

# EL DEVENIR DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Juan Albarracín

*Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática*  
*Universidad Industrial de Santander*  
Bucaramanga, Santander  
juanrtato@gmail.com

Jeferson Dominguez

*Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática*  
*Universidad Industrial de Santander*  
Bucaramanga, Santander  
jefersonmurallas97@gmail.com

Iván Castillo

*Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática*  
*Universidad Industrial de Santander*  
Bucaramanga, Santander  
castillo.ivan98@gmail.com

Jessica Pedraza

*Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática*  
*Universidad Industrial de Santander*  
Bucaramanga, Santander  
pedrazajesica15@gmail.com

**Resumen**—El campo de la computación cuántica se ha convertido rápidamente en un tema de gran importancia para la industria informática y académica. Las computadoras cuánticas han motivado este proceso, ya que están llegando a expectativas que refuerzan y aceleran enormemente la seguridad, innovación científica y la potencia de cómputo. Las expectativas se han construido bajo la hazaña de nuevas teorías que enlazan la mecánica cuántica y la computación. Pero, ¿Qué es realista para uno de los campos con mayor crecimiento en la informática? En este artículo se expone en responder los hechos de la realidad de la computación cuántica y los desafíos que enfrenta en el futuro desde un punto de vista ingenieril.

**Abstract**—The application area of quantum computing has quickly become a topic of great importance for the computer and academic industry. Quantum computers have motivated this process, as they are reaching expectations that greatly reinforce and accelerate security, scientific innovation and computing power. Expectations have been built under the feat of new theories that link quantum mechanics and computation. But what is realistic for one of the fastest growing fields in computing? This article sets out to answer the facts of the reality of quantum computing and the challenges it faces in the future from an engineering point of view.

**Palabras claves**—*Computación cuántica, qubit, aplicaciones de la computación, realismo cuántico.*

## I. INTRODUCCIÓN

Los teóricos de la complejidad computacional han sugerido durante mucho tiempo que las computadoras cuánticas podrían superar las expectativas convencionales de lo que es posible con las computadoras clásicas. Estos resultados han sugerido roles para las computadoras cuánticas, por ejemplo, para descifrar el cifrado de clave pública al trivializar el problema de la factorización de enteros y reducir dramáticamente el tiempo necesario para realizar búsquedas en la base de datos. El premio Nobel Richard Feynman fue más allá. Él defendió por qué una computadora cuántica será la clave para desentrañar los misterios de la naturaleza. El uso de computadoras cuánticas para estudiar las reacciones químicas y la ciencia de los materiales parece casi obvio para el avance del descubrimiento de fármacos y la nanotecnología.

A la luz de este entusiasmo, se necesita un examen realista de los desafíos técnicos que enfrenta la computación cuántica. Los dispositivos de computación cuántica actuales están disponibles comercialmente y en laboratorios privados, pero están lejos de ser útiles. Como un campo de práctica, la computación cuántica está en su infancia con los primeros avances en especie de hardware experimental que aún son rutinarios. A modo de ejemplo, muchas estimaciones teóricas para los recursos requeridos

para factorizar números o buscar en bases de datos exceden el estado actual de la técnica en un millón de veces. Ciertamente no está claro si o cómo la tecnología actual podría escalar a tales números.

¿Qué problemas ayudarán las computadoras cuánticas a resolver mejor que las clásicas, y qué impacto pueden tener estos avances en nuestra sociedad global? Y si una computadora cuántica puede ayudar a superar un problema conocido, pero hasta ahora difícil de solucionar, ¿mantendrá esto la promesa de una nueva base tecnológica?

