

Avances de la computación cuántica en México Advancements in quantum computing in Mexico

L. Palacios-Razo ^{a,*}, G.H. Sun ^b

^aÁrea Académica de Matemáticas y Física, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.
^bCentro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, UPALM, 07738, Ciudad de México, México.

Resumen

En México, se han realizado esfuerzos significativos en el desarrollo de la computación cuántica en los últimos años. El país ha establecido colaboraciones con instituciones y empresas líderes en el campo, lo que ha permitido el intercambio de conocimientos y tecnologías de vanguardia. Estas colaboraciones han impulsado la investigación y el desarrollo en México. Este artículo ofrece una visión general de los orígenes de la computación cuántica y de los avances e investigaciones realizadas en México, así como el establecimiento de colaboraciones y alianzas de investigación con instituciones internacionales. También se abordan los desafíos en el campo de la computación cuántica. El artículo concluye enfatizando la importancia de la educación y formación en computación cuántica, así como el impacto potencial de esta tecnología en México.

Palabras Clave: computación cuántica, superposición, entrelazamiento, México.

Abstract

In recent years, Mexico has demonstrated significant commitment to the development of quantum computing, fostering partnerships with renowned institutions and companies in this cutting-edge field. These collaborations have not only facilitated the exchange of knowledge and technologies but also spurred research and development within Mexico's quantum computing landscape. This article provides a comprehensive overview of the origins of quantum computing, highlighting Mexico's achievements, advancements, and ongoing research initiatives. Notably, it delves into the establishment of crucial research collaborations and alliances with international institutions, showcasing the global significance of Mexico's contributions to quantum computing. Furthermore, the article explores the challenges that lie ahead in this transformative domain. With a strong emphasis on education and training, the article underscores the pivotal role they play in driving the adoption and application of quantum computing in Mexico. Ultimately, it underscores the potential and profound impact of this emerging technology on Mexico's scientific, economic, and societal landscape.

Keywords: quantum computing, superposition, entanglement, Mexico.

1. Introducción

La computación cuántica ha surgido como un campo revolucionario en la tecnología de la información, con el potencial de transformar completamente la forma en que se procesa información y se resuelven problemas complejos. En México, se han dedicado esfuerzos significativos al desarrollo de la computación cuántica en los últimos años.

México ha establecido colaboraciones con instituciones y empresas líderes en el campo de la computación cuántica, permitiendo el intercambio de conocimientos y tecnologías, lo que ha impulsado la investigación y el desarrollo en el país.

2. Origen

La idea de la computadora cuántica surgió en 1982 cuando Richard Feynman (Feynman, 1982) observó que era imposible simular sistemas cuánticos de manera eficiente en computadoras clásicas. Posteriormente, en 1985, David Deutsch demostró formalmente que las computadoras cuánticas tienen la capacidad de resolver ciertos problemas mucho más rápidamente que las computadoras clásicas (Deutsch, 1985).

En 1986, Richard Feynman (Feynman, 1986) mostró cómo un sistema cuántico puede utilizarse para mejorar el rendimiento computacional, actuando como un simulador de procesos

*Autor para correspondencia: pa375077@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: pa375077@uaeh.edu.mx (Luis Palacios-Razo), gsun@cic.ipn.mx (GuoHua Sun).

Historial del manuscrito: recibido el 03/08/2023, última versión-revisada recibida el 12/10/2023, aceptado el 16/10/2023, en línea (postprint) desde el 16/10/2023, publicado el 05/07/2024. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.11467>



cuánticos probabilísticos de grandes dimensiones, para los cuales el almacenamiento convencional no es eficiente.

La idea se volvió realidad en 1994 cuando Peter Shor propuso el primer algoritmo cuántico capaz de factorizar grandes números en un tiempo polinomial (Shor, 1994). En este algoritmo, se utilizaron métodos de computación cuántica basados en principios de mecánica cuántica, mientras que los algoritmos clásicos se utilizaron para verificar la corrección de las soluciones candidatas generadas por los algoritmos cuánticos.

La mayor parte de la criptografía actual se basa en la complejidad computacional. Una computadora cuántica capaz de realizar el algoritmo de Shor podría romper la criptografía basada en la factorización de números grandes en cuestión de segundos.

En 1996 Grover (Grover, 1996) propuso un algoritmo para realizar búsquedas en bases de datos desorganizadas. Este algoritmo cuántico es capaz de buscar entre N datos desorganizadas con solo \sqrt{N} operaciones.

3. Bit Cuántico

La unidad básica del cómputo clásico es el bit, que representa un sistema binario clásico con dos posibles estados: 0 o 1. En la computación cuántica, el qubit es la unidad básica de información (del inglés **Quantum Bit**). Un qubit puede existir en el estado $|0\rangle$ o en el estado $|1\rangle$ (ket cero y ket uno en la notación de Dirac), pero también puede representar un estado de superposición que se puede describir mediante una combinación lineal de sus posibles estados base $|0\rangle$ y $|1\rangle$ como se muestra en la Figura 1 y se escribe como:

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \tag{1}$$

donde α y β son números complejos. Aunque un qubit puede existir en superposición de estados, cada vez que se hace una medición el estado en superposición colapsará al estado $|0\rangle$ o $|1\rangle$. La aplicación de las leyes de la mecánica cuántica a (1) establece que $|\alpha|^2$ representa la probabilidad de encontrar el sistema cuántico en el estado $|0\rangle$, mientras que $|\beta|^2$ representa la probabilidad de encontrarlo en el estado $|1\rangle$. Por lo tanto siempre se debe cumplir que:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \tag{2}$$

La superposición de estados le da una característica a la computación cuántica llamada paralelismo cuántico. Debido a la superposición de estados, un qubit puede asumir valores de 0 y 1 al mismo tiempo ver Figura 2. Esto le da un poder exponencial a los algoritmos cuánticos (McMahon, 2007).

