



TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN CIENCIA, GESTIÓN E INGENIERÍA DE SERVICIOS
CURSO ACADÉMICO 2022-2023
CONVOCATORIA NOVIEMBRE

INTEGRACIÓN DE QUANTUM COMPUTING EN EL SECTOR SERVICIOS:
REFORMULACIÓN A TRAVÉS DE LA CUÁNTICA

AUTORA: Moreno Ambrosio, Sonia

DNI: 03183796K

TUTORES: López Sanz, Marcos; Sevilla López, Francisco Javier

En Madrid, a 4 de noviembre de 2023

<i>AGRADECIMIENTOS</i>	4
<i>RESUMEN</i>	5
<i>ABSTRACT</i>	5
<i>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</i>	6
1.1 Motivación	6
1.2 Objetivos	8
1.3 Estructura de la memoria	9
<i>CAPÍTULO 2: BASES DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA</i>	9
2.1 Introducción histórica	9
2.2 Marco regulador e impacto socioeconómico de la computación cuántica.	13
2.3 Propiedades y características básicas	16
2.3.1 El principio de superposición.....	17
2.3.2 El principio de entrelazamiento cuántico.....	17
2.3.3 El principio de interferencia.....	18
2.3.4 El principio de decoherencia.....	19
2.3.5 Los qubits.....	19
2.4 Computadoras y tecnologías cuánticas	21
2.5 Estado actual de la tecnología	24
2.6 Usos reales	25
<i>CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE EQUIVALENCIA ENTRE SERVICIOS Y COMPUTACIÓN CUÁNTICA</i>	26
3.1 Técnicas de modelado de servicios	26
3.2 Comparativa de computaciones	32
3.3 Tecnologías as a service y cuántica	39
3.4 Propuesta de integración de tecnologías cuánticas en el sector servicios	42
3.5 Ciclo de vida de los servicios	44
3.6 Aplicación a un servicio real: Optimización de cadenas de suministro	46
3.6.1 Planificación y evaluación.....	47
3.6.2 Diseño del servicio.....	47
3.6.3 Transición del servicio.....	48
3.6.4 Operación del servicio.....	49
3.6.5 Mejora continua.....	49
<i>CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES</i>	50
4.1 Análisis de consecución de objetivos	50
4.2 Conclusiones generales	51
4.3 Conclusiones personales	52
<i>CAPÍTULO 5: BIBLIOGRAFÍA Y LUGARES DE INTERNET</i>	53
<i>Bibliografía</i>	53

ÍNDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1: Bit y byte Fuente: Wikipedia.....	12
Ilustración 2: Ecuación de Schrödinger Fuente: Wikipedia	13
Ilustración 4: Representación de un qubit mediante una esfera de Bloch Fuente: Qiskit con edición propia	20
Ilustración 3: Representación gráfica de un bit. Fuente: elaboración propia	20
Ilustración 5: Ejemplo de customer journey map. Fuente: Mind Tools	28
Ilustración 6: Ejemplo de Blueprint del servicio. Fuente: Nielsen Norman Group.....	29
Ilustración 7: Ejemplo de Value Stream Mapping. Fuente: NIST	31
Ilustración 8: Tabla comparativa de computaciones	33
Ilustración 9: Imagen explicativa de los "as a service" Fuente: Microsoft	39

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por creer siempre en mí y ayudarme a mantenerme a flote.

A mis amigas, por ser y por estar, siempre.

A Lidia, por no soltarme nunca de la mano.

*A mis chicas de la 113: Mapi, Alicia, Carmen;
por ser mi salvavidas cuando parecía ahogarme.*

*A mi chiquitín, Orión, por ayudar a que este trabajo saliera adelante,
siempre tumbadito a mis pies.*

Y a mi abuelo, porque sé que estaría orgulloso.

RESUMEN

La computación cuántica es una tecnología revolucionaria y novedosa, que puede cambiar sin precedentes el transcurso de la historia tecnológica pero pese a todo el potencial que tiene, hoy en día aún no se ha podido demostrar la llamada supremacía cuántica. Sin embargo, con el estudio, la investigación y el desarrollo correcto, esta tecnología podría suponer un rediseño completo de las industrias y los sectores, entre ellas, el sector servicios. Finanzas, sanidad, logística... la computación cuántica promete cambiar drásticamente cómo entendemos, entregamos y consumimos los servicios, abriendo la puerta a un futuro de los servicios y consecuentemente, la sociedad; completamente modelado por la cuántica.

ABSTRACT

Quantum computing is a revolutionary new technology that could change the course of technological history without precedent, but for all its potential, quantum supremacy has yet to be demonstrated. However, with the right study, research and development, this technology could bring about a complete redesign of industries and sectors, including the service sector. Finance, healthcare, logistics... quantum computing promises to drastically change how we understand, deliver, and consume services, opening the door to a future of services and consequently, society; completely shaped by quantum.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Desde la aparición de la computación cuántica, no se ha parado de especular acerca del futuro de esta tecnología, y aunque todavía se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo, son incontables los avances que podría suponer en infinitas áreas de desarrollo, como pueden ser la medicina, la criptografía o la logística. En pocas palabras, la computación cuántica tiene el potencial de revolucionar la industria de servicios, ya que puede resolver problemas que son inabordables para las computadoras clásicas, llevando a soluciones más eficientes y rápidas.

Sin embargo, no se ha considerado mucho el gran abanico de posibilidades que se podrían dar en el caso de que esta tecnología fuera aplicada correctamente al sector servicios. La optimización en la distribución de las mesas en un restaurante, los procesos logísticos y de distribución a gran escala en una empresa o la gestión de los servicios de limpieza en un edificio, entre otras muchas opciones. Por ejemplo, uno de los campos de la industria de los servicios que puede beneficiarse significativamente de la computación cuántica es el análisis de datos. Las empresas de servicios, como las de finanzas, de seguros y de comercio electrónico, manejan grandes cantidades de datos y pueden utilizar la capacidad de procesamiento cuántico para analizar y extraer información valiosa de los mismos en tiempo real. Esto puede mejorar la toma de decisiones y ofrecer una ventaja competitiva.

Otro campo en el que la computación cuántica podría tener un gran impacto es la optimización de procesos. La industria de servicios a menudo tiene que lidiar con la asignación de recursos y la programación de horarios, y la computación cuántica puede ayudar a encontrar soluciones óptimas a problemas de optimización complejos. Esto puede reducir costos y aumentar la eficiencia.

La seguridad también es un área de interés para la computación cuántica en la industria de servicios. Los algoritmos cuánticos pueden mejorar significativamente la seguridad de la información, y pueden ser utilizados para desarrollar sistemas de cifrado más seguros y resistentes a los ataques de piratas informáticos. En resumen, la computación cuántica tiene el potencial de transformar la forma en que la industria de servicios maneja la información y resuelve problemas complejos.

Si nos ponemos a pensar en estos dos conceptos como entidades aparentemente no relacionadas, vemos, sin embargo, que existe gran cantidad de información tanto científica como divulgativa de cada uno de ellos. El sector servicios ha crecido exponencialmente en los últimos años, en parte gracias a tecnologías punteras como el Big Data o las IAs, a las que la computación cuántica se une en cuanto a tecnologías del futuro se refiere. Lo que nos lleva a considerar, ¿qué suponen el uno para el otro?

Desde que se definió el concepto de servicio y el sector servicios comenzó a tomar importancia en el desarrollo de la economía mundial y el modo de vida de las sociedades actuales, se ha tenido una concepción de servicio muy arraigada. En términos generales, un servicio se refiere a una actividad o proceso que una persona o empresa realiza para satisfacer las necesidades de otra persona o empresa. También podemos definir un servicio como un producto intangible que no se puede almacenar ni poseer, y que se produce y se consume al mismo tiempo o como una actividad, beneficio o satisfacción que se ofrece para cubrir las necesidades o deseos de los consumidores. (Galán, 2020)

Aunque hay numerosas definiciones de servicio hemos de enfatizar siempre la necesidad de que haya un intercambio de valor entre un proveedor, que nos da el servicio, y un consumidor, que lo recibe. Es decir, lo que ocurre entre las partes es un intercambio binario. Sin embargo, al suponer que los servicios tienen una base binaria, estamos reduciendo sus posibilidades de evolución a la presencia de sólo esa posibilidad.

No obstante, ¿no podrían los servicios verse como algo más?

La computación cuántica se basa en 3 principios fundamentales: la superposición y el entrelazamiento y la interferencia cuántica. Estos conceptos forman la base de cómo funcionan y operan los sistemas de cómputo cuántico. A grandes rasgos, la superposición es un principio que permite que dos partículas pueden existir en dos estados simultáneamente. El entrelazamiento es un fenómeno en el que dos o más partículas se vinculan, de forma que sus estados pasan a estar instantáneamente relacionados, aunque estén separados por grandes distancias. Esto permite una comunicación instantánea entre ellas. Por último, la interferencia cuántica se refiere a la forma en la que las partículas pueden interferir entre sí, permitiendo que las amplitudes de probabilidad se sumen o cancelen. (AWS, 2023)

Para poder aprovecharnos de una tecnología como es la computación cuántica, tendríamos que considerar que puede haber servicios donde no nos sirva esa concepción binaria, en los que los estados se puedan superponer.

Consideremos, por ejemplo, el transporte público. Imaginemos una ciudad en la que cada una de las personas que utilizan el servicio tienen una necesidad diferente. Unos pueden preferir la rapidez que les brinda el metro, mientras que otros la flexibilidad y corto intervalo de espera de los autobuses. El servicio de transporte debería adaptarse para satisfacer las diferentes necesidades de los consumidores de este servicio, proporcionando diversas opciones de transporte para brindar así una solución integral y equitativa.

¿Podríamos, desde el punto de vista de la computación cuántica, ser capaces de modelar los servicios de tal forma que pudiéramos dar respuesta a los distintos estados de los consumidores (diferentes necesidades)? ¿Se podría diseñar un servicio, que tuviera en cuenta los estados de los consumidores, de forma que todos colectivamente tengan que resolver un mismo problema?

Para poder adaptar y aprovechar la tecnología cuántica, no podemos mantener los modelos de negocio ni las estructuras de servicio actuales, y que responden a la computación clásica. Esto implica que se debería adaptar el hardware y el software, al igual que los procesos de los servicios en un intento de adaptación a esta tecnología.

Al comenzar a pensar en los servicios desde las bases de lo cuántico, cabe la posibilidad de que podamos abrir la puerta a un futuro en el que los servicios trasciendan a un plano más evolucionado.

1.2 Objetivos

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como tema, la computación cuántica, y su posible aplicación en el sector servicios. En cuanto a los objetivos que se querían cumplir con este documento, son los siguientes.

- Estudiar la evolución de la computación a lo largo de la historia, proporcionando así una imagen completa de lo que ha sido su desarrollo desde que se originó.
- Presentación de la computación cuántica y explicación de las bases físicas que hay detrás de su funcionamiento.
- Analizar el estado actual de la computación cuántica, llevando a cabo un estudio y búsqueda exhaustiva de toda la literatura científica y técnica que se ha tenido a disposición.
- Identificar las potenciales aplicaciones que puede tener en el Sector de Servicios, identificando así áreas donde su aplicación podría traer más beneficios.
- Estudiar los avances en computación cuántica, incluyendo la evolución que han sufrido los ordenadores cuánticos, los lenguajes de programación cuántica o la aparición y desarrollo de algoritmos cuánticos.
- Analizar intentos y éxitos de aplicación en el sector servicios, estudiando proyectos piloto donde se haya aplicado o se haya intentado aplicar la computación cuántica en el sector de servicios.
- Definir las limitaciones actuales, identificando así los desafíos que sufre la computación cuántica en su intento de integración en el sector servicios.
- Proponer aplicaciones futuras y desarrollos potenciales. La proposición de líneas de trabajo futuras en las que se integre la computación cuántica en el sector.
- Contribuir a la difusión de las aplicaciones en el sector. Se pretende que la línea abierta en este TFG sirva para que el interés en la computación cuántica y su aplicación en el mundo de los servicios sea más conocido y se potencie su estudio.

Estos objetivos son los que van a servir de base para la construcción y el desarrollo del siguiente documento, que tratará de abordar la computación cuántica y su impacto en los servicios, siempre tratando de proporcionar una visión integral y contribuyendo a las futuras líneas de desarrollo y conocimiento del campo de estudio.

1.3 Estructura de la memoria

En este trabajo de fin de grado, en un primer lugar se ha presentado una motivación con la que es la idea principal que propició el surgimiento de esta línea de trabajo. Así, esta idea de un futuro en el sector servicios liderado por la computación cuántica y la presente introducción dan paso al segundo capítulo.

En este siguiente apartado, se presentará una introducción histórica en la que se dibujará una línea temporal con la que se pretende guiar al lector a través de los diversos avances que ha sufrido la computación, hasta llegar a las tecnologías actuales. Se debate sobre el impacto de la computación cuántica en un marco social y económico, al igual que sus implicaciones legales. Se analizan también las propiedades básicas de la física cuántica, al igual que las computadoras cuánticas por se, su estado actual y su futuro.

A continuación, en el capítulo tercero se hace un estudio de las diversas técnicas de modelado de servicios como base para nuestra propuesta, y seguidamente se llevará a cabo una comparativa entre las tres tecnologías que nos acaecen: computación clásica, de altas prestaciones y cuántica, usando diversas características como indicadores. Además, se presentan las Tecnologías as a Service y su relación con la cuántica. Después, se presenta la propuesta de integración de la computación cuántica con los servicios, al igual que se estudia el ciclo de vida de un servicio siguiendo el marco ITIL, y por último, se aplica a un servicio real.

Por último, en el capítulo cuarto, se presentan las conclusiones del estudio a diversos grados de profundización, al igual que se proponen líneas de trabajo futuras.

CAPÍTULO 2: BASES DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

2.1 Introducción histórica

Desde el momento en el que las matemáticas se hicieron notablemente más complejas, ha surgido la necesidad de crear dispositivos que nos permitieran realizar estos cálculos de forma automática. En esencia, de una forma más eficiente y rápida. De esta necesidad surgieron las computadoras.

El ser humano siempre ha dispuesto de dispositivos para realizar sus cálculos a través del tiempo, como pueden ser el ábaco, dispositivo que se utiliza para realizar operaciones aritméticas básicas que consta de varillas paralelas en las que se deslizan cuentas, representando cada fila un valor decimal; la calculadora de Pascal, inventada por el matemático y filósofo francés Blaise Pascal en el siglo XVII, considerada una de las primeras calculadoras mecánicas, que consta de una serie de discos que giran para representar los dígitos del 0 al 9, (IFICC, 2023) o la máquina diferencial de Babbage, dispositivo diseñado por el matemático británico Charles Babbage en el siglo XIX. También conocida como motor diferencial, se concibió como una máquina de cálculo automático capaz de realizar operaciones matemáticas complejas, y constaba de un sistema de engranajes y palancas, con tarjetas perforadas en las que programaba las operaciones. (Trilnick, 2022) Esta última está considerada como una precursora de la

computación, sin embargo, la primera computadora mecánica programable del mundo no surge hasta el siglo XX, entre 1935 y 1938, en Alemania.

Konrad Zuse desarrolla la llamada Z1, una calculadora de acción binaria que utilizaba cintas perforadas, las cuales leía para interpretar sus instrucciones. Sus funciones eran bastante limitadas, pero supuso un momento revolucionario para la época. Esta computadora tenía memoria, dispositivos de entrada-salida y muchos otros elementos que podemos ver presentes en las computadoras actuales. Además de esta, también desarrollaron la Z2, completada en 1939, y la Z3, finalizada en 1941.

La Z2, fue la primera computadora controlada por programas y utilizaba relés electromagnéticos para realizar sus cálculos. La Z3 por su parte, fue la primera computadora automática y programable.

Estas computadoras supusieron un paso muy importante en la historia de la informática, ya que sentaron las bases para el desarrollo de las computadoras modernas y fueron las precursoras de la ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Computer*), que empezó a operar en 1946. Fue la primera computadora digital, y fue diseñada por J. Presper Eckert y John Mauchly para realizar cálculos para el Laboratorio de Investigación Balística del Ejército de los Estados Unidos. Era una máquina de gran tamaño, que estaba compuesta por miles de tubos de vacío y relés electromecánicos entre otros componentes. A diferencia de las computadoras actuales, los cálculos no se realizaban de forma automática con solo pulsar un botón, si no que numerosos cables debían ser conectados por operadores físicos. Computadoras como estas, o como la COLOSSUS, que sirvió como descifrador de mensajes en código generados por la máquina ENIGMA durante la Segunda Guerra Mundial son las precursoras de las computadoras actuales de las que disponemos en nuestras casas.

Un factor que influyó notoriamente en el desarrollo de las computadoras fue la invención de los transistores, creados por los laboratorios Bell en EE. UU. en 1947, remplazando los tubos de vacío que se utilizaban en las computadoras y diversos dispositivos electrónicos, proporcionando un funcionamiento bastante más eficiente y confiable. La invención de los transistores marcó el inicio de la era de los dispositivos electrónicos tal y como los conocemos hoy en día, ya que estos fueron fundamentales para la aparición de los primeros microchips, permitiendo el paso de los aparatos eléctricos a los electrónicos.

En 1951 apareció el primer ordenador electrónico de uso comercial, el Ferranti Mark I, diseñado y construido por la empresa británica Ferranti. Este ordenador fue pionero en el uso de la memoria RAM, además de ofrecer mejoras en la velocidad y capacidad de almacenamiento. Poco después apareció en Estados Unidos la UNIVAC (*Universal Automatic Computer*), la primera computadora diseñada específicamente para empresas, con aplicaciones como cálculos científicos, procesamiento de nóminas y pronósticos meteorológicos entre otros. (Computer History Museum, 2023)

El primer lenguaje de programación del mundo fue creado poco después, en 1953 por IBM para su computadora IBM 704. FORTRAN (Formula Translation) fue el primer lenguaje de alto nivel que permitía programar de forma más parecida a un ser humano. Introdujo características como subrutinas o bucles, así como el concepto de compilador, que es hoy uno de los lenguajes más utilizados en las supercomputadoras actuales. (González, 2004) (Reclu IT, 2018)

La aparición del primer ordenador que surge con una estructura similar a las computadoras como las conocemos hoy en día llega de la mano de Douglas Engelbart en 1968, introduciendo conceptos como el ratón, las videoconferencias, los hipervínculos o la edición de texto. (Castelan, 2022)

A partir de este momento comienzan a surgir ordenadores mejores, que integraron microprocesadores, haciendo posible que se avanzara hacia las computadoras personales o PC, comenzando un cambio y una evolución que sigue hoy en día con la aparición de nuevas tecnologías y aplicaciones, como los primeros dispositivos de almacenamiento, el internet, la inteligencia artificial o la computación cuántica.

Desde nuestros ordenadores personales hasta las supercomputadoras como el Supercomputer Fugaku, Summit o Sierra de IBM, todas ellas se basan en la misma lógica: la del código binario del Álgebra de Boole que usó la máquina de Turing en 1936, la cual estaba destinada a simular cualquier algoritmo informático, independientemente de la complejidad de este. Esta lógica se construye sobre la premisa de que sólo existen dos estados "1" y "0", y tres únicas funciones lógicas, en este caso OR, AND y XOR, además de las correspondientes operaciones matemáticas comunes como la suma y la resta. (Wikipedia, 2023)

Un bit es la unidad básica de información utilizada en la computación clásica. El término "bit" proviene de la contracción de "binary digit", lo que significa "dígito binario" en español. En la computación, los bits se utilizan para representar información en forma de códigos binarios, que son secuencias de 0 y 1.

El sistema binario es una base numérica que utiliza dos símbolos (0 y 1) para representar cualquier número. Esto permite que las computadoras trabajen con la información de manera muy eficiente. Por ejemplo, un código binario podría representar el número 5 como "101", que es una cadena de tres bits (1, 0 y 1). La misma cadena de bits puede representar diferentes caracteres, como una letra o un símbolo, según el código usado. (CodeLearn, 2022)

Los bits se utilizan para almacenar y procesar información en los ordenadores. La memoria de un ordenador ya sea en forma de RAM (memoria de acceso aleatorio) o de disco duro, almacena la información en forma de bits. A más memoria RAM, más cosas simultáneas se podrán llevar a cabo en tu ordenador. Por otro lado, el procesador de un ordenador utiliza los bits para realizar operaciones y cálculos.

La capacidad de almacenamiento y procesamiento de un ordenador se mide en términos de bytes y kilobytes, megabytes, gigabytes, terabytes y otros múltiplos. Un byte es un conjunto de 8 bits, y se utiliza como unidad de medida para la capacidad de almacenamiento y transferencia de datos. Por ejemplo, un archivo de texto simple puede tener un tamaño de unos pocos kilobytes, mientras que un archivo de vídeo de alta definición puede tener varios gigabytes.

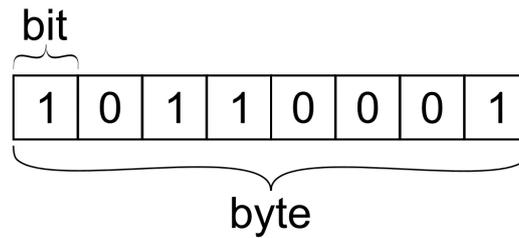


Ilustración 1: Bit y byte Fuente: Wikipedia

Con este modelo se han creado cada vez ordenadores más potentes, haciendo posible que podamos hacer cálculos más rápidos y con mayor precisión, de forma más eficiente.

