

Computación cuántica: avances, desafíos y nuevos paradigmas: en criptografía, optimización y simulación de materiales

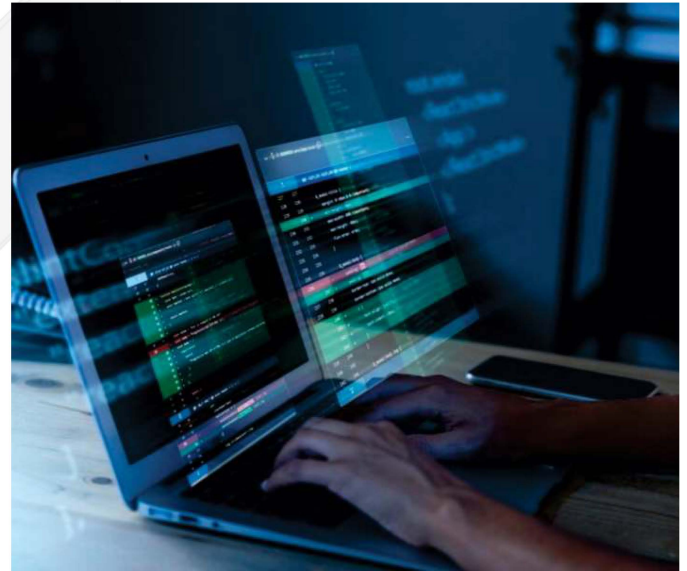
Por: David Eduardo León



Quantum computing: advances, challenges, and new paradigms in cryptography, optimization, and materials simulation

Resumen: El objetivo de este estudio fue explorar el estado actual de la computación cuántica y sus aplicaciones en criptografía, optimización y simulación de materiales. Se empleó un enfoque cualitativo, analizando una selección de fuentes académicas clave, como artículos científicos y libros especializados, para comprender los fundamentos teóricos y las aplicaciones prácticas de la computación cuántica. Los resultados revelaron que los algoritmos cuánticos, como el de Shor y el de Grover, tienen el potencial de superar las limitaciones de la computación clásica, mostrando mejoras significativas en la factorización de números grandes y en la búsqueda en bases de datos. La discusión destacó cómo estos avances pueden transformar la criptografía al ofrecer nuevas soluciones de seguridad y optimizar problemas complejos en logística, diseño de fármacos y simulación de materiales. También se identificaron desafíos técnicos, como la descoherencia y la necesidad de corrección de errores cuánticos, que deben abordarse para que la computación cuántica sea práctica y confiable a gran escala. Se concluyó que, la computación cuántica sigue siendo un campo emergente, sus aplicaciones prometen revolucionar varios sectores, y los esfuerzos continuos en investigación y desarrollo son cruciales para superar los obstáculos técnicos y aprovechar plenamente su potencial.

Abstract: The aim of this study was to explore the current state of quantum computing and its applications in cryptography, optimization, and material simulation. A qualitative approach was employed, analyzing a selection of key academic sources, such as scientific articles and specialized books, to understand the theoretical foundations and practical applications of quantum computing. The results revealed that quantum algorithms, such as those of Shor and Grover, have the potential to overcome the limitations of classical computing, showing significant improvements in large number factorization and database searching. The discussion highlighted how these advancements could transform cryptography by offering new security solutions and optimizing complex problems in logistics, drug design, and material simulation. However, technical challenges were also identified, such as decoherence and the need for quantum error correction, which must be addressed for quantum computing to become practical and reliable at



Palabras clave: Tecnología cuántica, unidades cuánticas (qubits), fenómenos de superposición, mejora en procesos, procedimientos cuánticos.

Keywords: Quantum technology, quantum units (qubits), superposition phenomena, process improvement, quantum procedures.

conclusion, while quantum computing remains an emerging field, its applications promise to revolutionize various sectors, and ongoing research and development efforts are crucial for overcoming technical hurdles and fully realizing its potential.

La computación cuántica, una de las fronteras más apasionantes y prometedoras de la ciencia y la tecnología, ha capturado la imaginación de investigadores y tecnólogos alrededor del mundo. Este campo emergente no solo representa un avance técnico significativo, sino también una oportunidad para redefinir nuestra comprensión de la información y el procesamiento de datos. Desde sus fundamentos teóricos hasta sus aplicaciones prácticas, la computación cuántica promete resolver problemas que son intratables para las computadoras tradicionales, ofreciendo una velocidad y eficiencia sin precedentes.

