6 (2015) 6979.	NATURE COMMUNICATIONS	Q1	2	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	93	Superconductores	Progreso en superconductores (2009). Modelos de arquitecturas tolerantes a fallos.	D.P. DiVincenzo, Fault-tolerant architectures for superconducting qubits, Phys. Scr. T. 137 (2009).	PHYSICA SCRIPTA	Q2	2	✓	NO AÑADIR	De nuevo, este artículo trata sobre técnicas de corrección de errores, las cuales no se tratarán en profundidad en el trabajo
A Survey on quantum computing technology	83	Trampas de iones	Progreso en trampas de iones (1995). Valor histórico.	J.I. Cirac, P. Zoller. Quantum computations with cold trapped ions, Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 4091.	PHYSICAL REVIEW LETTERS	Q1	2	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	61	Trampas de iones	Progreso en trampas de iones (2014).	C. Monroe, R. Raussendorf, A. Ruthven, K.R. Brown, P. Maunz, L.M. Duan, J. Kim, Large-scale modular quantum-computer architecture with atomic memory and photonic interconnects, Phys. Rev. A 89 (2014) 022317.	PHYSICAL REVIEW A	Q2	2	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	87	Trampas de iones	Progreso en trampas de iones (2002). Valor histórico.	D. Kielpinski, C. Monroe, D.J. Wineland, Architecture for a large-scale ion-trap quantum computer, Nature 417 (2002) 709.	NATURE	Q1	2	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	90	Trampas de iones	Progreso en trampas de iones (1995). Valor histórico.	C. Monroe, D.M. Meekhof, B.E. King, W.M. Itano, D.J. Wineland, Demonstration of a fundamental quantum logic gate, Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 4714.	PHYSICAL REVIEW LETTERS	Q1	2	✓	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	245	Trampas de iones	Sobre el problema de la escalabilidad en la corrección de errores en trampas de iones	D.K.L. Oi, S.J. Devitt, L.C.L. Hollenberg, Scalable error correction in distributed ion trap computers, Phys. Rev. A 74 (2006) 052313.	PHYSICAL REVIEW A	Q2	2	✓	NO AÑADIR	Corrección de errores. Tampoco se han encontrado evidencias de que este artículo tenga gran importancia en la historia de la arquitectura
A Survey on quantum computing technology	10	Trampas de iones	Progreso en trampas de iones (2016).	R. Van Meter, S.J. Devitt. Local and distributed quantum computation, IEEE Comput. 49 (9) (2016) 31–42, arXiv:1605.06951v1.	IEEE COMPUTER	Q2	2	✓	AÑADIR	
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	294	Energía	Los ordenadores cuánticos son más eficientes que los clásicos	Ajagekar A, You F. Quantum computing for energy systems optimization: challenges and opportunities. Energy. 2019;179:76-89.	ENERGY	Q1	3	✓	NO AÑADIR	Este artículo trata sobre el uso de computadores cuánticos para optimizar procesos plantas energéticas. No trata sobre la eficiencia de dichos computadores
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	290	Energía	Trabajar a bajas temperaturas reduce la pérdida de energía en forma de calor.	Ho A, McClean J, Ong SP. The promise and challenges of quantum computing for energy storage. Aust Dent J. 2018;2(5):810-813.	JOULE	Q1	3	✓	NO AÑADIR	Este artículo trata de almacenamiento de energía utilizando métodos "exóticos". No trata sobre eficiencia energética.