## II. MARCO TEÓRICO

Desde la aparición de teorías que relacionan el aprovechamiento de las propiedades de la física cuántica en la computación el crecimiento de su estudio ha sido exponencial, convirtiéndose en uno de los retos más fuertes para ingeniería, sobre todo el campo de la arquitectura de computadoras. Fue en la década de los 80's cuando los físicos Richard Feynman y Paul A. Benioff postularon de forma independiente sus trabajos para que más adelante la universidad de Berkeley en California se proclamará como la pionera al traer a funcionamiento el primer ordenador cuántico que contaba con 2 Qubits (Unidad básica de información en computación cuántica). Hoy en día grandes empresas como Google, IBM, Intel y Microsoft se encuentran en la carrera del desarrollo de máquinas cuánticas llegando a los 49 o 50 respectivamente. A pesar de convertirse en una carrera comercial el desarrollo de un procesador cuántico se encuentra en estado medio, dado que necesita un gran avance al nivel de arquitectura, ya que su proceso se ve frenado por la refrigeración y la decoherencia de datos, este último término refiriéndose a la inestabilidad cuántica que afecta la integridad de los datos. Para poder dar solución a estos y más problemas en la arquitectura computacional de estas máquinas se apuesta por la estandarización de las mismas, con un enfoque en el tiempo de ejecución y la memoria, donde este último puede estar en bits porque incluso una computadora cuántica debe generar una salida clásica.

La estimación confiable de recursos y la evaluación comparativa de algoritmos cuánticos es un componente crítico del ciclo de desarrollo de aplicaciones cuánticas viables para computadoras cuánticas de todos los tamaños. Determinar los cuellos de botella de los recursos en los algoritmos, especialmente cuando se requieren protocolos de corrección de errores que requieren muchos recursos, es crucial para reducir el costo de implementar algoritmos viables en el hardware cuántico real [1].

Los grandes retos de investigación en la computación cuántica incluyen el diseño de lenguaje de programación, software y verificación de hardware, la definición y perforación de los límites de abstracción, la gestión de paralelismo y comunicación, mapeo y programación de cálculos, reducción de la complejidad de control, optimizaciones máquina-específicas, patrones de error de aprendizaje, así como permitir hacer frente a la explosión de datos provocada por el Big Data e Internet of Things con capacidades de aceleración de cómputo sin precedentes y que permita también facilitar avances con campos como el Deep Learning, la Inteligencia Artificial, entre otras.

## III. CONTENIDO

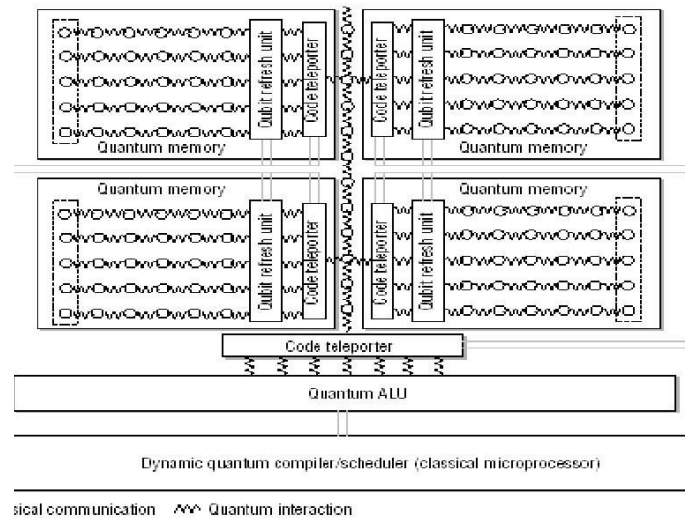
En la computación cuántica, a diferencia de la computación actual donde cada bit puede estar en un estado discreto y alternativo a la vez, la unidad fundamental de almacenamiento es el bit cuántico (Qubit), que se construye mediante partículas que tienen un comportamiento cuántico, donde cada bit cuántico puede tener múltiples estados simultáneamente en un instante determinado, así reduciendo el tiempo de ejecución de algunos algoritmos de miles de años a segundos.

