

# Computación cuántica, puertas a una nueva era.

## Quantum computing, doors to a new era.

Santiago Andrés Castro Duitama, *Escuela de Ingeniería de Sistemas e informática.*  
Jenny Marcela Rincón Santamaria, *Escuela de Ingeniería de Sistemas e informática.*  
Johan David Castro Palomares *Escuela de Ingeniería de Sistemas e informática.*  
David Santiago Martínez Castro *Escuela de Ingeniería de Sistemas e informática.*

### Resumen

Cada año escuchamos más sobre el computador cuántico y la cercanía de este a reemplazar la computación clásica. Sin embargo, muchos de estos anuncios no pasan de ser títulos ostentosos que son usados para girar los reflectores hacia las empresas que están compitiendo por la verdadera supremacía cuántica. Las compañías más grandes del mundo están invirtiendo miles de millones para ser los primeros en implementar la tan esperada computación cuántica, ya que se presenta como una próxima revolución en la historia de la humanidad, que cambiará para siempre la manera como percibimos la computación y cómo funciona el mundo.

Para este proyecto, se hará un énfasis sobre el hardware y software que usan estos computadores cuánticos enfocando su eje central en una visión ingenieril de estos, haciendo breves menciones a las ciencias puras y paradigmas computacionales incorporados.

### Abstract

Every year we hear more about the quantum computer and its proximity to replace classical computing. However, many of these ads are used for people to talk about these companies and believe they are winning the race for quantum supremacy. The most important companies in the world are investing billions to be the first to implement the long-awaited quantum computing(QC), further, QC is presented as the next revolution in humanity that will change the computing model and how the world works.

For this project, it will focus on the hardware and software used by quantum computers focusing their attention on an engineering vision of these, making some mention of the pure sciences and computational paradigms incorporated.

### Index Terms

Computación, Computación cuántica, Computación clásica, Cubit (Qubit), HPC, Mecánica cuántica, Supercomputadora, Superposición cuántica, Supremacía cuántica, Sycamore, Unidad de Procesamiento Cuántico (QPU).

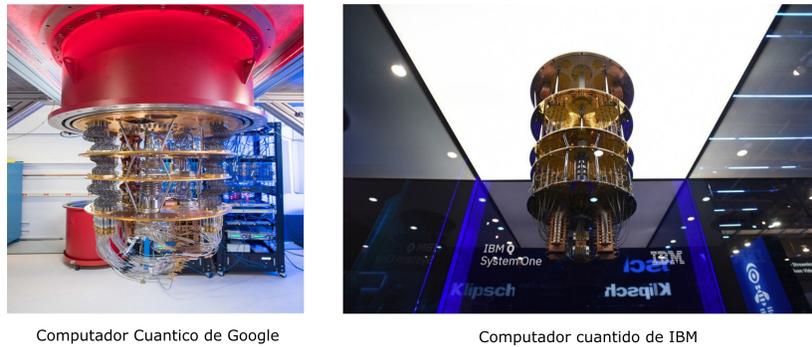
## I. INTRODUCCIÓN

**L**A COMPUTACIÓN CUÁNTICA ha estado en boca de todos de un tiempo para acá, y este hecho no ha de sorprender, debido a las grandes promesas que los teóricos de este campo afirman que logrará la computadora cuántica, y no solo ellos afirman sobre los alcances que podría tener, algunos científicos como por ejemplo el premio nobel de física Richard Feynman afirma que la computadora cuántica será la llave para revelar los misterios de la naturaleza, afirmaciones basadas en la posible potencia computacional que la computadora cuántica podría llegar a tener.

Pero no es solo en el campo de la ciencia donde se habla de la computación cuántica, la mayoría de personas ya habrán escuchado el término de “computadora cuántica”, y hasta los distintos medios de comunicación tratan el tema, un ejemplo de ello fue cuando la compañía Google anunció que logró la supremacía cuántica (siendo esto más un acto de publicidad que el verdadero alcance de la supremacía cuántica), y todos los distintos medios de comunicación hablaron sobre esto durante algunos días ya que es un tema que genera interés y mucha expectativa por parte del público.

