
DIFERENTES PLATAFORMAS DE CÚBITS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CHIPS CUÁNTICOS: VENTAJAS Y DESAFÍOS

JUAN MIGUEL IBÁÑEZ DE ALDECOA QUINTANA

En la computación clásica, los transistores implementan los bits (1 o 0) y se integran en chips clásicos. Por otro lado, la computación cuántica utiliza varias plataformas para construir cúbits, que pueden tener múltiples estados simultáneos e integrarse en chips cuánticos. Aunque el transistor es el componente básico de la computación clásica y permitió aumentar el número de transistores en un chip cada dos años según el escalado que establece la ley de Moore, no ha surgido todavía una plataforma de cúbits dominante pues todas presentan ventajas y desafíos por lo que no está claro cuál será la tecnología equivalente al transistor en la computación cuántica. Este trabajo examina las diferentes plataformas de cúbits, sus ventajas y desafíos, aunque determinar cuál prevalecerá y si esta tecnología será alguna de las actuales, resulta complicado debido a la continua evolución que se está experimentando en este campo.

La Ley de Neven es un concepto que describe la rapidez con la que la computación cuántica está avanzando y superando las capacidades de la computación clásica. La idea fue propuesta por Hartmut Neven, director del laboratorio de Inteligencia Artificial Cuántica de Google, y sugiere que la potencia de los ordenadores cuánticos está aumentando a una tasa exponencial, in-

cluso más rápida que la Ley de Moore (que sostiene que el número de transistores en un chip se duplica aproximadamente cada dos años).

Según la Ley de Neven, el poder de procesamiento cuántico está creciendo a un ritmo “doblemente exponencial”. Esto significa que no solo mejora de forma exponencial, sino que lo hace a una tasa en la que la velocidad de mejora también crece exponencialmente. Matemáticamente, la Ley de Neven sostiene que el poder de un procesador cuántico puede estar mejorando al doble de la tasa exponencial de un procesador clásico.

Mientras que la Ley de Moore sigue un crecimiento exponencial sencillo, duplicando la cantidad de transistores y, por ende, la potencia de los procesadores cada dos años, la Ley de Neven va más allá al implicar un crecimiento mucho más rápido en la computación cuántica. Esto sugiere que la computación cuántica podría superar a la clásica en un periodo relativamente corto, siempre y cuando continúe este tipo de crecimiento.

La Ley de Neven destaca el potencial de la ventaja cuántica o supremacía cuántica, donde los ordenadores cuánticos pueden resolver problemas que serían intratables para los ordenadores clásicos. Aunque aún

estamos en una fase temprana del desarrollo cuántico, esta ley enfatiza la necesidad de estar preparados para una era en la que los sistemas cuánticos puedan resolver problemas complejos en áreas como criptografía, química, inteligencia artificial y optimización de datos.

Sin embargo, aunque la Ley de Neven es una propuesta interesante que refleja la rapidez con la que la computación cuántica parece estar avanzando en teoría, en la práctica enfrenta desafíos significativos que impiden que este “doble crecimiento exponencial” se cumpla consistentemente en todas las circunstancias. Aunque ha habido avances notables, el cumplimiento de esta ley en un sentido práctico y sostenido es algo que sigue siendo debatido en la comunidad científica y tecnológica.

Las razones por las cuales el cumplimiento de la ley de Neven no es absoluto se deben a:

- Limitaciones tecnológicas: la computación cuántica actual enfrenta varios problemas técnicos, como la coherencia cuántica (la capacidad de los cúbits de mantener su estado) y la corrección de errores. Los sistemas cuánticos actuales, incluso los más avanzados, son inestables y requieren condiciones especiales (como temperaturas extremadamente bajas) para funcionar.
- Supremacía cuántica limitada: Aunque en 2019, Google afirmó haber alcanzado la supremacía cuántica con su procesador cuántico Sycamore, su logro fue específico para un problema diseñado para aprovechar las ventajas de los sistemas cuánticos. Este tipo de supremacía no ha sido generalizada para resolver problemas prácticos o útiles en áreas como inteligencia artificial o simulación de materiales, donde la computación cuántica promete revolucionar.
- Dificultad para aumentar el número de cúbits útiles: la Ley de Neven depende del crecimiento rápido del número de cúbits útiles en los procesadores cuánticos. Sin embargo, los sistemas actuales encuentran dificultades para escalar de manera efectiva sin una alta tasa de

errores. Los cúbits son difíciles de fabricar, mantener y manipular, lo cual limita el crecimiento doblemente exponencial que sugiere la ley.

- Desafíos en la corrección de errores cuánticos: A diferencia de los sistemas de computación clásica, donde la corrección de errores es mucho más manejable, en la computación cuántica requiere un gran número de cúbits físicos para mantener un solo cúbit lógico sin errores. Esto ralentiza el progreso hacia sistemas cuánticos realmente escalables.