### *A. Arquitectura de un computador cuántico*

Un computador cuántico tiene que ser construido utilizando muchos qubits, todos controlados individualmente y entrelazados entre ellos en una gran red para realizar los cálculos cuánticos. No todos los qubits se pueden entrelazar juntos; el entrelazamiento de qubits en una computadora cuántica requiere una conexión directa entre los qubits, que es una pieza importante de hardware. Estas conexiones no son simples cables, sino dispositivos como resonadores, las diferentes tecnologías para implementar qubits utilizan diferentes enfoques de entrelazamiento.

Es más común que los qubits solo puedan conectarse o entrelazarse con un número limitado de otros qubits, debido al costo y la dificultad de estas conexiones. En algunos casos, puede haber un solo qubit en el que se puede entrelazar un determinado qubit y, a veces, el entrelazamiento solo se puede crear en una sola dirección. En otros casos, puede haber dos o incluso tres opciones, pero esas opciones pueden estar en una sola dirección. Incluso en el mejor de los casos, tal vez solo haya cuatro opciones. En cualquier caso, la variabilidad de los qubits que se pueden entrelazar agrega un nuevo nivel de desafío al diseño de algoritmos para computadoras cuánticas.

Una arquitectura cuántica muy aceptada entre los investigadores y orientada a ser compatible con las actuales arquitecturas cuenta con memoria y una unidad de procesamiento aritmético-lógico y con elementos cuánticos. En la actualidad, el espacio que tiene que haber entre un qubit y otro tiene que ser de escasos nanómetros, ya que de lo contrario no se pueden entrelazar. Esto hace necesario que los demás componentes, como la electrónica de control y los dispositivos de lectura estén fabricados también a escala nanométrica. [1]



**Figura 1.** Propuesta por Oskin et al. de la arquitectura de un computador cuántico. Fuente: [4].

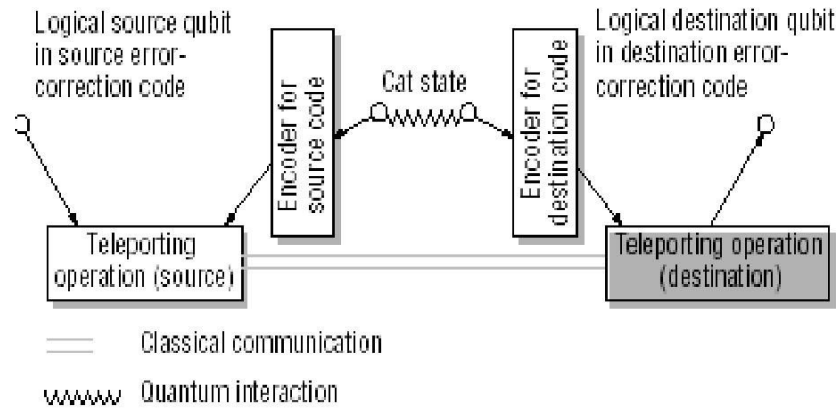
Oskin et al, propone una arquitectura que está conformada por una ALU cuántica, una memoria cuántica y un planificador dinámico, tal como puede observarse en la Figura 1.

A continuación se dispone a definir cada uno de los elementos que conforman esta arquitectura:

**ALU cuántica:** Tiene como funciones fundamentales la ejecución de operaciones cuánticas y la corrección de errores; está prepara los datos cuánticos antes de ejecutar cualquier compuerta lógica aplicando una secuencia de transformaciones cuánticas básicas. El procedimiento de aplicar la secuencia de operaciones elementales para la corrección de errores consume estados auxiliares adicionales, para la verificación de paridad.

**Memoria cuántica:** La memoria cuántica al igual que en las arquitecturas actuales es un elemento arquitectural muy importante. Esta debe ser confiable, con este propósito Oskin et al, incluye una unidad especializada de “actualización” de cada banco de memoria. Una unidad especializada actualiza periódicamente los qubits lógicos individuales, ejecutando algoritmos de detección y corrección de errores.