Tan importante ha llegado a ser este tema que, las compañías de tecnología más grandes del mundo, como lo es Google, IBM y Microsoft, (Ver Figura 1) que poseen una propuesta de ordenadores cuánticos, están en una carrera por alcanzar la verdadera supremacía cuántica, demostrando de manera práctica que un computador cuántico puede resolver un problema que para el supercomputador más potente que se encuentre en la actualidad sería imposible. Pero, ¿qué otras compañías trabajan en esta tecnología? . Contando con los gigantes tecnológicos mencionados antes, se ha creado un ecosistema de empresas que están haciendo productos y soluciones en torno a la computación cuántica tales como HP, Intel, Nokia, Hitachi, Honeywell, Toshiba, Fujitsu, NEC y Samsung que tienen soluciones para chips o dispositivos de comunicación. Igualmente compañías menos conocidas y más pequeñas como D-Wave, Rigetti Computing, IonQ, Quantum Circuits, IDQuantique, QuTech o Aliphine Quantum Technologies tienen propuestas con mayor o menor grado de madurez comercial de chips cuánticos e infraestructura de telecomunicaciones cuántica.

Sin embargo, aunque se tenga grandes y pequeñas compañías tecnológicas trabajando conjuntamente y competitivamente para el desarrollo de la computación cuántica, ¿Qué tan lejos están las aplicaciones prometidas que cambiarán el mundo gracias a la



Computador Cuántico de Google

Computador cuántido de IBM

Figura 1: Propuestas de computadores cuánticos

computación cuántica?. Esta pregunta se abordará durante el desarrollo de este documento exponiendo al lector las razones por las que el futuro, donde la computación cuántica reemplaza la computación clásica, aún es muy lejano. Finalmente, se hablará de qué aplicaciones cercanas podría tener la computación cuántica y se abarcara un punto de vista donde la computación clásica puede ir de la mano con la computación cuántica.

## II. MARCO TEORICO

### II-A. Qubit

La promesa de la computación cuántica tiene sus raíces en la mecánica cuántica, la física contraintuitiva que gobierna entidades diminutas como átomos, electrones y moléculas. Las computadoras cuánticas funcionan de una manera fundamentalmente diferente de las máquinas clásicas: A diferencia de los bits clásicos[6], que pueden optar entre dos valores –cero o uno-, los qubits pueden adoptar ambos valores a la vez gracias a una propiedad cuántica de las partículas llamada superposición, es decir que un qubit puede estar en los dos estados a la vez y tener más de estado cero de que estado uno, o más de estado uno que de estado cero, o tener la misma cantidad de estado uno que de estado cero (ver Figura 2). Es por esto que, pueden codificar una gran cantidad de información y tener velocidades de procesamiento mucho más rápidas que los computadores clásicos y gracias a sus propiedades cuánticas poder ejecutar algoritmos que nunca podría ejecutar una computadora clásica. Esto permite aumentar la capacidad de computación de manera exponencial con cada nuevo qubit que se añade al sistema.[4]

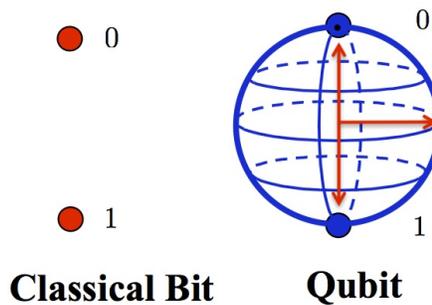


Figura 2: Qubit

Cabe destacar que, la computación cuántica, está viviendo un momento similar al que vivió la computación clásica en sus inicios, por ejemplo un ordenador clásico antes podía ocupar un cuarto entero y debido a su costoso precio de adquisición eran solo usados por empresas, sin embargo, la computación cuántica es mucho más compleja de lo que la computación clásica a llegado a ser. A diferencia de la computación clásica que usa valores de voltajes para los registros binarios, la computación cuántica, tiene estados cuánticos que “suceden” en los qubits. Esos qubits no se caracterizan por su voltaje como en los ordenadores clásicos, sino por su estado cuántico asociado a propiedades tales como el spin (rotación derecha o izquierda) de un electrón. Además, en un ordenador binario con  $n$  bits la cantidad de información que contiene un estado concreto de la máquina tiene tamaño  $n$ , es decir que es una colección de unos y ceros concreta para un estado específico de la máquina, por el contrario, un ordenador cuántico con  $n$  qubits un solo estado concreto de la máquina es una combinación de todas las posibles colecciones de  $n$  unos y ceros[5], cada colección posible tiene un coeficiente que nos dice que tanto hay de una combinación, es decir, si hay mucho de una combinación o muy poco de otra.