Empresas como IBM, Google, y D-Wave han logrado progresos, con modelos de cúbits cada vez más potentes y avances en arquitectura cuántica. IBM, por ejemplo, anunció recientemente su procesador cuántico de más de 400 cúbits, y las expectativas de la industria proyectan sistemas de más de 1.000 cúbits para los próximos años. Sin embargo, esto aún está lejos de poder aplicarse a gran escala para la resolución de problemas del mundo real y depende de mejoras en la estabilidad y corrección de errores.

Teóricamente, el crecimiento de la capacidad de los procesadores cuánticos ha sido notable y, en algunos casos, incluso ha superado las expectativas, pero en la práctica la Ley de Neven no se cumple consistentemente en la computación cuántica en general debido a desafíos tecnológicos, aunque sugiere una tendencia positiva en ciertos contextos experimentales. La Ley de Neven puede considerarse una aspiración en el desarrollo de la computación cuántica, aunque todavía falta tiempo para que este campo se convierta en un recurso confiable y escalable en la vida cotidiana.

DIFERENTES PLATAFORMAS DE CÚBITS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CHIPS CUÁNTICOS

Existen varias plataformas o tecnologías para construir cúbits, que son las unidades fundamentales de los procesadores o chips cuánticos. Cada plataforma tiene sus propias ventajas y desventajas en cuanto a es-

tabilidad, facilidad de fabricación y escalabilidad. Las más prominentes actualmente son:

- **Cúbits Superconductores:** utilizan circuitos superconductores, generalmente en bucles, a través de los cuales circula una corriente eléctrica sin resistencia a temperaturas extremadamente bajas (cercasas al cero absoluto). Como ejemplos de empresas involucradas en esta tecnología, tenemos a: Google (Sycamore), IBM (Quantum System One), Rigetti Computing. Las ventajas de esta tecnología son su alta velocidad de operación, han mostrado una buena escalabilidad en varios proyectos y es una tecnología bien desarrollada en términos de infraestructura y tecnología experimental. Como desventajas requiere de sistemas de refrigeración criogénicos complejos y sus cúbits tienen una coherencia limitada y una alta susceptibilidad al ruido, lo que hace necesaria la corrección de errores.
- **Iones atrapados:** se trata de átomos cargados eléctricamente (iones) atrapados y manipulados por campos electromagnéticos en trampas especiales. Como ejemplos de empresas involucradas en esta tecnología, tendríamos a IonQ y a Honeywell. Las ventajas de esta tecnología es que es altamente estable con tiempos de coherencia largos, facilitando operaciones lógicas de alta fidelidad y reduciendo la necesidad de corrección de errores. Como desventajas, sus operaciones son más lentas en comparación con los cúbits superconductores y son difíciles de escalar, especialmente para la construcción de procesadores con un gran número de cúbits.
- **Cúbits de fotones:** usan partículas de luz (fotones) en vez de partículas materiales. Los fotones pueden manipularse y medirse su polarización o fase. Como ejemplos de empresas involucradas en esta tecnología tendríamos a Xanadu y PsiQuantum. Como ventajas de esta tecnología, es necesario señalar que los fotones son menos sensibles al ruido ambiental, lo que permite la comunicación de cúbits a largas distancias (ideal para redes cuánticas) y que funcionan a temperatura ambiente. Como desventajas es necesario señalar que son difíciles de controlar y manejar a nivel de grandes redes de cúbits y que se encuentran aún en etapas experimentales para aplicaciones prácticas en computación cuántica.
- **Cúbits de puntos cuánticos:** Son pequeños semiconductores que confinan electrones en regiones tan pequeñas que el comportamiento cuántico se hace dominante. Utilizan el espín del electrón en estos puntos para codificar los estados de cúbit. Como ejemplo, la empresa Intel está investigando esta tecnología con la empresa QuTech. Como ventajas de esta tecnología destacan su potencial de integración en la tecnología de fabricación de chips de silicio, lo que facilitaría la escalabilidad, lo que hace que sean prometedores para la integración con la tecnología actual de semiconductores. Como desventajas se encuentra el que actualmente se encuentran todavía en fase de investigación y desarrollo y su estabilidad y coherencia son limitadas.
- **Cúbits de espín en silicio o cúbits semiconductores:** utilizan el espín de electrones en átomos individuales de silicio o fósforo implantados en una estructura de semiconductores de silicio. Como ejemplos de entidades involucradas en esta tecnología se encuentran diferentes proyectos de la Universidad de Nueva Gales del Sur en Australia, y algunos de Silicon Quantum Computing. Como ventajas hay que señalar que se pueden fabricar utilizando técnicas de fabricación de semiconductores ya establecidas y que los tiempos de coherencia pueden ser largos. Como dificultades es necesario señalar que son difíciles de manipular y controlar a nivel de grandes escalas y que están en una fase experimental enfrentando dificultades en términos de fidelidad de las operaciones cuánticas.
- **Cúbits topológicos:** Basados en la teoría de los anyones (partículas que existen en sistemas bidimensionales) que mantienen su estado cuántico

mediante una topología especial. Son menos susceptibles a errores gracias a la protección topológica. Microsoft trabaja en el desarrollo de esta tecnología. Como ventajas tienen el potencial de ser menos susceptibles a errores y ruido ambiental, lo cual reduciría significativamente la corrección de errores. Como desventaja, se encuentra todavía en fase de investigación ya que no se ha logrado fabricar un cúbit topológico práctico. Los avances experimentales han sido limitados y continúan siendo una promesa a largo plazo.