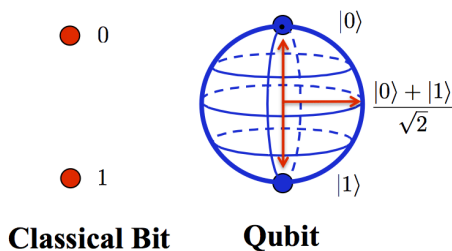


Figura 1: Bit clásico vs Bit cuántico. Imagen obtenida de (Hussain, 2016)

Si $q = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ y $p = \gamma|0\rangle + \delta|1\rangle$ son dos qubits independientes, podemos formar un estado combinado usando el producto tensorial:

$$q \otimes p = \alpha\gamma|00\rangle + \alpha\delta|01\rangle + \beta\gamma|10\rangle + \beta\delta|11\rangle. \tag{3}$$

Sin embargo, también existen combinaciones de qubits que no son de la forma $p \otimes q$. Por ejemplo el estado:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|11\rangle, \tag{4}$$

no es de la forma $p \otimes q$. Este tipo de combinación de estados que no puede describirse usando producto tensorial se le llama **entrelazamiento**.

El entrelazamiento es otra característica muy importante de los estados cuánticos. Se puede entender como una correlación que existe entre las partículas cuánticas, lo que ocasiona que estén unidas incluso si están separadas a grandes distancias. Esta propiedad es única de la mecánica cuántica y no tiene un equivalente directo en el mundo clásico. Si dos o más partículas están entrelazadas, sus estados están intrínsecamente correlacionados de tal manera que el estado de una partícula afectará instantáneamente el estado de las otras, independientemente de la distancia entre ellas (Vizzotto, 2013).

El poder exponencial de la computación cuántica proviene no solo de la superposición de estados, como se mencionó anteriormente, sino también del entrelazamiento cuántico. Ambas características permiten a los algoritmos cuánticos realizar ciertas tareas de manera extraordinariamente más eficiente que los algoritmos clásicos, lo que hace que la computación cuántica tenga un gran potencial para resolver problemas complejos y revolucionar diversos campos científicos y tecnológicos.

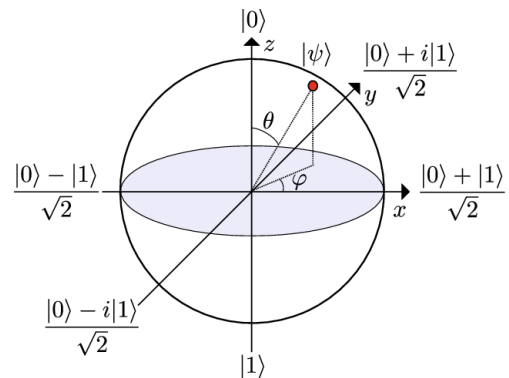


Figura 2: La representación de la esfera de Bloch para un estado qubit. Imagen obtenida de (Frisk Kockum y Nori, 2019)

4. Antecedentes del cómputo cuántico en México

En México, se han realizado esfuerzos significativos en el campo de la investigación en información cuántica. Afortunadamente, en los últimos años, se han experimentado cambios notables, como la fundación de la División de Información Cuántica de la Sociedad Mexicana de Física, un hito importante para la comunidad científica nacional.

La celebración de la XXXI Escuela Latinoamericana de Física en las instalaciones del Colegio Nacional en 1998, fue un hecho que impulsó la creación de la división. Algunos temas

que destacaron fueron el enfriamiento de átomos, las trampas atómicas y de iones y nuevos métodos teóricos para el estudio de la mecánica cuántica, métodos tomográficos e interpretaciones alternativas de la mecánica cuántica (Hacyan *et al.*, 1999). Todo esto resultó fundamental para el desarrollo de la teoría de la información cuántica.

La organización de la Primera Escuela Mexicana de Verano en Computación e Información Cuántica en el año 2004, tuvo lugar en la ciudad de Mérida, Yucatán, fue un evento destacado que contribuyó significativamente a la difusión y crecimiento del área de la información cuántica en México. La organización de la Escuela estuvo a cargo del Dr. Alberto Muñoz Ubando de la Universidad Autónoma de Yucatán, el Dr. Romeo de Coss de Cinvestav-Mérida, el Dr. Juan Luis Díaz de León del Centro de Investigación en Computación del IPN y el Dr. Salvador Venegas Andraca del Centro en Computación Cuántica de la Universidad de Oxford. Su objetivo principal fue brindar un primer acercamiento a la computación cuántica y al procesamiento cuántico de la información (Ubando, 2004).

En 2006, el Conacyt lanzó una convocatoria para la realización de un megaproyecto, en el cual el Dr. Octavio Castaños Garza, la Dra. Rocío Jáuregui Renaud y el Dr. Jorge Hirsch Ganievich participaron con un proyecto titulado “Información cuántica y fotónica”. Esta iniciativa contó con la colaboración de académicos de 11 instituciones de educación superior en México, entre las cuales se encontraban CICESE, CINVESTAV, CIO, INAOE, IPICYT, ITESM, UG, UGTO, UASLP, UAM y UNAM (Castaños Garza, 2008).