De modo idéntico, durante la ejecución de un programa en un computador clásico se cambia el estado de los bits utilizando puertas lógicas ,como son, la compuerta AND, OR, XOR ,etc... ,que al ser encadenadas una tras otra, crean algoritmos para

llegar a un estado final el cual será la solución al problema que le hayamos planteado, acorde a este funcionamiento, el computador cuántico para hacer de un cambio de estado a otro, usa puertas cuánticas, ejemplo de estas son la compuerta de PAULI, HADAMARD, la CNOT, TOFFOLF, entre otras[7]. Al unir estas puertas cuánticas, generando algoritmos, el ordenador llega a un estado final que le da solución al problema que le hemos planteado.

Por supuesto, propiedades de la mecánica cuántica como superposición, entrelazamiento e interferencia se usan en un ordenador cuántico para manejar los estados de los qubits y recrear las operaciones necesarias para procesar algoritmos. [4] Sin embargo, los Qubits tienden a ser propensos a fallos, lo que permite que los errores se introduzcan en los cálculos, esto se debe que son muy sensibles y se requiere unas condiciones específicas como, mantener a temperaturas próximas al cero absoluto, encima, su sistema de enfriamiento debe hacerse por fases, hasta llegar a la temperatura esperada, además, deben estar aislados para evitar perturbaciones de otras partículas[9]. Esta dificultad técnica ha limitado hasta ahora el desarrollo de la computación cuántica ya que, cuantos más qubits se intentan añadir a un sistema, más fácil es que pierdan sus propiedades cuánticas y el sistema se vuelve mucho más complejo con cada qubit agregado haciendo que el sistema sea mucho más difícil de controlar.[1]



Figura 3: Computador Cuántico IBM Q y su sistema de enfriamiento por fases, este enfriamiento se hace con superconductores y en cada capa baja más la temperatura hasta llegar a la aproximación del cero absoluto. El procesador cuántico se encuentra en la parte inferior, su sistema de enfriamiento se encuentra superior a este.

Las computadoras cuánticas podrían estimular el desarrollo de nuevos avances en la ciencia, métodos de aprendizaje automático, estructuras más eficientes, se piensa que algún día podrían ejecutar algoritmos revolucionarios que permitirían, por ejemplo, buscar bases de datos difíciles de manejar o factorizar grandes números, incluidos, aquellos utilizados en el cifrado. No obstante, esas aplicaciones aún están a décadas de distancia. Cuantos más qubits estén vinculados, más difícil será mantener sus estados de superposición lo cual dificulta la prevención de que sucedan errores mientras el dispositivo está funcionando.

### II-B. ¿Cómo es un ordenador cuántico por dentro?

En un ordenador cuántico no se tiene memoria, ni disco duro. Tan sólo posee un procesador al que se hacen llegar las señales de microondas necesarias para gestionar los estados de los qubits. El receptáculo donde se enfría al procesador es el componente más llamativo e importante y está compuesto por diferentes niveles de enfriamiento hasta llegar a la zona donde trabaja el procesador, en cada nivel se va disminuyendo cada vez más la temperatura hasta llegar a la temperatura requerida (ver Figura 3). En la Universidad de Delft se encuentra un computador cuántico que ha sido documentado en varios videos y artículos donde hacen un recorrido por las instalaciones en las que se encuentra el ordenador.

A causa de las bajas temperaturas necesarias, sabiendo que el cero absoluto se encuentra en los  $-273,15$  grados centígrados que son  $0$  grados Kelvin, el ordenador cuántico trabaja a  $20$  milikelvin (unos  $-273$  grados centígrados) estando muy cerca del cero absoluto. Para obtener un óptimo desarrollo del computador cuántico, este necesita estar siendo monitoreado y vigilado, para esto se requieren generadores de señales de microondas y sistemas para leer el estado en el que se encuentran los qubits, así como también equipos de computación tradicional para llevar o registrar los resultados obtenidos.