- **Cúbits basados en átomos neutros:** los cúbits basados en átomos neutros pertenecen a la categoría de cúbits de átomos fríos, una tecnología utilizada principalmente en la simulación cuántica y son una tecnología emergente en el campo de la computación cuántica, que utiliza átomos neutros individuales como portadores de información cuántica (cúbits). A diferencia de otras plataformas, como los cúbits superconductores o los iones atrapados, los átomos neutros ofrecen ventajas específicas relacionadas con su estabilidad y escalabilidad. Son átomos que no tienen carga eléctrica neta, es decir, tienen el mismo número de protones y electrones. Los estados cuánticos de los átomos neutros pueden mantenerse coherentes durante períodos de tiempo relativamente largos, lo que es crucial para realizar cálculos cuánticos complejos y son menos sensibles al ruido ambiental que otros sistemas cuánticos, lo que reduce la probabilidad de errores en los cálculos. Las empresas clave en este campo son Pasqal (Francia), QuEra (EE. UU.), Atoms Computing (EE. UU.) y PlanQC (Alemania). Los átomos neutros se enfrían a temperaturas extremadamente bajas, lo que les permite comportarse como objetos cuánticos. Estos átomos fríos se pueden manipular y controlar con láseres, atrapándolos en redes ópticas y utilizándolos como cúbits para realizar cálculos cuánticos.
- **Cúbits basados en centros de nitrógeno vacante:** los cúbits basados en centros de nitrógeno-vacante (NV) en

diamante son una tecnología prometedora en la computación cuántica y otras aplicaciones cuánticas como sensores y comunicación cuántica. Estos cúbits aprovechan defectos específicos en la estructura cristalina del diamante que tienen propiedades cuánticas únicas. Un centro NV es un defecto en la red cristalina del diamante donde un átomo de carbono es reemplazado por un átomo de nitrógeno y hay una vacante (un hueco) adyacente al átomo de nitrógeno. Este defecto crea un sistema que puede almacenar información cuántica en sus niveles de espín electrónico. Los estados de espín del centro NV son fácilmente manipulables y medibles mediante luz láser y microondas.

TECNOLOGÍAS HABILITADORAS DE LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

Las tecnologías cuánticas están apoyadas por una serie de tecnologías habilitadoras que son cruciales para el desarrollo de dispositivos cuánticos viables y escalables. Estas tecnologías permiten la manipulación, el control y la ampliación de los sistemas cuánticos para aplicaciones prácticas en computación, comunicación, y sensado cuántico. Las principales son las siguientes:

- **Criogenia y refrigeración ultra-baja:** la mayoría de las plataformas cuánticas, especialmente las que utilizan cúbits superconductores y cúbits de espín, requieren temperaturas cercanas al cero absoluto para reducir el ruido térmico y mantener la coherencia cuántica. Como ejemplos de uso se señalan los refrigeradores de dilución, utilizados en computación cuántica para mantener cúbits superconductores estables. "Esta tecnología permite que los sistemas de enfriamiento criogénico mantengan los cúbits en estados de coherencia durante más tiempo, lo cual resulta esencial para ejecutar operaciones cuánticas con mayor precisión.
- **Generación y manipulación de láseres de alta precisión:** los láseres son fundamentales para manipular cúbits en tecnologías como los iones atrapados y los

cúbits fotónicos. Los láseres también se usan para preparar, controlar y leer estados cuánticos. Como ejemplos de uso se señalan la manipulación de iones en trampas electromagnéticas, generación de pares de fotones entrelazados. Se trata de una tecnología habilitadora ya que permite el control preciso de los cúbits, haciendo posible operaciones lógicas cuánticas y entrelazamiento, que son esenciales para la computación y comunicación cuántica.