En febrero de 2007, se llevó a cabo la presentación del megaproyecto, en el cual se aprobaron varios objetivos, entre ellos: la creación del Centro Nacional de Ingeniería Cuántica, cuya tarea sería investigar tecnologías de comunicación y computación cuántica, así como estados cuánticos útiles en procesos de información cuántica y metrología cuántica. Además, se buscó fortalecer la investigación para lograr avances de la teoría de la información cuántica y se solicitó a la Sociedad Mexicana de Física (SMF) la creación y establecimiento de la División de Información Cuántica (DICU). Posteriormente, durante la sesión de la Mesa Directiva de la SMF celebrada el 23 de agosto de 2007, se aprobó oficialmente la creación de la División de Información Cuántica (Castaños Garza, 2008).

5. Investigación en Cómputo Cuántico

5.1. *Cinvestav*

El director del Cinvestav Unidad Querétaro, el Dr. Mauricio López Romero, destaca que la mecánica cuántica ha sido validada experimentalmente y que las tecnologías derivadas de ella tienen un potencial significativo en áreas como la ciencia, las comunicaciones, la computación y la medicina. En particular, en el Cinvestav Unidad Querétaro se están desarrollando tecnologías cuánticas, específicamente en criptografía y gravimetría. La criptografía cuántica tiene el potencial de proporcionar una seguridad mucho más robusta en las comunicaciones, mientras que la gravimetría cuántica utiliza principios de la mecánica cuántica para medir con alta precisión la aceleración de la gravedad, lo que puede tener aplicaciones en la exploración subterránea sin necesidad de perforaciones.

Además, se proyecta que en los próximos 10 años las aplicaciones cuánticas tendrán un impacto significativo en tecnologías como el 5G, donde los sensores cuánticos desempeñarán un papel importante en la conexión de dispositivos en el Internet de las cosas. Asimismo, se espera que la computación cuántica, la inteligencia artificial y la industria 4.0 se beneficien de las aplicaciones cuánticas en el futuro cercano (Conexión Cinvestav, 2021).

5.2. *CICESE*

El Dr. Francisco Domínguez, investigador del CICESE, destaca la ventaja de la computación cuántica mediante un ejemplo con el problema de encontrar una ruta óptima para la entrega de mercancías. Explica cómo la computación cuántica, a través del paralelismo cuántico y la superposición de estados, puede procesar simultáneamente todas las posibles rutas y encontrar la solución de manera mucho más rápida que una computadora clásica.

Por otro lado, el equipo de los doctores Karina Garay y Francisco Serna se enfoca en la computación cuántica utilizando medios fotónicos y desarrollando cúbits de color. Han demostrado teóricamente la posibilidad de generar y transformar estos cúbits, y actualmente trabajan en compuertas cuánticas para un solo cúbit. Además, tienen colaboraciones con el Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN) de la UNAM y la Universidad Tecnológica de Troyes en Francia. El equipo también está investigando la interacción entre dos cúbits (Martínez-Vega, 2022).

Desde sus laboratorios en Ensenada, el CICESE está realizando aportes innovadores para impulsar el crecimiento del campo de la computación cuántica de manera significativa.

5.3. *UASLP*

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), a través del área de Ciencias de la Computación, ha establecido un convenio de colaboración con la Universidad de Castilla-La Mancha, en España, una destacada institución europea especializada en el campo de la ingeniería de software cuántico, lo que la coloca en la vanguardia de dicho país.

El Dr. Héctor Pérez González resalta que aunque la construcción de una computadora cuántica en términos de hardware puede ser desafiante para México, el talento del país en el campo del software cuántico es tan destacado como en cualquier otra parte del mundo, incluyendo países como India, Corea, Estados Unidos y Rusia. En este sentido, México se encuentra a la vanguardia en el desarrollo de software cuántico.

El Dr. Pérez destaca las ventajas que ofrece una computadora cuántica, ya que puede llevar a cabo tareas que tomarían aproximadamente 400 años en una computadora clásica, como la ejecución de programas de secuenciación del genoma humano o simulaciones gráficas, en tan solo 14 minutos. Estas capacidades abren nuevas posibilidades en diversos campos, no solo en biología, sino también en áreas como la criptoseguridad (Quadratín San Luis Potosí, 2022).

6. Colaboraciones y Alianzas Internacionales

6.1. INAOE

Un proyecto multidisciplinario mexicano-alemán, liderado por el Dr. Daniel Durini del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), se ha propuesto desarrollar, evaluar y caracterizar circuitos integrados que operen en proximidad al cero absoluto, estableciendo las bases para el desarrollo de sistemas completos de cómputo cuántico. Este proyecto cuenta con la participación de investigadores y estudiantes del INAOE y del Centro de Investigaciones de Jülich en Alemania.

En el INAOE, la investigación se realiza en el Laboratorio de Criogenia del GTM, con expertos en caracterización y estudio del comportamiento de dispositivos microelectrónicos a temperaturas criogénicas. A pesar de la inversión limitada, el Dr. Durini menciona que están haciendo todo lo posible por establecerse en el campo de la computación cuántica con los recursos y el conocimiento que poseen.

En Jülich, se centran los esfuerzos en la investigación de los principios fundamentales del hardware. El objetivo principal es desarrollar circuitos integrados y sistemas electrónicos capaces de manipular y leer los qubits generados en estos materiales.

El Dr. Daniel Durini destaca la importancia de aprovechar las tendencias y oportunidades actuales en el campo de la computación cuántica. Reconoce que México no puede competir en términos de inversión con otros países que están impulsando tanto la ciencia básica como los sistemas de cómputo cuántico a gran escala. Sin embargo, confía en que México puede destacarse y realizar una contribución significativa en el campo utilizando el conocimiento y la infraestructura disponibles (Oficina de Vinculación INAOE, 2019).

