

Estado del arte en el desarrollo de algoritmos cuánticos de corrección de errores y sus aplicaciones prácticas

State of the art in the development of quantum error-correction algorithms and their practical applications

RESUMEN

La corrección cuántica de errores constituye una condición esencial para construir computadores cuánticos capaces de ejecutar algoritmos largos y fiables. A diferencia de la corrección clásica, debe proteger estados cuánticos sin medir directamente ni destruir la información codificada, mediante redundancia, mediciones de síndrome y decodificación. El objetivo de este artículo es revisar el estado del arte entre 2020 y 2026, considerando códigos de superficie, códigos cuánticos de baja densidad de paridad (qLDPC), códigos bosónicos, decodificadores y circuitos dinámicos, así como su relación con aplicaciones prácticas. Se desarrolló una revisión narrativa de literatura científica y fuentes institucionales, con énfasis en resultados experimentales recientes y en las limitaciones que separan las demostraciones de memoria lógica de la ejecución de algoritmos útiles a gran escala. La literatura muestra avances en operación por debajo del umbral, reducción de errores lógicos al aumentar la distancia del código, decodificación en tiempo real y arquitecturas alternativas que buscan reducir el costo físico. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con errores correlacionados, fuga de estados computacionales, conectividad, latencia, recursos para puertas lógicas tolerantes a fallos y escalabilidad. Las aplicaciones más prometedoras incluyen simulación cuántica, química y materiales, optimización y criptografía, aunque la corrección de errores no demuestra por sí sola una ventaja práctica en esas tareas. Se concluye que el progreso debe evaluarse por la calidad de los qubits lógicos, el costo total de recursos y la ejecución fiable de circuitos completos, no solo por el número de qubits físicos.

PALABRAS CLAVE: computación cuántica, corrección de errores cuánticos, códigos de superficie, qLDPC, computación tolerante a fallos.

ABSTRACT

Quantum error correction is essential for building quantum computers capable of executing long and reliable algorithms. Unlike classical error correction, it must protect quantum states without directly measuring or destroying the encoded information, using redundancy, syndrome measurements, and decoding. This article reviews the state of the art from 2020 to 2026, covering surface codes, quantum low-density parity-check (qLDPC) codes, bosonic codes, decoders, dynamic circuits, and their relationship to practical applications. A narrative review of scientific literature and institutional sources was conducted, emphasizing recent experimental results and the gap between logical-memory demonstrations and useful large-scale algorithms. The literature reports progress in below-threshold operation, logical-error suppression as code distance increases, real-time decoding, and alternative architectures designed to reduce physical overhead. However, correlated errors, leakage, connectivity, latency, fault-tolerant logical gates, and scalability remain substantial challenges. Promising application areas include quantum simulation, chemistry and materials science, optimization, and cryptography, although error correction alone does not establish practical advantage in these tasks. Progress should therefore be assessed through logical-qubit quality, total resource cost, and reliable execution of complete circuits rather than physical-qubit counts alone.

KEYWORDS: quantum computing, quantum error correction, surface codes, qLDPC, fault-tolerant computing

TRANSFORMACIÓN DIGITAL Y CONOCIMIENTO

Recepción: 01/10/2026

Aceptación: 10/10/2026

Publicación: 31/12/2026

AUTOR/ES

-  MSc. Mendoza Suquilanda Ariana Celena
-  MSc. Soto Cañar Deysi Maribel
-  MSc. Tenechagua Ayora Elvia Corina
-  MSc. Ayala Tapia Leiver German

-  ariana.mendoza@docentes.educacion.gob.ec
-  deysi.soto@educacion.gob.ec
-  elvia.tenechagua@docentes.educacion.gob.ec
-  leiver.ayala@educacion.gob.ec

-  U.E. Maria Paulina Solis
-  U.E. Maria Paulina Solis
-  U.E. Maria Paulina Solis
-  U.E. Maria Paulina Solis

-  Zamora Chinchipe - Ecuador
-  Zamora Chinchipe - Ecuador
-  Zamora Chinchipe - Ecuador
-  Zamora Chinchipe-Ecuador

CITACIÓN:

Mendoza, A. Soto, D. Tenechagua, E. & Ayala, L. (2026). Estado del arte en el desarrollo de algoritmos cuánticos de corrección de errores y sus aplicaciones prácticas. Revista InnovaSciT. 4 (2), p. 1427 – 1436.