Las primeras computadoras sólo eran capaces de resolver cálculos y problemas muy básicos, además de ocupar mucho espacio y ser bastante complejas. Sin embargo, con el paso de los años estas fueron reduciéndose de tamaño, volviéndose más compactas y potentes.

Lo mismo ocurre con los microchips. Seguida la revolución digital ocurrida en los 50. Estos se redujeron en tamaño hasta llegar a la escala de nanómetros. Y aunque esto nos permite una mayor velocidad de procesos computacionales, a esta escala se produce lo que conocemos como efecto túnel. Este ocurre cuando una partícula viola los principios de la mecánica clásica y atraviesa una barrera de energía potencial con una altura mayor a la energía total de las partículas. Es decir, según el efecto de tunelización cuántica, los electrones tienen cierta probabilidad de atravesar una barrera que, según la física clásica, no podrían atravesar. Esto se traduce en que los electrones escapan de los circuitos por los que deberían moverse, haciendo que los microchips no puedan reducirse más de tamaño, suponiendo así un impedimento para el desarrollo de ordenadores más potentes. (OpenStax, 2023)

La mecánica cuántica es una teoría física que describe el comportamiento de las partículas subatómicas, como los electrones y los fotones, en términos de ondas de probabilidad. Fue desarrollada en la primera mitad del siglo XX para explicar fenómenos que no podían ser comprendidos por la física clásica, como la radiación electromagnética de cuerpos negros, el efecto fotoeléctrico y la difracción de electrones, con científicos como Albert Einstein, o Niels Bohr, quien planteó su teoría cuántica, y fue el primero en aplicarla a la estructura atómica y molecular, recibiendo así el Nobel de física en 1922. También es destacable el aporte de Werner Heisenberg y Edwing Schrödinger, dando lugar a la ecuación de Schrödinger, que desempeña el mismo papel en la computación cuántica que las Leyes de Newton en la computación clásica, es decir, predecir el comportamiento futuro de un sistema dinámico. La ecuación de Schrödinger es una ecuación diferencial parcial que describe cómo una función de onda cuántica ¹cambia con el tiempo. (HypherPhysics, s.f.)

La ecuación es la que sigue:

¹ La función de onda cuántica es una función matemática que describe el estado de un sistema cuántico, y contiene información sobre la posición, el momento y otros estados cuánticos del sistema.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \Psi(\mathbf{r}, t)$$

Ilustración 2: Ecuación de Schrödinger Fuente: Wikipedia

Donde i es la unidad imaginaria, \hbar es la constante de Planck reducida, es decir, dividida por 2π , \mathbf{r} es el observable de posición, Ψ es la función de onda que describe el sistema, y H es el operador hamiltoniano. (Wikipedia, 2023)

Quizá más conocido es su experimento mental, en su defecto a veces descrito como paradoja para tratar de entender los eventos de la física de las partículas, donde imaginariamente se coloca un gato dentro de una caja con un dispositivo que de forma completamente aleatoria lanza una partícula que activa una serie de acontecimientos letales para el animal. Si la caja permanece cerrada, el gato estaría vivo y muerto al mismo tiempo, es decir, habría una superposición de estados, como los que encontramos en un sistema cuántico. Este experimento, más famosamente conocido como el Gato de Schrödinger, nace para intentar discutir la paradoja EPR pronunciada por Einstein, Podolsky y Rosen en 1935, que pretendía poner de manifiesto un problema aparente de la mecánica cuántica, la idea del entrelazamiento cuántico, que se explicará a lo largo de estas páginas. (Quimica.es, 2023) (Wikipedia, 2023)

En la década de los años 20, un grupo de físicos y matemáticos² comenzaron a trabajar conjuntamente para unir las diversas visiones, formalizando así una serie de postulados que amoldaron la nueva teoría cuántica. (Ruiz, 2019)

Tras el auge y desarrollo de la mecánica cuántica, aparece la idea de computadora cuántica, es decir, una especie de máquina de Turing que trabajase siguiendo las leyes de la mecánica cuántica. El primero en proponer esta idea fue Paul Benioff en 1981. A su vez, Richard Feynman poco después planteó la posibilidad de que esta computadora pudiera hacer cálculos muy complejos en muy poco tiempo. A partir de los años noventa aparecen los algoritmos cuánticos que dan pie a las primeras máquinas cuánticas capaces de realizar cálculos.

2.2 Marco regulador e impacto socioeconómico de la computación cuántica.

No podemos negar que la computación cuántica va a revolucionar tarde o temprano de forma exponencial numerosos sectores, como son la criptografía, las telecomunicaciones o la optimización de problemas. Sin embargo, un problema de vital importancia es su futuro impacto en la privacidad en internet y la seguridad de las comunicaciones.

Actualmente para asegurar la seguridad en internet se utiliza la llamada criptografía asimétrica.³ El problema lo encontramos en el hecho de que los dos algoritmos principales de cifrado asimétrico son RSA, que utiliza la factorización de un producto de dos números primos,

² Este conjunto de teorías fue llevado a cabo por Schrödinger, Einstein, Heisenberg, de Broglie, Von Neumann, Born y Bohr entre otros.

³ La criptografía asimétrica o criptografía de clave pública es un sistema criptográfico que se caracteriza por utilizar dos claves, una clave pública y otra privada, para el envío de mensajes o datos informáticos.

y la criptografía basada en la estructura matemática de las curvas elípticas (ECC). (Wikipedia c. d., Computación cuántica, 2023) El día que los ordenadores cuánticos sean suficientemente potentes y estables, la privacidad en internet no desaparecerá, pero los principales métodos de cifrado actuales se verán rotos por completo. Esto no es solamente culpa del poder computacional del que disponen estas computadoras, el algoritmo de Shor, específico de la computación cuántica, facilita en gran medida el descifrado de los métodos anteriormente mencionados. Para atajar este problema es de vital importancia que se empiecen a desarrollar protocolos criptográficos o herramientas que sean a prueba de computación cuántica. Es más, ya se están empezando a investigar nuevos esquemas de cifrado que puedan garantizarnos la privacidad frente a la computación cuántica.

Debido a que esta es un área en puro auge, actualmente no se cuenta con prácticamente legislación de ningún tipo que la regule. Hace pocos meses, el presidente de Estados Unidos, Joe Biden, firmó la Ley de Preparación para la Ciberseguridad de la Computación Cuántica, cuyo objetivo es intrínsecamente proteger los sistemas y datos del gobierno ante la amenaza de filtraciones, como lo expone la Estrategia Nacional de Ciberseguridad de los Estados Unidos publicada en 2023 (Biden, 2023):

"debemos priorizar y acelerar las inversiones en la sustitución generalizada de hardware, software y servicios que puedan ser fácilmente comprometidos por ordenadores cuánticos para que la información esté protegida contra futuros ataques"

Con relación a regulaciones internacionales, el Centro de Política Europea entregó recientemente una serie de recomendaciones a la Unión Europea (UE) para garantizar la protección de los Estados miembros específicamente frente a los ciberataques cuánticos. Esta propuesta, resalta la real y urgente necesidad de redactar un nuevo plan de acción antes de que llegue lo que denominan como el "día Q", es decir, el día en el que estos sistemas cuánticos sean capaces de romper los algoritmos criptográficos con los que contamos hoy en día. (Roa, 2023)

Además puntualiza que, a falta de estados que tomen la delantera en este ámbito, "sólo unos pocos países de la UE han hecho públicos planes para contrarrestar las nuevas amenazas a la ciberseguridad cuántica, y menos aún han puesto en marcha estrategias para hacerles frente." (Roa, 2023)

Según nos informa este documento del Centro de Política Europea, Estados Unidos habría tomado la delantera en la transición a la ciberseguridad post-cuántica. Además, por su parte el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) desde 2022 trabaja en desarrollar un nuevo estándar criptográfico y en conseguir nuevas herramientas de cifrado que potencialmente pudieran resistir el ataque de un ordenador cuántico.

A medida que la computación cuántica continúa desarrollándose, es fundamental que Europa tome medidas para prevenir quedarse atrás en la ciberseguridad, y que esto pueda ser aprovechado para el ataque. Esto aseguraría que todos los estados miembros son igualmente resistentes a posibles ciberataques cuánticos. Para poder asegurar que se cuenta con una efectiva agenda de ciberseguridad cuántica, se deberían llevar a cabo diversos pasos.

En primer lugar, coordinarse con la UE para realizar un plan de acción en el que se aborde la computación cuántica, fijando plazos y objetivos concisos y asegurándose que las naciones implementan planes para el cambio de la encriptación clásica, a la postcuántica.

Además, se debería crear un grupo de expertos en el área para poder definir unas buenas prácticas y así poder flanquear los diversos obstáculos que se puedan presentar en esta transición hacia la era cuántica. Asimismo, sería de extremo beneficio el uso de diversos entornos de prueba, para así poder acelerar el desarrollo de aplicaciones y diversas tecnologías a corto plazo. (Roa, 2023)

En cuanto al ámbito económico, la carrera por el liderazgo cuántico mundial no se limita al mundo empresarial, si no que transcurre también entre estados. Países como E.E.U.U., China, Japón o Corea del Sur entre otros, ya tienen presupuestos multimillonarios para invertir en el desarrollo de la tecnología y así tratar de convertirse en los líderes mundiales en algunas de las tecnologías cuánticas que serán más relevantes en unos años. (Aslan, 2020) A pesar del prometedor futuro y el innegable éxito de la inversión en esta tecnología, España aún no cuenta con un programa que garantice el crecimiento de la investigación de este campo, a diferencia de los países que han sido mencionados anteriormente. (Gonzalo, 2022)

Sin embargo, si cuenta con varios proyectos que trabajan para desarrollar y aplicar esta tecnología en diversos sectores como son la energía, las finanzas, la defensa o la agricultura para volver a nuestro país más competitivo, gracias a la implicación del Consejo Superior de investigaciones científicas (CSIC). También, por destacar uno, se está llevando a cabo el proyecto Quantum Spain, promovido por el Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, a través del cual se pretende conseguir un ordenador cuántico de altas prestaciones que se utilizaría, entre otras cosas, para desarrollar la inteligencia artificial. (CSIC, 2022) Además, se espera que el proyecto Quantum Spain contribuya a la creación de empleo y a la atracción de talento especializado en computación cuántica e inteligencia artificial en España, al igual que se busca involucrar a la industria española y desarrollar así nuevas capacidades en áreas muy especializadas para poder dar pie a la aparición de empresas relacionadas con la IA y la computación cuántica. (Gobierno de España, 2023)

Como podemos ver, numerosos proyectos se están llevando a cabo para el desarrollo de la tecnología pese a la falta de una estrategia de inversión.

Por otro lado, la computación cuántica, al igual que cualquier avance tecnológico importante a lo largo de la historia, nos plantea una serie de cuestiones éticas y sociales que deben ser consideradas a medida que esta tecnología avanza. Una de las más preocupantes y urgentes es la relacionada con la privacidad y la seguridad de los datos. Como se mencionó en los párrafos anteriores, la capacidad de desciframiento pone en riesgo la integridad de los datos de carácter privado de millones de personas a lo largo del globo. Una cuestión importante, sobre todo si pensamos que la carrera por la tecnología es global, son las posibles desigualdades tecnológicas. A medida que la computación cuántica se desarrolle, nos podremos encontrar en la tesitura de que se produzca un salto tecnológico entre los países que puedan permitirse el acceder a esta tecnología y los que no, acentuando así la brecha tecnológica que hoy en día ya es bastante prominente entre numerosos países. También podría suponer un impacto para la fuerza laboral. Al contar con una tecnología cada vez más potente y por ende, la capacidad de automatizar tareas para las que antes se requerían trabajadores, existe el riesgo de una reducción masiva de los puestos de trabajo, al igual que la necesidad de rediseñar las formaciones debido a una posible nueva demanda de habilidades. (Aslan, 2020)

El impacto ambiental es otro punto que no se debe tomar a la ligera. Las computadoras cuánticas requieren un alto volumen de energía para mantenerse activas, tanto la necesaria para operar, como la que requiere el poder mantener esas temperaturas tan bajas que se necesitan

para que la máquina esté en condiciones aptas. Como es natural, todos estos avances también han de ser considerados en sí, como éticos a la hora de su uso, por lo que todas las organizaciones y empresas involucradas en su desarrollo deberán de tratar que se usen siempre en beneficio de la sociedad, evitando usos que puedan ser usados para dañar, como pueden ser las hipotéticas armas cuánticas, en caso de que esta tecnología se cediera para usos militares.

Es imposible evitar que esta tecnología tenga un impacto grande sobre nuestras sociedades y su manera de vivir, y aunque supondrá unos avances que pasarán a la historia como un salto tecnológico sin precedentes, se debe operar siempre desde la ética y el respeto por las normas y convicciones sociales, siempre garantizando que la tecnología sea usada para beneficiar a la humanidad en su conjunto.

2.3 Propiedades y características básicas

La computación cuántica es una disciplina en constante evolución que se basa en los principios de la mecánica cuántica para procesar información de manera más rápida y eficiente que los sistemas clásicos. En este capítulo se explorarán los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica que son necesarios para entender los principios de la computación cuántica y cómo los investigadores están trabajando para desarrollar sistemas cuánticos cada vez más estables y controlables, así como arquitecturas de computación cuántica escalables que puedan procesar información compleja de manera eficiente. Este campo es muy multidisciplinar, aunando aspectos de la computación, la física y las matemáticas y utilizando mecánicas cuánticas para la resolución de problemas. (AWS, 2023)

La mecánica cuántica es el área de la física que estudia el comportamiento de las partículas cuando sus dimensiones son muy pequeñas en escala espacial y, por ende, no son observables al ojo humano, tales como los átomos o las moléculas. Esta rama es la más reciente dentro de las ramas que componen la física y fue desarrollada durante el siglo XX, mientras la Teoría de la relatividad⁴ también aparecía. Gracias a los desarrollos y postulados de científicos como de Broglie o Planck, esta rama se originó y ganó importancia. Las aplicaciones del desarrollo de este campo no solo revolucionaron a la física, sino también a la química y a otras áreas cercanas. Gracias a esto, se ha podido realizar el estudio del átomo, de las partículas que lo componen (electrones, quarks y gluones) y de todas las partículas elementales en general. Además, nos ha proporcionado un desarrollo tecnológico muy amplio. (Leskow, 2022)

Para poder entender de manera correcta el concepto y funcionamiento de un qubit, debemos primero introducir algunos conceptos y propiedades intrínsecas de la física cuántica que definen el comportamiento de todos los sistemas cuánticos. Debemos destacar que el comportamiento de cualquier partícula está definido por lo que denominamos la dualidad onda-partícula. Este concepto fundamental de la mecánica cuántica establece que, las partículas subatómicas como son los fotones o los electrones pueden mostrar comportamientos simultáneos de onda y de partícula. (BBC News, 2020)

⁴ La teoría de la relatividad general plantea que la gravedad no es una fuerza, sino la curvatura del espacio-tiempo.

2.3.1 *El principio de superposición*

La superposición cuántica es uno de los conceptos fundamentales de la física cuántica. Nace de la imposibilidad de determinar la posición de una partícula determinada en un momento cualquiera previo a su observación. Esto nos obliga a aceptar que, de una forma u otra existe la posibilidad de que esta partícula se encuentre en varios estados al mismo tiempo. Según la teoría cuántica, las partículas subatómicas, como los electrones, protones y fotones, pueden existir en estados de superposición, lo que significa como se acaba de mencionar que pueden estar en más de un estado al mismo tiempo. Esto se debe a que la naturaleza cuántica de estas partículas no sigue las leyes clásicas de la física, sino que sigue las leyes de la mecánica cuántica. En otras palabras, la superposición cuántica se refiere a la capacidad de una partícula de estar en varios estados simultáneamente, lo que se puede expresar matemáticamente a través de la función de onda cuántica. La función de onda cuántica describe la probabilidad de que una partícula se encuentre en una posición particular en un momento dado. (Comillas, 2022)

Aparece a raíz de la hipótesis formulada por Luis de Broglie con su mismo nombre, quien en 1924 propuso que los electrones no eran partículas, sino ondas. Ha sido demostrada a través de experimentos como el experimento de la doble rendija, en el que se dispara un haz de electrones a través de dos rendijas y se observa un patrón de interferencia en una pantalla detrás de las rendijas. Este patrón solo se puede explicar si se acepta que los electrones están en un estado de superposición, es decir, que atraviesan ambas rendijas al mismo tiempo. (BBC, 2021)

Además, la superposición cuántica es la base de muchas tecnologías cuánticas modernas, como los ordenadores y la criptografía cuánticos. Los ordenadores cuánticos utilizan la superposición cuántica para realizar cálculos mucho más rápidamente que los ordenadores clásicos, mientras que la criptografía cuántica la utiliza para garantizar la seguridad de las comunicaciones.

Si hablamos de ordenadores cuánticos, veremos que este principio es lo que intrínsecamente permite, de manera teórica, que estas computadoras puedan alcanzar las altas potencias de cálculo, superando con creces esas de los ordenadores clásicos. Sin embargo, nos encontramos un desafío a la hora de controlar estos estados de superposición, ya que la medición de partículas superpuestas provoca un colapso en uno de los posibles estados. (Rahaman & Islam, 2015)

2.3.2 *El principio de entrelazamiento cuántico*

En la década de 1930, el grupo de físicos conocidos como EPR, Einstein, Podolsky y Rosen, publicaron un artículo llamado *Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, en el que argumentaron que la mecánica cuántica implicaba que existían diversas relaciones entre partículas que parecía discrepar de la teoría de la relatividad propuesta por el mismo Einstein años atrás. Esto llevó a la formulación de la anteriormente mencionada en este documento, Paradoja EPR. (Horodecki et al., 2009) El entrelazamiento es un fenómeno cuántico que no tiene equivalente en la física clásica, que describe cuando los estados cuánticos de dos o más objetos deben ser descritos de manera conjunta en un mismo estado, aun encontrándose estos separados espacialmente. Para que entendamos su importancia en su relación con la computación cuántica, tenemos que resaltar el

hecho de que las QPU⁵ basan su funcionamiento en esta propiedad. Esta es la característica que le confiere a esta computación la alta capacidad de procesamiento que posee.

Con el fin de poder manejar la información almacenada en un conjunto de qubits, de los cuales hablaremos a continuación, y poder extraer una información útil, utilizamos las llamadas puertas cuánticas. Una puerta lógica cuántica es un circuito básico que opera sobre un número pequeño de qubits. Estas puertas las representamos utilizando matrices unitarias. Pese a que las puertas lógicas cuánticas operan bajo los principios de la mecánica cuántica, estas siguen operando como las de la computación clásica, con elementos lógicos como AND, OR y NOT. (Cornejo, 2020)

Esta propiedad permite dentro de la computación cuántica aplicaciones como el cómputo en paralelo⁶, la teleportación cuántica⁷, la codificación superdensa⁸ o la criptografía cuántica.

2.3.3 El principio de interferencia

La interferencia cuántica es un fenómeno fundamental en la mecánica cuántica que se refiere a la superposición y combinación de estados cuánticos para producir resultados observables. Este fenómeno es uno de los conceptos más distintivos y notables de la mecánica cuántica y se diferencia significativamente de la interferencia en la mecánica clásica. Esta permite el procesamiento de grandes conjuntos de datos de forma más rápida y precisa que con los métodos estándar.

El principio de inferencia cuántica se refiere al proceso de extraer información sobre un sistema cuántico a partir de las mediciones que se realizan en ese sistema, y se basa en varios conceptos clave.

Por un lado, se basa en la superposición. La medición que se realiza hará que el sistema colapse su superposición de estados en uno de los posibles con una probabilidad determinada. Por otro lado, se basa en el principio de incertidumbre de Heisenberg. Este principio, enunciado por Heisenberg en 1927 relaciona por un lado la incertidumbre de saber dónde se encuentra la partícula (posición), con la incertidumbre de conocer el momento⁹ de la partícula. Debemos tener en cuenta la gran importancia que posee este principio. Dado el caso de que conozcamos de forma muy precisa la posición de la partícula eso implica que no podremos conocer de forma tan precisa su velocidad y viceversa independientemente de lo bueno que sea nuestro aparato de medida. La incertidumbre en el sistema es intrínseca y no puede desaparecer nunca. (ICMM-CSIC, s.f.)

⁵ QPU: Quantum Processing Unit

⁶ realizar múltiples operaciones en estados entrelazados simultáneamente

⁷ permite la transferencia de información o estados cuánticos de una ubicación a otra, utilizando dos partículas entrelazadas

⁸ Defiende que dos qubits entrelazados pueden llevar más información de la que llevarían dos qubits no entrelazados.

⁹ Momento = masa x velocidad

Este principio implica que después de realizar una medición, este sistema va a decantarse y colapsará en uno de los muchos posibles resultados. Para poder calcular la probabilidad de ello podemos usar la función de onda. Es decir, nunca podemos conocer al 100% el resultado que vamos a obtener en una medición, si no que siempre tendremos que teorizar y hablar de ello en términos probabilísticos. El principio de incertidumbre como podemos observar es fundamental en la interpretación de la mecánica cuántica y en la predicción de los resultados de cualquier experimento que estemos realizando, de aspecto cuántico.