6.2. ITESM

El Dr. Salvador Elías Venegas Andraca, profesor investigador en el departamento de computación del Tec de Monterrey campus Estado de México, ha colaborado en el desarrollo de una capa adicional de seguridad para proteger los protocolos de criptografía en el protocolo de blockchain contra ataques de computadoras cuánticas.

En colaboración con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID Lab) y Cambridge Quantum (CQ), el Dr. Venegas Andraca y su equipo de científicos han logrado crear exitosamente este sistema de protección basado en tecnología cuántica, que aborda las vulnerabilidades criptográficas en las cadenas de bloques o blockchain.

Este avance realizado por el Dr. Venegas Andraca y su equipo fortalece tanto la estructura actual como futura del blockchain, así como las aplicaciones construidas sobre esta tecnología, incluyendo la criptomoneda Bitcoin. Esta innovación proporciona una mayor seguridad en el contexto de las amenazas que podrían surgir con la llegada de las computadoras cuánticas, asegurando la integridad de los datos y la privacidad en el uso de blockchain (Varela, 2021).

AztraZeneca y el campus Guadalajara del ITESM han colaborado en el diseño de un programa de transferencia de conocimiento que incluye el cómputo cuántico y su aplicación en la bioinformática cuántica para el diseño de nuevos medicamentos. Según menciona César Cárdenas, profesor del Tec Guadalajara, el cómputo cuántico será una herramienta fundamental

en el diseño de medicamentos, permitiendo resolver en poco tiempo lo que tomaría siglos con la computación clásica.

El Dr. Venegas, destaca que esta alianza entre AstraZeneca y el Tec Guadalajara es un avance importante en el desarrollo del capital humano en computación cuántica en México. El programa busca avanzar en la creación de algoritmos cuánticos con aplicaciones diversas, especialmente enfocados en la solución de problemas médicos de frontera.

Esta colaboración representa un paso significativo hacia el desarrollo de la computación cuántica en el ámbito de la medicina, y demuestra el potencial de la tecnología cuántica para acelerar el diseño de nuevos medicamentos y abordar desafíos en la industria farmacéutica (González, 2021).

7. Educación y Formación en Cómputo Cuántico en México

7.1. CIC-IPN

El 7 de enero de 2022 se creó el Laboratorio de Ciencias de la Información Cuántica en el CIC-IPN, conformado por la Dra. GuoHua Sun (jefa de laboratorio), el Dr. ShiHai Dong y el Dr. Luis Fernando Quezada. El objetivo principal del laboratorio es investigar y proponer algoritmos cuánticos que permitan una computación más potente, aprovechando la potencia de almacenamiento y la velocidad de procesamiento de la información. La Dra. Sun destaca la importancia de desarrollar la computación cuántica desde ahora, considerando el crecimiento constante de la cantidad de información que generamos y la necesidad de procesarla de manera eficiente.

La Dra. Sun destaca que en la era del cómputo cuántico, es importante aprovechar las ventajas que ofrece la ciencia de la computación cuántica para abordar la seguridad. Menciona que si se utiliza un canal cuántico para enviar información, la criptografía basada en principios cuánticos puede proporcionar una alternativa segura, ya que si un tercero intenta interceptar la información, esta se pierde, asegurando así que nadie externo pueda acceder a ella.

El Laboratorio de Ciencias de la Información Cuántica trabaja en investigaciones sobre comunicación cuántica, criptografía cuántica, entrelazamiento cuántico, sistemas cuánticos confinados, memoria asociativa cuántica, clasificación de imágenes con algoritmos cuánticos y topología cuántica para análisis de datos. El perfil de ingreso al laboratorio es diverso, incluyendo a estudiantes de computación, física, matemáticas e ingenierías con buena formación matemática. La Dra. Sun destaca que el cómputo cuántico tendrá un gran impacto en áreas como big data, inteligencia artificial y machine learning, y ve en las ciencias de información cuántica un campo de oportunidades y éxito para aquellos que se involucren (Centro de Investigación en Computación, 2022b).

El CIC-IPN ha sido el creador del Coloquio de Cómputo Cuántico, el cual tuvo su primera edición en 2014 y se llevaba a cabo cada tres años. Sin embargo, debido a la pandemia, el coloquio se pospuso. En 2022, se retomó con su tercera edición, reconociendo el impacto significativo que tiene la computación cuántica tanto en la academia como en la industria, y las diversas aplicaciones que se pueden desarrollar. Uno de los hitos destacados en este campo fue el trabajo premiado con el Nobel de Física 2022. El objetivo principal de este evento es fomentar

el interés y el apoyo en el área de la computación cuántica en México y Latinoamérica (Centro de Investigación en Computación, 2022a).

7.2. CECAv-UNAM

La Segunda Escuela de Cómputo Cuántico, organizada por el CECAv-UNAM, ofrece un curso de Cómputo Cuántico por las mañanas, donde los participantes aprenderán los principios básicos de la información cuántica y desarrollarán habilidades de programación en algoritmos de cómputo cuántico. Por las tardes, expertos nacionales e internacionales compartirán sus investigaciones en este campo que promete revolucionar la ciencia y la tecnología en un futuro cercano.

El curso tiene una duración de 5 días, con clases de cuatro horas diarias y sesiones de asesoría por las tardes. Durante el curso, los participantes aprenderán desde operaciones básicas en matrices y vectores, notación de Dirac, manipulación de qubits y representación en la esfera de Bloch, hasta compuertas cuánticas y construcción de circuitos cuánticos utilizando la biblioteca Qiskit (Centro de Estudios en Computación Avanzada (CECAv), 2023).