- **Electrónica rápida:** la electrónica rápida es necesaria para operar y leer los cúbits de manera eficiente. Incluye dispositivos de control y medición que permiten aplicar pulsos de microondas, radiofrecuencia o voltaje a los cúbits. Como ejemplos de uso tenemos el control de cúbits superconductores mediante microondas, lectura de cúbits mediante detección de fotones individuales. Esta tecnología es una tecnología habilitadora ya que los sistemas electrónicos rápidos y precisos permiten realizar operaciones cuánticas en tiempo real y sincronizar operaciones lógicas en sistemas de múltiples cúbits.
- **Optoelectrónica avanzada:** para trabajar con cúbits fotónicos, la optoelectrónica permite generar, manipular y medir fotones individuales, lo cual es fundamental en la comunicación cuántica y para construir redes cuánticas. Como ejemplos de uso se señala detectores de fotones individuales, divisores de haz, moduladores ópticos. Esta tecnología también es habilitadora ya que permite realizar operaciones de entrelazamiento en redes de comunicación cuántica y facilita la transmisión de información cuántica en sistemas fotónicos.
- **Fibra óptica y redes cuánticas:** la fibra óptica es esencial para transportar cúbits fotónicos en largas distancias, lo que permite la construcción de redes cuánticas. Junto con la optoelectrónica, la fibra óptica permite la transmisión de información cuántica de manera segura. Como ejemplos de uso se mencionan las redes de comunicación cuántica, satélites de enlace cuántico. Esta tecnología es habilitadora ya que facilita

la creación de redes cuánticas y la distribución de claves cuánticas (QKD) para la comunicación cuántica segura.

- **Materiales avanzados y nanofabricación:** la construcción de cúbits requiere materiales avanzados y técnicas de fabricación a escala nanométrica. Los cúbits superconductores, los puntos cuánticos y los cúbits de espín dependen de materiales puros y estables a nivel cuántico. Como ejemplos de uso estaría la fabricación de cúbits superconductores con aluminio y niobio, puntos cuánticos de semiconductores. Esta tecnología es habilitadora ya que permite la creación de cúbits confiables y estables y contribuye a mejorar la coherencia de los cúbits, aumentando su calidad y permitiendo una mayor escalabilidad de los sistemas cuánticos.
- **Corrección de errores cuánticos y algoritmos de control:** los errores en sistemas cuánticos son inevitables, por lo que es necesario implementar códigos de corrección de errores y algoritmos de control que los mitiguen. La corrección de errores cuánticos permite realizar cálculos precisos y hacer que los sistemas sean viables para aplicaciones reales. Como ejemplos de uso se encuentran los Códigos de superficie y códigos CSS para corrección de errores, algoritmos de control de error cuántico. Esta tecnología es habilitadora ya que los códigos de corrección y algoritmos de control aseguran la confiabilidad en el procesamiento de información cuántica, que es esencial para operaciones complejas en computación cuántica.
- **Software y emuladores cuánticos:** el desarrollo de software y emuladores cuánticos es crucial para el diseño de algoritmos cuánticos y la emulación de sistemas antes de su implementación física. Los emuladores permiten probar algoritmos en entornos virtuales y optimizar el rendimiento de los dispositivos cuánticos. Como ejemplos de uso tenemos: IBM Qiskit, Google Cirq, emuladores cuánticos de Microsoft y Amazon Braket. Se trata de una tecnología habilitadora ya que facilita la creación de aplicaciones cuánticas y permite a

los investigadores desarrollar y probar algoritmos antes de implementarlos en hardware cuántico.

- **Entrelazamiento cuántico y generación de estados cuánticos especiales:** la generación y manipulación de estados entrelazados es fundamental para muchas aplicaciones cuánticas, especialmente en comunicación y criptografía cuántica. El entrelazamiento permite la transmisión de información cuántica y la ejecución de algoritmos en múltiples cúbits. Como ejemplos de uso se tiene QKD (distribución de claves cuánticas), teleportación cuántica. Se trata de una tecnología habilitadora ya que permite la ejecución de tareas cuánticas que dependen de la correlación cuántica entre cúbits, como las comunicaciones cuánticas seguras y la computación distribuida cuántica.

