www.elementos.buap.mx

Acerca de las compuertas lógicas cuánticas más rápidas y precisas

Giselle N. **Morales Rosales**
Manuel **Ávila Aoki**

La computación cuántica es una disciplina emergente que promete revolucionar la forma en que se procesa la información. Las computadoras cuánticas tienen la capacidad de llevar a cabo determinadas tareas computacionales a una velocidad mucho más rápida que las computadoras clásicas (Wang *et al*., 2022). En el ámbito de la computación cuántica, las escalas de tiempo pueden ser extremadamente pequeñas: desde milisegundos y microsegundos, hasta nanosegundos y zeptosegundos. Este último es el tiempo más pequeño registrado experimentalmente (Grundmann *et al*., 2020).

Un elemento clave de la revolución de la computación cuántica son las compuertas cuánticas rápidas o *fast quantum gates*. Estas representan un avance crucial para la construcción de computadoras cuánticas prácticas, debido a que permiten ejecutar algoritmos cuánticos de forma confiable a pesar del ruido y la fragilidad de los cubits (Sarma y Hartmann, 2023), por lo que su desarrollo se ha vuelto cada vez más importante para el futuro desarrollo de computadoras cuánticas tolerantes a fallos (Nielsen y Chuang, 2010).

COMPUERTAS CUÁNTICAS RÁPIDAS

Las compuertas cuánticas rápidas son los bloques esenciales para ejecutar algoritmos cuánticos (Cáceres *et al*.,

2023), ya que permiten reducir significativamente el tiempo total de ejecución (Werninghaus *et al*., 2021). Estas compuertas están relacionadas con operaciones que manipulan el estado de los cubits. Tales operaciones producen una salida definida (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2018), es decir, se recibe un conjunto de cubits en un estado determinado, se realiza una operación sobre ellos y se obtiene la salida correspondiente.

Las compuertas cuánticas se caracterizan por el hecho de que realizan las operaciones en tiempos significativamente cortos. Estas operaciones pueden ocurrir en escalas de tiempo tan pequeñas como los zeptosegundos (zs), equivalentes a 10^{-21} segundos o a una billonésima de billonésima parte de un segundo, y por tanto permiten procesar una cantidad enorme de información en fracciones de segundo. Sin embargo, además de ser rápidas también deben tener una alta fidelidad (Sarma y Hartmann, 2023), es decir, una baja tasa de errores. Cuanto más rápidas y precisas sean las operaciones, menor será el tiempo disponible para que los errores se acumulen. Esto es crucial, dado que los cubits son extremadamente sensibles a su entorno y pueden perder su estado cuántico debido a un fenómeno llamado decoherencia (ver el glosario) (Nielsen y Chuang, 2010). Es importante mantener el estado cuántico de superposición en los cubits, dado que este estado es el que hace posible que se exploren múltiples soluciones de forma simultánea y, por lo tanto, que la computación cuántica tenga un enorme potencial de procesamiento.

AVANCES

Se han logrado diversos avances en el diseño y desarrollo de compuertas cuánticas, entre los cuales se incluye utilizar átomos neutros (Jaksch *et al*., 2000), que se manipulan para aumentar la rapidez y fidelidad de las operaciones cuánticas.

También se ha propuesto utilizar iones atrapados, partículas cargadas confinadas por campos eléctricos o magnéticos para su control y estudio preciso.

De acuerdo con Schäfer y colaboradores (2017), es posible obtener una compuerta de 1.6 microsegundos, 10^{-6} segundos o 1.6 milésimas de un segundo con una fidelidad del 99.8 %, lo que indica una operación cuántica extremadamente precisa con un margen de error mínimo.

Según el teorema de no clonación, no es posible alcanzar el 100 %, ya que este teorema impide crear copias exactas de estados cuánticos desconocidos y limita la precisión de las operaciones. Por lo que el 99.8 % de fidelidad representa un gran logro tecnológico. Para ello, se utilizaron pulsos de láser moldeados en escalas de tiempo muy cortas 10 nanosegundos, equivalentes a 10^{-8} segundos o diez mil millonésimas de un segundo con el fin de dirigir el movimiento de los iones a lo largo de trayectorias diseñadas de tal manera que la operación de la compuerta fuera insensible a la fase inicial del campo óptico (Schäfer *et al*., 2017), evitando errores por fluctuaciones o desajustes y mejorando su precisión y resistencia ante pequeñas variaciones.