8. Aplicaciones y Potencial Impacto en México

El Dr. Salvador Venegas enfatiza que México tiene el potencial de liderar el desarrollo de tecnología cuántica para fortalecer la ciberseguridad en la región. Aunque el país está en una etapa inicial en la construcción de su estrategia digital, esto presenta una oportunidad para involucrar a los sectores público, académico y privado en la creación de una estrategia integral. México cuenta con científicos y una infraestructura adecuada para avanzar en los aspectos teóricos, experimentales e implementación de la tecnología cuántica. Además, es de los pocos países en América Latina junto con Brasil, que posee capacidades en capital humano e infraestructura científico-tecnológica. Esto brinda amplias oportunidades para el desarrollo y la creación de nuevos mercados en el campo de la tecnología cuántica aplicada a la ciberseguridad (Venegas Andraca, 2019).

9. Aportes teóricos hechos por investigadores de instituciones mexicanas

La evolución de la computación cuántica plantea una seria amenaza a la seguridad de las blockchains, ya que los algoritmos criptográficos actuales se vuelven vulnerables ante su poder de procesamiento. Para abordar esta inminente crisis, Allende *et al.* (2023) presentan una solución innovadora: una implementación de código abierto en una red compatible con Ethereum (EVM) que garantiza la resistencia cuántica. Esta solución aborda la protección de la comunicación entre nodos de la blockchain a través de canales seguros poscuánticos, la incorporación de firmas poscuánticas en las transacciones y métodos eficaces para verificar estas firmas, asegurando así la integridad de los datos y activos en un entorno blockchain en constante evolución. Ante la incertidumbre de cuándo los ordenadores cuánticos serán lo suficientemente poderosos, esta iniciativa se presenta como un paso crucial para proteger la inmutabilidad y la seguridad de las blockchains en un futuro que se vislumbra cuántico.

Por otro lado, Moya-Cessa (2006) examina en profundidad varios enfoques que conducen a la decoherencia en sistemas cuánticos. Su estudio incluye una variación de la ecuación de Schrödinger que modela la decoherencia como una evolución del sistema a través de mecanismos intrínsecos más allá de la mecánica cuántica convencional. Además, se aborda la interacción disipativa con el entorno utilizando un enfoque basado en el principio de correspondencia. Las ecuaciones maestras se resuelven para diversos sistemas físicos, como Kerr y conversión paramétrica descendente, demostrando que, a pesar de que la disipación puede destruir la naturaleza cuántica del campo, es posible obtener información sobre el estado inicial mediante la reconstrucción de funciones de distribución de cuasiprobabilidad. La aplicación de técnicas de superoperadores en este estudio permite la generalización de las soluciones a campos arbitrarios y la correlación de pérdidas con funciones de distribución de cuasiprobabilidad en la interacción átomo-campo. Este artículo constituye una contribución valiosa al entendimiento de la decoherencia en sistemas ópticos cuánticos y su relación con la información cuántica.

Además, Gorin y Seligman (2003) utilizan modelos de matrices aleatorias para describir la dinámica de estados aleatorios en sistemas cuánticos. Descubren que el comportamiento de la pureza en intervalos cortos y medianos de tiempo está dominado por la amplitud del paquete de ondas en el espacio de energía, un aspecto crucial que se debe considerar incluso en los modelos más simples. Mencionan que, para sistemas caóticos, pueden producirse desviaciones significativas si el paquete de ondas tiene alguna relación especial con características conocidas como “scars”, que pueden estar asociadas con órbitas periódicas ligeramente inestables, manifolds parabólicos o bifurcaciones que influyen en la dinámica caótica a escalas más grandes. Aunque se requiere una mayor investigación, estos hallazgos proporcionan una visión importante de la relación entre el caos y la decoherencia en sistemas cuánticos.

10. Innovaciones tecnológicas realizadas por científicos de instituciones mexicanas

Li *et al.* (2023) proponen un modelo cuántico de tono, saturación y luminosidad basado en la codificación de secuencias de tres qubits (QHTS) y proporcionan circuitos cuánticos para la preparación y recuperación de imágenes QHTS. Este enfoque permite la interpolación por el vecino más cercano en imágenes QHTS y su aplicación en dos áreas clave: esteganografía cuántica, garantizando la seguridad de las imágenes portadoras y aumentando la capacidad de incrustación de mensajes secretos, y fusión de imágenes de teledetección espacial, creando composiciones cuánticas de pseudo-color en imágenes multi-espectrales y pancromáticas. Los resultados de simulación confirman que este método supera ampliamente a los algoritmos de esteganografía de imágenes cuánticas existentes, y un análisis de complejidad destaca su eficiencia gracias al paralelismo cuántico.

Altamirano-Escobedo y Bayro-Corrochano (2023) introducen un enfoque innovador en el campo del reconocimiento de patrones mediante la creación de la Red Neuronal Cuántica Quaternionic (QQNN). Este enfoque se destaca por su formulación basada en qubits quaternionicos y la construcción de operadores de activación dentro del álgebra de los cuaterniones.

Los resultados de una serie de experimentos con diversos conjuntos de datos de referencia demuestran que la QQNN supera de manera significativa a las redes neuronales convencionales de valores reales en términos de precisión. Este logro resalta el potencial de la computación cuántica y las representaciones hipercomplejas para mejorar la capacidad de clasificación, incluso con un número limitado de ejemplos de entrenamiento en ciertos problemas. Además, el artículo plantea perspectivas fascinantes para futuras investigaciones al sugerir la posibilidad de incorporar otras álgebras hipercomplejas en este modelo. En conjunto, esta contribución promete enriquecer el campo del aprendizaje automático y el reconocimiento de patrones con un enfoque cuántico que exhibe un rendimiento sobresaliente.