En los últimos años, se han producido importantes avances en el desarrollo de qubits, las unidades



básicas de la información cuántica, así como en la implementación de algoritmos cuánticos que pueden realizar tareas complejas con una velocidad impresionante. Empresas líderes en tecnología, como IBM, Google y Microsoft, junto con instituciones académicas de renombre, han invertido significativamente en la investigación y desarrollo de hardware y software cuántico, llevando a cabo experimentos pioneros que demuestran el poder potencial de estas máquinas.

Este artículo tiene como objetivo proporcionar una visión comprensiva del estado actual y las perspectivas futuras de la computación cuántica, basándose en una revisión exhaustiva de la literatura científica. Se abordan tanto los fundamentos teóricos como los avances experimentales recientes, destacando las aplicaciones prácticas en diversas áreas como la criptografía, la optimización y la simulación de sistemas complejos. Además, se discuten los desafíos que aún deben superarse para alcanzar la plena realización de la computación cuántica y las posibles direcciones del campo a futuro.

Al explorar estos temas, este estudio busca no solo informar a los académicos y profesionales del campo, sino también inspirar a una nueva generación de investigadores y entusiastas de la tecnología a unirse a esta emocionante travesía hacia el futuro de la computación. En un mundo donde la demanda de procesamiento de información es cada vez mayor, la computación cuántica ofrece una promesa de transformación radical, abriendo puertas a posibilidades que hoy solo podemos tener en mente.

Materiales y métodos

Este estudio se basa en la literatura científica existente sobre la computación cuántica, abarcando más de dos décadas de investigaciones. Se han utilizado diversas fuentes y recursos para la recopilación de información, incluyendo artículos de revistas científicas, libros de texto fundamentales, actas de conferencias y bases de datos académicas. Entre las revistas de alto impacto consultadas se encuentran Physical Review Letters, Nature Physics y Philosophical Transactions of the Royal Society A. Se revisaron obras clave como Quantum Computation and Quantum Information de Michael A. Nielsen e Isaac L. Chuang, así como presentaciones y trabajos presentados en conferencias destacadas de computación cuántica. Las bases de datos académicas utilizadas para acceder a la literatura relevante incluyen Google Scholar, IEEE Xplore y PubMed.

El enfoque metodológico de esta investigación se estructura en varias etapas clave. En primer lugar, se realizó una búsqueda y selección de literatura. Los criterios de inclusión se centraron en artículos y libros que abordaran avances teóricos y experimentales en computación cuántica, incluyendo modelos de computación, algoritmos, hardware y aplicaciones prácticas. Por otro lado, se excluyeron estudios preliminares con datos no concluyentes y publicaciones no revisadas por pares.

Se realizó una revisión sistemática de los textos seleccionados, categorizando la información en temas relevantes como modelos de computación cuántica, corrección de errores y aplicaciones específicas. A través de un análisis cualitativo, se identificaron tendencias y avances significativos, así como las contribuciones más relevantes de cada estudio. La síntesis de información incluyó la comparación de estudios para proporcionar una visión coherente y comprensiva del estado actual de la computación cuántica. Se identificaron los principales desafíos que enfrenta esta disciplina y se discutieron posibles direcciones futuras de investigación.

Se utilizaron herramientas de análisis bibliométrico y de texto para validar la calidad y relevancia de las publicaciones seleccionadas. Se emplearon software especializados como NVivo para el análisis cualitativo de contenido.

La población de estudio abarca la literatura científica publicada en el campo de la computación cuántica desde el año 2000 hasta la fecha. La muestra final incluyó 25 referencias consideradas fundamentales para comprender los avances y desafíos en este campo. Se utilizó una técnica de revisión sistemática, siguiendo las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Para el análisis comparativo y la síntesis de resultados, se implementaron procedimientos de codificación y categorización de información.

No se realizaron análisis estadísticos cuantitativos debido a la naturaleza cualitativa de la revisión. Sin embargo, se emplearon métodos descriptivos para resumir y presentar los hallazgos de manera clara y organizada. La revisión se organizó en varias categorías temáticas: fundamentos teóricos de la computación cuántica, modelos de computación cuántica, avances en hardware cuántico, algoritmos y aplicaciones cuánticas, corrección de errores y estabilidad, y desafíos actuales y futuras direcciones.