CHIPS CUÁNTICOS BASADOS CÚBITS SUPERCONDUCTORES

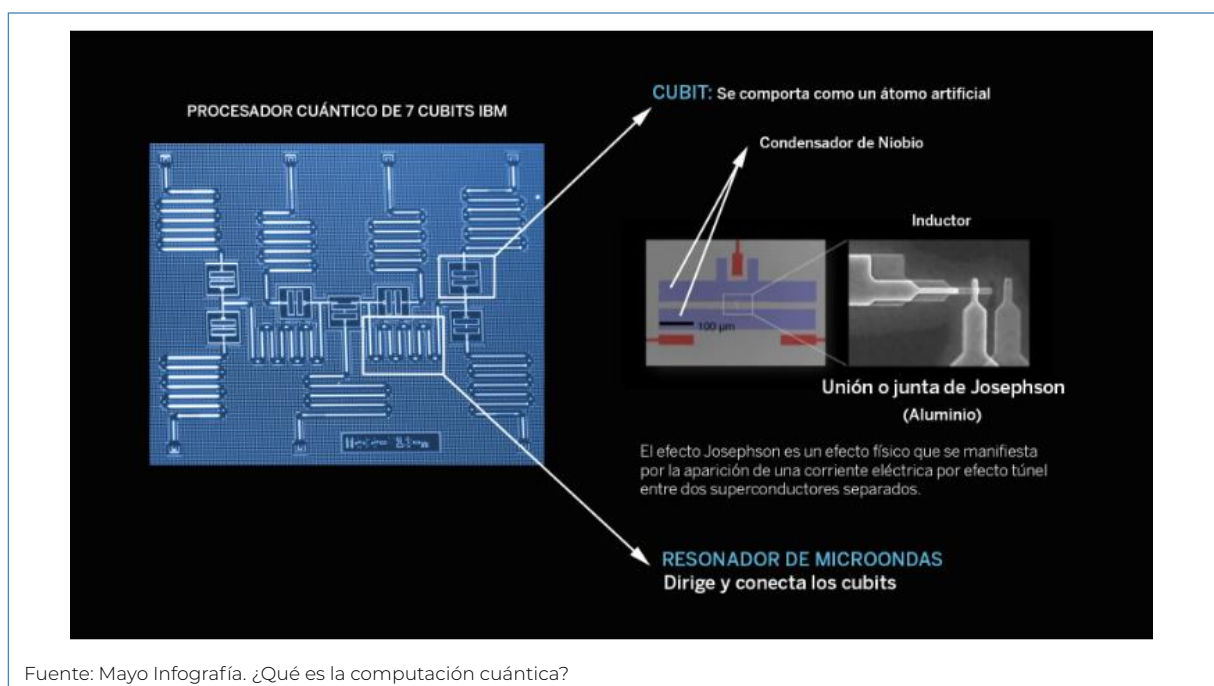
Los chips basados en cúbits superconductores son una de las tecnologías más avan-

zadas en la computación cuántica. Estos dispositivos emplean propiedades de la superconductividad para crear cúbits que pueden procesar y almacenar información cuántica de forma eficiente.

Son cúbits hechos de materiales superconductores, que al enfriarse a temperaturas extremadamente bajas (cerca al cero absoluto), pierden toda resistencia eléctrica y permiten que la corriente eléctrica fluya sin pérdida de energía. En este estado, las propiedades cuánticas como la superposición y el entrelazamiento se pueden manipular. Los cúbits superconductores suelen ser implementados como circuitos Josephson, que son interruptores cuánticos basados en un efecto de túnel controlado por superconductividad (ver figura 1). Estos circuitos forman osciladores que pueden estar en estados cuánticos definidos.

Los cúbits superconductores presentan numerosas ventajas. Los cúbits superconductores pueden procesar operaciones en escalas de nanosegundos, lo que los hace ideales para cálculos rápidos. Además, se fabrican utilizando técnicas avanzadas de litografía y deposición de materiales, similares a las que se emplean en la industria

FIGURA 1
CÚBITS SUPERCONDUCTORES



de semiconductores, lo que facilita su producción. Otro punto a favor es su escalabilidad, pues en comparación con otras tecnologías cuánticas, es más sencillo fabricar varios cúbits superconductores en un solo chip. Su integración con sistemas electrónicos clásicos es relativamente directa.

Como ejemplos de cúbits superconductores están: Transmon que es el diseño más común, que reduce la sensibilidad a fluctuaciones de carga y mejora la coherencia cuántica; Flux cúbits que utiliza flujos magnéticos para operar, menos común que el transmon, pero útil en ciertos contextos; y Phase cúbit que es una variante menos utilizada debido a limitaciones en tiempos de coherencia.

Por su parte, las limitaciones de los cúbits cuánticos son, entre otras, la necesidad de refrigeración extrema, pues requieren enfriarse a temperaturas cercanas a 10-15 milikelvin, lo que implica el uso de costosos criostatos de dilución. Otra de sus limitaciones es el tiempo de coherencia que pese a haber mejorado en los últimos años (alcanzando microsegundos a milisegundos), sigue siendo limitado. Por último, señalar el ruido y los errores ya que son sensibles a ruido ambiental y errores que complican el mantenimiento de la calidad cuántica.

Sus aplicaciones actuales son tanto las simulaciones moleculares y químicas dada su capacidad para modelar sistemas complejos, como interacciones moleculares; la optimización, es decir resolver problemas complejos como rutas óptimas o diseño industrial; y la implementación de algoritmos cuánticos como Shor (factorización) o Grover (búsqueda).

Empresas como IBM, Google, y Rigetti Computing han desarrollado procesadores cuánticos basados en cúbits superconductores. Existen diversos ejemplos: IBM Quantum Sistema One que es un sistema comercial basado en cúbits superconductores; Sycamore (Google) quien logró la llamada "supremacía cuántica" en 2019, realizando un cálculo en 200 segundos que a un supercomputador le llevaría 10.000 años.

Estas plataformas siguen mejorándose para alcanzar la corrección de errores cuánticos y la escalabilidad práctica, necesarias para

resolver problemas reales a gran escala. En efecto, los ordenadores cuánticos basados en cúbits superconductores están en una etapa de rápido desarrollo, con avances significativos logrados por empresas como IBM, Google, y otros centros de investigación.