**Tele transportadora de código:** La tele transportadora de código desde la memoria cuántica a la ALU, añade alguna funcionalidad a la tele transportación cuántica convencional, proveyendo un mecanismo general para ejecutar simultáneamente operaciones mientras transporta los datos cuánticos. Ver figura 2.



**Figura 2.** Fuente:[4]. Tele transportadora de código. El mecanismo se usa para la corrección de errores en el codificador de código origen y en el codificador de código destino. El emisor y el receptor ejecutan qubits lógicos equivalentes en la operación de tele transportación en cada terminal de par enredado.

*Planificador dinámico:* La propuesta es un procesador clásico de alto desempeño como parte principal del planificador dinámico. Este procesador ejecuta un algoritmo de planificación dinámico que toma operaciones cuánticas lógicas, intercaladas con construcciones clásicas de control de flujo y dinámicamente las traduce en operaciones individuales de qubits físicos.

#### B. Problemas de la computación cuántica

Uno de los obstáculos principales para la computación cuántica es el problema de la decoherencia cuántica, esta causa la pérdida del carácter unitario de los pasos del algoritmo cuántico. Los tiempos de decoherencia para los sistemas candidatos, en particular el tiempo de relajación transversal (en la terminología usada en la tecnología de resonancia magnética nuclear e imagerie por resonancia magnética) está típicamente entre nanosegundos y segundos, a temperaturas bajas. Las tasas de error son típicamente proporcionales a la razón entre tiempo de operación frente a tiempo de decoherencia, de forma que cualquier operación debe ser completada en un tiempo mucho más corto que el tiempo de decoherencia. Si la tasa de error es lo bastante baja, es posible usar eficazmente la corrección de errores cuánticos, con lo cual sí serían posibles tiempos de cálculo más largos que el tiempo de decoherencia y, en principio, arbitrariamente largos. Se cita con frecuencia una tasa de error límite de  $10^{-4}$ , por debajo de la cual se supone que sería posible la aplicación eficaz de la corrección de errores cuánticos [1].

Otro de los problemas principales es la escalabilidad, especialmente teniendo en cuenta el considerable incremento en qubits necesarios para cualquier cálculo que implica la corrección de errores. Para ninguno de los sistemas actualmente propuestos es trivial un diseño capaz de manejar un número lo bastante alto de qubits para resolver problemas computacionalmente interesantes hoy en día.

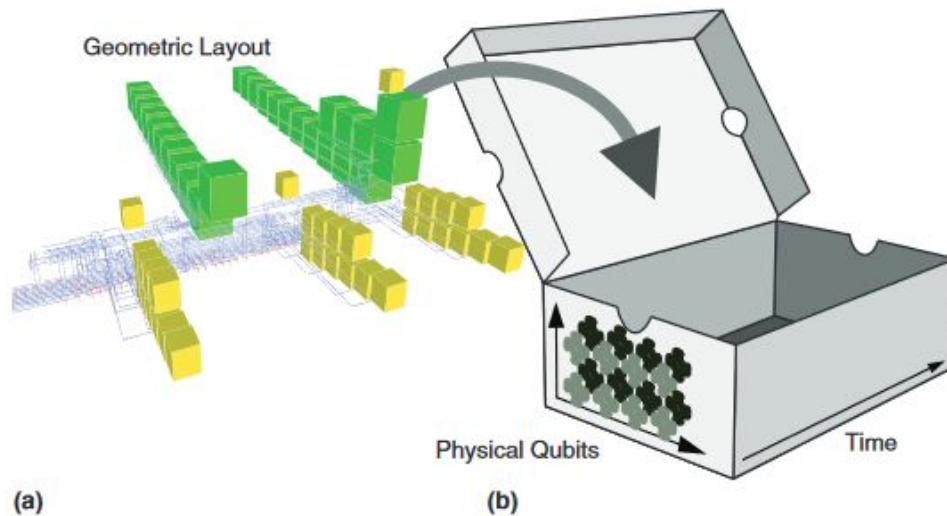
#### C. Cajas de zapatos en la estimación realista de recursos cuánticos