Resultados

Los resultados de este estudio subrayan el enorme potencial de la computación cuántica para revolucionar múltiples campos a través de sus aplicaciones en criptografía, optimización, y simulación de materiales. A partir de un análisis exhaustivo de la literatura académica relevante, se pueden destacar varias contribuciones clave que ilustran tanto los avances significativos como los desafíos actuales en el ámbito de la computación cuántica. El análisis cualitativo de las fuentes seleccionadas revela avances significativos en el campo de la computación cuántica, especialmente en áreas como la criptografía, la optimización y la simulación de materiales. Los estudios revisados destacan la capacidad de los algoritmos cuánticos, como el de Shor y el de Grover, para superar las limitaciones inherentes a la computación tradicional. En particular, el algoritmo de Shor ha demostrado una eficacia notable en la factorización de números grandes, lo que podría tener un impacto profundo en la criptografía, desafiando los métodos de encriptación actuales (Nielsen & Chuang, 2010; J. Zhang et al., 2023).

El artículo de (S. H. Zhang et al., 2021) subraya la relevancia del modelo de computación cuántica basado en medidas, que ofrece una alternativa viable y escalable al modelo tradicional de puertas cuánticas. Este modelo ha mostrado su potencial para la computación cuántica universal, siendo crucial para el desarrollo de algoritmos y esquemas de corrección de errores tolerantes a fallos.

En su artículo, (Nagy & Akl, 2006) ofrecen una panorámica exhaustiva sobre la computación cuántica y la información cuántica. El estudio introduce los principios fundamentales de la mecánica cuántica que permiten un procesamiento de información más eficiente y seguro. Se exploró cómo estos principios se aplican a áreas clave como la teoría de la información, la criptografía, los algoritmos, la complejidad computacional y la corrección de errores. El artículo también abordó las perspectivas futuras para la construcción de ordenadores cuánticos prácticos, proporcionando una visión detallada de los avances y los desafíos en el campo.

En particular, el modelo de computación cuántica basado en estados de cúmulos, revisado por (Golestan et al., 2023), presenta una aplicación innovadora en sistemas de energía. Este modelo, que utiliza estados cuánticos fijos y mediciones para procesar la información, subraya tanto el potencial como las limitaciones en el ámbito de la computación cuántica aplicada.

Los avances significativos en la tecnología de semiconductores, detallados por (X. Zhang et al., 2019) han revolucionado la manipulación de qubits, permitiendo un control y lectura más precisos y consistentes. Estos progresos no solo han facilitado la implementación de puertas lógicas cuánticas de alta fidelidad, sino que también han sido cruciales para el desarrollo de procesadores cuánticos programables. Al mejorar la escalabilidad y la eficiencia de los sistemas cuánticos, estos desarrollos están sentando las bases para el despliegue de arquitecturas cuánticas más complejas, capaces de superar las limitaciones de los enfoques tradicionales y de realizar cálculos que antes se consideraban inalcanzable.

En cuanto a la computación cuántica topológica, los trabajos de (Pachos & Simon, 2014) y (Nayak et al., 2008) exploran el uso de anyones no abelianos como una de las estrategias más prometedoras para desarrollar sistemas cuánticos resistentes a errores. Estas investigaciones resaltaron cómo las propiedades topológicas de la materia pueden ser aprovechadas para construir sistemas más robustos y seguros.

Uno de los aspectos más prometedores de la computación cuántica es su capacidad para superar las limitaciones de la computación tradicional, particularmente en la resolución de problemas complejos que requieren un procesamiento de datos masivo. Los algoritmos de Shor y Grover, en particular, han demostrado su eficacia teórica en la factorización de números grandes y en la búsqueda de bases de datos no estructuradas, respectivamente. Según (S. H. Zhang et al., 2021) estos algoritmos podrían transformar la criptografía moderna al hacer obsoletos muchos de los métodos criptográficos actuales basados en la dificultad de la factorización de números grandes. Esto sugiere una necesidad urgente de desarrollar nuevos métodos criptográficos resistentes a los ataques cuánticos, como la criptografía post-cuántica.