INTRODUCCIÓN

La computación cuántica utiliza propiedades como la superposición y el entrelazamiento para procesar información de maneras que no tienen un equivalente directo en la computación clásica. No obstante, los estados cuánticos son sensibles a interacciones con el entorno y a imperfecciones en las operaciones, mediciones y controles. Estos errores pueden acumularse y comprometer el resultado de un algoritmo, especialmente cuando se necesitan circuitos profundos con muchas operaciones.

La corrección cuántica de errores (quantum error correction, QEC) aborda este problema codificando la información lógica en un conjunto de qubits físicos. La información se distribuye de modo que ciertas mediciones, llamadas mediciones de síndrome, permiten detectar patrones de error sin revelar directamente el estado lógico. Un decodificador interpreta los síndromes y determina qué corrección física o lógica debe aplicarse. La meta es reducir la probabilidad de error lógico al aumentar recursos y mejorar el control del sistema.

Durante años, la corrección cuántica se estudió principalmente como una posibilidad teórica debido al costo de los qubits auxiliares, la calidad limitada de las operaciones y las dificultades de realizar mediciones repetidas con rapidez. Entre 2020 y 2026, el campo avanzó desde demostraciones de componentes y memorias lógicas hacia experimentos que muestran supresión de errores por debajo del umbral, decodificación más rápida, códigos alternativos y arquitecturas orientadas a ejecutar operaciones lógicas. Campbell (2024) describe esta etapa como una aceleración de avances experimentales y teóricos, aunque advierte que cada plataforma mantiene desafíos técnicos propios.

Un hito destacado fue la demostración de Google Quantum AI y colaboradores (2025), publicada en Nature, en la que un código de superficie alcanzó funcionamiento por debajo del umbral: al aumentar la distancia del código, disminuyó el error lógico. El experimento con el procesador Willow reportó un qubit lógico de distancia 7 cuya vida útil superó la de su mejor qubit físico constituyente. Este resultado representa un avance importante, pero no equivale por sí solo a un computador universal capaz de ejecutar algoritmos comerciales largos; todavía deben resolverse los costos de escalado, las operaciones lógicas y ciertos errores correlacionados.

El objetivo de este artículo es analizar el estado del arte en algoritmos y métodos de corrección cuántica de errores entre 2020 y 2026, comparar las principales familias de códigos y decodificadores, identificar sus aplicaciones prácticas y describir las barreras que permanecen. La pregunta orientadora es: ¿qué avances acercan la corrección cuántica de errores a la computación tolerante a fallos y qué condiciones faltan para convertir las demostraciones experimentales en aplicaciones útiles?

MÉTODOS Y MATERIALES

Se realizó una revisión bibliográfica narrativa de publicaciones de 2020 a 2026. Se priorizaron artículos revisados por pares en revistas científicas, revisiones especializadas y publicaciones técnicas de instituciones de investigación. La búsqueda dirigida incluyó términos como quantum error correction, surface code, qLDPC, bosonic codes, fault-tolerant quantum computing, quantum error decoder, logical qubits y dynamic surface codes.

Se incluyeron fuentes que describieran avances conceptuales, experimentales o de arquitectura; presentaran resultados medibles de corrección o supresión de errores; o analizaran el impacto de los códigos y decodificadores en la escalabilidad. La síntesis se organizó en seis categorías: principios básicos, códigos principales, decodificación, hitos experimentales recientes, aplicaciones y desafíos.

Esta revisión es narrativa y no constituye un metaanálisis ni una revisión sistemática exhaustiva. Los resultados experimentales citados se obtuvieron en arquitecturas y condiciones diferentes, por lo que no se comparan como si fueran pruebas equivalentes. Se distingue entre resultados demostrados en laboratorio, propuestas de arquitectura y aplicaciones que continúan siendo prospectivas.