El sistema de control consiste en equipos para generar las señales de microondas que llegarán a los qubits del chip cuántico, recreando estados cuánticos, así como sistemas para identificar (leer) los estados cuánticos, en este proceso se atenúa la señal de microondas ya que la potencia con la que la señal entra es demasiado alta y produce un calentamiento del procesador. En el chip se usan los fundamentos de mecánica cuántica para gestionar los estados en los qubits, tales como superposición, interferencia y enlazamiento, para “ejecutar” los algoritmos capaces de obtener resultados relevantes al operar sobre el gran

número de estados con los que se cuenta en un chip cuántico. Es una forma de paralelizar las operaciones de un modo extremo, comparado con la forma de trabajar de un ordenador binario.

En un computador cuántico, existe un conjunto de operaciones cuánticas que permiten ejecutar algoritmos capaces de resolver problemas computacionales. En vez de lógica booleana, se tiene la “lógica cuántica”. Y en vez de operar secuencialmente sobre grupos de “n” bits, se opera en paralelo sobre 2 elevado a “n” estados.

El computador cuántico, en la actualidad, tiene, entre otras misiones, ser el escenario para encontrar métodos de corrección de errores que permitan trabajar con los qubits durante tiempos prolongados. Los estados cuánticos no se mantienen estables durante mucho tiempo y si este estado se modifica durante la ejecución de un algoritmo, el resultado será erróneo, por esto, uno de los retos más relevantes que presenta la computación cuántica es mantener y mejorar la estabilidad de los qubits, para esto, se tiene un monitoreo del tiempo de coherencia, este es uno de los parámetros más importantes, ya que el tiempo de coherencia de los qubits da el tiempo en el cual el estado cuántico del qubit se mantiene estable, por ende, este es quien limita la longitud de los algoritmos que se pueden realizar en la computadora cuántica.

### III. ESTADO DEL ARTE

En la extenuante competencia por construir una computadora cuántica práctica, las compañías tecnológicas mantienen en voz alta cada avance, sin importar cuán pequeño sea. En 1998 la universidad de Berkeley, en California, presentó la primera máquina de 2 qubits, un año más tarde en los laboratorios de IBM-Almaden, se creó la primera máquina de 3 qubits y posteriormente la máquina de 5 qubits, que además fue capaz de ejecutar por primera vez el algoritmo de búsqueda de Grover. Actualmente casi todas las empresas pioneras en tecnología se encuentran involucradas con el desarrollo de ordenadores cuánticos (Google, IBM, Microsoft, NTT, Intel, etc). Uno de los competidores más grandes es IBM, en enero del 2019 en el CES presentó el IBM Q System One (ver Figura 4): una computadora cuántica de 20 qubits construida para la estabilidad”, para ello han tenido que superar uno de los principales problemas de los ordenadores cuánticos, el mantenimiento de las condiciones óptimas en el entorno, una de las condiciones más importantes es que la temperatura debe ser extremadamente baja para evitar que la energía térmica haga que los qubits cambien de estado espontáneamente, estos también pueden verse perturbados por las fluctuaciones eléctricas más pequeñas o las vibraciones físicas.

La línea IBM Q busca crear este tipo de ordenadores para darles uso donde los ordenadores tradicionales se quedan cortos, es decir, no busca reemplazar la computación tradicional, busca complementarla donde esta no es tan eficiente. IBM está promocionando el Q System One como “el primer sistema de computación cuántica universal totalmente integrado del mundo diseñado para uso científico y comercial”. Al igual que otras computadoras cuánticas de IBM, solo se puede acceder a través de la nube, donde las empresas y los institutos de investigación pueden comprar tiempo en la red IBM Q Network .



Figura 4: IBM Q

En septiembre de ese mismo año, IBM anunció que lanzará un ordenador cuántico de 53 qubits, el más grande y potente de forma comercial hasta la fecha, sin embargo, días después Google afirmó haber alcanzado la supremacía cuántica, ya que propusieron un algoritmo que, si se ejecuta en una computadora cuántica lo suficientemente grande, produciría resultados que no podrían ser igualados o alcanzados por las supercomputadoras más poderosas del mundo. Google afirmó que ha diseñado una máquina que solo necesita 200 segundos para resolver un problema que le tomaría a la supercomputadora más rápida del mundo 10.000 años resolver. A lo cual los investigadores de IBM respondieron que no se había hecho nada especial, ya que se presentó un documento que sugiere una técnica de supercomputación mejorada que podría realizar la tarea en solo 2.5 días.