El trabajo de Perez-Leija *et al.* (2013) demuestra que, al aprovechar adecuadamente la dinámica cuántica interna de una red reticular inspirada en las propiedades de espín, es posible realizar la transferencia coherente de estados cuánticos a través de la región funcional de un dispositivo de procesamiento de información. Este logro presenta ventajas sustanciales en comparación con enfoques previos y sienta las bases fundamentales para el desarrollo de dispositivos de computación cuántica a mayor escala. A través de este estudio experimental en profundidad, se ha explorado el concepto de transferencia de estado cuántico sin corrupción, demostrando una transferencia de alta fidelidad a lo largo de una cadena extensa. Los resultados indican que los protocolos de transferencia de estado perfecto representan una vía altamente prometedora para avanzar hacia la computación cuántica distribuida e integrada en un chip.

11. Desarrollo de algoritmos cuánticos por parte de investigadores de México

Olvera *et al.* (2022) destacan la limitación de los algoritmos clásicos de optimización multiobjetivo en la resolución de problemas complejos con numerosas variables y funciones. Su análisis revela que los algoritmos inspirados en la computación cuántica muestran un rendimiento comparable al algoritmo clásico NSGA-II, lo que subraya su viabilidad para abordar problemas multiobjetivo. Además, se resalta que el método propuesto supera a otros algoritmos cuánticos, especialmente en situaciones que involucran restricciones y conjuntos de Pareto complejos.

Ballinas y Montiel (2023) introducen la innovadora propuesta “Algoritmo Genético Cuántico Híbrido con Ángulo de Rotación Adaptativo” (HQGAAA) diseñada para resolver el desafiante problema de la mochila binaria (0-1 knapsack problem). Este enfoque único aprovecha el circuito cuántico de Deutsch-Jozsa para generar poblaciones cuánticas, que actúan de manera sinérgica como operadores de recombinación haploide y mutación.

Esto aprovecha la entrelazación cuántica para proporcionar características de explotación y exploración, generando así nuevos individuos de manera eficiente. Los resultados muestran que esta propuesta supera a otros algoritmos evaluados en términos de desempeño, con resultados cuánticos que son comparables o superiores al algoritmo genético clásico en términos de precisión. Además, pruebas estadísticas respaldan la eficiencia temporal de la propuesta en comparación con otros algoritmos cuánticos evaluados.

12. Principales instituciones en México y Latinoamérica que han contribuido al campo del cómputo cuántico

En Latinoamérica, se destaca la presencia de Brasil con tres instituciones líderes en el campo del cómputo cuántico: la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ), la Universidad de Sao Paulo (USP) y la Universidad Federal Fluminense (UFF), estas instituciones lideran la región en términos de productividad, con 79, 59 y 47 artículos publicados respectivamente. Otras instituciones destacadas en Latinoamérica en el campo del cómputo cuántico incluyen el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) en Argentina, el Tecnológico de Monterrey (ITESM) en México y la Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) en Brasil, todas ellas con 38 artículos publicados. Para obtener una visión más detallada de la situación, consulte la Figura 3, que proporciona una representación gráfica de la productividad de estas instituciones.

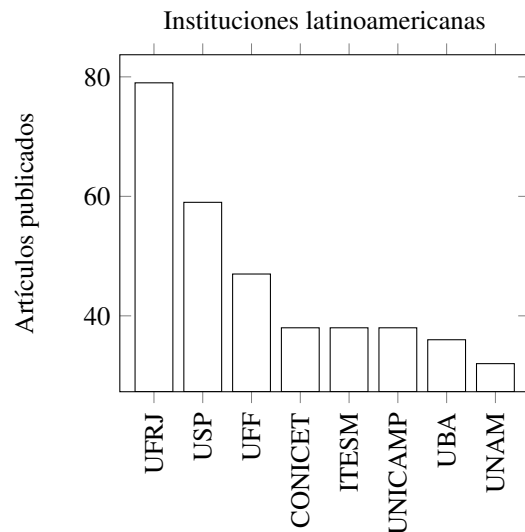


Figura 3: Fuente: Elaboración propia basada en datos recolectados de Web of Science, julio de 2023

En México, el Tecnológico de Monterrey (ITESM) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) encabezan la lista de instituciones destacadas en este ámbito con 38 y 32 artículos publicados respectivamente. Además, se mencionan otras instituciones de diversas regiones de México, como la Universidad de Guadalajara (U. GDL), la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN), consulte la Figura 4.

Estos datos evidencian el crecimiento y la dinámica de la comunidad científica en México y Latinoamérica, que se encuentra dedicada al desarrollo del cómputo cuántico. Se puede observar cómo el interés y la actividad en este campo están creciendo, lo que demuestra el potencial y la relevancia del cómputo cuántico en nuestra región. Estas contribuciones científicas no solo fortalecen el conocimiento en esta área, sino que también tienen el potencial de generar impactos significativos en la sociedad y la industria en el futuro cercano.