A pesar de los avances teóricos y experimentales, la computación cuántica enfrenta varios desafíos técnicos significativos. La decoherencia, provocada por la interacción de los qubits con su entorno, sigue siendo uno de los principales obstáculos para la implementación práctica de computadoras cuánticas. (D'Acunto, 2023) sugiere que una posible solución podría residir en el estudio de sistemas biológicos que utilizan la física cuántica de manera efectiva incluso en condiciones de ruido y temperaturas elevadas. Estos sistemas biológicos, como el ADN y las enzimas, podrían inspirar nuevas formas de mantener la coherencia cuántica y mejorar la robustez de los sistemas cuánticos., avanzando en la comprensión y



manipulación de sistemas biológicos para inspirar nuevas técnicas en la computación cuántica, abriendo una nueva perspectiva para superar los desafíos actuales, como la decoherencia y la corrección de errores.

El trabajo de (Fu et al., 2021) destaca la importancia de mantener condiciones de baja temperatura para mitigar los efectos de la decoherencia y el ruido térmico en los qubits. Sin embargo, este requisito plantea desafíos en términos de infraestructura y costos, lo que limita la escalabilidad de las tecnologías cuánticas.

El modelo de computación cuántica basado en medidas (MBQC) ha emergido como una alternativa viable al modelo de circuitos de puertas cuánticas, ofreciendo potencialmente una forma más eficiente de realizar computación cuántica universal. (S. H. Zhang et al., 2021) detallan cómo este modelo se basa en estados gráficos cuánticos y podría ser clave para desarrollar sistemas de computación cuántica escalables y tolerantes a fallos. Sin embargo, la implementación física de este modelo, como señalan (Kashif & Al-Kuwari, 2023) sigue enfrentando desafíos significativos, particularmente en la generación y manipulación de los estados gráficos requeridos.

La computación cuántica adiabática, revisada por (Aharonov et al., 2008) ha demostrado ser polinómicamente equivalente a la computación cuántica convencional, lo que sugiere que ambas estrategias podrían ser complementarias en la búsqueda de soluciones cuánticas a problemas complejos. Este hallazgo es significativo, ya que amplía las posibles vías de investigación y desarrollo en computación cuántica, permitiendo un enfoque más flexible y diversificado en el diseño de algoritmos cuánticos.

La corrección de errores cuánticos sigue siendo un área crítica de investigación, ya que la estabilidad y fidelidad de los sistemas cuánticos dependen en gran medida de la capacidad para manejar y corregir errores. (Bombín et al., 2023) proponen una nueva metodología para la implementación de bloques lógicos en la computación cuántica topológica, lo que podría mejorar significativamente la corrección de errores en estos sistemas. Este enfoque, basado en el uso de sistemas topológicos de materia, promete facilitar la realización de cálculos cuánticos complejos de manera más fiable y escalable.

El uso de átomos de Rydberg, como proponen (Cong et al., 2022), también ofrece una plataforma prometedora para la corrección de errores

cuánticos, aunque todavía enfrenta desafíos en términos de desintegración y errores correlacionados. El desarrollo de nuevas técnicas de corrección de errores, como las puertas de tipo "Rydberg Wire" descritas por (Jeong et al., 2022), podría ser clave para superar estos obstáculos y avanzar hacia sistemas cuánticos más robustos.

El campo de la computación cuántica está en constante evolución, y la investigación futura deberá abordar tanto los desafíos técnicos como explorar nuevas aplicaciones potenciales. (J. Zhang et al., 2023) sugieren que la computación cuántica geométrica y holonómica, que aprovecha propiedades geométricas intrínsecas en los espacios de estados cuánticos, podría ofrecer nuevas formas de resistencia a errores y aumentar la eficiencia de los cálculos cuánticos.

La integración de diferentes enfoques, como la computación cuántica de variables continuas revisada por (M. H. Wang et al., 2022) podría abrir nuevas vías para mejorar la precisión y estabilidad de los sistemas cuánticos. Estas investigaciones, junto con el desarrollo de nuevas metodologías y la aplicación de principios inspirados en la naturaleza, serán fundamentales para superar los desafíos actuales y realizar el pleno potencial de la computación cuántica.