2.3.4 El principio de decoherencia.

También es destacable mencionar la decoherencia cuántica. Decoherencia cuántica es el termino aceptado y utilizado en mecánica cuántica para explicar cómo un estado cuántico entrelazado puede dar lugar a un estado físico clásico, es decir, no entrelazado. (Wikipedia c. d., 2023) Dicho de otra forma, es cómo un sistema cuántico estando bajo ciertas condiciones específicas pasa de estar bajo los efectos cuánticos y se empieza a comportar como un sistema clásico típicamente hace, es decir, sin los efectos típicos de la mecánica cuántica. Durante los últimos años, el estudio de la decoherencia cuántica se ha vuelto particularmente importante debido que es un proceso que impediría el funcionamiento de las computadoras cuánticas. Esto convierte a la decoherencia en un desafío fundamental si se quiere implementar a la práctica las tecnologías cuánticas como la computación cuántica ya que sus efectos limitan la capacidad de mantener esos estados cuánticos en un periodo prolongado de tiempo, lo que nos podría llevar a errores a la hora de hacer cálculos cuánticos y, por ende, afectar a la precisión de estos. Por decirlo de un modo sencillo, la decoherencia convertiría las computadoras cuánticas en clásicas y, por lo tanto, cualquier intento por construirlas debe incluir una “protección contra decoherencia”. (Fortin, 2016) (González B. C., 2021)

Para poder paliar los efectos de la decoherencia se aplican diferentes técnicas que pretenden corregir los errores cuánticos, y de esta forma proteger la información. Ejemplos de estas técnicas pueden ser los códigos de corrección de errores¹⁰, el teorema de corrección de errores cuánticos¹¹ o los algoritmos de corrección de errores¹². (Fuentes-Ugartemendia, 2022)

2.3.5 Los qubits

De forma análoga al bit clásico que describíamos previamente, existen los qubits. Un qubit (acrónimo de quantum bit) es el elemento más básico de toda unidad de procesamiento de información en la computación cuántica. Un qubit puede estar representado físicamente por un átomo, un electrón o un fotón, entre otros, y lo que hace que un qubit sea un objeto cuántico a diferencia de los bits clásicos, que solo pueden tener dos estados, 0 o 1 (nomenclatura correcta $|0\rangle$ y $|1\rangle$) es que un qubit puede estar en una superposición de ambos estados simultáneamente.

¹⁰ Algoritmos y protocolos diseñados para detectar y corregir errores cuánticos. Estos códigos se basan en la redundancia, donde se agregan qubits adicionales para codificar la información cuántica de manera redundante.

¹¹ El teorema de corrección de errores cuánticos establece que es posible proteger la información cuántica contra los errores mediante la utilización de códigos de corrección de errores adecuados

¹² Estos algoritmos se utilizan para implementar eficientemente las técnicas de corrección de errores y mejorar la confiabilidad de los sistemas cuánticos, como por ejemplo el algoritmo de Shor.

Esto significa que un qubit puede estar en una combinación de los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$ al mismo tiempo, lo que se representa matemáticamente mediante una función de onda cuántica y que permite procesar información de manera más compleja y con mayor rapidez. (Microsoft, What is a qubit?, 2023)

Para representar los qubits hacemos uso de la denominada Esfera de Bloch. La esfera de Bloch es una representación geométrica del espacio de estados de un sistema cuántico de dos niveles. Su nombre alude al físico suizo Felix Bloch. Geométricamente se trata de una esfera de radio unidad (es decir, igual a 1) en que cada punto de la superficie corresponde unívocamente a un estado puro del espacio de Hilbert bidimensional¹³, que caracteriza a un sistema cuántico de dos niveles. (Química.es, 2023) En cuanto a los ejes y puntos de referencia en esta esfera, el eje Z representa los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$, coincidiendo el polo norte de la esfera con el $|0\rangle$ y el polo sur con el $|1\rangle$. El eje x representa una superposición igual de $|0\rangle$ y $|1\rangle$, mientras que el eje y representa una superposición de fases entre $|0\rangle$ y $|1\rangle$. (Herrera, 2021)

1 bit



Ilustración 4: Representación gráfica de un bit. Fuente: elaboración propia

1 qubit

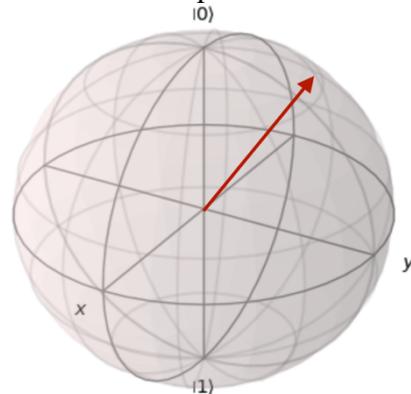


Ilustración 3: Representación de un qubit mediante una esfera de Bloch Fuente: Qiskit con edición propia

De forma matemática podemos describir un qubit como un vector de módulo unidad en un espacio vectorial complejo bidimensional. (Wikipedia, Cúbit, 2023) Además, los qubits pueden estar entrelazados, lo que significa que el estado de un qubit puede estar correlacionado con el estado de otro qubit, incluso a grandes distancias. Este fenómeno es una de las propiedades cuánticas más importantes y útiles en la computación cuántica. Los sistemas cuánticos que se utilizan para implementar qubits deben ser altamente controlables y estables para minimizar la pérdida de información cuántica. Los qubits son la base de la arquitectura de la computación cuántica, y la capacidad de procesar información a través de la superposición y el entrelazamiento de estados cuánticos es lo que permite a la computación cuántica superar las limitaciones de la computación clásica y resolver problemas complejos de manera más eficiente.

Uno de los mayores desafíos en la investigación de qubits es la decoherencia, que ocurre cuando la información cuántica se pierde debido a interacciones con el ambiente circundante. Los investigadores trabajan en desarrollar técnicas para minimizar la decoherencia y aumentar

¹³ es un espacio de Hilbert en el que se pueden describir estados cuánticos de un sistema con dos dimensiones. Los espacios de Hilbert son espacios vectoriales que se utilizan para representar estados cuánticos y realizar cálculos en la mecánica cuántica

la duración de la información cuántica almacenada en los qubits. La decoherencia se debe al acoplamiento del qubit con el entorno. Este acoplamiento produce un entrelazamiento entre los sistemas que modifica el qubit de forma aparentemente incontrolable. (Fortin S. , 2016)

Otro desafío importante es la construcción de redes de qubits para procesar información a gran escala. Los investigadores están trabajando en el desarrollo de arquitecturas de computación cuántica, como las computadoras cuánticas de circuito, que utilizan redes de qubits interconectados para procesar información. (Tomorrow Bio, 2023)

Hoy en día, los investigadores están trabajando para desarrollar sistemas cuánticos cada vez más estables y controlables, y para construir arquitecturas de computación cuántica escalables que puedan procesar información compleja de manera eficiente.

2.4 Computadoras y tecnologías cuánticas

El hardware cuántico podemos definirlo como el conjunto de dispositivos y plataformas físicas que se utilizan para poder canalizar y aprovechar las propiedades de la mecánica cuántica. Todo lo relacionado con el hardware cuántico, al igual que con la tecnología cuántica en general, está en constante evolución e investigación.

En el contexto del hardware cuántico, encontramos tres componentes principales:

En primer lugar, tenemos el plano de datos cuánticos. El plano de datos cuánticos es el núcleo de la computadora cuántica. Este incluye los qubits físicos y las estructuras necesarias para mantenerlos en su lugar. Es decir, es el lugar de la computadora en el que los qubits residen y son manipulados. Dentro de este plano de datos cuánticos se realizan los cálculos y operaciones cuánticas pertinentes. Por otro lado, contamos con el plano de control y medida. El plano de control y medida es la parte de la computadora que convierte las señales digitales en señales analógicas, gracias a las cuales podemos realizar las operaciones del plano de datos cuánticos. Esto implica el envío de señales de microondas o pulsos magnéticos y eléctricos para poder manejar los qubits según se necesite.

Por último, el plano del procesador de control y procesador host. El procesador de control se dedica a implementar el algoritmo cuántico o la secuencia de operaciones en tiempo real. Esta es la parte del hardware cuántico que interactúa con el software cuántico. Además, supervisa la ejecución de las operaciones y se asegura que se realicen correctamente. Esta parte puede estar integrada en el propio hardware o ser una unidad externa. Por otro lado, el procesador host se encarga de gestionar tareas más generales y de alto nivel. (AWS, 2023)

Por su parte, el software cuántico se dedica a implementar los algoritmos cuánticos que requiere la computadora utilizando circuitos cuánticos. Estos circuitos son rutinas de computación que definen un aserie de operaciones cuánticas lógicas en los qubits.

Los algoritmos cuánticos están diseñados para ejecutarse en las computadoras cuánticas y así aprovechar sus características distintivas como son el entrelazamiento y la superposición, resolviendo problemas de manera más eficiente que los algoritmos clásicos.

El primero algoritmo creado en base a la computación cuántica es el desarrollado por Peter Shor en 1994. Este algoritmo fue diseñado para factorizar números enteros grandes a sus factores primos de una manera eficiente. Esto es un problema difícil para los algoritmos clásicos, al igual que la base de la seguridad de muchos sistemas criptográficos. (Wikipedia c. d., Algoritmo de Shor, 2023). Este algoritmo utiliza ciertos principios de la computación cuántica, como son la superposición y el entrelazamiento para encontrar factores primos de un número compuesto en un tiempo mucho más rápido que los algoritmos clásicos con los que se cuenta hoy en día. Como todos los algoritmos cuánticos, este es probabilístico, es decir que la respuesta nos la da en forma de probabilidad. A medida que se repite el algoritmo, la probabilidad se puede ir aumentando.

A grandes rasgos, el algoritmo cuenta con dos partes; por un lado, la parte clásica convierte el problema de descomponer en factores un número a un problema de encontrar el periodo de una función. Por otro lado, la parte cuántica, que consta de una subrutina que permite encontrar el periodo haciendo uso de la transformada de Fourier¹⁴. La aplicación más conocida de este algoritmo es romper cualquier sistema criptográfico basado en RSA. Esto supone que, si apareciese una máquina basada en este algoritmo, el sistema RSA desaparecería por completo. Esto podría dar pie a la aparición de tecnologías sustitutas como puede ser la criptografía cuántica o el Protocolo BB84.

Por otro lado, tenemos el Algoritmo de búsqueda de Grover. Este algoritmo cuántico está diseñado para encontrar una entrada específica en una base de datos no ordenada. Se propuso en 1996 y supone una mejora cuadrática en la velocidad de búsqueda en comparación con los algoritmos clásicos. Al igual que otros algoritmos de naturaleza cuántica, el algoritmo de Grover es un algoritmo de carácter probabilístico, por lo que produce la respuesta correcta con una determinada probabilidad de error, que, no obstante, puede obtenerse tan baja como se desee por medio de iteraciones. (Wikipedia c. d., Algoritmo de Grover, 2023)

En primer lugar, prepara el estado cuántico. Posteriormente se define un oráculo cuántico¹⁵ que evalúa si una entrada de la base de datos coincide con la entrada buscada. Después realiza una operación de difusión que amplifica la amplitud de la entrada buscada. Estos dos últimos pasos se repiten aproximadamente un número de veces igual a la raíz cuadrada del número de elementos en la base de datos en la que estamos aplicando el algoritmo. En cuanto a sus aplicaciones, se utiliza para la búsqueda de bases de datos no ordenadas, la resolución de problemas de optimización y la criptografía. Sin embargo, es importante destacar que este algoritmo no proporciona una ventaja cuántica para todos los tipos de problemas de búsqueda, sino más bien para aquellos en los que no se tiene información adicional sobre la ubicación de la entrada buscada en la base de datos. (Nielsen & Chuang, 2000, págs. 276-305).

El algoritmo de simulación cuántica es un tipo de algoritmo que nos permite modelar e investigar sistemas cuánticos de alta complejidad. Su principal objetivo es entender el comportamiento de los sistemas cuánticos (como pueden ser los átomos o las partículas subatómicas). Si lo miramos desde la perspectiva de los computadores cuánticos, nos damos cuenta del problema que supone esto, ya que según el sistema se hace más grande, aumenta la cantidad de datos a ser descritos. Uno de los usos más importantes de este algoritmo es en el campo de la química cuántica, donde nos permite ver simuladas dinámicas y estructuras de las

¹⁴ La transformada de Fourier es una herramienta matemática que descompone una función periódica o una señal en componentes de diferentes frecuencias.

¹⁵ Un oráculo cuántico es una operación específica en un algoritmo cuántico que tiene la capacidad de evaluar una función o una propiedad sobre un conjunto de datos cuánticos.

moléculas, pero a nivel cuántico, ayudando por ejemplo a desarrollar nuevos medicamentos. (OpenAI, consultado en 2023)

Los algoritmos cuánticos son un área de investigación activa y en constante desarrollo. A medida que las computadoras cuánticas continúan avanzando, se espera que estos algoritmos tengan un impacto significativo en campos como la criptografía, la optimización, la simulación y la química. Sin embargo, todavía hay muchos desafíos técnicos y prácticos que deben superarse para lograr la plena utilidad de los algoritmos cuánticos en aplicaciones del mundo real.

Dentro de lo extenso que es el mundo cuántico, encontramos diversas tecnologías cuánticas, cada una de ellas basadas en diferentes tipos de qubits. Los procesadores superconductores, fotónicos, de átomos neutros o atómicos son algunos de los ejemplos con los que contamos en la actualidad. Sin embargo, la mayoría de ellos se enfrentan a problemas comunes, como son las extremadamente bajas temperaturas que se requieren para mantener los estados cuánticos coherentes, siendo, en varios casos, cercanas al cero absoluto. La necesidad del ultra-alto vacío¹⁶ en muchas de las situaciones también es un desafío que superar.

En el contexto del desarrollo de ordenadores cuánticos, actualmente compiten dos tecnologías principalmente, los bucles cuánticos y las trampas de iones. Ambos enfoques tienen sus inconvenientes y sus ventajas, y se han convertido en los líderes indiscutibles en la carrera hacia la construcción de computadoras cuánticas escalables y funcionales. (Ibarra, 2020)

Los procesadores de bucles cuánticos utilizan circuitos superconductores para realizar los cálculos cuánticos. Las ventajas que presenta esta opción es que los qubits necesarios para su funcionamiento, los qubits cuánticos, son relativamente sencillos de generar y utilizar. Asimismo, ha puntuado muy alto en escalabilidad, dando resultados formidables en sistemas de cientos de qubits. En cuanto a los desafíos observados, las anteriormente mencionadas bajas temperaturas suponen un gran percance, debido a lo complicado que es mantenerlas, y a la poca practicidad que presenta. Además, no podemos olvidar la decoherencia, que sigue siendo significativamente problemática.

En el frente contrario encontramos los procesadores de trampas de iones. Estos sistemas usan unos iones atrapados en campos electromagnéticos para manipular y utilizar los qubits. Gracias a la estabilidad de los iones, podemos llegar a generar redes cuánticas. Las ventajas que presenta son la facilidad de manipulación de los iones, y a su vez, un tiempo de coherencia bastante alto, gracias a la estabilidad de los iones anteriormente mencionada. Conjuntamente, se ha observado una alta precisión en las operaciones cuánticas realizadas. Como su competidora, las bajas temperaturas aquí siguen suponiendo un desafío importante, al igual que las condiciones de ultra-alto vacío que se necesitan.

Cada enfoque tiene sus ventajas y desafíos, y ambas tecnologías están en constante desarrollo. La elección entre procesadores superconductores y procesadores de trampas de iones puede depender de factores como la arquitectura necesaria para el servicio designado, la escalabilidad, la facilidad de manipulación y las condiciones de operación. Lo que es innegable, es que la competición entre las dos tecnologías ha llevado a un gran desarrollo y avance en el campo de las computadoras cuánticas. (López, 2023)

¹⁶ O UHV por sus siglas en inglés (Ultra High Vacuum) es un nivel extremadamente bajo de presión de gas en un entorno de vacío.

2.5 Estado actual de la tecnología

Durante los últimos años la computación cuántica ha disparado su desarrollo. Aunque es innegable que es una disciplina en la que aún queda un gran camino por recorrer, gracias a empresas privadas como son Intel, Google o IBM entre otras, han sido posibles todas las innovaciones que han ido acaeciendo los últimos años. Este avance se ve frenado debido a la falta de qubits. Según comentó Ignacio Cirac, pionero en el desarrollo de esta tecnología para una entrevista con la publicación de noticias tecnológicas Xataka (Xataka, 2022):

“para abordar problemas simbólicos necesitaremos tener varios millones de cúbits. Probablemente, incluso, cientos de millones de cúbits. En estos momentos estamos hablando de cien cúbits, por lo que queda un camino largo por recorrer. Hay gente que dice que con 100 000 cúbits tal vez se pueda resolver algún problema específico, pero realmente hacen falta muchísimos cúbits”

Desde que en 2001 IBM construyó su primer procesador cuántico de 7 qubits, que fue uno de los primeros intentos de la empresa de implementar hardware cuántico, se ha avanzado en gran medida. La carrera por la computación cuántica hace que las empresas anteriormente mencionadas trabajen sin cesar para poder crear sistemas de procesamiento cuántico mejores y más rápidos.

En 2019, Google anuncia el nacimiento de Sycamore, su procesador cuántico de 54 qubits, con el que proclamó haber conseguido la supremacía cuántica¹⁷, sin embargo, IBM negó que esto fuera correcto, alegando que sistemas clásicos como Summit podrían realizar esa tarea en tiempo relativamente corto, simplemente necesitando un poco más de espacio en disco (Kang, 2019). Aun así, se considera un avance, ya que, si comparamos los tres minutos que tarda Sycamore en contraposición a los 2 días y medio que requiere una computadora clásica, sigue siendo un gran aumento de la velocidad cuántica de procesamiento.

Coetáneamente, IBM también trabajó en sus propios sistemas cuánticos dentro de su sistema IBM Quantum, como son los procesadores Falcon, Eagle y Hummingbird, sistemas de 27, 65 y 127 qubits respectivamente. Este último, es el primero que se desarrolla por parte de IBM con más de 100 qubits operativos. Gracias a este alto número de qubits, los usuarios serán capaces de realizar experimentos más demandantes como pueden ser los relacionados con machine learning. Según lo expresado por IBM en la IBM Quantum Summit de 2021, el evento que usan para compartir sus avances en cuanto a tecnologías cuánticas, Eagle es el primer procesador cuántico cuya escala hace imposible que un ordenador clásico lo simule con fiabilidad. Gracias a la creación de este procesador, podemos vislumbrar como en un futuro estos ordenadores cuánticos serán capaces de superar a los clásicos en cuanto a utilidad. (ARMONK, 2021)

Otras aportaciones destacables que han ido aconteciendo los últimos años vienen de la mano de Intel, IonQ, Rigetti, Alibaba o Honeywell, con otros procesadores cuánticos que poco a poco nos van acercando a la era cuántica y convirtiendo la integración de los sistemas cuánticos en la vida cotidiana en una realidad cada día más cercana.

¹⁷ Supremacía cuántica: La supremacía cuántica, alternativamente llamada ventaja cuántica, es la capacidad potencial de los dispositivos de computación cuántica para resolver problemas que los ordenadores clásicos prácticamente no pueden resolver. [7]

A lo largo de estas páginas se ha especulado mucho sobre cuál será el futuro de esta tecnología y con qué excitantes aplicaciones se podrá contar en el futuro, pero no se han abordado sus usos actuales. Aunque muy limitados, debido a que se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo, hay algunos usos interesantes que sin duda abren camino a los futuros desarrollos en las diferentes áreas de trabajo en las que se pueden aplicar las tecnologías cuánticas.

Actualmente se cuenta con ordenadores cuánticos que ofrecen limitadas prestaciones. Debido al reducido número de qubits con los que cuentan, y que solo son capaces de mantener las propiedades de superposición y entrelazamiento durante periodos muy limitados de tiempo, las posibilidades que ofrecen son pocas, no teniendo ninguna ventaja real sobre la computación clásica con la que contamos hoy en día. Asimismo, la computación cuántica está empezando a ser utilizada para romper claves criptográficas utilizadas por virus como son los ransomware.

Uno de los hitos recientes más relevantes e importantes es el logrado por el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Como se menciona pocas páginas atrás, la decoherencia cuántica es uno de los mayores, si no el mayor reto al que se enfrentan los ordenadores cuánticos. Físicos e ingenieros están trabajando para mejorar la calidad de los qubits y preservar durante el mayor tiempo posible las condiciones necesarias para mantener la coherencia cuántica (es decir, limitar la decoherencia al mínimo) están poco a poco alcanzando resultados muy positivos. Es precisamente un grupo de investigadores del MIT en Estados Unidos, que ha conseguido un avance cuanto menos esperanzador. Es importante recalcar que para recrear un entorno en el que los qubits puedan operar, se debe contar con una temperatura extremadamente baja. Es más, esta temperatura óptima está muy cerca de lo denominado cero absoluto, o lo que es lo mismo, $-273,15$ °C. La temperatura de trabajo de los equipos cuánticos con la que cuentan gigantes del sector como Intel, Google o IBM es de alrededor de 20 milikelvin, que son unos -273 °C. Gracias a esta temperatura, el nivel de energía es muy bajo, y permite alargar el tiempo en el que los qubits mantienen sus efectos cuánticos lo máximo posible. Sin embargo, estas condiciones no son nada sencillas de recrear, incluso en entornos muy controlados.