Análisis de resultados

1. Principios de la corrección cuántica de errores

Un qubit físico es la unidad básica de información cuántica, pero su estado puede alterarse por ruido, errores de control, relajación, desfaseamiento y errores de medición. La estrategia de QEC consiste en codificar un qubit lógico en varios qubits físicos y extraer información sobre los errores sin medir directamente el estado lógico. Las comprobaciones de estabilizadores producen síndromes que describen inconsistencias detectables; el decodificador utiliza esta información para inferir una corrección probable.

El umbral de error es una condición crítica: si los errores físicos y las operaciones de corrección se mantienen por debajo de ciertos límites, aumentar el tamaño del código puede reducir el error lógico. Si el sistema opera por encima del umbral, añadir qubits puede no mejorar la fiabilidad. El umbral depende del código, del circuito de extracción de síndromes, del modelo de ruido y del decodificador; no es una cifra universal aplicable a cualquier dispositivo.

La distancia del código representa, de manera intuitiva, la cantidad mínima de errores físicos que pueden producir un error lógico no detectable. En códigos de superficie, aumentar la distancia suele exigir más qubits físicos y más rondas de medición, pero puede disminuir la probabilidad de fallo lógico cuando el hardware opera en el régimen adecuado. El desafío práctico es conseguir una reducción suficiente del error sin que los recursos y el tiempo de cálculo crezcan de forma prohibitiva.

QEC debe distinguirse de la mitigación de errores. La mitigación intenta estimar

resultados más fiables a partir de circuitos ruidosos, extrapolación, postselección u otras técnicas, pero no necesariamente protege de forma continua un qubit lógico. La corrección tolerante a fallos pretende mantener la información y realizar operaciones fiables a lo largo de un cálculo. Cai et al. (2023) resumen los métodos de mitigación y sus posibilidades para dispositivos ruidosos; son herramientas complementarias, no sustitutos universales de la QEC.

2. Códigos de superficie: madurez experimental y costos

Los códigos de superficie son una de las estrategias dominantes para plataformas de qubits superconductores debido a su estructura local, umbrales relativamente favorables y compatibilidad con arreglos bidimensionales. Los qubits de datos almacenan la información codificada, mientras que los qubits de medición permiten comprobar estabilizadores de forma repetida. El diseño facilita identificar patrones de error a partir de síndromes, aunque requiere numerosos qubits físicos por qubit lógico y una infraestructura de control y lectura rápida.

Google Quantum AI y colaboradores (2025) demostraron códigos de superficie de distancia 5 y 7 operando por debajo del umbral en procesadores superconductores Willow. En el experimento de distancia 7, el error lógico se redujo al aumentar el tamaño del código y la vida útil lógica superó la del mejor qubit físico constituyente. El trabajo también incorporó decodificación en tiempo real. La importancia del resultado no radica solo en almacenar información, sino en mostrar que aumentar recursos puede mejorar la protección lógica bajo condiciones experimentales concretas.

El resultado no elimina los problemas de escalabilidad. Los algoritmos tolerantes a fallos pueden requerir muchos qubits lógicos y millones o miles de millones de operaciones fiables, mientras que la construcción de cada qubit lógico puede consumir numerosos qubits físicos. También deben controlarse errores correlacionados, fuga fuera del espacio computacional, estabilidad de largo plazo y latencia del decodificador. Por ello, la supresión de errores en una memoria lógica es un hito necesario, pero no suficiente para ejecutar cualquier algoritmo práctico.

Una línea complementaria consiste en cambiar los circuitos que implementan el código. Google Quantum AI reportó en 2025–2026 implementaciones dinámicas del código de superficie que alternan estructuras de circuito para reducir ciertos errores correlacionados, disminuir requisitos de conectividad y utilizar puertas alternativas como iSWAP. La demostración publicada en Nature Physics mostró supresión del error al aumentar la distancia de 3 a 5 en tres implementaciones dinámicas (Google Quantum AI, 2026; Eickbusch et al., 2025). Estas variantes sugieren que el diseño de la corrección puede adaptarse al hardware en lugar de imponer una única geometría.