Discusión

Los resultados obtenidos confirman que la computación cuántica se encuentra en una fase de rápida evolución, con aplicaciones potenciales que podrían revolucionar varios sectores. En criptografía, la posibilidad de que los algoritmos cuánticos rompan los esquemas de encriptación actuales subraya la urgencia de desarrollar nuevos métodos de seguridad cuántica (Nielsen & Chuang, 2010). Los algoritmos como el de Shor y el de Grover no solo han demostrado su capacidad para realizar cálculos más rápidos y eficientes en comparación con los métodos tradicionales, sino que también presentan un desafío significativo para la seguridad de la información, obligando a repensar y reforzar los sistemas de criptografía existentes (Pachos & Simon, 2014)

El impacto de estos avances también se extiende a la optimización de problemas complejos, como los relacionados con la logística y el diseño de fármacos, donde la velocidad y eficiencia de los algoritmos cuánticos pueden superar con creces las capacidades de los enfoques clásicos (S. H. Zhang et al., 2021; Aharonov et al., 2008). En logística, la capacidad de resolver problemas de optimización con mayor rapidez podría significar mejoras significativas en la



eficiencia de las cadenas de suministro y la gestión de recursos. En el diseño de fármacos, la simulación precisa de interacciones moleculares a nivel cuántico puede acelerar el desarrollo de nuevos medicamentos y tratamientos (Fu et al., 2021).

La simulación de materiales utilizando computación cuántica permite un análisis detallado de las propiedades físicas y químicas de los materiales a nivel atómico. Este enfoque tiene el potencial de revolucionar campos como la ciencia de materiales y la química cuántica, permitiendo el diseño de materiales con propiedades específicas y optimizadas para diversas aplicaciones industriales (Cong et al., 2022; Jeong et al., 2022).

Los modelos como la computación cuántica basada en estados de clúster, como revisa (Nielsen, 2006) y los estados de cúmulos analizados por Golestan et al. (2023), presentan tanto promesas como desafíos. Aunque estos modelos permiten la manipulación coherente de la información, ciertas limitaciones, como la simulación eficiente en sistemas clásicos, sugieren que no todos los modelos son igualmente viables para aplicaciones prácticas.

Un desafío destacado es el manejo del ruido en sistemas cuánticos, como analiza (Ortega et al., 2023). La evaluación de ordenadores cuánticos utilizando protocolos de comparación de estados cuánticos representa un enfoque crucial para superar estos obstáculos y mejorar la precisión en entornos ruidosos.

Es interesante también, la intersección entre la computación cuántica y la inteligencia artificial, explorada por (Ying, 2010), puesto que ofrece una perspectiva prometedora. Esta combinación podría abrir nuevas posibilidades para abordar problemas complejos que requieren una potencia de cálculo significativamente mayor que la disponible actualmente.

A pesar de estos prometedores avances, la computación cuántica enfrenta desafíos técnicos significativos.

Problemas como la descoherencia y la necesidad de corrección de errores cuánticos deben ser abordados para que esta tecnología sea práctica y confiable a gran escala (Chakrabarti et al., 2023). La implementación de mecanismos eficientes de corrección de errores y la creación de qubits más estables son áreas de investigación clave para superar estas barreras (Bombín et al., 2023; Sakaguchi et al., 2023).

Las aplicaciones prácticas de la computación cuántica también dependen de la capacidad para operar en condiciones de baja temperatura, necesarias para mantener la coherencia cuántica y reducir el ruido térmico (Wang et al., 2022). La creación de entornos experimentales adecuados y el desarrollo de nuevas tecnologías para operar a estas bajas temperaturas son esenciales para avanzar en este campo (Fu et al., 2021).

La inspiración derivada de los sistemas biológicos, que utilizan la física cuántica de manera efectiva incluso en condiciones ruidosas, podría proporcionar nuevas perspectivas y métodos para la computación cuántica. El estudio de biomoléculas como el ADN y las enzimas podría ofrecer soluciones innovadoras para superar algunos de los desafíos técnicos actuales (D'Acunto, 2023).