Se ha invertido una gran cantidad de investigación para descubrir cuántos qubits necesitará una computadora cuántica para ser más poderosa que la computadora clásica más poderosa. Las conexiones admitidas entre qubits dentro de un chip determinado determinan la cantidad de operaciones necesarias para ejecutar un algoritmo. El problema es muy similar a cómo se ejecutan los cálculos en las máquinas clásicas: si no todos los registros son direccionables desde un registro dado, o por una determinada instrucción, deben usarse algunas soluciones. Estas soluciones aumentan el tiempo necesario para ejecutar el cálculo [2].

Uno de los principales problemas es que el hardware cuántico no es perfecto, de modo que la información almacenada en los registros cuánticos (los qubits de hardware físico) pierde su precisión con el tiempo. Debido a que el hardware (almacenamiento y operación) es “defectuoso” en ausencia de corrección de errores, un cálculo cuántico debe ejecutarse lo más rápido posible y con la menor cantidad de compuertas posible.

La comunidad de investigadores está cada vez más de acuerdo en la necesidad de abstraer los recursos computacionales (hardware y tiempo) necesarios para ejecutar una computación particular como un volumen espacio-tiempo, es decir, el número de qubits físicos necesarios para un algoritmo (espacio) particular, multiplicado por profundidad de la puerta del algoritmo (tiempo). A esto se le llama la caja de zapatos.

Determinar la caja de zapatos que encapsula un algoritmo cuántico, en principio compara qué tan grande se necesitará una computadora cuántica para ejecutarla. Cuando esto se hace rigurosamente, se muestra que todos los algoritmos cuánticos prácticos son demasiado grandes para ejecutarse en la generación actual de hardware físico.



**Figura 3.** Caja de zapatos que encapsula un algoritmo cuántico de (a) hasta (b). Fuente: [2].

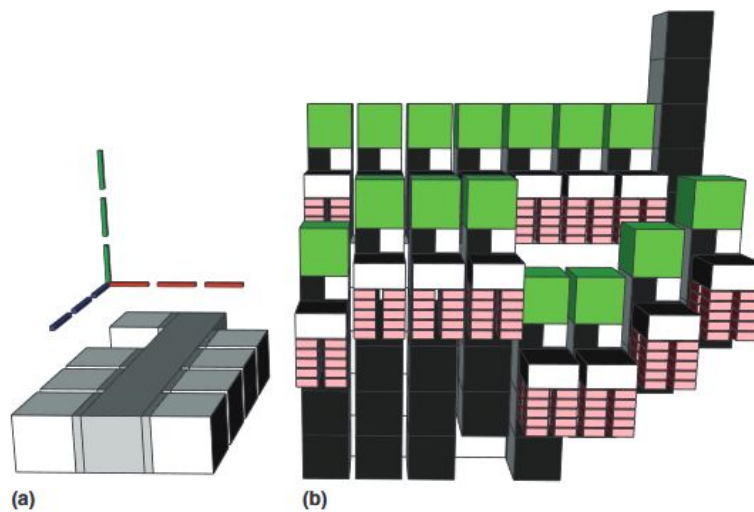
El hardware cuántico es tan frágil que la corrección de errores ha sido aceptada como una necesidad para aplicaciones de tamaño "práctico". La estimación de recursos cuánticos es el proceso de sintetizar, optimizar y verificar un cálculo cuántico con corrección de errores que requiere la menor cantidad de recursos físicos en términos de hardware qubit y tiempo de ejecución. La estimación realista de recursos cuánticos requiere que compilemos explícitamente un algoritmo completamente corregido por error (al nivel de generar esencialmente una secuencia de ejecución para cada qubit y cada compuerta) y mapear esto a un modelo de hardware dado utilizando los supuestos técnicos más actualizados.