Los investigadores de Google planean continuar aumentando el número y el rendimiento de qubits en sus computadoras cuánticas, asegurando su punto de apoyo en la supremacía cuántica, el equipo ahora está apuntando a otro objetivo: una técnica conocida como corrección de errores cuánticos que domina los errores que se escapan, al combinar varios qubits en un qubit efectivo, los investigadores pudieron detectar cuándo ocurre un error y solucionarlo[8]. A sí mismo, un nuevo proyecto sobre optimización cuántica y aprendizaje automático está en marcha en la Universidad de Oxford, el objetivo del proyecto es comprender el potencial de la tecnología cuántica para mejorar la optimización y las tareas de aprendizaje automático ya que estas son algunas de las aplicaciones más difíciles e importantes en informática hoy en día. Los desafíos planteados para esta nueva computación recaen principalmente en cuanto a su diseño arquitectural y a su estabilidad, ya que, como se mencionó anteriormente, se deben cumplir ciertas condiciones para garantizar el rendimiento de los qubits y por ende de la computadora cuántica.

#### IV. DESARROLLO

##### IV-A. Teniendo en cuenta lo que arquitecturalmente es un computador cuántico. ¿Cual es la realidad?

El modelo clásico de arquitectura de computadoras fue desarrollado por John Von Neumann, su modelo está compuesto por diferentes elementos como lo son: dispositivos de entrada, salida, almacenamiento y de proceso. A si mismo, se puede mencionar que este concepto se considera como dependiente de la memoria, ya que, acomula gran variedad de datos e instrucciones sobre sus diferentes formas y tipos de almacenamiento, ya sean persistentes o volátiles.

Así mismo, los problemas de la era post-moore, no se harán esperar. Con la constante disminución del tamaño de los componentes de hardware y sobretodo los problemas que tienen las compañías de fabricación de microcontroladores debido a la incapacidad de crear microchips con mayor cantidad de transistores, la computación cuántica se ve como un salvavidas para no frenar el avance de la tecnología y poder trabajar con lo que leyes de la mecánica cuántica. Ya que estas, son las causantes de que la computación clásica este llegando a su límite.

Como se ha enseñado, un computador cuántico no posee memoria ram, disco duro, o unidades de procesamiento específico, por el contrario, esta basado en la intercomunicación del mundo atómico, y posee elementos como el qubit, las compuertas cuánticas, los estados confusos, la tele transportación cuántica y el paralelismo cuántico. Evitando así, muchos de los problemas que enfrenta la computación clásica en este momento.

Finalmente, la arquitectura usada en la computación cuántica es la Von Neumann cuántica, la cual guarda similitudes a la clásica, como se puede observar en la figura 5. La arquitectura cuántica realiza una serie de operaciones de puertas cuánticas por medio de la carga de qubits, los cuales deben ser manipulados en los registros cuánticos del QALU (Unidad aritmética lógica cuántica), y esta puede tener una longitud arbitrariamente grande.

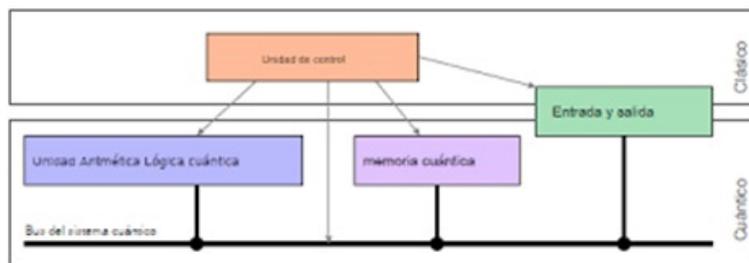


Figura 5: Arquitectura Clásica-Cuántica

Seguido a esto, los qubits pueden permanecer en el QALU para su posterior procesamiento o se mueven de nuevo en la memoria cuántica. Para detectar estados cuánticos, la información cuántica requerida se puede mover a una salida, donde puede ser detectada e interpretada, haciendo que los qubits puedan moverse en varias regiones.

En términos de memoria cuántica los computadores cuánticos de gran escala tienen que alcanzar capacidades de almacenamiento de datos cuánticos con la demanda de hardware baja en la memoria. Aunque se debe tener en cuenta que la arquitectura de la computadora cuántica es tolerante a fallas, por lo tanto, la QALU realiza todas las operaciones, los bancos de memoria cuántica son compatibles con la conversión de código eficiente, la teleportación transmite estados cuánticos sin enviar datos cuánticos y el organizador dinámico controla todos los procesos.