(DiVincenzo, 2000) identifica cinco requisitos esenciales para la implementación física de la computación cuántica. Primero, el sistema debe ser escalable, es decir, capaz de manejar un número creciente de cúbits sin comprometer la fidelidad de las operaciones. En segundo lugar, es crucial contar con un control de alta fidelidad, que permita manipular cúbits con una precisión extremadamente alta para ejecutar operaciones lógicas cuánticas. La corrección de errores es otro requisito fundamental, dado que el sistema debe poder corregir errores cuánticos que surjan durante el procesamiento. Los qubits deben estar adecuadamente aislados del entorno externo para reducir la descoherencia, y debe ser posible interconectar qubits de manera eficiente para llevar a cabo operaciones cuánticas complejas.

La 10th Anniversary Edition de Quantum Computation and Quantum Information de (Michael & Isaac, 2010) sigue siendo una referencia fundamental en el campo. Esta edición conmemorativa mantiene la estructura y el contenido original, proporcionando una introducción exhaustiva a los principios y técnicas de la computación cuántica. El libro abarca temas clave como el algoritmo de Shor, la criptografía cuántica, y la corrección de errores cuánticos, ofreciendo una base sólida para estudiantes e investigadores que buscan entender los fundamentos teóricos y los avances en estos campos emergentes.

El análisis de (Nielsen et al., 2002) subraya la importancia de esta obra como uno de los textos más citados en la física cuántica. Destaca su capacidad para introducir los principios de la mecánica cuántica y la informática cuántica, proporcionando una referencia integral para estudiantes y profesionales.



Aunque, (Y. Wang, 2012) reafirma la posición del libro como una de las referencias más influyentes, destacando su valor continuo en el estudio de la computación cuántica y su contribución al desarrollo de nuevas tecnologías en el campo.

Conclusión

La computación cuántica está en constante evolución, ofreciendo soluciones innovadoras y desafiantes para superar las limitaciones de la tecnología clásica. El modelo de computación cuántica basada en medidas (MBQC) presenta ventajas significativas al simplificar la corrección de errores, pero enfrenta retos importantes en la generación y mantenimiento de estados entrelazados, lo que requiere avances en tecnología y protocolos.

La computación cuántica topológica, que utiliza anyones no abelianos, ofrece un alto potencial para sistemas robustos y tolerantes a fallos, aunque aún enfrenta desafíos experimentales. La investigación en materiales y técnicas para el control de anyones será crucial para su avance. La biomimética, inspirada en la eficiencia de sistemas biológicos, podría proporcionar nuevas estrategias para abordar la decoherencia y mejorar la estabilidad de los qubits en entornos ruidosos.

El recocido cuántico ha mostrado avances en la optimización y resolución de problemas complejos, pero su implementación a gran escala requiere mejorar el control y la reducción de errores. Los átomos de Rydberg ofrecen un enfoque prometedor para el entrelazamiento cuántico, con avances recientes en corrección de errores, aunque se necesitan mejoras adicionales en la implementación y el control.

La computación cuántica basada en semiconductores continúa avanzando en la manipulación de qubits. A pesar de los desafíos, sigue siendo una opción viable para la información cuántica, con la investigación futura enfocada en superar los problemas actuales y desarrollar sistemas prácticos y escalables.

Referencias

- Aharonov, D., Van Dam, W., Kempe, J., Landau, Z., Lloyd, S., & Regev, O. (2008). Adiabatic quantum computation is equivalent to standard quantum computation. *En SIAM Review* (Vol. 50, Número 4).
<https://doi.org/10.1137/080734479>
- Bombín, H., Dawson, C., Mishmash, R. V., Nickerson, N., Pastawski, F., & Roberts, S. (2023). Logical Blocks for Fault-Tolerant Topological Quantum Computation. *PRX Quantum*, 4(2).
<https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.4.020303>
- Chakrabarti, B. K., Leschke, H., Ray, P., Shirai, T., & Tanaka, S. (2023). Quantum annealing and computation: Challenges and perspectives. *En Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 381, Número 2241).
<https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0419>
- Cong, I., Levine, H., Keesling, A., Bluvstein, D., Wang, S. T., & Lukin, M. D. (2022). Hardware-Efficient, Fault-Tolerant Quantum Computation with Rydberg Atoms. *Physical Review X*, 12(2).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevX.12.021049>
- D'Acunto, M. (2023). Quantum Computation by Biological Systems. *IEEE Transactions on Molecular, Biological, and Multi-Scale Communications*, 9(2).
<https://doi.org/10.1109/TMBMC.2023.3272230>
- DiVincenzo, D. P. (2000). The physical implementation of quantum computation. *En Fortschritte der Physik* (Vol. 48, Números 9–11).
[https://doi.org/10.1002/1521-3978\(200009\)48:9/11<771::AID-PROP771>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1521-3978(200009)48:9/11<771::AID-PROP771>3.0.CO;2-E)
- Fu, H., Wang, P., Hu, Z., Li, Y., & Lin, X. (2021). Low-temperature environments for quantum computation and quantum simulation. *En Chinese Physics B* (Vol. 30, Número 2).
<https://doi.org/10.1088/1674-1056/abd762>
- Golestan, S., Habibi, M. R., Mousazadeh Mousavi, S. Y., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2023). Quantum computation in power systems: An overview of recent advances. *En Energy Reports* (Vol. 9).
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.185>
- leong, S., Shi, X. F., Kim, M., & Ahn, J. (2022). Rydberg Wire Gates for Universal Quantum Computation. *Frontiers in Physics*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fphy.2022.875673>