La corrección de errores cuánticos es un componente de todas las arquitecturas prácticas de computación cuántica, y se ha propuesto una amplia variedad de códigos. Sin embargo, uno de los códigos más utilizados, en la práctica, es el código de superficie, ya que puede tolerar altas tasas de error mientras tiene una de las configuraciones de hardware requeridas más directas, en comparación con otros códigos. El número de qubits utilizados para la corrección de errores también podría optimizarse al mantener constante la calidad del hardware, al organizar los agujeros o los parches de manera más eficiente en la superficie, un caso de empaque bidimensional. Aumentar la calidad de los qubits reduce la cantidad de corrección de errores necesaria [2].

Una de las dificultades de la corrección de errores es que no se pueden realizar operaciones arbitrarias en datos codificados de una manera simple (técnicamente conocidas como operaciones lógicas transversales). Algunas compuertas en un conjunto de compuerta universal deben reformularse en una forma tolerante a fallas compatible con el código. En la práctica, los cálculos se descomponen en una secuencia de operaciones (instrucciones / compuertas) elegidas de un conjunto llamado Clifford y T-Bone. Esto se debe a que se conocen recetas de cómo codificar estados de qubit tolerantes a fallas y puertas lógicas del conjunto universal Clifford y T-Bone ("Clifford, el gran perro rojo" es una serie de libros infantiles que curiosamente ha encapsulado la naturaleza cualitativa de este problema.) Clifford es amable y servicial, y T-Bone es un bulldog con un gran apetito. Los rasgos de carácter de los perros de dibujos animados son sorprendentemente consistentes con el efecto de las puertas Clifford y T en los

cálculos protegidos con códigos de superficie. Los cálculos que consisten enteramente en compuertas Clifford son amigables, ya que estos pueden simularse eficientemente en computadoras clásicas [2].

Cuando se implementan cálculos con corrección de errores, al menos una puerta es difícil de implementar directamente en el espacio de código, y para códigos de superficie esta es la puerta T. Cada vez que se debe aplicar una puerta T de manera tolerante a fallas y con corrección de errores, se incluye un mecanismo complejo adicional en el cálculo: un procedimiento de destilación. Estos procedimientos, como su nombre lo indica, se utilizan para purificar recursos computacionales defectuosos en otros menos defectuosos. Las compuertas T tienen un gran apetito por los recursos computacionales, porque cada destilación utiliza qubits y tiempo adicionales, en última instancia, para promulgar una única compuerta lógica. Los investigadores han abordado este problema en gran medida, ya que la reducción del número de puertas T en un algoritmo cuántico da como resultado automáticamente la reducción del volumen de la caja de zapatos. Al mismo tiempo, la reducción del volumen de protocolos de destilación para promulgar compuertas T individuales da como resultado grandes mejoras, porque (al menos por el momento) todos los procedimientos de destilación implementan la misma compuerta. La elección del código de superficie y el hecho de que los cálculos deben ser Clifford + T, implica que ya se han hecho algunos supuestos técnicos [3].



**Figura 4.** Una representación pictórica espacio-tiempo de un algoritmo cuántico. Según [2] (a) son las operaciones Clifford + T y (b) es tan solo el proceso que realiza T-Bone para la corrección de errores.

La paralelización de algoritmos cuánticos sólo será posible con hardware barato y escalable. Este no será el caso en el futuro previsible ya que los qubits serán costosos y escasos. En consecuencia, en el corto plazo para la compilación y la evaluación comparativa, parece que la decisión más sensata es permitir que las destilaciones se ejecuten solo secuencialmente: esto ahorra cantidades significativas de hardware físico. La compensación es que los cálculos tardarán más en ejecutarse.

El trabajo futuro debería abordar nuevos métodos para reducir la profundidad del circuito sin aumentar el número de qubits de cálculo. La esperanza es que existan códigos que tengan las mismas propiedades de corrección de errores, o incluso mejores, y que no requieran la inclusión de destilaciones para lograr un cálculo universal con corrección de errores. Dichos códigos ya se han encontrado, pero muchos de estos códigos no son realistas desde el punto de vista de la ingeniería de hardware.