Esta arquitectura utiliza múltiples bancos, pero esto no mejora los tiempos de acceso del qubit lógico, por eso se podría decir que la tasa de error subyacente del mecanismo de almacenamiento físico de los qubits, la complejidad del algoritmo y el tamaño de los datos de entrada, así mismo como el tiempo de operación del QALU, el paralelismo y el código de corrección de error que almacenan los qubits lógicos limita el tamaño del banco.

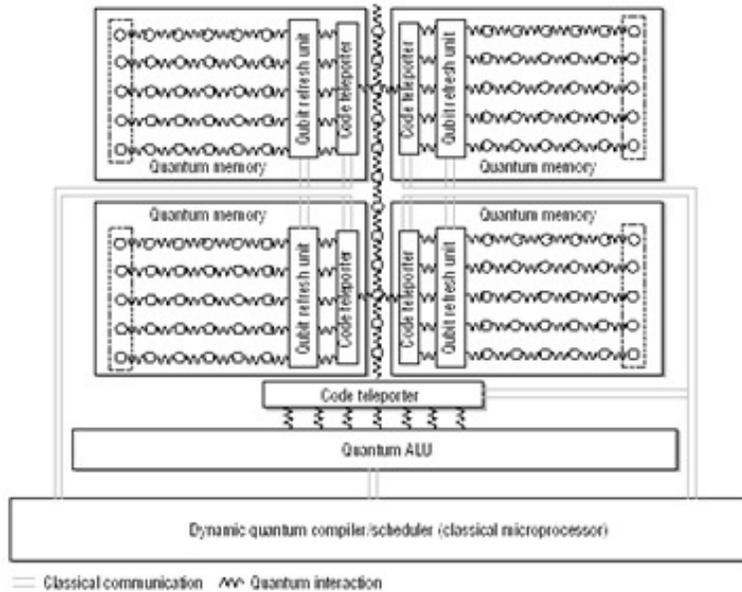


Figura 6: Arquitectura Cuántica

IV-B. ¿Qué definitivamente no es computación cuántica?

Según Arnau Riera, doctor en Física Teórica, profesor de secundaria y asesor de la exposición cuántica llevada a cabo en el Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona (CCCB), “En el mundo clásico, las propiedades de los sistemas que estudiamos están bien definidas. En el mundo cuántico no es así: las partículas pueden tener diferentes valores, no son un objeto puntual, su posición está diluida”, lo cual nos deja un claro mensaje de que, a la hora de aproximarnos a un computador cuántico, nos sirve tanto conocer cómo funciona como cuáles son las diferencias con un computador tradicional. Es por esto que, debemos tener en cuenta es que usan unidades mínimas de información diferentes: bits y qubits.



Figura 7: Comparación computador tradicional y cuántico

En la computación clásica sabemos cómo crear soluciones a problemas gracias al lenguaje de computación ('AND, OR NOT') con el que se escribe programación. Con un computador cuántico se pueden hacer operaciones que no están disponibles en la computación de 'bits'. En un ordenador cuántico se superponen todos los números y posibilidades que se pueden crear con  $N$  'qubits' (si son tres 'qubits' serían ocho posibilidades de manera simultánea). Con 1000 'qubits' las posibilidades exponenciales son muy superiores a las que tenemos con un ordenador clásico".

Actualmente, el término "cuántico" es usado como adjetivo para simplemente generar publicidad, ya que la palabra cuántico suena a ciencia y las personas pueden pensar que es algo fiable, sin embargo, la mayoría de las cosas que se anuncian nada tienen que ver con la física cuántica y los principios de esta. Debemos tener presente, que la computación cuántica se encuentra en etapa de desarrollo, ya que la falta de información presente en los medios de comunicación propician la creación de mitos.