El equipo de investigadores del MIT ha conseguido, mediante una técnica que emula de forma muy similar a lo que los cascos de cancelación de ruido hacen, aumentar el tiempo de coherencia desde los 150 microsegundos hasta los 3 milisegundos. Si bien no es ideal y está lejos de ser una cifra que permita que las computadoras cuánticas empiecen a mostrar su potencial, es sin duda un punto de inicio muy prometedor para el desarrollo de las computadoras cuánticas. (Lopez, 2023)

2.6 Usos reales

En el contexto de la industria 4.0, las aplicaciones y repercusiones que tendrá la computación cuántica son muy prometedoras.

Por un lado, la computación cuántica jugará un rol indispensable a la hora de resolver problemas en áreas como el enrutamiento, la asignación de recursos, la programación lineal o la optimización de cadenas de suministro. Estas se volverán más eficaces, permitiendo que se pueda llegar a optimizar a niveles inalcanzables con la tecnología clásica con la que contamos ahora. Procesos como la planificación en cadenas de montaje y suministro, al igual que en gestión de inventarios o logística se verán optimizados exponencialmente, todo ello gracias a

los algoritmos cuánticos como el anteriormente mencionado Algoritmo de Grover, siendo una gran aliada para el sector logístico. (Spri, 2020)

Siendo una de las aplicaciones más prometedoras de la computación cuántica, la simulación de sistemas cuánticos podría ofrecer innumerables ventajas para numerosos sectores. Actualmente difícil, o prácticamente imposible de conseguir con las computadoras clásicas con las que disponemos, permitiría la simulación de nuevas estructuras, moléculas y reacciones, siendo de gran utilidad para áreas como la física de materiales, la química, o las ciencias naturales.

El ámbito de la criptografía es otro de los grandes afectados por el auge de la computación cuántica. En la industria 4.0, la seguridad de los datos es esencial. La computación cuántica también puede utilizarse para fortalecer la seguridad mediante la implementación de sistemas de criptografía cuántica que son resistentes a los ataques cuánticos, protegiendo así la propiedad intelectual y la información confidencial. (Grupo Oesía, 2022)

Gracias a los algoritmos cuánticos, podemos abordar problemas complejos de optimización en procesos de fabricación como la programación de máquinas, mejorar la calidad del producto y la gestión de la energía.

Por otra parte, la convergencia de la inteligencia artificial y la computación cuántica abre un amplio abanico de aplicaciones en la industria 4.0. Los algoritmos cuánticos permiten un procesamiento de datos más eficiente y, por ende, una toma de decisiones más rápida y precisa. Esto se refleja en la optimización de procesos de fabricación, abordando problemas complejos como la programación de máquinas, la gestión de la energía y la mejora de la calidad del producto. Además, la computación cuántica acelera el análisis de datos en tiempo real, impulsando la toma de decisiones ágil en gestión y producción.

La tecnología cuántica también encuentra aplicación en la predicción de errores, permitiendo el desarrollo de modelos más precisos que podrán anticipar problemas en equipos, reduciendo así los tiempos en los que la máquina no pueda desempeñar. Finalmente, la computación cuántica también tiene un papel clave en el diseño y la mejora de sistemas de cuánticos, como son los procesadores cuánticos.

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE EQUIVALENCIA ENTRE SERVICIOS Y COMPUTACIÓN CUÁNTICA

3.1 Técnicas de modelado de servicios

Dentro de la gestión y el desarrollo de servicios y la gestión de IT de estos, se utilizan una serie de herramientas y métodos para poder analizar, diseñar y mejorar los diferentes servicios que, como organización, podemos ofrecer a nuestros clientes.

Por un lado, e incluido en las diferentes técnicas de modelado más comúnmente usadas en la industria tenemos los Mapas de Experiencia de Cliente o Customer Journey Maps. Un mapa del recorrido del cliente es una representación visual de cómo actúa, piensa y siente un cliente durante el proceso de compra. (Asana, 2023) Este método de modelar servicios nos es especialmente útil para mejorar nuestra estrategia de actuación. Cuando somos capaces de

identificar los pensamientos y sentimientos del cliente mientras hace uso de todos los pasos que conforman la toma del servicio, se podrá mejorar la estrategia de marketing y de negocios para que cuadren lo mejor posible con nuestros intereses.

Podemos representar dos tipos diferentes de journey que nos ayudarán a dar una visión completa de lo que tenemos, y lo que queremos conseguir. Por un lado, tenemos los customer journey maps que representan un modelo AS IS. Este modelo nos muestra una imagen actual de la experiencia que los clientes están teniendo actualmente con nuestro servicio. Por otro lado, podemos tener una visión TO BE, que sirve de puerta hacia el futuro. Este tipo de customer journey map nos muestra cómo puede ser la experiencia en el futuro, es decir, la futura experiencia que queremos que nuestros clientes tengan con nuestro servicio. Dependiendo del objetivo que tenga la realización de este mapa, lo haremos más o menos específico, al igual que elegiremos un tipo de mapa u otro. (Hammond, 2022)

Una de las razones por las que esta opción es tan atractiva es debido a que ayuda a comprender la experiencia del cliente. Esto ayuda a las organizaciones a ser más conscientes de cómo quiere el cliente que se le entregue el servicio en cuestión, al igual que permitir identificar problemas subyacentes y así mejorar la experiencia. Asimismo ayuda a optimizar procesos y a alinear a todos los equipos internos con un solo objetivo, que es la entrega de valor y satisfacción al cliente, y mejora la obtención de futuros clientes.

Para la construcción correcta de un customer journey map, tenemos que seguir una serie de pasos que nos garantizan que obtendremos toda la información que necesitamos. Para ello, hacemos uso de los diferentes componentes clave de los que está compuesto este mapa, que cuando vistos juntos nos dan una visión global del comportamiento del cliente. En primer lugar, se deben tener muy claros los objetivos, es decir, el primer paso es decidir qué se quiere conseguir, definiéndolo de manera precisa. En caso de que este objetivo sea algo más vagamente definido, como podría ser “mejorar la experiencia de compra”, lo más probable es que el mapa recoja el proceso de principio a fin, sin embargo, si el objetivo es mucho más concreto, el mapa se puede reducir a ciertas áreas en específico. El siguiente paso en el desarrollo debe de ser la búsqueda y obtención de información, tanto sobre el cliente como sobre su comportamiento. Es importante que la obtención de información también se haga de forma interna, tratando de obtener la información de parte de los trabajadores que más frecuentan a los clientes para los que estamos desarrollando la experiencia. De la misma forma, hace falta definir los puntos de contacto con nuestros clientes, ya sea por correo, teléfono, campañas, revistas informativas, etc. siempre considerando las características de nuestros clientes y su perfil para elegir el método de comunicación más efectivo y menos molesto. Como punto clave podemos destacar los puntos más importantes de la experiencia que se le entrega a los clientes, haciendo hincapié en situaciones como la entrega o el proceso de compra. Una vez que tenemos definidos todos estos puntos, se puede empezar a dibujar el customer journey map. (Mind Tools, 2023)



Ilustración 5: Ejemplo de customer journey map. Fuente: Mind Tools

Como se puede observar, el mapa sigue una estructura ordenada, usando los puntos clave identificados dentro del servicio y su entrega, al igual que los diferentes puntos de contacto con el cliente. Asimismo, se puede contar con una representación de las emociones del consumidor durante toda la experiencia, y más concretamente, en cada uno de los puntos clave que la conforman.

En cuanto al alcance que tiene este customer journey map, este puede variar según los objetivos específicos de cada una de las organizaciones. Puede por un lado centrarse en un aspecto específico de la experiencia del cliente o abarcar el ciclo de entrega del servicio al completo, desde el momento en que el cliente es consciente de la necesidad, hasta la entrega y mejora continua, por lo que este alcance usualmente depende en su totalidad de lo que la organización quiera lograr con el mapa.

Otra herramienta disponible para realizar el diseño, el mantenimiento y mejora de estos servicios es el blueprint del servicio.

El blueprint del servicio es una representación visual de un servicio, que nos ayuda a entender, diseñar y mejorar la manera en la que entregamos ese servicio. Es una herramienta que puede brindar una gran ayuda en el área del diseño y la gestión de los servicios. Esta tecnología se introdujo inicialmente con el objetivo de visualizar los pasos realizados durante el proceso de servicio, teniendo en cuenta la perspectiva del cliente. En concreto, se corresponde con la ruta concreta realizada por un único usuario objetivo asociado al itinerario indicado, por lo que a la hora de elaborarlo se debe tener en cuenta, por un lado cuál es el público objetivo, y a su vez tener tantos blueprints del servicio como usuarios objetivo haya. (Ibáñez, 2021)

Los beneficios que nos aporta el blueprint del servicio son variados. Encontramos que, al mapear todos los puntos de contacto y procesos relacionados con un servicio, se pueden

identificar oportunidades para mejorar la experiencia del cliente, aumentando así la satisfacción y la lealtad. También, sirve para optimizar procesos, evitando así cuellos de botella y redundancias, además de ser una herramienta muy útil para que los trabajadores estén al tanto del funcionamiento y estructura del servicio, asegurando una buena comprensión. Los blueprints en general son más útiles cuando se coordinan servicios complejos porque conectan el trabajo entre departamentos. El éxito de un departamento suele medirse por los puntos de contacto que gestiona. Sin embargo, los usuarios encuentran muchos puntos de contacto en el mismo recorrido y no saben (ni les importa) a qué departamento pertenece cada punto de contacto. Si bien un departamento puede lograr sus objetivos, es posible que no se alcancen los objetivos a gran escala a nivel organizacional. Los blueprints obligan a las empresas a capturar lo que sucede internamente a lo largo del recorrido del cliente, brindándoles información sobre superposiciones y dependencias que los departamentos por sí solos no pueden ver. (Nielsen Norman Group, 2017)

SERVICE BLUEPRINT *Example*

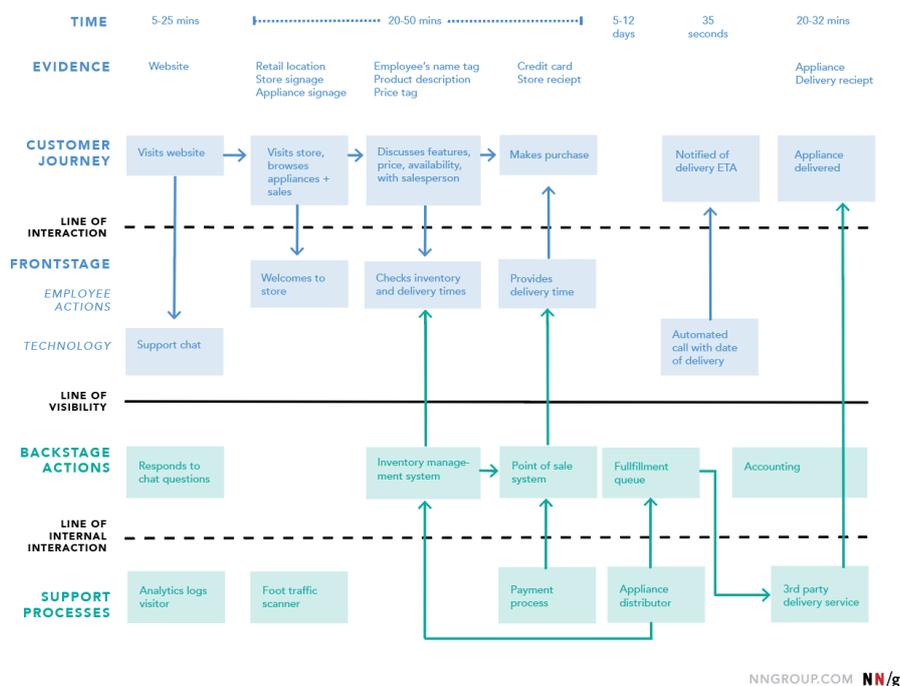


Ilustración 6: Ejemplo de Blueprint del servicio. Fuente: Nielsen Norman Group

Los elementos clave del blueprint de servicios son los que se pueden observar en el ejemplo superior. Por un lado, las acciones del cliente. En general los pasos, elecciones, actividades e interacciones que los clientes realizan mientras interactúan con un servicio para alcanzar un objetivo particular. Las acciones del cliente pueden estudiarse con más profundidad si se desea haciendo uso de un mapa del recorrido del cliente. Aquí se nos presenta la primera separación en forma de “línea de interacción”. Esta delimita la separación entre el cliente y la organización. Justo después nos encontramos en el frontstage, que cuenta con las acciones de los trabajadores y la tecnología. Estas se refieren a las acciones que ocurren directamente a la vista del cliente. Estas pueden ser de persona a persona o de persona a una computadora. Las acciones de persona a persona son todas las acciones que realiza la persona que interactúa con el cliente, sin embargo, las acciones de persona a computadora se llevan a cabo cuando el cliente interactúa con algún tipo de tecnología cuyo propósito es el propio servicio del cliente por su parte, o lo que

es lo mismo, el autoservicio. En general, estas acciones del frontstage tienen mucha relación con las futuras opiniones del cliente, las reclamaciones, la actitud del cliente hacia los empleados, etc. Como se puede apreciar, justo por debajo se encuentra la “línea de visibilidad”. Esta nos informa de que los procesos llevados a cabo a partir de ahí son siempre fuera del alcance del cliente, es decir, que ocurren sin que se vea por parte del consumidor del servicio. Estas acciones se pueden llevar a cabo tanto por un empleado del backstage, como por uno del frontstage que realice ciertas tareas invisibles para el cliente. Tras ello, se nos presenta la última división, llamada “línea de interacción interna”, que traza la separación entre los empleados que entregan el servicio directamente a los clientes, y a los que no tienen esas interacciones. Por último, encontramos todas las acciones internas que se desarrollan para ayudar a que este servicio pueda ser entregado al cliente. (Nielsen Norman Group, 2017)

Otra herramienta muy útil es el Value Stream Mapping. El Value Stream Mapping o mapa de flujo de valor, está considerada dentro de la metodología Lean¹⁸ y nos permite visualizar el proceso de manufactura, al igual que sus flujos de trabajo correspondientes. Generalmente se suele usar como primer paso para poder identificar oportunidades dentro del propio proceso para mejorar y así reducir tiempos. Además, sirve como precedente para aplicar otras herramientas de lean como pueden ser Kanban, que también ayuda a generar nuevos desarrollos que contribuyan al futuro desarrollo de los procesos, así como a su mejora. (NIST, 2022) En pocas palabras, los mapas de flujo de valor son herramientas que nos ayudan a entender de forma más correcta y sencilla todos los pasos del proceso, ver cuáles de ellos nos aportan un valor real y cuáles no nos aportan desde el punto de vista del cliente y a mejorar el proceso en todo su conjunto, y por ende, su finalidad es generar el mayor valor posible para el cliente, de la forma más eficiente que se pueda.

Para el correcto desarrollo de un mapa de flujo de valor hay que seguir una serie de pasos determinados:

En primer lugar, se ha de ser consciente del estado actual con el que contamos en el proceso, por lo que debemos elaborar nuestro mapa de flujo de valor sobre el estado que tiene el proceso en este momento, siendo lo más fieles posible. Después de realizarlo, tenemos que analizar el estado descrito, pudiendo localizar aquellos momentos del proceso en los que no estemos aportando valor al cliente, buscar su causa e intentar desarrollar opciones de mejora. Seguidamente a este análisis, se ha de crear un nuevo diagrama para reflejar un estado futuro del proceso, un estado ideal que se querría alcanzar, y diseñar conjuntamente un plan de acción en el que englobemos todas las mejoras que se creen que ayudarán al proceso a llegar al estado deseado.

¹⁸ La metodología lean busca optimizar los procesos de gestión y productivos de la empresa que lo ponga en práctica. De este modo se utilizan menos recursos, por lo que cualquier proceso se convierte en más eficiente.

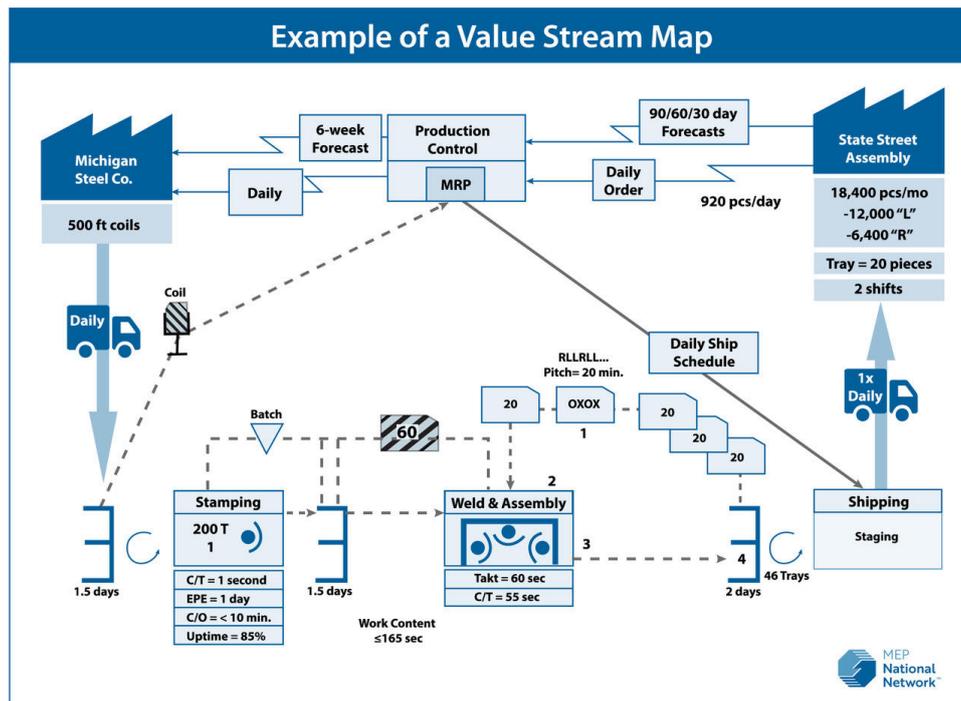


Ilustración 7: Ejemplo de Value Stream Mapping. Fuente: NIST

En cuanto a los elementos clave que podemos identificar, encontramos dos principales, el cliente, y el producto o servicio.

En lo que respecta al cliente, identificarlo correctamente es esencial para poder realizar una solución que satisfaga todas sus necesidades. Para los que se está mapeando el flujo de valor. Esto ayuda a mantener el enfoque en satisfacer las necesidades del cliente. En cuanto al producto o servicio, ha de ser definido de manera clara y sin ambigüedades.

Por otra parte, para poder ser capaces de entender cómo se desarrolla el producto a lo largo del proceso, tenemos que representar correctamente los flujos, tanto de materiales como de información. El flujo de materiales por su parte representa cómo se mueve físicamente el producto, mientras el flujo de información muestra cómo se comunican las instrucciones para su desarrollo a lo largo de todo el proceso. En cuanto a los símbolos y la notación de los diagramas, se utilizarán varios símbolos diferentes para representar diferentes elementos del proceso, como puede ser el transporte, las operaciones, el inventario, etc. Como se puede apreciar, en el diagrama ejemplo se utiliza un camión para representar el transporte, y un triángulo para el inventario.

Otros elementos que pueden estar incluidos en un VSM, pero que no se pueden ver representados en este ejemplo en concreto pueden ser el Estado Futuro, en el que se muestra cómo se podría mejorar el proceso, eliminando pasos y procesos que no aportan valor para el cliente, al igual que optimizando el flujo de trabajo. Las métricas de desempeño o KPIs también se pueden incluir en estos mapas, ayudando a mostrar el desempeño actual o la eficiencia, calidad y costes del proceso de forma clara y visual. Además, se podrían añadir acciones Kaizen para representar la mejora continua que deben sufrir todos los productos que se entregan al cliente.

En definitiva, el VSM es una herramienta que nos permite identificar un gran número de áreas que necesitan mejora en los procesos empresariales que nos conciernen, y que tiene un carácter muy versátil ya que puede ser usado en una gran variedad de industrias.

En cuanto a la elección de la herramienta en la integración de la computación cuántica en el sector servicios, esta dependerá significativamente de los objetivos y del aspecto específico del proceso de integración que se quiere analizar, y en un futuro, mejorar. Para tener una visión mucho más completa, se propone utilizar una combinación de estas herramientas. Para empezar, se podría realizar un Value Stream Mapping para poder identificar ineficiencias a nivel de proceso, una vez dibujado este, y luego utilizar un Customer Journey Map para comprender la experiencia del cliente, en este caso las empresas en las que se realiza la integración en detalle y así poder conseguir más eficiencia a la hora de la integración en el resto del sector.