Por ejemplo, que requieren conexiones qubit densas y de largo alcance que continúan expandiéndose a medida que la computadora escala. Por lo tanto, es realista suponer que la primera computadora cuántica comercial o científicamente viable será computacionalmente universal, pero capaz de ejecutar solo un algoritmo específico (porque está optimizado para este problema y no por limitaciones en su capacidad). Se debe adaptar un estimador de recursos realista para los códigos de superficie y asumir que las destilaciones son secuenciales. El estimador debe tener aplicaciones tanto académicas como industriales, a la vez que es muy escalable en el sentido de que puede estimar circuitos de hasta decenas de miles de qubits. Alcanzar tal hito de desarrollo comenzará una nueva carrera de investigación y desarrollo para la construcción de un marco de control de software clásico para computadoras cuánticas confiables.

El horizonte temporal para la computación cuántica práctica es incierto, pero es casi seguro que los estimadores de recursos y sistemas prácticos para analizar el rendimiento de los algoritmos cuánticos diseñados teóricamente estarán en funcionamiento antes de la primera computadora cuántica real comercial o científicamente viable [4].

#### *D. Mayores desafíos para la computación cuántica*

Sin el hardware necesario, los algoritmos estrictamente cuánticos corren el riesgo de quedar en la estacada, si no fuera por los simuladores y algoritmos cuánticos que se ejecutan en computadoras clásicas que continúan avanzando a un paso ligero.

Para poner los desafíos de hardware en perspectiva, se necesita según [5]:

- Un número mucho mayor de qubits: decenas de miles, cientos de miles, incluso millones. Una red de 1,000 por 1,000 es un millón de qubits, pero sigue siendo una cantidad bastante modesta de datos según los estándares actuales.
- Mayor conectividad con muchas menos restricciones, si es que las hay.
- Mucho menor tasa de error, así como mucha más coherencia y profundidad de circuito mucho mayor.
- Verdadera tolerancia a fallas: corrección de errores, que requiere una redundancia significativa para cada qubit.
- Mucho menor costo para el sistema completo.

Los problemas selectivos de nicho pueden lograr soluciones adecuadas sin una fracción de esos avances necesarios, pero las computadoras cuánticas verdaderas, de propósito general, ampliamente utilizables y prácticas requerirán la mayoría de esos avances.

Actualmente, no se está cerca de estar a punto de reemplazar todas o la mayoría de las computadoras clásicas con computadoras cuánticas, por lo que estamos viendo un futuro a mediano plazo con soluciones híbridas que mezclan y combinan la computación cuántica y la computación clásica según sea necesario y práctico. En esencia, las computadoras cuánticas serán coprocesadores en el futuro previsible [6].

Los expertos de los años 1940 a 1950 se cuestionaron sobre el futuro de sus computadoras, pocos prácticamente proyectaron el grado de avance que se ha logrado en la velocidad del procesador, el tamaño de la memoria, el tamaño del almacenamiento de datos, el tamaño físico y facilidad de uso. Si hubieras sugerido intentar colocar una unidad central del tamaño de una habitación en una caja de zapatos, y mucho menos una máquina cien veces más capaz, se habrían reído de ti, pero ese es el alcance del desafío que tenemos por delante para las computadoras cuánticas.

Se espera que el progreso en el frente del hardware continúe avanzando, a un ritmo no tan diferente al que experimentamos con las computadoras clásicas desde la década de 1940 hasta la década de 1990. Uno esperaría que progresamos con al menos un ritmo moderadamente más rápido, posiblemente avanzando en 10 a 20 años, lo que tardó 20 a 50 años en ese entonces, pero también enfrentamos desafíos más desalentadores que a veces simplemente toman el tiempo transcurrido para el pensamiento creativo en lugar de ser estrictamente susceptible a la cantidad de dólares que arroja al problema.