ARTÍCULO "PADRE"	Nº. REF. CATEGORÍA	UTILIDAD PREVISTA	REFERENCIA	REVISTA	CUARTIL	PRIORIDAD	LEÍDO	VEREDICTO	JUSTIFICACIÓN (si no añadido)
Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions	287 Errores	Problema de la tolerancia de errores	Paler A, Devitt S.J. An introduction into fault-tolerant quantum computing. Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference; 2015:1-6.	N/A	N/A	3	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	Corrección de errores.
A Survey on quantum computing technology	41 Errores		J. Combes, et al., In-situ characterization of quantum devices with error correction, 2014, arXiv:1405.5656.			3	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	Corrección de errores.
A Survey on quantum computing technology	122 Otro	Fundamentos de computación topológica.	M.H. Freedman, A. Kitaev, M.J. Larsen, Z. Wang, Topological quantum computation, Bull. Amer. Math. Soc. 40 (01) (2002) 31–39.	BULLETIN OF THE AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY	Q1	3	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	Ya se dispone de suficiente información sobre esta arquitectura
A Survey on quantum computing technology	91 Superconductores	Progreso en superconductores (2016).	T. Brecht, W. Pfaff, C. Wang, Y. Chu, L. Frunzio, M.H. Devoret, R.J. Schoelkopf, Multilayer microwave integrated quantum circuits for scalable quantum computing. Npj Quantum Inf. 2 (2016) 16002.	NPJ QUANTUM INFORMATION	Q1	3	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	Ya se disponen de su
A Survey on quantum computing technology	92 Superconductores	Progreso en superconductores (2013).	M.H. Devoret, R.J. Schoelkopf, Superconducting circuits for quantum information: An outlook, Science 339 (2013) 1169.	SCIENCE	Q1	3	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	A pesar de la gran cantidad de menciones que existen a este artículo, no deja de ser un artículo de revisión de hace 10 años. Se dispone de suficientes referencias para el apartado histórico de la arquitectura, y la explicación de los fundamentos aquí realizada es de muy bajo nivel.
A Survey on quantum computing technology	67 Superconductores	Progreso en superconductores (2017).	J. Salmilehto, F. Deppe, M. Di Ventra, M. Sanz, E. Solano, Quantum memristors with superconducting circuits, Sci. Rep. 7 (2017) 42044.	SCIENTIFIC REPORTS	Q2	3	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	No se ha estimado suficientemente relevante como para tratar los contenidos de este artículo en el apartado histórico.
A Survey on quantum computing technology	82 Trampas de iones	Progreso en trampas de iones (2016).	K.R. Brown, J. Kim, C. Monroe, Co-designing a scalable quantum computer with trapped atomic ions, 2016, arXiv:1602.02840.	NPJ QUANTUM INFORMATION	Q1	3	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	Ya se dispone de suficiente información sobre esta arquitectura.
A Survey on quantum computing technology	89 Trampas de iones	Progreso en trampas de iones (2015).	B. Lekitsch, S. Weidt, A.G. Fowler, K. Moolmer, S.J. Devitt, C. Wunderlich, W.K. Hensinger, Blueprint for a microwave ion trap quantum computer, 2015, arxiv:1508.00420.	SCIENCE ADVANCES	Q1	3	<input checked="" type="checkbox"/>	AÑADIR	
A Survey on quantum computing technology	86 Trampas de iones	Progreso en trampas de iones (2014). Mención al entrelazado.	D. Hucul, I.V. Inlek, G. Vittorini, C. Crocker, S. Debnath, S.M. Clark, C. Monroe, Modular entanglement of atomic qubits using photons and phonons, Nat. Phys. 11 (2014) 37–42.	NATURE PHYSICS	Q1	3	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	Ya se dispone de una referencia similar a esta de una fecha anterior.
A Survey on quantum computing technology	49 Errores		D. Riste, et al., Detecting bit-flip errors in a logical qubit using stabilizer measurements. Nature Commun. 6 (2015) 6983.	NATURE COMMUNICATIONS	Q1	4	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	Corrección de errores.
A Survey on quantum computing technology	44 Errores		A.B. Gribó, I. Kerenidis, Learning with errors is easy with quantum samples, 2017, arXiv:1702.08255.	PHYSICAL REVIEW A	Q2	4	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	Corrección de errores.
A Survey on quantum computing technology	19 Otro	Puertas de Toffoli y Fredkin.	R. Van Meter, Architecture of a Quantum Multicomputer Optimized for Shor's states Factoring Algorithm, (Ph.D. thesis), Keio University, 2006, arXiv: quant-ph/0607065.	N/A	N/A	4	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	No se ha estimado necesario. El apartado de puertas cuánticas ya presenta las más utilizadas. El resto del artículo no resulta de utilidad para ampliar otras secciones.
A Survey on quantum computing technology	94 Superconductores	Progreso en superconductores (2015).	N. Friis, A.A. Melnikov, G. Kirchmair, H.J. Briegel, Coherent control using superconducting qubits, Sci. Rep. (2015).	SCIENTIFIC REPORTS	Q2	4	<input checked="" type="checkbox"/>	NO AÑADIR	Artículo de enfoque demasiado específico como para ser de utilidad en el trabajo

B. Hoja de ruta de IBM

Development Roadmap Executed by IBM On target

IBM Quantum