3.2 Comparativa de computaciones

La computación clásica, la computación de altas prestaciones y la computación cuántica son tres paradigmas actuales fundamentales en el contexto de la informática. Cada uno de ellos cuenta con una serie de características distintivas que influyen en numerosos aspectos de su funcionamiento, como por ejemplo en la capacidad que tienen de llevar a cabo diversos retos computacionales. En este análisis comparativo, se van a explorar las diversas características que poseen en términos de velocidad, disponibilidad, eficiencia, escalabilidad, lenguajes de programación utilizados, capacidad de aprendizaje, funcionalidad, adaptabilidad, coste-beneficio, innovación, personalización, escalabilidad y aplicaciones específicas. El objetivo es ser capaces de determinar cuál de estas tres tecnologías de computación, en general, ofrece mayores beneficios en un panorama tecnológico en constante evolución, como es el actual, ayudándonos así a comprender mejor qué enfoque de los tres es más correcto a la hora de abordar diversos tipos de tareas y desafíos en el mundo de los servicios. Para poder visualizarlo de manera más sencilla, se presenta la siguiente tabla comparativa, que se usará de guía para el posterior análisis.

CRITERIO	C. CLÁSICA	COMP. ALTAS PRESTACIONES	QC
Velocidad	Adecuada con limitaciones	Alta	Significativamente más alta
Disponibilidad	Ampliamente disponible	Disponible con limitaciones	Poco disponible y experimental
Capacidad de aprendizaje	Aprendizaje automático no inherente	Aprendizaje automático no inherente	Alta capacidad de aprendizaje automático
Aplicabilidad	Alta aplicabilidad	Aplicabilidad media	Aplicabilidad en áreas muy específicas
Lenguajes	Convencionales	Convencionales con enfoque en paralelismo	Lenguajes cuánticos
Funcionalidad	Amplia variedad de funciones	Tareas específicas con alto número de cálculos	Por determinar, tareas cuánticas específicas
Adaptabilidad	Alta adaptabilidad	Específica y no fácilmente adaptable	Aún por determinar, altamente específica

Coste-beneficio	Más económica y altamente accesible	Medianamente costosa	Muy costosa y experimental
Eficiencia	Eficiente para tareas convencionales	Eficiente para tareas específicas clásicas	Eficiente para problemas cuánticos, error en hardware
Innovación	Mejoras continuas menores	Innovaciones específicas	Constante innovación y avances
Optimización	Relativamente sencilla	Optimización posible	Optimización compleja
Personalización	Fácil	Personalización posible en aplicaciones específicas	Poco personalizable
Escalabilidad	Escalabilidad posible	Escalabilidad posible	Baja y difícil escalabilidad

Ilustración 8: Tabla comparativa de computaciones

En cuanto a la velocidad, podemos destacar que es un factor crítico en la computación, y su importancia depende mucho del tipo de tecnología que necesitemos, sea computación clásica, de altas prestaciones o cuántica. Por su parte, la velocidad en la computación clásica se basa en el uso de transistores y circuitos eléctricos para realizar cálculos. En ciertas tareas del día a día, como puede ser el procesamiento de texto, la navegación web o el uso de aplicaciones, la velocidad de la computación clásica es suficiente y, en la mayoría de los casos, rápida. Sin embargo, en campos más delicados y específicos como pueden ser la simulación de sistemas complejos, el análisis de grandes conjuntos de datos (big data) o la criptografía, la velocidad de la computación clásica puede resultar en muchos casos, limitada. (Frackiewicz, 2023) La computación de altas prestaciones, por otro lado, fue desarrollada con la idea de solucionar las limitaciones que puede tener la computación clásica en este tipo de casuísticas. Utiliza arquitecturas de hardware específicas y sistemas paralelos¹⁹ para aumentar la velocidad de procesamiento de forma significativa. Es especialmente útil en tareas científicas y técnicas que involucran simulaciones complejas, análisis de datos masivos y modelado numérico. A través de supercomputadoras, la velocidad se incrementa considerablemente, permitiendo resolver problemas que serían impracticables para la computación clásica convencional. (UOC (Universitat Oberta de Catalunya), 2013) Por último, la computación cuántica destaca en el ámbito de la velocidad debido los principios de superposición e interferencia cuántica. Esto le permite que su procesamiento de información sea remarcablemente más rápido que el de la computación clásica y de altas prestaciones en situaciones muy concretas. Por ejemplo, en problemas como la factorización de números grandes usada en ámbitos como la criptografía o la simulación de sistemas cuánticos, la computación cuántica muestra una superioridad innegable sobre las otras dos computaciones.

¹⁹ Sistemas paralelos: combinación de componentes de hardware y software que utilizan recursos masivos de cómputos en conjunto para resolver una tarea computacional.

Si bien ha quedado bastante demostrado que computación cuántica promete un aumento impresionante en la velocidad para problemas concretos, su aplicabilidad está bastante limitada a que sean esos casos en específico, ya que no todos pueden aprovechar sus ventajas cuánticas. Para tareas cotidianas y aplicaciones generales, la computación clásica sigue siendo eficaz y asequible, dejando la computación cuántica en un segundo plano ya que sería prácticamente innecesaria su aplicación. La computación de altas prestaciones la podríamos colocar en un punto intermedio, ya que mejora la velocidad en aplicaciones concretas con respecto a la computación clásica, pero de forma mucho más asequible que la computación cuántica. En cuanto a líneas futuras, se podría llegar a ver una integración más amplia de la computación cuántica en áreas que requieran de un rendimiento extremadamente rápido y soluciones a problemas complejos que las otras dos computaciones no puedan abarcar de forma rápida y eficiente.

La disponibilidad por su parte, juega un papel muy importante en la comparación que se está llevando a cabo, ya que es un punto clave en si se puede utilizar dicha computación o no. La computación clásica es, a grandes rasgos, accesible para casi todos. Se utiliza para una gama muy amplia de dispositivos, y como se sabe, los sistemas operativos y aplicaciones tradicionales se usan ampliamente a lo largo del globo, para todo tipo de tareas. Es por esto por lo que la computación clásica es la más común y extendida actualmente, siendo la que a la mayoría de las personas y organizaciones tienen acceso.

Por su lado, el uso de la computación de altas prestaciones es bastante más limitado. Su uso está reducido a las aplicaciones que necesitan muchos recursos, como todo lo que tiene que ver con simulaciones o estudios científicos de gran magnitud. Si bien su poder computacional es sustancialmente mayor que el de la computación clásica, esta requiere hardware especializado y recursos de alto rendimiento, lo que hace de su acceso algo limitado y de lo que solo pueden hacer uso empresas y organizaciones que cuenten con grandes capitales y necesidades muy específicas. En lo que a la computación cuántica respecta, es actualmente el menos disponible. Aunque existen sistemas cuánticos de los que se puede hacer uso hoy en día, el desarrollo de hardware cuántico y de sus procesos sigue siendo altamente complejo y costoso. Además, hay que resaltar que la mayoría de los ordenadores cuánticos que existen hoy en día están ubicados en determinados centros de investigación o grandes empresas tecnológicas, y el acceso suele estar muy limitado e incluso restringido. Todo esto significa que, la disponibilidad de la computación cuántica es muy limitada y significativamente menos accesible que la computación clásica.

En el ámbito del coste-beneficio, la informática clásica destaca por ser muy asequible y fácil de acceder. Los ordenadores y servidores tradicionales están muy disponibles y, por lo general, no son excesivamente caros como para resultar limitante. El beneficio principal que presenta es su amplia usabilidad en una gama extensa de aplicaciones.

Por otro lado, la computación de altas prestaciones requiere una inversión importante, no tan significativa como la necesaria para los sistemas cuánticos pero significativamente mayor que la computación clásica. Requiere hardware, centros de datos y mantenimiento especiales, lo que genera costes significativamente altos. Sin embargo, tiene la ventaja de poder manejar tareas intensivas como simulaciones científicas, análisis de big data y aplicaciones de ingeniería avanzadas, por lo que se puede argumentar que la mejora del rendimiento y la eficiencia justifica estos gastos más altos.

En cuanto a la computación cuántica, actualmente es con creces la opción más costosa de las tres a considerar. Las inversiones que hay que hacer para aplicar esta tecnología son amplias, e incluyen investigación y desarrollo de hardware cuántico, al igual que de la infraestructura necesaria, lo que resulta en que el número de recursos necesarios sea muy

significativo. Asimismo, actualmente su beneficio es relativamente incierto y depende en gran medida de la capacidad que tenga la computación cuántica para abordar los problemas cuánticos específicos que se le presenten. El valor real de la computación cuántica se podrá medir a medida que la tecnología avance.

Como se ve, la computación clásica sobresale por su asequibilidad y su capacidad de proporcionar resultados inmediatos y con resultados asegurados, lo que la hace más atractiva para las aplicaciones cotidianas. Por su parte la computación de altas prestaciones, a pesar de suponer un coste significativamente más elevado que su predecesor, se justifica en las ocasiones que se necesite un alto rendimiento para tareas muy específicas. Por último, la computación cuántica, aunque prometedora, representa la opción más cara actualmente, y su relación entre coste y beneficio aún no está del todo consagrada, debido al carácter novedoso de la tecnología y su corta trayectoria y testing. Si bien es cierto que en el futuro, la computación cuántica tiene el potencial de poder superar a las otras dos computaciones en la resolución problemas específicos, lo que podría cambiar de lado la balanza actual del coste y beneficio, su aplicación dependerá mucho de si es capaz de demostrar resultados y beneficios reales sin suponer un desembolso tan gigantesco, ya que actualmente esta inversión supone una visión a futuro y no un servicio del que disponemos de inmediato.

En términos de capacidad de aprendizaje, como se ha comentado anteriormente la computación clásica, que utiliza los bits para procesar datos de manera secuencial, tiene un conjunto intrínseco de algoritmos de aprendizaje automático, como pueden ser los árboles de decisión, usados en la lógica o las redes neuronales, usadas en el desarrollo de IAs. Sin embargo, tiene varias limitaciones y problemas que implican grandes volúmenes de datos o tareas que son demasiado complejas. Por su parte, la computación de altas prestaciones está más orientada a mejorar la capacidad de procesamiento y cálculo, lo que hace esta computación útil si las tareas que queremos llevar a cabo tienen un alto volumen de cómputo matemático. Por otro lado, la computación cuántica apunta maneras en el campo del aprendizaje automático. Los qubits permiten la realización de muchos cálculos en paralelo, siendo muy ventajoso si se quiere entrenar modelos de aprendizaje de mayor complejidad. Algunos algoritmos cuánticos, como puede ser el Algoritmo Cuántico de Grover, nos permiten la obtención de un aprendizaje automático más rápido y avanzado. (Ranz Ribeiro, 2019)

En cuanto al panorama que depara el futuro, la computación clásica seguirá siendo muy necesaria en aplicaciones del día a día, pero nunca dejará de tener esas limitaciones en las tareas de gran envergadura. La computación de altas prestaciones seguirá siendo buena alternativa, sobre todo siendo muy útil para todo lo relacionado con la inteligencia artificial. Por su parte, la computación cuántica en cuanto a este ámbito también se encuentra en desarrollo y se espera comience a tomar relevancia en el ámbito del aprendizaje automático, sobre todo en tareas en las que el procesamiento sea muy elevado.

En cuanto a la aplicabilidad, no hay duda de que la computación clásica cuenta con la mayor de todas, además es una de las características en las que más salto hay de un tipo de computación a otra. Por su parte, y como se venía mencionando, la computación clásica es conocida por su versatilidad y se encuentra en prácticamente todos los aspectos de la vida cotidiana. Desde navegadores web hasta procesadores de texto y aplicaciones de productividad, su utilidad es generalizada. Además, desempeña un papel fundamental en la administración de servidores y la infraestructura de redes, lo que permite la comunicación en línea y el funcionamiento de aplicaciones basadas en la web. Esta amplia aplicabilidad la hace esencial para el funcionamiento general de muchas industrias todos los días. La computación de altas prestaciones por su parte se especializa en aplicaciones científicas que necesitan de una

capacidad de procesamiento mayor. Se utiliza en campos como la investigación científica, donde se emplea en ámbitos como la simulación del clima, la modelización de moléculas y la predicción de fenómenos naturales. Su utilidad radica en lo útil que es para solucionar problemas con alta complejidad y que exigen mayor potencia. La computación cuántica, como es de esperar, tiene una aplicabilidad altamente especializada, lo que la hace innecesaria para muchas tareas que son perfectamente solucionables por un sistema clásico. La computación cuántica, sin embargo, muestra su potencial en la previamente mencionada capacidad de cómputo tan elevada.

Si bien actualmente la elección de la tecnología a utilizar parece estar bastante clara, se ha de analizar y siempre decidir en última instancia basándose en la naturaleza de la tarea a realizar y de sus requisitos. La computación clásica es la opción segura y preferible para aplicaciones cotidianas y tareas generales, mientras que la computación de altas prestaciones es esencial en campos científicos y técnicos intensivos. La computación cuántica, por su parte, se destaca en problemas cuánticos específicos y muestra su potencial en áreas como la criptografía o la simulación.

En relación con los lenguajes de programación, cada tipo de computación tiene unos lenguajes clave asociados. Por su parte, los lenguajes más utilizados en la computación clásica son Python, C++ o Java entre otros. Python, gracias a su simplicidad y versatilidad es ampliamente utilizado, mientras Java aporta una gran portabilidad, y C++ es usado más para aplicaciones que requieren alto rendimiento. Los lenguajes de programación en este tipo de computación están diseñados para usarse en aplicaciones generales. Sus principales objetivos son la simplicidad, la portabilidad y la facilidad de desarrollo. Además cuentan con un gran ecosistema de bibliotecas que permite a los desarrolladores utilizar una “plantilla”, o lo que es lo mismo, un marco de trabajo ya creado para solucionar problemas que son comunes, ayudando mucho con la velocidad del desarrollo de software. Son muy accesibles, ya que la mayoría de los lenguajes que se usan en la computación clásica permiten su ejecución multiplataforma, es decir, que se pueden usar para varios sistemas operativos, haciendo de estos códigos más aprovechables, sin olvidar, que gracias a la cantidad de documentación con la que se cuenta, aprender estos lenguajes de programación cada día es más sencillo y al alcance de cualquiera. (AWS, 2023), (AppMaster, 2023), (Robledano, 2019)

En la computación de altas prestaciones, los lenguajes principales son CUDA, utilizado principalmente en la programación de GPU (Wikipedia, CUDA, 2023), OpenMP, framework de programación paralela para C/C++ y Fortran que destaca por su simplicidad y buenos resultados (GitHub, s.f.), Fortran, lenguaje de programación de alto nivel muy usado especialmente para tareas numéricas y matemáticas intensivas (Fortran Programming Language, 2022) y C++, entre otros. Estos lenguajes se caracterizan por la programación paralela, es decir, la capacidad de realizar cálculos en paralelo. Asimismo, los lenguajes de programación de altas prestaciones se centran en la optimización de rendimiento. Esto agrupa por un lado, la capacidad de controlar la asignación de recursos del sistema, y por otro, la gestión de la memoria. Además, es común para estos lenguajes trabajar en sistemas distribuidos o clústeres. Como gran beneficio al igual que sus predecesores, los lenguajes de computación de altas prestaciones son altamente portables, permitiendo así que el mismo código que desarrollamos se pueda ejecutar en múltiples sistemas y arquitecturas. En conclusión, estos lenguajes permiten a los desarrolladores conseguir el máximo poder de diversas arquitecturas de hardware de alto rendimiento, como pueden ser las GPUs y los clústeres de computadoras, obteniendo resultados muy satisfactorios.

Por su parte, la computación cuántica cuenta con sus lenguajes propios de carácter cuántico como son Qiskit, que es un motor de construcción, optimización y ejecución de circuitos cuánticos (Qiskit, 2023) Cirq, lenguaje en código abierto en Python desarrollado por Google (Computing, 2023) o Quipper, lenguaje que permite la descripción de algoritmos cuánticos y fue desarrollado por Microsoft. Estos lenguajes se caracterizan principalmente por la capacidad de manipulación de qubits, permitiendo así el carácter cuántico, y el que se puedan realizar operaciones como son la superposición o el entrelazamiento. Permite a su vez la compilación cuántica, que se encarga de optimizar y adaptar el código para que funcione en una computadora cuántica particular. Los programadores cuánticos para poder manipularlos han de comprender los principios de la mecánica cuántica y cómo se aplican a la programación cuántica.

La comparativa en este caso es sencilla, ya que la elección de lenguaje estará siempre supeditada al tipo de computación con el que estemos trabajando.

La funcionalidad y la adaptabilidad van de la mano en este caso. La computación clásica cuenta con una alta funcionalidad y adaptabilidad, ya que nos permite tanto desarrollar una amplia variedad de aplicaciones en una amplia gama de campos, como un set muy completo de funcionalidades y aplicaciones, desde el procesamiento de datos y el desarrollo de software hasta el modelado y la simulación. Esto la hace esencial en la mayoría de las aplicaciones tecnológicas y empresariales, ya que se adapta a las cambiantes necesidades de los usuarios y organizaciones. Es por todo esto que actualmente es la forma de computación predominante.

En la computación de altas prestaciones, la adaptabilidad se centra principalmente en aplicaciones científicas y técnicas que requieren un alto rendimiento. Es altamente adaptable en términos de optimización, por ejemplo, pero es menos versátil en comparación con la computación clásica en términos de aplicaciones generales. La computación cuántica por su parte, es muy funcional, ya que se basa en la mecánica cuántica, teniendo potencial de superar a la computación clásica en cuanto a realizar tareas específicas, sin embargo, es mucho menos adaptable que las otras dos computaciones. Como es muy específica, las computadoras cuánticas están muy optimizadas en lo que a tareas complejas y problemas cuánticos respecta, sin embargo, actualmente no es adecuada para llevar a cabo tareas cotidianas.

En lo que respecta a la eficiencia, podemos realizar el estudio siguiendo diversas líneas. Por un lado tenemos la eficiencia en términos de velocidad. En general, para la computación cuántica la eficiencia depende en gran manera de la capacidad de procesamiento que tenga la CPU y lo optimizado que esté el código que estamos usando. Se puede decir que es considerablemente eficiente para tareas que no requieran cálculos en paralelo, aunque puede quedarse corta en aquellas que supongan mayor necesidad de cómputo, ya que el cálculo supondría un tiempo excedido. La computación de altas prestaciones por su parte, podemos decir que destaca en cuanto a velocidad en aquellas tareas que impliquen paralelismo como pueden ser las simulaciones. Además, los supercomputadores con los que contamos hoy en día son capaces de procesar volúmenes de datos muy grandes de forma significativamente más rápida que los ordenadores clásicos. Por otro lado, la computación cuántica es en muchas ocasiones sinónimo de velocidad, sin embargo, es complejo asegurar que en el 100% de los casos será más rápida que la computación clásica o que la de altas prestaciones. Aunque hay aplicaciones para las que la velocidad de cómputo si es significativamente mayor que las otras como puede ser las tareas cuánticas realizadas en algoritmos como es el de Shor, hay ciertas tareas básicas, como la búsqueda en una base de datos, para las que la computación cuántica puede no ser más veloz que la clásica. (Banafa, 2021)

En cuanto a la eficiencia en términos de escalabilidad, se presentan más diferencias e incógnitas. Por su parte, la computación clásica está muy limitada debido a la ley de Moore, que predijo que cada año se duplicarían la cantidad de transistores que caben en un microprocesador, y las restricciones físicas de la CPU. A mayor problema, generalmente menor eficiencia. (Jayo, 2021) La computación de altas prestaciones se escala generalmente bien en sistemas de clústeres, como se mencionó anteriormente, sin embargo también tiene sus límites. En cuanto a la computación cuántica, actualmente se desconoce hasta dónde llega su escalabilidad, ya que sigue en desarrollo. Este es uno de los mayores retos a los que se enfrenta la computación cuántica, a la capacidad de ampliar los sistemas cuánticos al nivel necesario para resolver problemas cada vez más grandes y complejos. El principal problema es la inestabilidad de los qubits, los cuales son muy frágiles y cualquier mínima interacción con el exterior puede hacer que se rompa su estado cuántico, obligando a los sistemas cuánticos a aislarse del exterior de forma perfecta y a solucionar sus errores de manera veloz y eficiente. Aunque los sistemas cuánticos con los que contamos hoy en día son capaces de hacer cálculos básicos, aún no se ha conseguido suficiente desarrollo como para tratar de resolver los problemas más complejos del mundo real, que se espera puedan ser resueltos con un estado más avanzado de esta tecnología. (Tomorrow Bio, 2023)

En lo que se refiere a la eficiencia en términos de optimización, las tres computaciones basan su optimización en la capacidad de diseño de algoritmos o el uso eficiente de recursos. Cualquier tecnología puede ser considerada eficiente en términos de optimización si puede desarrollar algoritmos eficientes para su propósito y si puede mantener un código óptimo. Si que es cierto, que en la computación cuántica la optimización es más compleja debido a la inestabilidad de los qubits, ya que cada vez que se añaden qubits al entorno, la estabilidad general del sistema puede verse modificada.