La selección de Qubit debe hacerse con cuidado; como se señaló anteriormente, las restricciones significativas en la conectividad de qubits es un obstáculo importante para la rápida adopción y diseño de algoritmos cuánticos avanzados. En pocas palabras, necesitamos qubits completamente conectados lo antes posible. O al menos muchos más grados de conectividad [7].

Por supuesto, algunos algoritmos simples no requieren conectividad completa, y esa puede ser la norma en un futuro muy cercano, pero se necesitará una conectividad mucho mayor para que la computación cuántica salga de la etapa de novedad y nicho en la que actualmente está profundamente arraigada.

#### IV. CONCLUSIONES

La computación cuántica ha logrado grandes avances en las últimas décadas, prueba de eso lo son algoritmos como la caja de zapatos o la corrección de errores que se da con el código de superficie; esto estabiliza el proceso de desarrollo y permite que se enfoque el trabajo en nuevos retos importantes como lo es la cantidad de qubits, la conectividad entre ellos e incluso la optimización de algoritmos como los que no requieren conectividad completa en sus qubits.

Muy pocos lograron estimar el avance que tendría la computación cuántica y les sonaba extraña la idea de la computación fuera del 1 y 0. Sin embargo hoy en día se puede tener una idea más clara de lo que se podría lograr, incluso se espera que el progreso en hardware se dé a un ritmo no tan diferente al experimentado por la computación clásica en las décadas de 1940 a 1990, y con ello desencadenar un avance en las aplicaciones de esta computación.

El potencial teórico de la computación cuántica está tan por encima de la computación clásica que cada vez más personas se suman al desarrollo de nuevos algoritmos y nuevas arquitecturas que den solución a los problemas y logren llevar a la práctica el potencial teórico.

#### REFERENCIAS

[1] T. S. Humble and E. P. DeBenedictis, "Quantum Realism," in *Computer*, vol. 52, no. 6, pp. 13-17, June 2019. doi: 10.1109/MC.2019.2908512. keywords: {Special issues and sections; Quantum computing; Quantum mechanics; Computer security},

URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8728103&isnumber=8728042>

[2] A. Paler and D. Herr and S. J. Devitt, "Really Small Shoe Boxes: On Realistic Resource Estimation" in *Computer*, vol. 52, no. 6, pp. 27-37, June 2019. DOI: 10.1109/MC.2019.2908621. keywords: {qubit; footwear; hardware; computers; logic gates; estimation}, URL:

<https://www.computer.org/csdl/magazine/co/2019/06/08728077/1axaEI8wmmn>

[3] Frederic T. Chong, "Quantum Computing is Getting Real: Architecture, PL, and OS Roles in Closing the Gap between Quantum Algorithms and Machines" March 24-28, Williamsburgh, VA, USA. URL:

<https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3177152>

[4] Natalia Gomez, Angel Gomez, Andres Gomez, David Villabona "Arquitectura de la computación cuántica: La información es transmitida más rápido que la velocidad de la luz." Universidad industrial de Santander 2019. URL: <http://wiki.sc3.uis.edu.co/images/8/8f/TF4.pdf>

[5] Jack Krupansky. "The Greatest Challenges for Quantum Computing are hardware and algorithms". 20 Aug 2018.

URL: <https://medium.com/@jackkrupansky/the-greatest-challenges-for-quantum-computing-are-hardware-and-algorithms-c61061fa1210>

[6] Nasser Darwish Miranda. "Computación cuántica". EcuRed. Enciclopedia cubana.

URL: [https://www.ecured.cu/Computaci%C3%B3n\\_cu%C3%A1ntica](https://www.ecured.cu/Computaci%C3%B3n_cu%C3%A1ntica)

[7] J.Figueroa, W. Renteria, C. Bustillo. "Arquitecturas computacionales cuánticas". Octubre 2008. Instituto Politécnico Nacional Centro de Investigación en Computación.

URL: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/8510/1/ARQUITECTURAS%20COMPUTACIONALES%20CUANTICAS.pdf>