Entre estos se encuentra, uno de los mitos más mencionados acerca de la computación cuántica es su capacidad para superar cualquier método de cifrado tradicional. En el momento en que Google anunció que había logrado la supremacía cuántica, se dispararon masivamente los comentarios de quienes recibieron con preocupación esta noticia, ya que consideraban que esto podría poner en riesgo el sector de las criptomonedas y los sistemas de cifrado actuales. Sin embargo, tanto a Google como al resto de computadores cuánticos les falta mucho por mejorar para llegar a construir un ordenador cuántico capaz de poner en riesgo los sistemas de cifrado actuales. "El computador cuántico de Google actualmente cuenta con 53 qubits y para lograr un sistema capaz de tener algún tipo de efecto sobre bitcoin o la mayoría de los sistemas financieros, se estima que necesitaría disponer de una capacidad aproximada de 1500 qubits y permitir el entrelazamiento de todos ellos" asegura Dragos Ilie.

## V. CONCLUSIONES

Para alcanzar el gran potencial que promete la computación cuántica aun falta mucho por desarrollar y mejorar, uno de los aspectos más importantes y relevantes es mantener la estabilidad de los qubits por tiempos prolongados, por ende, encontrar métodos de corrección de errores que permitan trabajar con estos, ya que los resultados a los problemas planteados para la computación cuántica dependen de la fiabilidad de la misma. Aunque la computación cuántica por ahora este lejos de alcanzar su potencial es necesario ser consciente de que ha creado un nuevo paradigma que transforma la manera como se fabricará e implementará la tecnología. Como sabemos, la computación clásica se basa en la física clásica, es evidente saber que la computación cuántica necesita basarse en la física cuántica, esto implica que la matemática usada en la computación clásica no es óptima o no satisface en su totalidad para implementarla en la computación cuántica, para ello es necesario utilizar otras teorías matemáticas y cambiar la mentalidad de como se comprende la computación actual. Por otro lado, cabe resaltar que la computación cuántica no va a sustituir a la computación clásica, la va a complementar, ya que trabajaran juntas. La computación clásica seguirá trabajando con los problemas que ya pueden solucionar y relevará los trabajos complejos que la computación cuántica pueda resolver de manera significativamente más efectiva, el objetivo de la computación cuántica es trabajar con aquellos problemas que la computación clásica nunca podría resolver y los procesos que tomen en una computadora clásica un gran periodo de tiempo.

## REFERENCIAS

- [1] IBM's new quantum computer is a symbol, not a breakthrough. (2019). Retrieved 3 March 2020, Recuperado de: <https://www.theverge.com/2019/1/8/18171732/ibm-quantum-computer-20-qubit-q-system-one-ces-2019>
- [2] Google claimed quantum supremacy in 2019 — and sparked controversy. (2019). Retrieved 3 March 2020, from <https://www.sciencenews.org/article/google-quantum-supremacy-claim-controversy-top-science-stories-2019-yir>
- [3] Research stories — Oxford Quantum. (2020). Retrieved 3 March 2020, Recuperado de: <http://oxfordquantum.org/stories>
- [4] G. Arun and V. Mishra, "A review on quantum computing and communication,"2014 2nd International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking, Surat, 2014, pp. 1-5.
- [5] Saenz E. [Derivando]. (2019, febrero 13). ¿Qué es y cómo funciona la COMPUTACIÓN CUÁNTICA?. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=YpYuBEzfRIM&feature=youtu.be>
- [6] Arce, J. (2019). Q System one IBM computador cuántico el primer intel. Retrieved 6 March 2020, from <https://www.juanbarrios.com/ibm-presenta-el-ibm-q-system-one-el-primer-computador-cuatico-para-uso-comercial/>
- [7] A. Frisch, "IBM Q — Introduction into quantum computing with live demo,"2017 30th IEEE International System-on-Chip Conference (SOCC), Munich, 2017, pp. 1-2.
- [8] J. Singh and M. Singh, "Evolution in Quantum Computing,"2016 International Conference System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), Moradabad, 2016, pp. 267-270.
- [9] Conover, E. (2019, October 23). Quantum computers are about to get real. Recuperado de: <https://www.sciencenews.org/article/quantum-computers-are-about-get-real>
- [10] WIRED (2018 junio 25) Quantum Computing Expert Explains One Concept in 5 Levels of Difficulty — WIRED. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=OWJcFOvochA&feature=youtu.be>
- [11] Computación cuántica y Blockchain: Mitos y realidades. (2019). Retrieved 6 March 2020, from <https://www.bbvaopenmind.com/tecnologia/mundo-digital/computacion-cuantica-y-blockchain-mitos-y-realidades/>