IBM ha desarrollado procesadores como el "IBM Osprey", con 433 cúbits, que triplican el tamaño de sus modelos previos. Se están diseñando sistemas modulares como el IBM Quantum System Two para superar las limitaciones físicas actuales y alcanzar más de 4.000 cúbits para 2025. Estos sistemas combinan múltiples procesadores con enlaces de comunicación cuántica para escalar la capacidad computacional. La corrección de errores es uno de los mayores desafíos, ya que el ruido cuántico afecta la estabilidad de los sistemas. Soluciones como la mitigación de errores mediante software (como las implementadas en Qiskit Runtime de IBM) están en desarrollo para hacerlos más útiles y robustos. Escalar a sistemas de decenas de miles de cúbits requerirá superar barreras de energía y control, ya que cada cúbit superconductor actual necesita una infraestructura compleja para operar cerca del cero absoluto. Por otra parte, se están explorando sistemas híbridos que combinan cúbits superconductores y semiconductores. Estos sistemas prometen un mejor escalado y aprovechan conocimientos de la electrónica tradicional para resolver limitaciones de los cúbits superconductores actuales. Aunque todavía no realizan tareas que superen de forma significativa a los supercomputadores clásicos, empresas como IBM y Google planean alcanzar hitos con sistemas de 100.000 a 1.000.000 de cúbits para abordar problemas complejos en áreas como química cuántica y optimización.

En resumen, los ordenadores cuánticos basados en cúbits superconductores están progresando rápidamente, pero aún enfrentan desafíos técnicos importantes para alcanzar un uso práctico en gran escala. Las investigaciones actuales buscan soluciones innovadoras en hardware y software para superar estas barreras. En la actualidad, el ordenador cuántico superconductor ha marcado el listón de la potencia de cálculo. En 2019, Google anunció que había alcan-

zando la supremacía cuántica con su ordenador Sycamore. IBM, sin embargo, lanzó su procesador Eagle de más de 100 cúbits en 2021 y luego desarrolló el Osprey de 433 cúbits. Los ordenadores cuánticos superconductores tienen una gran ventaja: pueden utilizar tecnología ya existente creada por la industria de los ordenadores digitales. Durante décadas, las empresas de Silicon Valley han perfeccionado la técnica de grabar circuitos microscópicos en placas de silicio. En cada chip, los números 0 y 1 se representan mediante la presencia o ausencia de electrones dentro del circuito.

El ordenador cuántico superconductor también se basa en esta tecnología (véase Figura 2). Al reducir la temperatura cerca del cero absoluto, los circuitos se vuelven cuánticos y coherentes, permitiendo la superposición estable de electrones. Entonces, uniendo varios circuitos, estos se pueden entrelazar de modo que los cálculos cuánticos sean posibles. La necesidad de un complejo sistema de conductos y bombas para enfriar la máquina incrementa los costes y conlleva complicaciones. Una mínima vibración o impureza puede afectar los circuitos, y un estornudo cercano arruinar un experimento. Los científicos miden esta sensibilidad mediante el tiempo de coherencia, el intervalo en que los átomos vibran juntos de forma coherente. Cuanto más baja es la temperatura, más lento es el

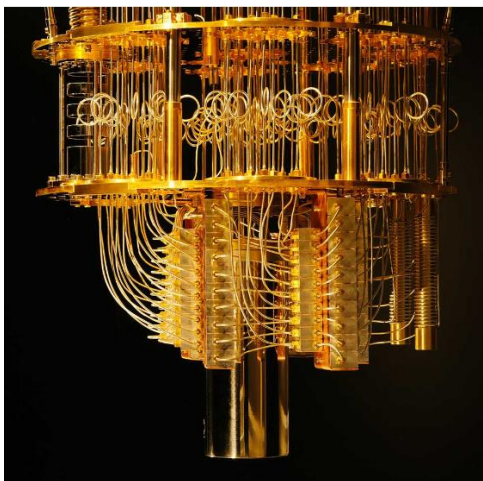
movimiento atómico y mayor el tiempo de coherencia. Enfriar las máquinas a temperaturas inferiores a las del espacio exterior maximiza este tiempo.

Sin embargo, es imposible alcanzar el cero absoluto, lo que hace inevitable la introducción de errores en los cálculos. Mientras que un ordenador digital clásico no tiene este problema, en un sistema cuántico sí se presenta esta dificultad, influyendo en la fiabilidad de los resultados, especialmente en transacciones de gran valor económico. Una solución consiste en reforzar cada cúbit con un conjunto de cúbits, creando redundancia y reduciendo así los errores del sistema. Si un ordenador cuántico usa tres cúbits y produce la serie 101, puede que el dígito central esté mal y deba cambiarse por un 1. La redundancia reduce errores, pero aumenta los cúbits necesarios. Se estima que se necesitan mil cúbits para reforzar uno solo, lo que implica un millón de cúbits para un sistema de mil cúbits. Google proyecta alcanzar un procesador de un millón de cúbits en diez años.