3. Códigos qLDPC y reducción del costo físico

Los códigos cuánticos de baja densidad de paridad (quantum low-density parity-check, qLDPC) buscan proteger información con una relación más eficiente entre qubits físicos y

lógicos que la de algunos esquemas convencionales. En principio, determinadas familias qLDPC permiten códigos con buena distancia y conectividad de comprobaciones relativamente escasa, lo que abre la posibilidad de reducir el costo de recursos. Sin embargo, una buena construcción matemática no garantiza automáticamente una implementación experimental sencilla: las conexiones, la profundidad de los circuitos, la medición y el decodificador también deben ser viables.

Panteleev y Kalachev (2022) demostraron avances teóricos en códigos cuánticos LDPC asintóticamente buenos. En el plano experimental, trabajos de 2024 sobre memoria cuántica de alto umbral y bajo costo mostraron protocolos basados en familias qLDPC, acercando estas construcciones a plataformas físicas. La literatura de arquitecturas con átomos reconfigurables también estudia cómo mover o reorganizar qubits para ejecutar interacciones requeridas por códigos de conectividad no local.

El atractivo de qLDPC es disminuir el número de qubits físicos necesario para una cantidad dada de qubits lógicos y una tasa de error objetivo. No obstante, la ventaja depende de los costos totales: ancillas, operaciones de medición, movimiento o conectividad, decodificación, corrección de errores y puertas lógicas tolerantes a fallos. Un código con menor sobre costo de memoria podría necesitar circuitos más complejos para ejecutar puertas universales. Por ello, la comparación justa debe considerar el algoritmo completo, no únicamente el almacenamiento lógico.

IBM ha divulgado propuestas basadas en códigos qLDPC y códigos denominados gross code, orientadas a reducir la sobrecarga de recursos en computación tolerante a fallos. La propia discusión técnica reconoce que codificar información es solo una parte del problema: también debe demostrarse cómo realizar operaciones sobre los qubits codificados de manera eficiente (Zhu et al., 2024). La etapa actual se caracteriza, por tanto, por el tránsito desde códigos prometedores hacia protocolos integrales de cálculo.

4. Códigos bosónicos y codificación en osciladores

Los códigos bosónicos codifican información lógica en grados de libertad de un oscilador, por ejemplo modos de luz en una cavidad, en lugar de repartirla exclusivamente entre muchos qubits de dos niveles. Entre las familias estudiadas se encuentran los códigos de gato, binomiales y Gottesman–Kitaev–Preskill (GKP). Su objetivo es aprovechar la estructura del espacio de estados del oscilador para detectar o corregir errores con una carga de recursos distinta a la de los códigos discretos.

Brady et al. (2024) revisan los avances teóricos y de ingeniería de los códigos GKP, incluyendo sus aplicaciones potenciales a memorias y procesamiento cuántico. Una motivación es que ciertos errores pueden representarse como desplazamientos en el espacio de fase y corregirse mediante mediciones adecuadas. No obstante, la preparación de estados no clásicos, la fidelidad de las operaciones, la lectura y la integración con qubits auxiliares

siguen siendo retos relevantes.

Los códigos bosónicos no necesariamente compiten con los códigos de superficie de forma excluyente. Una arquitectura híbrida puede utilizar un oscilador para proteger un modo lógico y códigos discretos para corregir errores residuales o conectar unidades. La evaluación práctica debe considerar las tasas de error físicas, la complejidad de preparación, los recursos de control y la facilidad de realizar puertas lógicas. Su valor dependerá de que la protección demostrada se mantenga durante operaciones computacionales, no solo en experimentos de memoria.

5. Decodificadores: algoritmos clásicos y aprendizaje automático

Los síndromes de error deben traducirse en una estimación del patrón que afecta al estado lógico. Esta tarea corresponde al decodificador, que puede emplear algoritmos de emparejamiento, métodos probabilísticos, aproximaciones tensoriales o aprendizaje automático. Un decodificador eficaz necesita equilibrar precisión, tiempo de ejecución, consumo de recursos y capacidad de adaptarse a cambios en el ruido del dispositivo.