Un punto muy controvertido es la eficiencia en términos coste-beneficio. Es cierto que por su lado, la computación clásica ha sido, y hoy en día sigue siendo la opción más asequible, ya que sirve para una gran variedad de aplicaciones y el capital que se tiene que invertir para la adquisición de software y hardware es relativamente bajo. La computación de altas prestaciones puede ser considerada un poco costosa, ya que la infraestructura no es la misma que la clásica, sin embargo, si lo que se quiere llevar a cabo son procesos que requieren mucha capacidad de cómputo, se volverá no solo rentable, si no necesaria.

En cuanto a la computación cuántica, se puede decir que su punto negativo es el alto coste que tiene. La inversión que se ha de hacer en infraestructura cuántica es muy elevado comparado con las otras dos computaciones, al igual que su mantenimiento; y no se puede decir que hoy en día sea rentable en lo que a coste-beneficio respecta, ya que su aplicabilidad está muy limitada.

Si bien se puede ver una clara ganadora en este aspecto, no se debe olvidar el factor futuro. La computación clásica está en auge, y aunque no pueda resultar rentable a corto plazo, se debe considerar que a largo plazo puede generar unos beneficios muy considerables.

Por otro lado, podemos estudiar la eficiencia en términos de innovación y personalización. La computación clásica, debido al tiempo que lleva operativa, es una tecnología altamente personalizable e innovable en términos tanto de software como de hardware. Además, no se puede olvidar la alta adaptabilidad que tiene, permitiendo así aplicarlo a necesidades muy específicas a bajo coste. Al igual que la computación clásica, la de altas prestaciones es bastante personalizable de manera relativamente sencilla, como la adaptación de código. No obstante, la innovación es mucho más limitada y lenta. En la computación

cuántica sin embargo, se está produciendo una innovación constante, debido a su carácter naciente, produciéndose constantes avances en lo que a infraestructura y algoritmos respecta. Si bien esto es un punto muy atractivo, se ha de puntualizar que en personalización es bastante limitada, mucho más que sus dos competidoras, ya que hay numerosos problemas y desafíos técnicos en todos los aspectos, y que los algoritmos usados, a diferencia de los clásicos, son muy específicos.

En resumidas cuentas, se puede decir que la eficiencia en la computación en general depende de múltiples factores. Cada uno de los enfoques que se han presentado tienen tanto numerosas ventajas, como limitaciones y la elección propia entre todos ellos depende tanto de las necesidades del proyecto en el que se quieran utilizar, como de los recursos específicos con los que se cuente.

La elección entre estas formas de computación depende del contexto y los objetivos. La computación clásica es ampliamente accesible y adecuada para la mayoría de las aplicaciones. La computación de altas prestaciones es ideal para cargas de trabajo intensivas. La computación cuántica es prometedora pero limitada en aplicaciones actuales. En el futuro, la computación cuántica tiene el potencial de superar a las demás en problemas específicos, pero su adopción generalizada llevará tiempo debido a los desafíos técnicos y de infraestructura que enfrenta.

3.3 Tecnologías as a service y cuántica

La computación cuántica, como hemos mencionado anteriormente tiene un potencial enorme de transformar las industrias tal y como las conocemos hoy en día. Cuando hablamos de las “tecnologías as a service” o tecnologías como servicio, nos referimos a entregar diferentes servicios a través de la nube, generalmente siendo de pago. Esto permite que las empresas puedan acceder a las diversas tecnologías que se ofrecen de forma mucho más económica y accesible. A su vez, la Computación cuántica como servicio (QCaaS) es una extensión del modelo de tecnologías as a service.

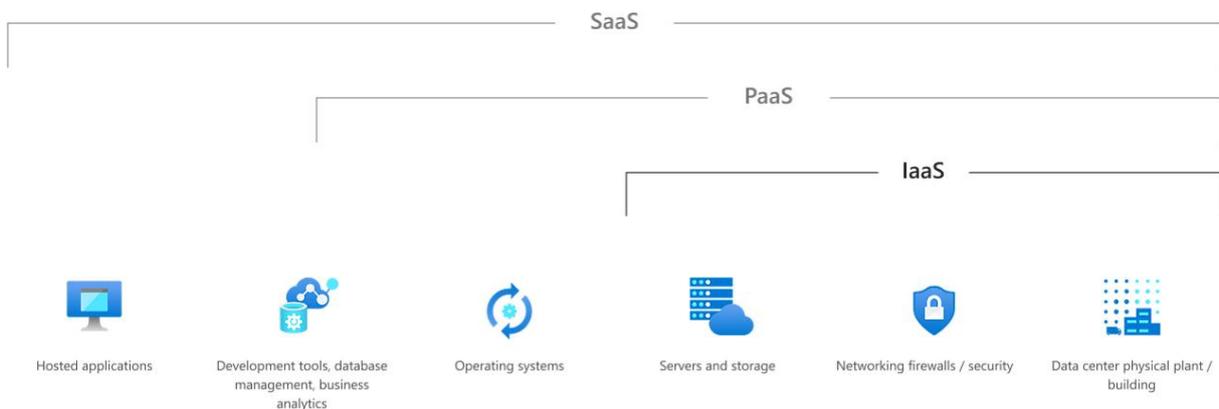


Ilustración 9: Imagen explicativa de los "as a service" Fuente: Microsoft

Por un lado, encontramos el Software como servicio, o SaaS. El software como servicio se refiere a la entrega de aplicaciones basadas en la nube, a través de la cuál, los usuarios pueden conectarse. Algunos ejemplos destacables son los e-calendars, las herramientas ofimáticas como es Microsoft Office 365 o plataformas como Spotify. (Microsoft, ¿Qué es SaaS?, 2023)

En cuanto a su relación con la cuántica, las empresas que ofrecen SaaS, podrían beneficiarse de la tecnología cuántica para optimizar procesos y algoritmos diversos. Un ejemplo de uso podría ser la optimización de recomendaciones en plataformas de streaming como Netflix, mejorando significativamente su eficiencia.

Por otro lado, encontramos la Infraestructura como Servicio, o IaaS. La Infraestructura como Servicio se refiere a un tipo de servicio en la nube que ofrece en esencia almacenamiento y recursos de red de forma *on demand*. Las soluciones IaaS ayudan a reducir el mantenimiento de los centros de datos, al igual que reducir gastos. Diversos ejemplos de IaaS son Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure o IBM Cloud Infrastructure, entre otros. (Microsoft, What is IaaS?, 2023)

En cuanto a su relación con la computación cuántica, los proveedores de IaaS podrían integrar recursos de hardware cuántico, como podría ser el almacenamiento o procesadores cuánticos como parte de sus diversos servicios. Esto podría permitir a las diferentes organizaciones usuarias de IaaS acceder a los recursos cuánticos sin tener que invertir en hardware cuántico, el cuál es muy costoso.

Por último, dentro de los tres principales “as a service”, encontramos el Plataforma como Servicio, o PaaS. La Plataforma como Servicio es un entorno de desarrollo e implementación en la nube. Este entorno cuenta con recursos que permiten entregar desde aplicaciones muy sencillas hasta muy sofisticadas. Al igual que con la IaaS, compras los recursos que necesitas en cada momento a través de un proveedor en la nube. Dentro de la PaaS, encontramos herramientas como Microsoft Azure App Service, IBM Cloud Foundry, RedHat OpenShift o SAP Cloud Platform. (Microsoft, ¿Qué es PaaS?, 2023) Aplicándolo al ámbito cuántico, los diversos servicios PaaS pueden incluir herramientas de desarrollo cuántico, permitiendo que el desarrollo e implementación de soluciones cuánticas sea mucho más sencillo.

A parte de estos tres principales modelos as a service, encontramos algún otro modelo que tiene interesantes posibilidades si se aplica la cuántica, como puede ser el Data as a Service (DaaS). Data as a Service es un modelo de entrega de datos en la que los mismos se proporcionan a los usuarios a través de la nube, generalmente internet. DaaS en esencia, trata los datos como si fueran un servicio en el que poder acceder a datos bajo demanda, evitando el uso de bases de datos locales. Esto implica facilidad, escalabilidad y una mayor seguridad. (TIBCO) Algunos ejemplos de DaaS son las plataformas de análisis en la nube o proveedores de diferentes tipos de datos, como los financieros o datos de marketing. En relación con la computación cuántica, los servicios DaaS podrían hacer uso de las tecnologías cuánticas para analizar grandes conjuntos de datos, permitiendo una mayor velocidad y precisión al usar esos datos para tomar decisiones.

En la línea de las tecnologías as a service, encontramos la Computación Cuántica como Servicio (QCaaS). Aunque es un concepto que se ha tachado de ser una mera ilusión, la computación cuántica como servicio cada día está más cerca de convertirse en una realidad. Este modelo se basa en la entrega de servicios cuánticos, al igual que el resto de as a service, a

través de la nube. Aunque similar en cierto modo a las otras as a service, la QCaaS pega un salto, ofreciendo tecnologías cuánticas sin la necesidad de invertir en hardware cuántico. (Kaushik, 2021) Actualmente, encontramos varios desafíos para la viabilidad de la QCaaS. Aunque esta podría ofrecer una serie de ventajas innegablemente revolucionarias, lo cierto es que presenta una serie de retos bastante importantes que son inherentes al propio modelo de negocio en el que se basa. Encontramos problemas más relativamente comunes como son el alto costo de la tecnología, ya que la infraestructura cuántica es bastante costosa de conseguir y también de mantener a la larga; la falta de formación o las habilidades necesarias para gestionar esta tecnología, ya que requiere una alta especialización y la capacitación puede ser costosa y resultar un obstáculo para la integración y adopción de esta tecnología, o la aceptación en la industria, ya que esta requiere tiempo y esfuerzo, al igual que la evaluación al respecto de las organizaciones.

El QCaaS ofrece, además, una serie de beneficios bastante significativos. En primer lugar, ofrece acceso a la computación cuántica, es decir, permite a las diversas organizaciones que puedan acceder a la computación cuántica sin necesidad de tener o invertir en hardware cuántico, que además de ser costoso es difícil de mantener. Gracias a ella, el acceso a esta tecnología promete ser algo posible hasta para aquellas empresas que cuenten con los recursos justos y no puedan hacer un desembolso como el que supone la adquisición de hardware cuántico. En la misma línea, reduce los costes iniciales asociados con la adquisición del hardware, ya que omite este paso. Esto rentabiliza mucho más el proceso. A su vez, gracias a la QCaaS, las empresas tienen la capacidad de aumentar o disminuir a placer y siguiendo la necesidad que tengan en cada momento, el uso de recursos cuánticos. Para concluir, las interfaces y herramientas que los proveedores de QCaaS ofrecen hacen que el paso de especialización y capacitación de empleados pase de ser obligatoria a solo recomendable, ya que no será necesario un usuario con experiencia en computación cuántica, aunque si recomendable.

El estado actual de esta tecnología es aún muy rudimentario. Aunque sí que hay varios proveedores como son IBM o AWS y Google, que han puesto a disposición de los clientes cuántica a través de la nube para usuarios que quieran adquirirla, todavía no se han diversificado las ofertas, y su adopción aún se encuentra en una etapa muy inicial, estando muy limitada a empresas muy tecnológicas y grandes líderes de la industria. Además, como toda tecnología cuántica, sigue teniendo muchos desafíos técnicos importantes, como es la inestabilidad de los qubits y la decoherencia. En el futuro, se espera una expansión enorme que impulsará su adopción y diversificación a través de las industrias. Esto llevará a que cada vez haya más y más aplicaciones cuánticas impulsadas por esta adopción cada vez más extendida de la tecnología, permitiendo también que se desarrollen ecosistemas cuánticos más complejos. Asimismo, esto también implicará que el sector de la QCaaS, o de la cuántica en general, dejará de ser tan monopolizado y aumentará la competitividad entre empresas que comenzarán a proveer de esta tecnología, permitiendo así la aparición de una mayor variedad de servicios y aplicaciones cuánticas.

Es innegable, que a medida que la tecnología cuántica vaya creciendo y mejorando, la QCaaS se convertirá en una parte indispensable de nuestro ecosistema de servicios en la nube.

3.4 Propuesta de integración de tecnologías cuánticas en el sector servicios

La integración de las tecnologías cuánticas en el sector de los servicios supone una idea revolucionaria, un paso en la dirección correcta para conseguir una nueva evolución en el mundo tecnológico. La integración podemos definirla como la aplicación en diversas áreas de los principios que rigen el área cuántica, más en concreto la de la mecánica cuántica, de forma que podamos realizar cálculos, operaciones y tareas que hasta la aparición de estas tecnologías eran impensables de realizar con las computadoras tradicionales con las que contamos. (OpenAI, 2023)

A lo largo de estas páginas se ha estudiado el origen, la evolución y las características que el área de la cuántica puede suponer para el desarrollo vital de muchos servicios de los que hacemos gran uso hoy en día, por lo que se puede fácilmente ver que a medida que la computación cuántica evoluciona, irán apareciendo con nuevas oportunidades para transformar la manera en la que dibujamos los servicios. Aprovechar la capacidad de procesamiento lo máximo posible, o abordar desafíos que hasta ahora eran demasiado complejos son solo dos de los muchos beneficios que nos podría aportar la tecnología cuántica si fuera aplicada de manera correcta, y, sobre todo, consecuente.

En este contexto, se va a presentar a continuación una propuesta detallada sobre cómo poder integrar la computación cuántica dentro del sector servicios, resaltando sus beneficios y las oportunidades que podría brindar para el sector en gran medida, al igual que trataremos de solventar de forma teórica los posibles obstáculos de diversas índoles que podamos ir encontrando a lo largo del camino.

No podemos obviar el hecho de que la integración de la computación cuántica es un proceso tedioso, que requiere de una gran inversión, una planificación exhausta y gran esfuerzo. Desarrollar una estrategia segura que nos permita aprovechar los beneficios y el potencial de las tecnologías cuánticas será clave si queremos que la integración sea lo más liviana posible.

El primer paso en la integración de la computación cuántica en el sector servicios debe de ser la preparación por parte de las empresas y la evaluación de sus recursos y capacidades. Para que una empresa, sea del sector que sea, pueda empezar a integrar estas tecnologías es importante que evalúen tanto los beneficios, como puede ser si la computación cuántica sería idónea para las diversas tareas que se llevan a cabo específicos del sector servicios en su contexto, y por otro lado los obstáculos, como puede ser el elevado coste inicial que supone la adquisición de la infraestructura necesaria para la implementación (nuevo hardware), la contratación de personal experto en la tecnología o la falta de conocimiento por parte del personal interno de la empresa. (Prieto, 2022) La identificación de los casos de uso adecuados para cada empresa es crítica en el proceso de integración. Tratándose de aplicaciones cuánticas, las áreas de uso más comunes y en las que se encontrarán la mayoría de casos de uso serán la criptografía cuántica, siendo la seguridad de las áreas en las que más impacto tendrá la computación cuántica; la simulación cuántica, que para empresas del sector de la química y la investigación de materiales podría ser crucial; la optimización, permitiendo volver mucho más eficiente todo el sector servicios, o el big data, donde podría suponer un aumento drástico de la velocidad.

Seguidamente, las empresas interesadas en la integración deberán de contar con el hardware necesario, por lo que la adquisición y establecimiento de hardware cuántico es el siguiente paso por seguir. Si bien esta es una opción, el uso de tecnologías cuánticas en la nube

como las ofrecidas por IBM o AWS son una excelente opción si no se cuenta con el capital necesario para el desembolso que supone.

Una empresa no es nada sin sus empleados, y, una integración como esta necesita que tengan una experiencia concreta. Para poder integrar la cuántica en una empresa, se tienen dos opciones a la hora de contar con personal capacitado. Por un lado, se pueden dar formaciones, talleres y cursos a los empleados actuales para que adquieran las habilidades necesarias para el uso y el manejo de la computación cuántica, si es que necesitamos que los empleados generales sepan de ello. La correcta selección de programas de capacitación es crucial, o en su defecto, la creación de programas internos que permitan a las empresas formar a sus empleados con los conocimientos exactos que requieren sus procesos. Por otro lado, si lo que necesitamos es personal específico muy cualificado, la opción a elegir debería ser la contratación de personal que ya tenga experiencia para gestionar los sistemas. De cualquier forma, búsqueda o preparación de personal capacitado debería ser el siguiente paso en esta integración. Además, para que los sistemas que estamos intentando integrar cumplan su cometido y tengan una funcionalidad correcta, se deberán contar con algoritmos cuánticos que sirvan para la funcionalidad específica que queremos solucionar con la integración cuántica. Para ello, se deberá de contar con personal cualificado para ello de manera interna, o en su defecto, recurrir a expertos externos a nuestro entorno. De cualquier manera, se debe siempre invertir en capacitación continua. Ya que la aplicación de la computación cuántica supone un cambio tan drástico, la formación no puede ser un evento único. Los cambios continuos que sufre como tecnología emergente en pleno desarrollo que es, hacen que los trabajadores que las manejarán deben de estar al día de las últimas tendencias y modificaciones, y así asegurar que su uso a futuro no sufrirá un declive por culpa del manejo erróneo.

Las empresas no pueden empezar de cero sólo porque quieran llevar a cabo esta integración, ni pueden deshacerse de sus actuales sistemas y procesos. El siguiente paso por llevar a cabo debería ser la integración de las tecnologías cuánticas con los sistemas existentes, lo cual puede llegar a requerir el uso de APIs, o de la creación de diversas interfaces. Tras esto, llega el siguiente paso, la prueba. Antes de poder implementar estos servicios cuánticos, es necesario llevar a cabo una serie de validaciones y pruebas que nos aseguren una integración correcta y se pueda asegurar que los resultados a obtener serán fiables.

Como es de esperar, esta implementación no puede ser algo drástico, si no que deberá de llevarse a cabo de manera paulatina. Se deberá comenzar con casos de uso que sirvan de piloto para luego extenderse poco a poco a medida que los usuarios y empleados ganan confianza y experiencia en la tecnología. Una vez que los sistemas estén en funcionamiento, se deberá hacer un seguimiento y una mejora continua para buscar formas de mejorar los procesos continuamente. Se deberá controlar el rendimiento, sirviendo así para detectar posibles cuellos de botella²⁰ y optimizar el uso de recursos.

Dentro de la propuesta de implementación, se quiere remarcar la necesidad de la creación de un Centro de Excelencia Cuántica en el que se considere el sector servicios.

Los centros de excelencia, o CoE (del inglés *Centre of Excellence*) son un lugar centralizado donde se formulan las buenas prácticas de un sector determinado basándose en conocimientos y en datos de la experiencia de una empresa. Estas permiten a las empresas establecer estándares para la organización e implementarlos de manera consistente en todas las plantas y áreas dentro de su entorno empresarial. (Nexus Integra, 2023)

²⁰ Cuello de botella: Proceso (o etapa productiva) que funciona de manera ineficiente, o a un bajo nivel de productividad, causando como consecuencia un retraso importante en las operaciones

Aplicado al área que concierne, un centro de excelencia cuántica se dedica a la investigación, desarrollo, educación y promoción de tecnologías y aplicaciones relacionadas con la computación cuántica, actuando así como punto focal de reunión de los conocimientos sobre computación cuántica, al igual que de otras áreas que afecten a la cuántica como pueden ser la física, la programación y las matemáticas. Actualmente España cuenta con varios centros de excelencia que trabajan la cuántica, como pueden ser el Instituto de Física Fundamental (IFF-CSIC), el instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT), o el Instituto de Ciencias Cuánticas (ICIQ), entre otros. (Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal de Inováción, 2023) Sin embargo, ninguno cuenta con una línea de investigación abierta que trate la computación cuántica desde la perspectiva de los servicios. Como parte de esta propuesta, se cree que una nueva línea de trabajo sobre las aplicaciones de la computación cuántica en servicios avanzados sería una iniciativa prometedora. Los objetivos de dicha nueva línea serían la investigación y desarrollo de aplicaciones cuánticas que puedan ayudar al sector servicios a mejorar su eficiencia y seguridad, al igual que a innovar. Asimismo, la colaboración de estas líneas de trabajo y las empresas y organizaciones varias del sector sería crítico para poder identificar las diversas oportunidades y los desafíos específicos en los que la computación cuántica puede ser de gran utilidad. Además, sería muy beneficioso fomentar la capacitación y formación cuántica dentro del sector, pudiendo así acercar la industria y la academia de manera exponencial.

Para poder establecer esta nueva línea de trabajo, sería necesario en primer lugar reunir un equipo multidisciplinar de expertos e investigadores, que serán los indicados para identificar las diversas oportunidades de trabajo en el sector, al igual que de desarrollar los diversos algoritmos y prototipos, siempre manteniendo feedback bidireccional con las empresas colaboradoras del sector. A su vez, no se podría olvidar la continua formación y evaluación que se ha de hacer de cualquier avance, ambas dos que podrían venir dadas por parte del propio centro, pudiendo desarrollar ellos mismos las formaciones necesarias, al igual que eventos o conferencias para asegurar que la transmisión de información importante sobre el uso de los avances conseguidos sea lo más directa y clara posible a los profesionales del sector servicios.

En definitiva, la creación de una nueva línea de trabajo en centros de excelencia que tenga en cuenta el sector servicios en su totalidad puede contribuir significativamente al avance de la computación cuántica en diversas aplicaciones, tanto prácticas como reales. Además, promovería la colaboración entre la comunidad científica y las empresas y organizaciones para aprovechar el potencial transformador que esta tecnología tiene, sobre todo en un sector clave de la economía como es el sector servicios.