CHIPS CUÁNTICOS BASADOS EN CÚBITS DE TRAMPAS DE IONES

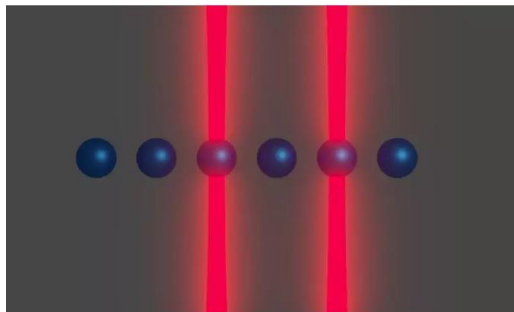
Los chips cuánticos basados en cúbits de trampas de iones son una tecnología cla-

FIGURA 2
ORDENADOR CUÁNTICO BASADO EN CÚBITS SUPERCONDUCTORES



Fuente: Artículo: "Ordenador cuántico en Barcelona: ¿qué podremos hacer con él?"

FIGURA 3
DOS IONES ATRAPADOS (EN AZUL) SE SELECCIONAN CON PINZAS ÓPTICAS (EN ROJO). SE PUEDE IMPLEMENTAR UNA PUERTA CUÁNTICA ENTRE LOS IONES USANDO CAMPOS ELÉCTRICOS



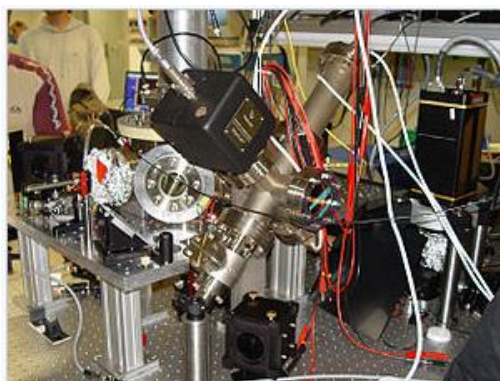
Fuente: Europa Press. "Nuevo método de computación cuántica en iones atrapados"

ve en la computación cuántica actual, con avances significativos en escalabilidad, precisión y diseño integrado. Esta tecnología utiliza átomos cargados (iones) confinados en campos electromagnéticos y manipulados mediante láseres o sistemas electrónicos avanzados (véase Figura 3). Como avances recientes, destacan tanto Quantinuum H2 que es uno de los ordenadores cuánticos más avanzados, con una arquitectura escalable llamada QCCD. Puede manejar 32 cúbits con conexiones de alta fidelidad, siendo un referente en precisión y estabilidad. Los avances en corrección de errores y la fidelidad en las puertas lo posicionan como líder para aplicaciones complejas y escalables. También destaca Oxford Ionics que ha desarrollado un chip que integra control electrónico en lugar de láseres, simplificando la producción y reduciendo costes. Este diseño ofrece el doble de rendimiento en comparación con chips tradicionales, con menos cúbits necesarios para resultados similares, lo que facilita la escalabilidad. Y por último IonQ, empresa de software y hardware con sede en College Park, Maryland. Están desarrollando software y una computadora de iones atrapados de propósito general para generar, optimizar y ejecutar circuitos cuánticos.

A pesar de los avances, persisten problemas como la sensibilidad al entorno, la necesidad de técnicas de corrección de errores más robustas y la complejidad en la fabricación masiva de sistemas altamente fiables. Estas innovaciones posicionan a

los sistemas basados en trampas de iones como una alternativa prometedora frente a otros enfoques, combinando precisión y potencial de escalabilidad en el desarrollo de la computación cuántica. De hecho, otro contendiente del ordenador cuántico basado en cúbits superconductores es el ordenador cuántico basado en trampas de iones. Cuando se toma un átomo eléctricamente neutro y se le quitan algunos electrones, se obtiene un ion cargado positivamente. Este se puede suspender en una trampa formada por una serie de campos eléctricos y magnéticos, y cuando se introducen varios iones, estos vibran como cúbits coherentes. Por ejemplo, si el electrón tiene un espín hacia arriba, el estado es un 0. Si el espín está hacia abajo, es un 1. Así, el resultado debido a los efectos del mundo cuántico es una mezcla superpuesta de dos estados. Los átomos pueden girar y alinearse con un campo magnético. Un espín hacia arriba representa 0, mientras que uno hacia abajo representa 1. Los átomos también pueden estar en una superposición de estos estados. Para realizar un cálculo, un láser invierte los espines, cambiando los 0 por 1 y viceversa. También se pueden hacer incidir además de rayos láser haces de microondas en estos iones para voltearlos y hacer que cambien de estado. Así, estos rayos actúan como un procesador al convertir una configuración de átomos en otra, igual que la CPU de un ordenador digital cambia el estado de los transistores entre encendido y apagado. Estos rayos funcionan como una CPU al transformar la configuración

FIGURA 4
TRAMPA DE IONES USADA EN UNA COMPUTADORA CUÁNTICA



Fuente: Wikipedia. Trampa iónica

de átomos, similar a cómo un procesador cambia el estado de los transistores entre encendido y apagado. Esta es una manera de observar cómo se desarrolla un ordenador cuántico a partir de un conjunto de electrones aleatorios. Honeywell apoya este modelo.