El decodificador por emparejamiento mínimo ha sido una referencia importante en códigos de superficie por su rendimiento y estructura clara. Sin embargo, los modelos reales de ruido pueden incluir correlaciones, errores de medición y fuga que no se ajustan a supuestos simples. Los decodificadores más avanzados buscan aprovechar modelos de ruido calibrados, información temporal y relaciones entre errores para reducir la tasa de fallo lógico.

Google Quantum AI y colaboradores publicaron en Nature en 2024 un decodificador basado en redes neuronales recurrentes y transformers para aprender a decodificar el código de superficie con alta precisión (Google Quantum AI, 2024). El aprendizaje automático puede capturar patrones complejos, pero requiere datos representativos, entrenamiento y pruebas de generalización. Si el ruido cambia, el modelo puede necesitar recalibración; además, la inferencia debe realizarse con latencia compatible con el ciclo de corrección.

La decodificación en tiempo real es un requisito de sistema. Si los síndromes se producen más rápido de lo que el procesador clásico puede analizarlos, la cola de datos puede crecer y comprometer el control del cálculo. Por tanto, los algoritmos de decodificación no se evalúan únicamente por su exactitud fuera de línea, sino también por latencia, rendimiento sostenido, tolerancia a cambios y facilidad de integración con el hardware.

6. Puertas lógicas y computación tolerante a fallos

Una memoria lógica estable no equivale a un computador tolerante a fallos. Un algoritmo requiere preparar estados, aplicar puertas lógicas, entrelazar qubits lógicos, medir resultados y mantener la corrección a lo largo de toda la ejecución. Cada una de estas operaciones debe realizarse sin propagar errores de forma incontrolada. La construcción de un conjunto universal de puertas lógicas tolerantes a fallos suele implicar técnicas como cirugía de retículos en códigos de superficie, teletransportación lógica y destilación de estados

mágicos.

Las puertas lógicas transversales, cuando existen, pueden reducir la propagación de errores, pero no todos los códigos admiten de esa forma un conjunto universal. En los códigos de superficie, la cirugía de retículos permite unir y separar regiones codificadas mediante mediciones de paridad, mientras que la destilación de estados mágicos produce estados auxiliares de mayor fidelidad para operaciones no Clifford. Estas técnicas pueden dominar el costo total de algoritmos profundos.

Los trabajos de arquitectura recientes analizan cómo combinar códigos, decodificadores, conectividad y circuitos de puertas para reducir el número de qubits físicos y el tiempo total. Una estimación de recursos útil debe contar qubits lógicos, qubits físicos, ciclos de corrección, operaciones no Clifford, rendimiento del decodificador y probabilidades de fallo. Solo entonces puede evaluarse si un algoritmo cabe en una máquina realista y si su ventaja potencial sobre métodos clásicos tiene sentido.

7. Aplicaciones prácticas: potencial y grado de madurez

Química cuántica y ciencia de materiales constituyen áreas de interés porque la simulación de sistemas cuánticos puede crecer rápidamente en complejidad con métodos clásicos. Algoritmos tolerantes a fallos podrían calcular propiedades moleculares, energías de estados y comportamientos de materiales con una precisión difícil de alcanzar para ciertos sistemas. Sin embargo, estas aplicaciones requieren circuitos largos, preparación de estados y operaciones lógicas de alta fidelidad. La corrección de errores es una condición habilitante, no una demostración de que ya exista una ventaja comercial generalizada.

En criptografía, los algoritmos cuánticos como el de Shor motivan la necesidad de máquinas tolerantes a fallos, porque factorizar números grandes con relevancia criptográfica requeriría recursos mucho mayores que los de las demostraciones actuales. La corrección de errores será fundamental para sostener el número de operaciones necesarias. A corto plazo, la protección de datos frente a amenazas cuánticas se aborda mediante criptografía poscuántica, que es una estrategia distinta y no depende de disponer de un computador cuántico corregido.