Además, se ha realizado un análisis sobre cómo las compuertas cuánticas rápidas podrían permitir que los procesadores cuánticos basados en iones atrapados alcancen la escalabilidad necesaria para superar a las computadoras clásicas, incluso si no se usaran los mecanismos de corrección de errores (Taylor *et al*., 2017), que normalmente se consideran necesarios para el funcionamiento cuántico. También se estudiaron los límites de las configuraciones experimentales para llevar a cabo con éxito operaciones de alta fidelidad utilizando compuertas cuánticas rápidas (Taylor *et al*., 2017).

Otro avance significativo es la utilización de cubits superconductores. Esta alternativa tiene un gran potencial a causa de su escalabilidad, tiempos de coherencia largos y su capacidad para realizar operaciones rápidas y de alta fidelidad (Cáceres *et al*., 2023).

Por otro lado, aunque se han implementado técnicas como el desacoplamiento dinámico, los pulsos compuestos y el control óptimo (ver el glosario), con las que ha sido posible mejorar la fidelidad, la velocidad de la compuerta aún es limitada (Cáceres *et al*., 2023), ya que estás técnicas, aunque seguras,

son lentas, por lo que las escalas de tiempo necesarias para realizar las operaciones entran en conflicto con las escalas de tiempo en las que ocurre la decoherencia. Tomando en cuenta esto, un grupo de investigadores propuso utilizar el protocolo denominado Landau-Zener-Stückelberg-Majorana (LSZM), que ha tenido una implementación exitosa. Este protocolo de conducción consiste en aplicar al cubit una señal con una amplitud significativa o una señal que no esté en resonancia exacta con el cubit (Cáceres *et al*., 2023), lo que permite cambiar rápidamente entre estados cuánticos cuando estos se acercan mucho pero no se cruzan. Su principal ventaja es que opera más rápido que las técnicas convencionales, ya que no requiere mantener el control del sistema por mucho tiempo, aunque requiere ajustes muy precisos para evitar errores.

Finalmente, se ha propuesto utilizar el aprendizaje por refuerzo (*reinforcement learning*) en cubits superconductores para diseñar compuertas cuánticas rápidas de dos cubits, con un tiempo de compuerta de 11 nanosegundos y una tasa de error baja de aproximadamente 4×10^{-3} (Sarma y Hartmann, 2023); esto implica que solo el 0.4 % de las operaciones puede fallar, lo que representa un margen de error mínimo y una mejora significativa en la velocidad en comparación con las implementaciones actuales. Aunque esta técnica es flexible y permite aprender mediante interacción y retroalimentación, requiere mucho tiempo y experiencia, lo que consume recursos. Además, debe equilibrar entre explorar nuevas acciones y aprovechar las conocidas para mejorar los resultados.

CONCLUSIÓN

Las compuertas cuánticas rápidas representan un avance significativo en el desarrollo de la computación cuántica. Su implementación abarca tecnologías como el uso de átomos neutros, iones atrapados y cubits superconductores. Además, se emplean técnicas modernas como el protocolo LSZM y el aprendizaje por refuerzo.Sin embargo, tanto las tecnologías como las técnicas aún están en etapas de investigación y enfrentan desafíos importantes.

Aunque la investigación y el control de procesos en la escala de zeptosegundos impulsaría este avance al permitir realizar cálculos extremadamente rápidos, reduciendo la decoherencia y asegurando la fidelidad de los algoritmos cuánticos, las fluctuaciones inestables en los parámetros de control y las interacciones no deseadas entre los cubits siguen siendo obstáculos en la implementación de compuertas cuánticas en sistemas complejos.