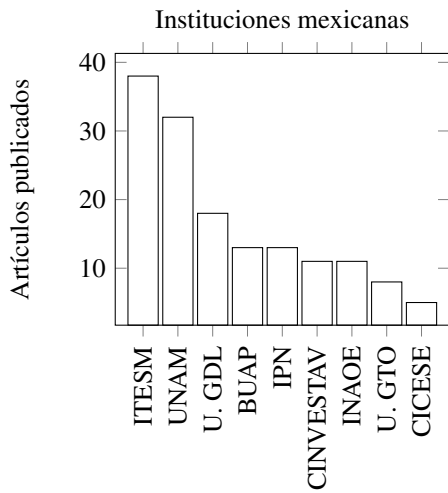


Figura 4: Fuente: Elaboración propia basada en datos recolectados de Web of Science, julio de 2023

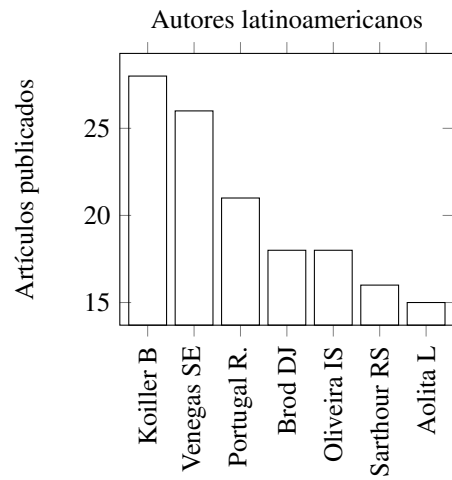


Figura 6: Fuente: Elaboración propia basada en datos recolectados de Scopus, julio de 2023

13. Investigadores mexicanos y latinoamericanos que más contribuyen al campo del cómputo cuántico

En México, uno de los autores más destacados en el campo del cómputo cuántico es Salvador Venegas, cuya labor ha resultado en la publicación de 26 artículos. Su trabajo ha contribuido al avance de esta disciplina en el país. Además, autores como Francisco Delgado e Félix Izrailev también han realizado importantes contribuciones con 15 artículos cada uno como se muestra en la Figura 5.

En el ámbito latinoamericano, varios autores han dejado una huella significativa en el campo del cómputo cuántico. Destaca la productividad de Belita Koiller, quien ha publicado 28 artículos y ha desempeñado un papel clave en el crecimiento y desarrollo de este campo en la región. Salvador Venegas también se encuentra entre los principales contribuyentes, con 26 artículos publicados en la región, ver Figura 6.

Sus investigaciones y contribuciones en el campo del cómputo cuántico están sentando las bases para una nueva era de descubrimientos y aplicaciones tecnológicas tanto en México como en Latinoamérica.

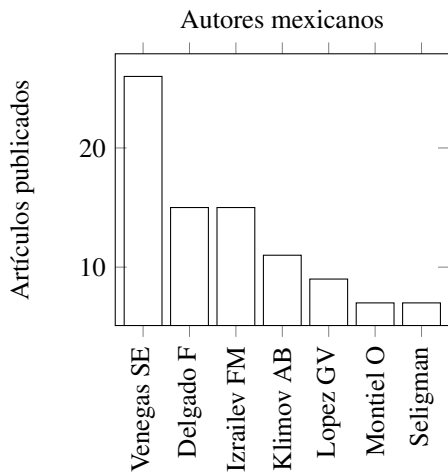


Figura 5: Fuente: Elaboración propia basada en datos recolectados de Scopus, julio de 2023

14. Retos y Desafíos

Actualmente, uno de los desafíos en la creación de una computadora cuántica es garantizar su estabilidad. A medida que se agregan más qubits, la tarea de ingeniería se vuelve más compleja. La decoherencia, causada por las interacciones con el entorno, es un obstáculo significativo, y hasta ahora ha sido difícil mantener la coherencia en los sistemas durante períodos prolongados (Knights, 2007).

La estabilidad de los qubits también es otro desafío clave en la computación cuántica. El contacto con el entorno macroscópico puede romper la coherencia de los qubits, por lo que es necesario mantenerlos completamente aislados. Una posible solución es utilizar una trampa iónica para mantener el qubit aislado y protegido de las interacciones no deseadas (Häffner *et al.*, 2008).

15. Perspectivas

En México, las instituciones académicas y centros de investigación desempeñan un papel importante en la investigación y desarrollo del cómputo cuántico. La participación de investigadores mexicanos en proyectos internacionales y colaboraciones con instituciones líderes en este campo ha contribuido al avance y la adopción de esta tecnología en el país. Estas colaboraciones han generado importantes avances y oportunidades prometedoras para el futuro del cómputo cuántico en México.

La formación de científicos e ingenieros altamente capacitados en cómputo cuántico es fundamental para el éxito de esta tecnología en México. Aunque existen programas académicos y grupos de investigación dedicados a este campo, es necesaria la creación de programas educativos especializados, la promoción de oportunidades de investigación y desarrollo, y la colaboración con instituciones internacionales para compartir conocimientos y experiencias.

La infraestructura también juega un papel clave en nuestro camino hacia el cómputo cuántico. La construcción y mejora de laboratorios y plataformas experimentales son indispensables para llevar a cabo investigaciones avanzadas y realizar pruebas

prácticas. Al contar con una infraestructura sólida y actualizada, México estará en mejores condiciones de fomentar la innovación y la colaboración en el campo del cómputo cuántico.

Además, es esencial identificar y desarrollar aplicaciones prácticas del cómputo cuántico para impulsar su adopción en diferentes sectores. Tenemos la oportunidad de explorar aplicaciones específicas y desarrollar casos de uso en áreas como la optimización, la inteligencia artificial y la criptografía cuántica. Estas aplicaciones podrían tener un impacto significativo en diversos campos, como la medicina, la energía y la seguridad de la información.

16. Conclusiones

México está avanzando significativamente en el campo de la computación cuántica, con instituciones de investigación y universidades involucradas activamente en el avance de la tecnología.

El establecimiento de la División de Información Cuántica dentro de la Sociedad Mexicana de Física y la organización de eventos como el Coloquio de Cómputo Cuántico y la Segunda Escuela de Cómputo Cuántico demuestran el compromiso de México para promover y desarrollar la computación cuántica.