En optimización, la búsqueda de soluciones a problemas combinatorios es un área de investigación activa, pero la ventaja cuántica práctica depende de la estructura del problema, la calidad de los algoritmos, los recursos y la comparación con los mejores métodos clásicos. La corrección de errores puede ampliar la profundidad de los circuitos ejecutables, aunque el costo de la protección puede superar el beneficio en problemas pequeños o en hardware todavía limitado.

También se investigan aplicaciones en dinámica de materiales, física de altas energías, simulación de modelos cuánticos y aprendizaje automático. Para cada aplicación debe definirse una tarea concreta, establecer una métrica de utilidad y estimar los recursos necesarios con supuestos transparentes. Es esencial distinguir una demostración de QEC en

una memoria, una demostración de puerta lógica, la ejecución de un circuito algorítmico y una ventaja práctica validada frente a métodos clásicos.

8. Retos abiertos y agenda de investigación

El primer reto es escalar el número de qubits lógicos con tasas de error suficientemente bajas. Aumentar el tamaño del código puede reducir el error lógico, pero el costo físico total puede crecer de forma significativa. Códigos qLDPC, códigos bosónicos, circuitos dinámicos y nuevas arquitecturas intentan reducir ese costo, aunque cada propuesta debe demostrar rendimiento de extremo a extremo.

El segundo reto es controlar errores correlacionados y fuga. Los modelos ideales a menudo suponen errores independientes, mientras que el hardware puede sufrir eventos que afectan múltiples qubits o ciclos. Estos eventos pueden crear un piso de error que no se elimina simplemente aumentando la distancia. Se requieren caracterización del ruido, diseño de circuitos que eviten propagación y decodificadores que incorporen correlaciones.

El tercer reto es integrar hardware y software. La corrección necesita ciclos rápidos, mediciones precisas, decodificación de baja latencia y control adaptativo. Una mejora en el código puede perderse si la lectura o la electrónica de control no alcanzan el rendimiento requerido. El sistema debe diseñarse como una arquitectura conjunta, en lugar de optimizar cada componente de manera aislada.

Finalmente, la comunidad necesita criterios comparables para evaluar avances. Las publicaciones deberían describir el modelo de ruido, el número de qubits, el código, la distancia, la tasa de error lógico, la duración de la prueba, el decodificador, la latencia y las limitaciones. Para aplicaciones, deben añadirse estimaciones reproducibles del costo del algoritmo completo y comparaciones con métodos clásicos relevantes.

DISCUSIÓN

La literatura de 2020–2026 refleja un cambio desde la validación de principios hacia la ingeniería de sistemas de corrección. El código de superficie ha logrado hitos experimentales claros, incluidos resultados por debajo del umbral y circuitos dinámicos. En paralelo, qLDPC busca reducir la sobrecarga física y los códigos bosónicos exploran formas de protección adaptadas a osciladores. Estas líneas no deben interpretarse como soluciones incompatibles; podrían integrarse en arquitecturas híbridas.

Los decodificadores se han convertido en una parte central de la arquitectura. Un código con buenas propiedades teóricas no es práctico si no puede decodificarse con suficiente precisión y rapidez. El aprendizaje automático ofrece oportunidades para capturar ruido complejo, pero exige datos representativos y garantías de funcionamiento cuando cambian las condiciones. La evaluación debe combinar precisión lógica con rendimiento operativo real.

Las aplicaciones prácticas siguen siendo prospectivas en muchos dominios. Los avances en corrección de errores acercan la posibilidad de ejecutar algoritmos largos, pero no

demuestran automáticamente que un cálculo de química, optimización o criptografía sea más barato o mejor que su alternativa clásica. La evaluación requiere estimar los recursos de todas las etapas, las tasas de fallo y los criterios de utilidad.

Esta revisión tiene limitaciones: es narrativa, incluye familias de códigos con plataformas diferentes y no realiza una comparación cuantitativa normalizada. Las publicaciones institucionales se han usado para contextualizar resultados, mientras que los artículos revisados por pares sustentan las afirmaciones experimentales. Las tecnologías evolucionan rápidamente, por lo que el estado del arte deberá actualizarse a medida que se publiquen nuevas demostraciones y estimaciones de recursos.