Kashif, M., & Al-Kuwari, S. (2023). Physical Realization of Measurement Based Quantum Computation. En *IEEE Access* (Vol. II).
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3289005>

Michael, A. N., & Isaac, L. C. (2010). Quantum Computation and Quantum Information 10th Anniversary Edition. En Cambridge University Press.

Nagy, M., & Akl, S. G. (2006). Quantum computation and quantum information. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 21(1).
<https://doi.org/10.1080/17445760500355678>

Nayak, C., Simon, S. H., Stern, A., Freedman, M., & Das Sarma, S. (2008). Non-Abelian anyons and topological quantum computation. *Reviews of Modern Physics*, 80(3).
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.80.1083>

Nielsen, M. A. (2006). Cluster-state quantum computation. *Reports on Mathematical Physics*, 57(1).
[https://doi.org/10.1016/S0034-4877\(06\)80014-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4877(06)80014-5)

Nielsen, M. A., Chuang, I., & Grover, L. K. (2002). Quantum Computation and Quantum Information. *American Journal of Physics*, 70(5).
<https://doi.org/10.1119/1.1463744>

Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). Quantum Computation and Quantum Information by Michael A. Nielsen. En Cambridge Core.

Ortega, A., Kálmán, O., & Kiss, T. (2023). Testing quantum computers with the protocol of quantum state matching. *Physica Scripta*, 98(2).
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/acb2ff>

Pachos, J. K., & Simon, S. H. (2014). Focus on topological quantum computation. En *New Journal of Physics* (Vol. 16).
<https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/6/065003>

Sakaguchi, A., Konno, S., Hanamura, F., Asavanant, W., Takase, K., Ogawa, H., Marek, P., Filip, R., Yoshikawa, J. ichi, Huntington, E., Yonezawa, H., & Furusawa, A. (2023). Nonlinear feedforward enabling quantum computation. *Nature Communications*, 14(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-39195-w>

Wang, M. H., Hao, S. H., Qin, Z. Z., & Su, X. L. (2022). Research advances in continuous-variable quantum computation and quantum error correction. *Wuli Xuebao/Acta Physica Sinica*, 71(16).
<https://doi.org/10.7498/aps.71.20220635>

Wang, Y. (2012). Quantum computation and quantum information. *Statistical Science*, 27(3).
<https://doi.org/10.1214/11-STS378>

Ying, M. (2010). Quantum computation, quantum theory and AI. En *Artificial Intelligence* (Vol. 174, Número 2).
<https://doi.org/10.1016/j.artint.2009.11.009>

Zhang, J., Kyaw, T. H., Filipp, S., Kwek, L. C., Sjöqvist, E., & Tong, D. (2023). Geometric and holonomic quantum computation. En *Physics Reports* (Vol. 1027).
<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2023.07.004>

Zhang, S. H., Zhang, X. D., & Li, L. Z. (2021). Research progress of measurement-based quantum computation. En *Wuli Xuebao/Acta Physica Sinica* (Vol. 70, Número 21).
<https://doi.org/10.7498/aps.70.20210923>

Zhang, X., Li, H. O., Cao, G., Xiao, M., Guo, G. C., & Guo, G. P. (2019). Semiconductor quantum computation. En *National Science Review* (Vol. 6, Número 1).
<https://doi.org/10.1093/nsr/nwyl53>