Sin embargo, existen desafíos que superar, como la estabilidad y la coherencia de los qubits, fomentar programas de educación y formación, e identificar aplicaciones prácticas para maximizar el potencial de la computación cuántica en México.

México tiene la oportunidad de posicionarse como líder en tecnología cuántica en la región, aprovechando su talento científico y su infraestructura existente. Al continuar invirtiendo en investigación, educación y colaboraciones, México puede aprovechar el poder de la computación cuántica y promover la innovación en diversos sectores, contribuyendo a su desarrollo tecnológico y competitividad a nivel global.

Referencias

- Allende, Marcos and León, Diego López and Cerón, Sergio and Pareja, Adrián and Pacheco, Erick and Leal, Antonio and Da Silva, Marcelo and Pardo, Alejandro and Jones, Duncan and Worrall, David J and others (2023). Quantum-resistance in blockchain networks. *Scientific Reports*, 13(1):5664.
- Altamirano-Escobedo, G. y Bayro-Corrochano, E. (2023). Quaternion quantum neural network for classification. *Advances in Applied Clifford Algebras*, 33(4):40.
- Ballinas, E. y Montiel, O. (2023). Hybrid quantum genetic algorithm with adaptive rotation angle for the 0-1 knapsack problem in the ibm qiskit simulator. *Soft Computing*, 27(18):13321–13346.
- Castanós Garza, O. (2008). Creación de la división de información cuántica de la sociedad mexicana de física. *CINVESTAV*, 27(1):72–77.
- Centro de Estudios en Computación Avanzada (CECAv) (2023). Segunda escuela de cómputo cuántico. *Sito Web CECAv-UNAM*.
- Centro de Investigación en Computación (2022a). 3er coloquio de cómputo cuántico. *Sito Web Laboratorio de Robótica y Mecatrónica*.
- Centro de Investigación en Computación (2022b). Creación de nuevo laboratorio de ciencias de la información cuántica en el cic. *Noticias CIC-IPN*.
- Conexión Cinvestav (2021). Cinvestav unidad querétaro desarrolla tecnologías cuánticas. *Conexión Cinvestav*.
- Deutsch, D. (1985). Quantum theory, the church–turing principle and the universal quantum computer. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 400(1818):97–117.
- Feynman, R. P. (1982). Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21:467–488.
- Feynman, R. P. (1986). Quantum mechanical computers. *Found. Phys.*, 16(6):507–532.
- Frisk Kockum, A. y Nori, F. (2019). *Quantum Bits with Josephson Junctions*, pp. 703–741.
- González, C. (2021). Tec transfiere conocimiento de cómputo cuántico a astraZeneca. *Conecta Tec*.
- Gorin, T. y Seligman, T. H. (2003). Decoherence in chaotic and integrable systems: a random matrix approach. *Physics Letters A*, 309(1-2):61–67.
- Grover, L. K. (1996). A fast quantum mechanical algorithm for database search. En *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*, pp. 212–219.
- Hacyan, S., Jauregui-Renaud, R., Jáuregui, R., y Lopez-Pena, R. (1999). *Latin-American School of Physics XXXI ELAF: New Perspectives on Quantum Mechanics*. Número 464. American Institute of Physics.
- Häffner, H., Roos, C. F., y Blatt, R. (2008). Quantum computing with trapped ions. *Physics reports*, 469(4):155–203.
- Hussain, Z. (2016). Strengths and weaknesses of quantum computing. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 7.
- Knights, M. (2007). Computing—the art of quantum computing—can ‘spooky action at a distance’ be harnessed to build a new class of computers? *Engineering & Technology*, 2(1):30–34.
- Li, N., Yan, F., Venegas-Andraca, S. E., y Hirota, K. (2023). Quantum image scaling with applications to image steganography and fusion. *Signal Processing: Image Communication*, 117:117015.
- Martínez-Vega, D. F. (2022). Cicese investiga acerca de la computación cuántica basada en fotónica. *TodosCICESE*.
- McMahon, D. (2007). *Quantum computing explained*. John Wiley & Sons.
- Moya-Cessa, H. (2006). Decoherence in atom–field interactions: A treatment using superoperator techniques. *Physics reports*, 432(1):1–41.
- Oficina de Vinculación INAOE (2019). Proyecto mexicano-alemán desarrollará circuitos que funcionen a muy bajas temperaturas para cómputo cuántico. *Noticias INAOE*.
- Olvera, C., Montiel, O., y Rubio, Y. (2022). Quantum-inspired evolutionary algorithms on continuous space multiobjective problems. *Soft Computing*, pp. 1–22.
- Perez-Leija, A., Keil, R., Kay, A., Moya-Cessa, H., Nolte, S., Kwek, L.-C., Rodríguez-Lara, B. M., Szameit, A., y Christodoulides, D. N. (2013). Coherent quantum transport in photonic lattices. *Physical Review A*, 87(1):012309.
- Quadratin San Luis Potosí (2022). Trabaja uaslp en desarrollo de computación cuántica. *Quadratin SLP*.
- Shor, P. W. (1994). Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. En *Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science*, pp. 124–134. Ieee.
- Ubando, L. A. (2004). Primer escuela mexicana de verano en computación cuántica y procesamiento cuántico de la información. Publicado en Academia.edu.
- Varela, E. (2021). Profesor del Tec CEM colabora en desarrollo de seguridad de blockchain. *Conecta Tec*.
- Venegas Andraca, S. E. (2019). Tecnología cuántica y ciberseguridad. *Revista de Administración Pública*, 54(1):209–230.
- Vizzotto, J. K. (2013). Quantum computing: State-of-art and challenges. En *2013 2nd Workshop-School on Theoretical Computer Science*, pp. 9–13. IEEE.