"La computación cuántica tiene el poder de transformar casi todos los sectores y ayudarnos a abordar los mayores problemas de nuestro tiempo." Dr. Darío Gil, vicepresidente senior de IBM y director de Investigación.

3.5 Ciclo de vida de los servicios

Para poder diseñar una integración correcta en un servicio real, primero se han de identificar las fases del ciclo de vida de los servicios. Para definir las se usará como base el modelo ITIL. El modelo ITIL (Information Technology Infrastructure Library) surge en el siglo XX, en la década de los 80, impulsado por la Central Computer and Telecommunications Agency. Sus principales objetivos son la adopción de un enfoque orientado a los servicios, alinear los objetivos de negocio con el IT, la mejora continua y la importancia de medir y

evaluar el desempeño de los servicios, entre otros. (Service Tonic, consultado en 2023) El ciclo de vida de los servicios según el modelo ITIL está formado por 5 fases distintas y diferenciadas.

En primer lugar, la Estrategia del Servicio o Service Strategy. En esta fase se define la estrategia, las políticas que se van a seguir, y se tomarán decisiones sobre los servicios que se van a ofrecer al cliente.

Se identifican las oportunidades de mercado y a los clientes potenciales, al igual que las necesidades de estos. Las necesidades de los clientes no son un objetivo que debemos cumplir. Son el objeto que debemos satisfacer. Por lo tanto, se puede asegurar que el servicio que se va a ofrecer va a cumplir cumplirlas de forma satisfactoria. Dentro de esta etapa también englobamos el análisis financiero, donde se determina el método de financiación del servicio, al igual que los presupuestos para su desarrollo. Se gestiona la estrategia, creando un plan estratégico que contemple puntos importantes como son la adquisición de los recursos necesarios, la implementación de políticas, las relaciones con los proveedores y el desarrollo de métricas.

A continuación se aborda la fase de Diseño de Servicios o Service Design. La fase de diseño del servicio es clave para poder asegurarse de que los servicios se desarrollan de manera eficiente. Es importante que tanto la arquitectura, como los procesos y los acuerdos a nivel de servicio (SLA) se definan perfectamente. El principal objetivo de diseñar un servicio es que nos aporte rentabilidad, por lo que un diseño eficiente es crucial. En esta fase de su ciclo de vida se diseñan los diversos procesos necesarios, como la gestión de incidentes y la tecnología, siendo muy necesario especificar qué infraestructura de hardware o software se va a necesitar para poder proveer el servicio elegido. Además, se analiza cuál es la capacidad necesaria para poder cumplir con los SLA establecidos. El diseño de la arquitectura, de los niveles del servicio o de los roles son pasos cruciales en este momento. En resumen, se podría decir que esta fase sienta las bases para que el servicio pueda desarrollarse, implementarse y mantenerse de manera exitosa.

En la siguiente fase, llamada Transición del servicio o Service Transition, se planifica y gestiona la transición a un nuevo servicio o, en su defecto, se realizan cambios en un servicio ya existente. La gestión de cambios es necesaria, ya que evitará así retrasos innecesarios en la entrega del servicio y el riesgo de interrupciones no planificadas. Es también importante realizar pruebas de los cambios realizados para así asegurar que estas no son perjudiciales para el siguiente desarrollo del servicio. En definitiva, esta fase hace que los servicios, ya sean de nueva creación o modificados, se integren de manera correcta en el entorno de operaciones sin causar un retraso en el proceso de entrega. Si durante esta fase se realiza un enfoque cuidado y meticuloso, el éxito de la misma dentro del ciclo de vida está asegurado.

La penúltima fase es la llamada Operación del Servicio, o Service Operation. En esta se gestionan todas las operaciones que se llevan a cabo en el día a día del servicio. Su principal objetivo es asegurar el correcto funcionamiento de los servicios y así poder cumplir los SLA acordados con los clientes. Dentro de esta fase se lleva a cabo, entre otras cosas, la gestión de incidentes, en la que se intenta restaurar el funcionamiento del servicio de la forma más rápida posible tras una interrupción no planificada o una situación que evite su funcionamiento normal. También se gestionan los problemas que generan estos incidentes, sobre todo si son recurrentes, para así prevenir que vuelva a pasar. De igual forma se gestionan operaciones técnicas como la infraestructura o la capacidad, de manera que se puedan mantener los servicios en funcionamiento. Además, también se controlan las operaciones que se llevan a cabo en el centro de datos, asegurando que el uso de los recursos de este se administra correctamente. En

definitiva, esta fase pone su foco principal en asegurarse que los servicios que se ofrecen al cliente son fiables, trabajan de manera eficiente y cumplen con los SLA definidos con aquel, para así asegurar que la entrega es exitosa y se puede mantener como tal a lo largo del tiempo.

En último lugar, encontramos la Mejora Continua, o Continual Service Improvement (CSI) Esta fase, aunque es la última, como bien dice su nombre, es continua. Es una etapa clave si se quieren mantener los servicios y su calidad en el tiempo. Para ello, se tratan de identificar oportunidades de mejora, ya sea en prácticas o en procesos, y así implementarlas para poder mejorar la eficiencia. Procesos como la identificación de KPIs²¹, la recopilación y el análisis de datos o la revisión de los resultados obtenidos son parte de esta fase. Además, el modelo ITIL promueve fervientemente el uso de la mejora continua con el uso del PDCA, Plan, Do, Check, Act. Esta técnica implica que se planifiquen los cambios, se realicen, se analicen sus consecuencias y poder así decidir cómo actuar a continuación. (Wikipedia, 2023) Asimismo, se documentan todos los cambios llevados a cabo, asegurando la transparencia en todo momento. La cultura de la mejora continua que se propone en esta fase no se limita solo a lo que son los procesos definidos del servicio, si no que se propone una extensión de esta mejora a toda la organización, ya sea capacitando personal o promoviendo la innovación siempre que sea posible. (Witei, 2022) (Service Tonic, consultado en 2023)

3.6 Aplicación a un servicio real: Optimización de cadenas de suministro

Como servicio sobre el que desarrollar nuestra propuesta, se ha elegido la optimización de cadenas de suministro.

La optimización de cadenas de suministro se considera un proceso fundamental en la gestión de operaciones y logística de una empresa, realizándose un ajuste de las operaciones de la cadena para garantizar que esté en su punto máximo de eficiencia. (TIBCO, 2023)

Si bien la computación cuántica todavía está en un desarrollo muy temprano y su adopción en aplicaciones comerciales es muy limitada en este momento, la consideración de la optimización cuántica en este tipo de servicios es una línea de investigación emergente muy interesante y prometedora. Teóricamente, aplicar la perspectiva cuántica podría permitir abordar los problemas de optimización que tenemos hoy en día de una forma no binaria, aprovechando así la capacidad que tienen las partículas cuánticas para estar en múltiples estados a la vez, siendo particularmente útil si se presenta una situación en la que hay que tratar con múltiples variables o hay incertidumbre.

Actualmente, este servicio se concibe desde una perspectiva binaria. Esto quiere decir que la naturaleza de las decisiones que se toman en este servicio son de carácter dicotómico, o lo que es lo mismo, de tipo sí o no. Por ejemplo, decisiones como son si se utiliza un determinado proveedor, si se asigna un centro de distribución específico o si se realizan pedidos para reponer inventario se definen por dos respuestas posibles (sí/no). Estas decisiones binarias, se puede decir que son muy típicas en la optimización de cadenas de suministro. Es muy útil para simplificar las elecciones si se las considera en términos de elecciones discretas, con las que se podrá modificar la velocidad, la calidad o los costes. Extrapolando al mundo de la computación, esta optimización de cadenas de suministro siempre se ha abordado siguiendo

²¹ Los KPI se establecen para medir el desempeño de los servicios y procesos, ayudando a identificar las áreas que necesitan atención.

una perspectiva clásica (binaria) y no cuántica. Hoy en día, las técnicas de optimización son de carácter tradicional y utilizan algoritmos y métodos que toman como base la lógica de Boole y la teoría clásica de la optimización.

A continuación se presenta una propuesta detallada sobre cómo integrar la computación cuántica dentro de las cadenas de suministro, que sigue el ciclo de vida de los servicios ITIL al igual que las líneas de trabajo que se han definido en la propuesta de integración de tecnologías cuánticas en el sector servicios, para garantizar su optimización.

3.6.1 Planificación y evaluación.

El primer paso de cualquier estrategia debe ser la planificación y evaluación. Para poder optimizar una cadena de suministro ya existente se debe analizar, en primer lugar, qué parte de la cadena necesita ser optimizada, es decir, encontrar los eslabones débiles de la cadena y los procesos en los que la optimización es crítica. Esto se consigue realizando un análisis exhaustivo del modelo actual. Para ello sería beneficioso que se tuviera una imagen completa que incluyera al cliente y los trabajadores de logística.

Es importante que en esta fase primigenia de la incorporación se asegure que los trabajadores que están involucrados en la cadena tengan un mínimo control sobre las tecnologías y teorías cuánticas y de cómo se aplican y afectan al área concreta que nos ocupa. Esto se podría conseguir con sesiones, talleres o seminarios de capacitación en los que se enseñe al personal las bases de la cuántica y los diversos ejemplos de aplicaciones que pueden encontrar en una cadena de suministro. Si se asegura esto, se asegura que los trabajadores tengan un mayor control sobre todos los procesos, al igual que una iniciativa mayor a la hora de la proposición de mejoras. También es importante que se defina el objetivo u objetivos principales de la integración. ¿Reducción de costes?, ¿mayor satisfacción del cliente?, ¿incremento de la velocidad? Si se es capaz de definir exactamente los objetivos, de manera clara y sin ambigüedades, se podrá asegurar que estos siguen la línea marcada por la organización o el cliente.

Planificar una estrategia que defina las próximas fases de integración, tanto temporal como objetivamente, ayuda a que se puedan fijar objetivos a largo plazo de manera realista. Asimismo, y debido a que se depende de una tecnología tan volátil y nueva como es la computación cuántica, se debe asegurar que los objetivos que se definen son coherentes con lo que se necesita para llevarla a cabo, así como con la inversión que se planea hacer en recursos cuánticos.

3.6.2 Diseño del servicio

En esta segunda fase se terminan de identificar los problemas clave a solucionar de una forma específica, como la gestión del inventario o las rutas de transporte. Ya que se ha de diseñar la estrategia de trabajo, contar con un equipo multidisciplinar de profesionales, tanto de gestión de cadenas de suministro como de computación cuántica, clave. Gracias a esta colaboración, se pueden diseñar soluciones efectivas aprovechando bien las tecnologías cuánticas y siempre siguiendo la estructura correcta de las cadenas de suministro. Como se está trabajando con tecnología cuántica, se han de desarrollar algoritmos cuánticos específicos que trabajen de manera personalizada para la solución de un problema en concreto. Además, es

necesario también que haya un uso asiduo de simulaciones, lo cual asegura que los algoritmos cuánticos sean completamente correctos en el momento en el que se apliquen al proceso principal, fuera de un entorno de prueba.

Es además en esta fase cuando la empresa u organización deberá empezar a evaluar qué opciones tiene en cuanto a lo que a tecnología cuántica se refiere. La empresa cuenta con dos opciones principales en este aspecto. Por un lado, adquirir hardware cuántico propio y por otro, trabajar con un proveedor en la nube. La decisión depende mucho del poder adquisitivo de la empresa, al igual que los requerimientos cuánticos que necesite y, en caso de que decida adquirir hardware cuántico, deberá evaluar las opciones con las que cuenta en el mercado. Actualmente, hay oferta de computadoras cuánticas basadas en qubits superconductores y trampas iónicas, entre otras. La empresa deberá sopesar beneficios y riesgos de cada una de ellas, al igual que el coste y mantenimiento, no solo inicial, si no a largo plazo también. La opción de utilizar un proveedor cuántico es muy atractiva en el caso de que el poder adquisitivo sea limitado o no se quiera hacer el desembolso que supone la adquisición propia del hardware.

De igual forma, en esta fase se deberá desarrollar un plan lo más detallado posible para la próxima implementación de las tecnologías cuánticas en la cadena de suministro. Para hacerlo visual y claro para todas las personas implicadas, se podrá hacer uso de un diagrama temporal de los plazos y fases de integración, al igual que definir qué recursos son necesarios en cada una de las fases y los objetivos a cumplir al realizar cada una de ellas. Esto ayudará a medir el éxito de las fases en el momento que terminen. Es esencial que este paso se desarrolle con calma, siempre siendo específicos a la hora de definir cualquier punto.

3.6.3 Transición del servicio

Al inicio de la transición del servicio, se ha de llevar a cabo el desarrollo técnico de los diversos algoritmos o programas que se han diseñado durante la fase anterior, es decir, aquí se aprovechan principios de la computación cuántica como son la superposición o la interferencia. Es también este el momento clave en el que se debe trabajar la integración de los sistemas. Como se ha comentado previamente, este es un servicio ya existente sobre el que se realizarán modificaciones pero que mantendrá sus sistemas actuales. Estos sistemas deberán ser adaptados de forma que la computación cuántica se pueda integrar con ellos, por lo que para que esta integración sea exitosa, ambos tendrán que coexistir en perfecto estado de simbiosis. Para poder conseguir esto, puede ser necesaria la incorporación de algún tipo de interfaz que asegure que la comunicación entre componentes cuánticos y clásicos sea idónea. A su vez, se ha de comprobar que se dispone de una total disponibilidad de los recursos necesarios para ello, ya sea personal, hardware o software.

No se puede olvidar que en esta fase también se ha de continuar con las diversas pruebas y simulaciones iniciadas en la fase anterior. La naturaleza de la cuántica es compleja, inesperada y bastante impredecible, por lo que es muy importante para el éxito del proyecto que las pruebas sean continuas y se escale gradualmente el nivel. Se debe definir de igual manera en qué momentos de la estrategia se realizará la propia implementación. No se recomienda realizarla de manera drástica, debido a su falta de predictibilidad. En general, esta fase de transición del servicio la podemos contemplar una fase crítica en la implementación de la computación cuántica, que requiere de una planificación exhaustiva. Una vez finalizada con éxito, la cadena de suministro debería estar en perfectas condiciones para operar con la integración de la nueva

tecnología cuántica, y es en este momento en el que se deberían poder apreciar las mejoras, al igual que los posibles fallos.

3.6.4 Operación del servicio

Para este momento, la tecnología cuántica ya ha debido de ser implementada, llevando a cabo ahora una supervisión constante de los procesos y los sistemas para asegurar que todo sigue su curso correcto. En caso de que se detectara alguna anomalía o problema el proceso se retornaría a fases anteriores, en las que se modificaría para arreglar el problema identificado.

Se ha de definir a estas alturas el procedimiento sobre cómo reaccionar ante un incidente relacionado con las nuevas tecnologías cuánticas implementadas, ya que los planes de acción con los que se contaba previamente no sirven si el fallo es de carácter cuántico. Se ha de asegurar, a su vez, que todos los recursos cuánticos están siendo usados correctamente y trabajando de la manera esperada y con el rendimiento esperado.

Esta fase es, sobre el papel, menos compleja que las anteriores, pero aun así se debe poner especial cuidado en su desarrollo. Debido a la novedad y los pocos datos a futuro con los que se cuenta de implementaciones de la computación cuántica, no se sabe de qué forma reaccionará el sistema o cómo evolucionará su comportamiento en adelante, por lo que se debe revisar con ahínco cada uno de los procesos de forma rutinaria para asegurar su funcionamiento correcto. No se debe confiar en que su actual buen funcionamiento implique un futuro buen funcionamiento.

3.6.5 Mejora continua

Esta última fase va muy ligada a la anterior. Es muy importante en el desarrollo del proceso ya que, sin la fase de mejora continua lo más probable es que esta integración que hoy en día es novedosa y puntera, se quede obsoleta. Debido a que las tecnologías avanzan a una velocidad inconmensurable, incluida la cuántica, de la que se espera un gran desarrollo en los próximos años; es necesario utilizar un análisis exhaustivo para poder identificar los procesos cuánticos sobre los que se pueden ir realizando mejoras. Además es muy importante que se realicen retroalimentaciones cada cortos periodos de tiempo (semanales, mensuales) para asegurar que los operadores que trabajan con los sistemas cuánticos pueden así proporcionar sus opiniones y visiones acerca de los procesos que se realizan día a día. Se ha de ser consciente que la información que pueden proporcionar los trabajadores es muy valiosa de cara a la identificación de nuevos desafíos o mejoras que se puedan llevar a cabo. Durante esta fase también sería inteligente que se crearan KPIs concretos para la cuántica, es decir, que estén adaptados para medir correctamente características como la eficiencia, pero desde la perspectiva cuántica. Asimismo, es importante que se utilice el ciclo PDCA para guiar la implementación de estas mejoras que se vayan desarrollando, siendo común tanto para la tecnología cuántica como a la computación tradicional.

Esta es la estrategia propuesta con la que se pretende proveer de un plan de acción que permita una integración efectiva de la computación e impulsar la integración de tecnologías cuánticas al foco, resaltando la importancia y los beneficios que podría tener para la industria de los servicios en general, usando esta propuesta como ejemplo.

Para analizar más profundamente los beneficios concretos en procesos determinados, y no por fases, se han cogido las características más reseñables de la computación cuántica, y se ha especulado sobre su posible beneficio. Es el caso, por ejemplo, del procesamiento en paralelo. Gracias al carácter cuántico de los qubits, en lugar de evaluar una sola ruta de envío o una combinación de recursos a la vez, la aplicación de la computación cuántica podría evaluar múltiples combinaciones y posibilidades al mismo tiempo, lo que reduciría significativamente el tiempo que se tarda en encontrar la solución óptima.

Por su parte, el entrelazamiento cuántico implica que dos qubits, por muy alejados que estén están interrelacionados. Aplicado a las cadenas de suministro, sería una gran aliado a la hora de gestionar dichas cadenas de carácter global. Al asumir que los niveles de inventario en diversas ubicaciones, todas ellas alejadas en espacio unas de las otras, están relacionados; aprovechando las características del entrelazamiento cuántico se podría modelar una relación que permitiera que los cambios y decisiones tomadas en una ubicación de inventario determinada se vieran reflejados de forma instantánea en el resto de las ubicaciones, permitiendo así una gestión mucho más sincronizada y, por ende, eficiente entre los inventarios. De igual forma funcionaría con la demanda. Gracias a esta relación de carácter cuántico, se podrían reflejar de manera inmediata en el proceso productivo los cambios en la demanda, adaptando de manera muy eficiente estos procesos a las diversas fluctuaciones que sufra dicha demanda. Además, podría ser de mucha utilidad de cara a hacer frente a las interrupciones y fallos dentro de la cadena, utilizando la correlación cuántica como herramienta para asegurar que la respuesta ante el fallo es más rápida y adaptativa.

La superposición cuántica también tiene el potencial de ser muy beneficiosa en problemas como podría ser la asignación de recursos, donde aplicando esta tecnología las decisiones podrían pasar de ser binarias a obtener una combinación de varias decisiones, como podría ser asignar fracciones de los recursos a destinos múltiples. Esto permitiría así evaluar varias configuraciones simultáneamente y encontrar la más eficiente en términos de tiempos de producción, utilización de recursos y costos, a la misma vez que puede ser más realista y eficiente que tomar decisiones estrictamente binarias. Funcionaría de igual forma para la planificación de rutas, la gestión de personal, pudiendo crear así una asignación custom de trabajadores, valorando tanto sus habilidades como su disponibilidad.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

4.1 Análisis de consecución de objetivos

Al inicio de este trabajo, se definieron una serie de objetivos con la intención de llevar a cabo todos y cada uno de ellos. Ahora, a posteriori y analizando el transcurso y desarrollo de este trabajo, se quiere evaluar la consecución de estos objetivos.

A través del desarrollo del segundo capítulo de este trabajo, se marcan como logrados varios de ellos. Se realiza un estudio detallado del desarrollo de la computación, mostrando de manera sencilla el camino que la computación ha ido recorriendo. De igual forma, se intenta dar una imagen sencilla de comprender, pero completa, de lo que es la computación cuántica,

y a su vez, la física detrás de ella y la mecánica cuántica. Se estudia cómo se encuentra la computación cuántica basándose en varios criterios hoy en día, y también se consigue dar una idea de cómo se puede aplicar en el futuro.

Se definen también en páginas siguientes los ordenadores cuánticos actuales, sus limitaciones y desafíos y se valora si ha habido intentos de aplicación previos. Además, se consigue de forma satisfactoria, o al menos eso se espera, que este trabajo de fin de grado pueda ser de ayuda en la difusión de esta tecnología dentro del sector servicios, al igual que para proponer ciertas aplicaciones o líneas de trabajo y desarrollo futuras, que puedan ser beneficiosas para el sector.

En general, los objetivos marcados para este TFG se han conseguido satisfactoriamente, en casos incluso yendo más allá del nivel de abstracción propuesto en un primer momento.