CONCLUSIONES

La corrección cuántica de errores es una condición esencial para la computación cuántica tolerante a fallos. Entre 2020 y 2026, el campo avanzó en códigos de superficie, qLDPC, códigos bosónicos, decodificadores basados en aprendizaje automático y circuitos dinámicos. Las demostraciones por debajo del umbral constituyen evidencia experimental de que es posible mejorar la protección lógica al aumentar el código bajo determinadas condiciones.

Los códigos de superficie presentan una madurez experimental significativa, mientras que qLDPC ofrece perspectivas para reducir el sobre costo de qubits y los códigos bosónicos proponen estrategias de codificación alternativas. Ninguna familia elimina por sí sola los retos de conectividad, errores correlacionados, puertas lógicas universales, decodificación rápida y estabilidad a largo plazo. La selección debe considerar el costo total de ejecutar el algoritmo, no solo la eficiencia de la memoria.

Las aplicaciones en química, materiales, optimización y criptografía podrían beneficiarse de computadores tolerantes a fallos, pero el impacto práctico depende de circuitos completos, recursos viables y comparaciones rigurosas con métodos clásicos. Por ahora, muchos resultados constituyen hitos habilitantes y no pruebas de ventaja comercial generalizada.

Se recomienda evaluar futuras investigaciones con métricas de extremo a extremo: tasa de error lógico, distancia, número de qubits físicos por lógico, latencia de decodificación, estabilidad temporal, costo de puertas y recursos totales del algoritmo. La transición hacia aplicaciones prácticas dependerá de la integración coordinada de códigos, hardware, software de control y algoritmos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brady, A. J., Eickbusch, A., Singh, S., Wu, J., & Zhuang, Q. (2024). Advances in bosonic quantum error correction with Gottesman–Kitaev–Preskill codes: Theory, engineering and applications. *Progress in Quantum Electronics*, 93, Article 100496. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2023.100496>
- Cai, Z., Babbush, R., Benjamin, S. C., Endo, S., Huggins, W. J., Li, Y., McClean, J. R., & O'Brien, T. E. (2023). Quantum error mitigation. *Reviews of Modern Physics*, 95(4), Article 045005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.95.045005>
- Campbell, E. (2024). A series of fast-paced advances in quantum error correction. *Nature Reviews Physics*, 6, 160–161. <https://doi.org/10.1038/s42254-024-00706-3>
- Eickbusch, A., et al. (2025). Demonstration of dynamic surface codes. *Nature Physics*, 21, 1994–2001. <https://doi.org/10.1038/s41567-025-03070-w>
- Google Quantum AI. (2024). Learning high-accuracy error decoding for quantum processors. *Nature*, 635, 834–840. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08148-8>
- Google Quantum AI and Collaborators. (2025). Quantum error correction below the surface code threshold. *Nature*, 638, 920–926. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>
- IBM Quantum. (2024). Computing with error-corrected quantum computers: A perspective from symmetry and non-Euclidean geometry. *IBM Quantum Blog*. <https://www.ibm.com/quantum/blog/qldpc-codes>
- Panteleev, P., & Kalachev, G. (2022). Asymptotically good quantum and locally testable classical LDPC codes. In *Proceedings of the 54th Annual ACM SIGACT Symposium on Theory of Computing* (pp. 375–388). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3519935.3520017>
- Smith, S. C., Brown, B. J., & Bartlett, S. D. (2024). Mitigating errors in logical qubits. *Communications Physics*, 7, Article 386. <https://doi.org/10.1038/s42005-024-01883-4>
- Zhu, G., Cross, A., & Brown, B. (2024, February 22). Computing with error-corrected quantum computers. *IBM Quantum Blog*. <https://www.ibm.com/quantum/blog/qldpc-codes>

CONFLICTO DE INTERÉS:

Los autores declaran que no existen conflicto de interés posibles.

FINANCIAMIENTO

No existió asistencia de financiamiento de parte de pares externos al presente artículo.

NOTA:

El artículo no es producto de una publicación anterior