A pesar de los desafíos, avances como la supremacía cuántica demostrada por los procesadores Sycamore y Willow, que mejoran la estabilidad de los cubits, evidencian el gran potencial de la computación cuántica. Aunque estos logros se limitan a tareas específicas, demuestran que se está avanzando en la dirección correcta.

En resumen, es de suma importancia continuar invirtiendo en investigación y desarrollo, para superar estos obstáculos y avanzar hacia computadoras cuánticas escalables, capaces de superar las limitaciones de las computadoras clásicas.

GLOSARIO

Control óptimo: técnica que consiste en encontrar el conjunto de controles externos como campos electromagnéticos o pulsos láser, que optimicen el comportamiento de un sistema cuántico para llevarlo a un estado deseado y minimizar los errores o costos en el proceso.

Cubit: unidad básica de información cuántica que puede estar en el estado $|0>$, en el estado $|1>$, o en una superposición, es decir, en ambos estados al mismo tiempo, pero con diferentes probabilidades.

Decoherencia: pérdida de información cuántica debida a la interacción de los cubits con su entorno.

Desacoplamiento dinámico: técnica que consiste en aplicar pulsos de control (señales externas manipuladoras) sobre el sistema cuántico para generar cambios periódicos en el estado del sistema y suprimir así la interacción no deseada con el entorno.

Fase inicial del campo óptico: valor de la fase de una onda electromagnética antes de interactuar con otros sistemas.

Fidelidad: precisión con la que una operación cuántica se ejecuta.

Pulsos compuestos: técnica que consiste en aplicar una serie de pulsos de control que colectivamente corrigen imperfecciones en el sistema, mitigando errores y minimizando la influencia de perturbaciones externas.

© Honorio Cruz. *Sin título*. Mural en cerámica de alta temperatura, 57 × 72 cm.

NOTA

Para la elaboración de este trabajo se emplearon herramientas de inteligencia artificial. Se utilizó ChatGPT para realizar una búsqueda preliminar de artículos recientes relacionados con el tema. Además, se empleó para realizar las conversiones de tiempo. Por otro lado, se utilizó Meta para validar y verificar las conversiones realizadas por ChatGPT, con el objetivo de garantizar la exactitud y coherencia de la información presentada.

REFERENCIAS

Cáceres J, Domínguez D and Sánchez M (2023). Fast quantum gates based on Landau-Zener-Stückelberg-Majorana transitions. *Physical Review A* 108(5):052619.

Grundmann S, Trabert D, Fehre K *et al*. (2020). Zeptosecond birth time delay in molecular photoionization. *Science* 370(6514):339-341.

Jaksch D, Cirac J, Zoller P *et al*. (2000). Fast quantum gates for neutral atoms. *Physical Review Letters* 85(10): 2208.

National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. (2018). *Quantum computing: progress and prospects.* The National Academies Press.

Nielsen M and Chuang I (2010). *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition.* Cambridge University Press.

Sarma B and Hartmann M (2023). Designing Fast Quantum Gates with Tunable Couplers: A Reinforcement Learning Approach. *arXiv preprint* arXiv:2312.16358.

Schäfer V, Ballance C, Thirumalai K *et al*. (2017). Fast quantum logic gates with trapped-ion qubits. *arXiv preprint* arXiv:1709.06952.

Taylor R, Bentley C, Pedernales J *et al*. (2017). A study on fast gates for large-scale quantum simulation with trapped ions. *Scientific Reports* 7(1):46197.

Wang C Li X, Xu H *et al*. (2022). Towards practical quantum computers: Transmon qubit with a lifetime approaching 0.5 milliseconds. *npj Quantum Information* 8(1):3.

Werninghaus M, Egger D, Roy F *et al*. (2021). Leakage reduction in fast superconducting qubit gates via optimal control. *npj Quantum Information 7*(1):14.

Giselle N. Morales Rosales
Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco (TESCHA), Tecnológico Nacional de México
giselle_mr@tesch.edu.mx

Manuel Ávila Aoki
Centro Universitario UAEM Valle de Chalco
Universidad Autónoma del Estado de México