4.2 Conclusiones generales

En el transcurso y desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado, se ha realizado una investigación muy exhaustiva para poder comprender la computación cuántica, lo cual no ha sido una tarea sencilla. Al haber escasa información sobre muchos aspectos intrínsecos de la tecnología, la recopilación de datos y de ideas para desarrollar ha sido bastante tediosa y a ratos muy complicada. Sin embargo, se ha conseguido tener una idea general bastante sólida sobre lo que implica esta tecnología, sus orígenes físicos y las implicaciones con el mundo real. En cuanto a la relación con servicios, no hay casi información existente, y la que se ha encontrado ha sido en muchas ocasiones escasa y poco útil. Esto ha llevado a que el desarrollo de la estrategia de integración sea muy teórica e hipotética, siempre basándose en los modelos de diseño de servicios pero con la incertidumbre que genera el uso de una tecnología tan cambiante como es la computación cuántica.

Las conclusiones generales a las que se ha podido llegar son, en primer lugar, que la computación cuántica representa, sin lugar a duda, una revolución en el panorama tecnológico sin precedentes. La utilización de esta tecnología puede aportar beneficios inimaginables hace una década, pero actualmente sigue aún en etapas demasiado tempranas de su desarrollo como para hacer uso de su potencial, a pesar de sus prometedoras capacidades. Esto mejorará según se vayan construyendo cada vez ordenadores cuánticos que puedan mantener de manera estable el estado cuántico de los qubits, por más tiempo. La investigación de este campo sigue estando poco explotado. Está en crecimiento, pero existen numerosas oportunidades para futuras investigaciones que aún no están siendo consideradas, como es su integración en el sector servicios y la capacidad de rediseño de estos.

Se ha de destacar, que gracias a este TFG se ha podido resaltar la importancia de la computación cuántica como gran campo de estudio, que tiene un potencial de transformar las industrias enorme. El futuro de esta tecnología es prometedor, y gracias a ella podremos abordar problemas computacionales de la era moderna, que hoy en día, son un desafío sin solución.

4.3 Conclusiones personales

Personalmente, este trabajo ha sido muy gratificante. Como entusiasta de la física, mezclar computación con cuántica es un campo excitante. Cuando comencé la búsqueda de información, fue abrumador cuanto menos. Toda esta información, en su mayoría muy técnica, que intentaba absorber para ser capaz de transmitir de manera sencilla, una idea: la integración de la computación cuántica en los servicios.

Esta idea surge de la intención de optimizar al máximo lo que es el sector de la industria, tanto española como europea, con mayor peso en la economía. Durante su desarrollo, la idea difusa comenzaba a tomar forma, y, aunque debido al estado de la tecnología y la incertidumbre que genera su futuro no había forma de estar 100% seguros a la hora de afirmar una estrategia de integración como válida, toda la información reunida en estas páginas, y la que se quedó en el tintero me llevan a pensar que esta estrategia es la base de una futura, más compleja y con una computación cuántica más desarrollada, para un futuro en el que los servicios se vean mejorados y completamente integrados con la computación cuántica para hacer de la vida y el desarrollo económico y social algo más optimizado.

La computación cuántica, es, a fin de cuentas, uno de los futuros pilares del sector tecnológico, como son también la Inteligencia Artificial, o el Big Data.

CAPÍTULO 5: BIBLIOGRAFÍA Y LUGARES DE INTERNET

Bibliografía

- AppMaster. (2023). *¿Qué es Java? Definición, significado y características*. Obtenido de AppMaster: <https://appmaster.io/es/blog/que-es-java-definicion-significado-caracteristicas>
- ARMONK, N. (Noviembre de 2021). *IBM presenta un procesador cuántico innovador de 127 qubits*. Obtenido de IBM España Newsroom: <https://es.newsroom.ibm.com/announcements?item=122698>
- Asana. (Marzo de 2023). *Customer journey: cómo hacer un mapa del recorrido del cliente*. Obtenido de Asana: <https://asana.com/es/resources/customer-journey-map>
- Aslan. (2020). *El impacto socioeconómico de la computación cuántica*. Obtenido de Aslan: <https://aslan.es/el-impacto-socioeconomico-de-la-computacion-cuantica/>
- AWS. (2023). *¿Qué es la computación cuántica?* Obtenido de <https://aws.amazon.com/es/what-is/quantum-computing/#:~:text=El%20plano%20de%20datos%20cuánticos,para%20mantenerlos%20en%20su%20lugar.>
- AWS. (2023). *¿Qué es la computación cuántica?* Obtenido de AWS: <https://aws.amazon.com/es/what-is/quantum-computing/>
- AWS. (2023). *¿Qué es Python?* Obtenido de AWS: <https://aws.amazon.com/es/what-is/python/>
- Banafa, A. (2021). *Computación Cuántica e IA: una combinación transformacional*. Obtenido de BBVA: <https://www.bbvaopenmind.com/tecnologia/mundo-digital/computacion-cuantica-e-ia/#:~:text=En%20cuanto%20a%20la%20velocidad,tradicional%20le%20llevarían%2010.000%20años.>
- BBC. (2021). *El experimento más bello de la física cuántica*. Obtenido de BBC: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-59563136>
- BBC News. (4 de JUNIO de 2020). *Física cuántica: qué es la dualidad partícula-onda de la luz y cómo su descubrimiento revolucionó la ciencia*. Obtenido de BBC News: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-52815076>
- Biden, J. (2023). *Tutanota*. Obtenido de <https://tutanota.com/es/blog/posts/cybersecurity-strategy-post-quantum-encryption>
- Castelan, J. (2022). *Conoce la historia de la computadora y sé el próximo Bill Gates*. Obtenido de Crehana: [6] <https://www.crehana.com/blog/transformacion-digital/historia-de-la-computadora/>
- CodeLearn. (2022). *¿Qué es el sistema binario?* Obtenido de CodeLearn: <https://codelearn.es/blog/que-es-el-sistema-binario/>
- Comillas, U. D. (2022). *QUANTUM COMPUTING-AS-A-SERVICE: ESTUDIO COMPARATIVO DE LA DIFUSIÓN DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA FRENTE A LA COMPUTACIÓN TRADICIONAL*. Madrid: Universidad Pontificia de Comillas. Obtenido de <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/63339/TFG%20-%20Segura%20Munoz%2c%20Jorge.pdf?isAllowed=y&sequence=5>
- Computer History Museum. (2023). *Timeline of Computer History*. Obtenido de Computer History Museum: <https://www.computerhistory.org/timeline/computers/>
- Computing. (2023). *Computación cuántica, ¿qué es y cómo funciona?* Obtenido de Computing: <https://www.computing.es/informes/computacion-cuantica-que-es-y-como-funciona/>
- Cornejo, J. E. (2020). *Conceptos matemáticos Básicos de Computación cuántica*.
- CSIC. (14 de Julio de 2022). *CSIC*. Obtenido de csic.es: <https://www.csic.es/en/node/3783530>

- Fortin, S. (2016). *Decoherencia cuántica*. Obtenido de Diccionario Interdisciplinar Austral: http://dia.austral.edu.ar/Decoherencia_cuántica#:~:text=La%20decoherencia%20cuántica%20es%20el,cuántica%2C%20el%20principio%20de%20superposición.
- Fortin, S. (2016). *Decoherencia cuántica* . Obtenido de Diccionario Interdisciplinar Austral: http://dia.austral.edu.ar/Decoherencia_cuántica#El_proceso_de_decoherencia
- Fortran Programming Language. (2022). *Fortran High-performance parallel programming language*. Obtenido de Fortran Programming Language: <https://fortran-lang.org/#>
- Frackiewicz, M. (2023). *Computación cuántica versus computación clásica: ¿cuál es la diferencia?* Obtenido de TS2: <https://ts2.space/es/computacion-cuantica-versus-computacion-clasica-cual-es-la-diferencia/>
- Fuentes-Ugartemendia, P. (2022). *ERROR CORRECTION FOR RELIABLE QUANTUM COMPUTING*. Navarra: Universidad de Navarra.
- Galán, J. S. (2020). *Servicio*. Obtenido de Economipedia: <https://economipedia.com/definiciones/servicio.html>
- Gil, D. (s.f.).
- GitHub. (s.f.). *Lab 11 - Thread Level parallelism con OpenMP*. Obtenido de GitHub: <https://cc-3.github.io/labs/lab11/#:~:text=OpenMP%20es%20un%20framework%20de,su%20simplicidad%20y%20buen%20performance>.
- Gobierno de España. (2023). *Quantum Spain: el primer ordenador cuántico del sur de Europa*. Obtenido de Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia : <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/quantum-spain-el-primer-ordenador-cuantico-del-sur-de-europa>
- González, A. E. (2004). *Lenguajes de programación*. Ciudad de México: Instituto Tecnológico de Monterrey.
- González, B. C. (2021). *MEJORA DEL CONTROL CUÁNTICO CON OPTIMIZACIÓN COMPLEJA*. CONCEPCIÓN: UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN.
- Gonzalo, M. (2022). *Tecnologías cuánticas: qué son y por qué los países invierten en ellas*. Obtenido de Newtral: <https://www.newtral.es/tecnologias-cuanticas-que-son-y-por-que-los-paises-invierten-en-ellas/20221027/>
- Grupo Oesia. (2022). *Criptografía cuántica y su impacto en nuestra ciberseguridad*. Obtenido de Oesia grupo: <https://grupooesia.com/insight/criptografia-cuantica-y-su-impacto-en-nuestra-ciberseguridad/>
- Hammond. (2022). *Customer Journey Map: qué es, cómo crearlo y ejemplos (con plantilla)*. Obtenido de Hubspot: <https://blog.hubspot.es/service/customer-journey-map>
- Herrera, D. (2021). *Lección 2.2: Qubits en la esfera de Bloch*. Obtenido de QC-FEM: <https://qc-fem.github.io/crashcourse/2021/03/25/BlochSphere.html>
- Horodecki et al. (2009). *Quantum entanglemen*. American Physical Society.
- HypherPhysics. (s.f.). *La Ecuación de Schrodinger*. Obtenido de HypherPhysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/quantum/schr.html>
- Ibáñez, M. G. (2021). *¿Qué es un Service Blueprint y cómo te puede ayudar a optimizar la experiencia de usuario?* Obtenido de Hiberius Blog: <https://www.hiberius.com/crecemos-contigo/que-es-un-service-blueprint-y-como-te-puede-ayudar-a-optimizar-la-experiencia-de-usuario/>
- Ibarra, D. (2020). *Ordenador cuántico: ¿trampas de iones o bucles cuánticos?* Obtenido de Cunoticias.com: <https://www.cunoticias.com/empresas/ordenador-cuantico-trampas-de-iones-o-bucles-cuanticos.php>
- ICMM-CSIC. (s.f.). *El principio de incertidumbre de Heisenberg – superconductividad* . Obtenido de ICMM-CSIC: <https://wp.icmm.csic.es/superconductividad/fisica-cuantica-y-transiciones/fisica-cuantica/principio-de-incertidumbre-de-heisenberg/>

- IFICC. (2023). *La Calculadora de Blaise Pascal*. Obtenido de IFICC: <https://www.ificc.cl/La-Calculadora-de-B/>
- Jayo, E. (2021). *¿Por qué necesitamos la Computación Cuántica? Ley de Moore y Quantum Tunneling*. Obtenido de Wordpress: <https://edgarjayo.wordpress.com/2021/03/24/por-que-necesitamos-la-computacion-cuantica-ley-de-moore-y-quantum-tunneling/#:~:text=algo%20muy%20lejano,-,Ley%20de%20Moore,y%20sucede%20así%20desde%20entonces.>
- Kang, M. (Octubre de 2019). *Google Claims Quantum Computing Achievement, IBM Says Not So Fast*. Obtenido de Pcmag: <https://www.pcmag.com/news/google-claims-quantum-computing-achievement-ibm-says-not-so-fast>
- Kaushik, V. (2021). *What is Quantum Computing -as -a -service?* . Obtenido de AnalyticSteps: <https://www.analyticssteps.com/blogs/what-quantum-computing-service>
- Leskow, E. C. (2 de Febrero de 2022). *Concepto*. Obtenido de <https://concepto.de/mecanica-cuantica/>
- Lopez, J. C. (SEPTIEMBRE de 2023). *El MIT ha logrado algo crucial: que los ordenadores cuánticos mantengan los efectos cuánticos más tiempo*. Obtenido de Xataka: <https://www.xataka.com/investigacion/mit-ha-logrado-algo-crucial-que-ordenadores-cuanticos-mantengan-efectos-cuanticos-tiempo>
- López, J. C. (2023). *En la carrera por el mejor ordenador cuántico hay dos bandos, y no son Estados Unidos y China*. Obtenido de Xataka: <https://www.xataka.com/investigacion/carrera-mejor-ordenador-cuantico-hay-dos-bandos-no-estados-unidos-china-1>
- Microsoft. (2023). *¿Qué es PaaS?* Obtenido de Microsoft: <https://azure.microsoft.com/es-es/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-paas>
- Microsoft. (2023). *¿Qué es SaaS?* Obtenido de Microsoft: <https://azure.microsoft.com/es-es/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-saas>
- Microsoft. (2023). *What is a qubit?* Obtenido de Azure: <https://azure.microsoft.com/en-gb/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-a-qubit#:~:text=Qubits%20are%20represented%20by%20a,one%20of%20two%20possible%20states.>
- Microsoft. (2023). *What is IaaS?* Obtenido de Microsoft: [https://azure.microsoft.com/en-us/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-iaas#:~:text=Infrastructure%20as%20a%20service%20\(IaaS,\(PaaS\)%2C%20and%20serverless.](https://azure.microsoft.com/en-us/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-iaas#:~:text=Infrastructure%20as%20a%20service%20(IaaS,(PaaS)%2C%20and%20serverless.)
- Mind Tools. (2023). *How to Create Customer Journey Maps*. Obtenido de MindTools: <https://www.mindtools.com/au8vys8/how-to-create-customer-journey-maps>
- Ministerio de Ciencia e Innovación, Agencia Estatal de Innovación. (2023). *Apoyo y Acreditación de Centros de Excelencia «Severo Ochoa» y a Unidades de Excelencia «María de Maeztu»*. Obtenido de Agencia Estatal de Investigación: <https://www.aei.gob.es/ayudas-concedidas/centros-unidades-excelencia>
- Nexus Integra. (2023). *Centros de excelencia de fabricación ¿Qué son y por qué son necesarios?* Obtenido de Nexus Integra: <https://nexusintegra.io/es/centros-de-excelencia-coe-empresas/>
- Nielsen Norman Group. (2017). *Service Blueprints: Definition*. Obtenido de Nielsen Norman Group: <https://www.nngroup.com/articles/service-blueprints-definition/>
- Nielsen, M., & Chuang, I. (2000). *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.
- NIST. (2022). *Value Stream Mapping*. Obtenido de NIST: <https://www.nist.gov/mep/value-stream-mapping>
- OpenAI. (2023). Definición de integración cuántica.

- OpenAI. (consultado en 2023). *Algoritmo de simulación cuántica*. Obtenido de OpenAI.
- OpenStax. (2023). 7.6 *El efecto túnel de las partículas a través de las barreras de potencial*. Obtenido de OpenStax: <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-3/pages/7-6-el-efecto-tunel-de-las-particulas-a-traves-de-las-barreras-de-potencial>
- Prieto, E. (2022). *Descubre los pasos para realizar la transformación digital en una empresa*. Obtenido de Southern New Hampshire University: <https://es.snhu.edu/noticias/pasos-para-realizar-la-transformacion-digital-en-una-empresa>
- Qiskit. (2023). *Computación cuántica en pocas palabras*. Obtenido de Qiskit: https://qiskit.org/documentation/locale/es_UN/qc_intro.html
- Química.es. (2023). *Esfera de Bloch*. Obtenido de Química.es: https://www.quimica.es/enciclopedia/Esfera_de_Bloch.html
- Química.es. (2023). *Paradoja EPR*. Obtenido de Química.es: https://www.quimica.es/enciclopedia/Paradoja_EPR.html
- Rahaman, & Islam. (2015). *An Overview on Quantum Computing as a Service (QCaaS): Probability or Possibility*. Dhaka: Bangladesh University of Business & Technology.
- Ranz Ribeiro, C. (2019). *Comparación de capacidades entre aprendizaje clásico y cuántico*. Madrid: E.T.S.I. de Sistemas Informáticos (UPM). Obtenido de <https://oa.upm.es/56422/>
- Reclu IT. (2018). *Historia y evolución de FORTRAN*. Obtenido de RecluIT: <https://recluit.com/historia-y-evolucion-de-fortran/>
- Roa, P. H. (Julio de 2023). *Recomiendan a Unión Europea agenda en ciberseguridad cuántica*. Obtenido de LinkedIn: <https://es.linkedin.com/pulse/recomiendan-union-europea-agenda-en-ciberseguridad-huichalaf-roa>
- Robledano, Á. (2019). *Qué es C++: Características y aplicaciones*. Obtenido de OpenWebinars: <https://openwebinars.net/blog/que-es-cpp/>
- Ruiz, I. K. (2019). “*Computación cuántica: Aplicaciones prácticas que la computación clásica no puede solucionar*”. MADRID: UC3M.
- Service Tonic. (consultado en 2023). *¿Qué es ITIL? Conceptos y Principios*. Obtenido de ServiceTonic: <https://www.servicetonic.com/es/itil/3-itil-conceptos-y-principios/#:~:text=El%20ciclo%20de%20vida%20que,%2C%20despliegue%2C%20mejora%20y%20retirada.>
- Spri, G. (Febrero de 2020). *Aplicaciones de la computación cuántica en la industria*. Obtenido de Grupo Spri: <https://www.spri.eus/es/teics-comunicacion/aplicaciones-de-la-computacion-cuantica-en-la-industria/>
- TIBCO. (2023). *¿Qué es la optimización de la cadena de suministro?* Obtenido de TIBCO: <https://www.tibco.com/es/reference-center/what-is-supply-chain-optimization#:~:text=La%20optimización%20de%20la%20cadena%20de%20suministro%20es%20el%20ajuste,su%20punto%20máximo%20de%20eficiencia.>
- TIBCO. (s.f.). *What is Data as a Service?* Obtenido de TIBCO: <https://www.tibco.com/reference-center/what-is-data-as-a-service-daas>
- Tomorrow Bio. (2023). *Cómo construir redes cuánticas*. Obtenido de Tomorrow Bio: <https://www.tomorrow.bio/es/post/cómo-construir-redes-cuánticas-2023-09-5137839898-quantum>
- Tomorrow Bio. (2023). *Escalar lo inescalable: El mayor obstáculo de la computación cuántica*. Obtenido de Tomorrow Bio: <https://www.tomorrow.bio/es/post/el-mayor-obstaculo-de-la-computación-cuántica-no-escalable-2023-06-4669702804-quantum>
- TRACC. (2021). *Implementación de tecnología avanzada: Digitalizando con éxito operaciones de manufactura para aumentar la productividad*. Obtenido de TRACC: <https://traccsolution.com/es/blog/implementacion-de-tecnologia/>

- Trilnick, C. (2022). *Máquina diferencial - Máquina analítica*. Obtenido de IDIS: <https://proyectoidis.org/maquina-diferencial-maquina-analitica/>
- UOC (Universitat Oberta de Catalunya). (2013). *combinación de componentes de hardware y software que utilizan recursos masivos de cómputos en conjunto para resolver una tarea computacional*. Obtenido de https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/76185/4/Computación%20de%20altas%20prestaciones_Módulo%201_Introducción%20a%20la%20computación%20de%20altas%20prestaciones.pdf
- Wikipedia. (2023). *Boolean Algebra*. Obtenido de Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Boolean_algebra
- Wikipedia. (2023). *Cúbit*. Obtenido de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cúbit>
- Wikipedia. (2023). *CUDA*. Obtenido de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/CUDA>
- Wikipedia. (2023). *Ecuación de Schrödinger*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/ecuacion_de_Schrodinger.
- Wikipedia. (2023). *Gato de Schrödinger*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Gato_de_Schrödinger
- Wikipedia. (2023). *PDCA*. Obtenido de Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/PDCA>
- Wikipedia, c. d. (2023). *Algoritmo de Grover*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Algoritmo_de_Grover&oldid=144921259
- Wikipedia, c. d. (2023). *Algoritmo de Shor*. Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Algoritmo_de_Shor&oldid=152790020
- Wikipedia, c. d. (11 de junio de 2023). *Computación cuántica*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Especial:Citar&page=Computación_cuántica&id=151774819&wpFormIdentifier=titleform
- Wikipedia, c. d. (12 de Mayo de 2023). *Decoherencia cuántica*. Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Decoherencia_cuántica&oldid=151106739
- Wikipedia, c. d. (9 de mayo de 2023). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Entrelazamiento_cuántico&oldid=151053857
- Witei. (2022). *Ciclo de vida de un servicio: Modelo ITIL*. Obtenido de Witei: <https://get.witei.com/es/articulos/ciclo-de-vida-de-un-servicio-modelo-til/>
- Xataka. (Junio de 2022). *Esta es la gran promesa de la computación cuántica: un millón de cúbits y corrección de errores durante esta década*. Obtenido de Xataka: <https://www.xataka.com/investigacion/esta-gran-promesa-computacion-cuantica-millon-cubits-correccion-errores-durante-esta-decada>

©2023 Sonia Moreno Ambrosio

Algunos derechos reservados

Este documento se distribuye bajo la licencia "Atribución- CompartirIgual 4.0 Internacional" de Creative Commons,

disponible en: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.es>