En un computador cuántico de trampas de iones (véase Figura 4), los átomos se mantienen en un estado cercano al vacío, suspendidos en una compleja matriz de campos magnéticos y eléctricos capaces de absorber movimientos aleatorios. En consecuencia, el tiempo de coherencia puede ser significativamente mayor que en un computador cuántico superconductor, permitiendo su funcionamiento a temperaturas más altas que sus competidores. Sin embargo, existe el problema del escalado: aumentar el número de cúbits es un proceso complicado, ya que requiere ajustes continuos en los campos eléctrico y magnético para mantener la coherencia, lo cual resulta técnicamente complejo.

CHIPS CUÁNTICOS BASADOS EN CÚBITS FOTÓNICOS

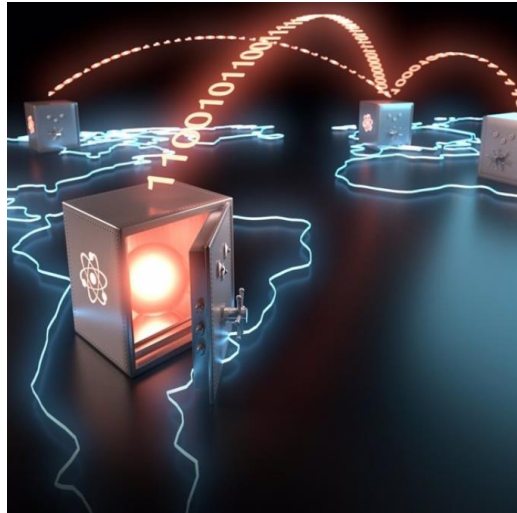
Los chips cuánticos basados en cúbits fotónicos representan una tecnología emergente con características únicas en el ámbito de la computación cuántica. A diferencia de los cúbits superconductores o de trampas de iones, los cúbits fotónicos

utilizan fotones, las partículas de luz, como portadores de información (véase la Figura 5). Esto les permite operar a temperatura ambiente y facilita su integración en sistemas ópticos ya existentes, como las telecomunicaciones.

Recientemente, se presentó un procesador fotónico de 20 modos desarrollado con nitruro de silicio. Este procesador tiene bajas pérdidas ópticas (2,9 dB por modo) y una alta fidelidad en las operaciones, características cruciales para cálculos cuánticos precisos. La tecnología utilizada permite una interferencia cuántica de alta visibilidad (98%), marcando un avance significativo en la fotónica integrada. Un desafío crítico para todos los sistemas cuánticos es la corrección de errores. En sistemas fotónicos, avances recientes han demostrado que las redes ópticas pueden diseñarse para minimizar errores intrínsecos y permitir la implementación de algoritmos cuánticos más robustos.

Destacan proyectos como el programa PHOQUSING, financiado por el programa Horizon 2020, busca desarrollar tecnologías basadas en fotónica para superar barreras técnicas y acercar la computación cuántica fotónica a aplicaciones prácticas en campos como inteligencia artificial y optimización. En cuanto al acceso comercial, empresas como Xanadu están trabajando en procesadores fotónicos y han impulsado aplicaciones para tareas específicas, como el modelado de moléculas y el aprendiza-

FIGURA. 5
SE LOGRA UN QUBIT FOTÓNICO PARA LA TELEPORTACIÓN CUÁNTICA GLOBAL



Fuente: Europa Press. "Se logra un qubit fotónico para la teleportación cuántica global"

je automático cuántico. Estas plataformas son compatibles con infraestructuras en la nube, lo que facilita su adopción por parte de la industria.

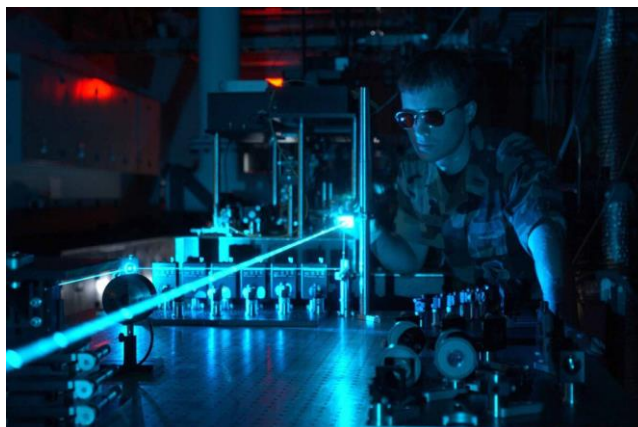
Como desafíos actuales se encuentran la escalabilidad: incrementar la cantidad de cúbits utilizables y su conectividad efectiva sigue siendo un objetivo clave para lograr sistemas de mayor capacidad. Y las interferencias y la estabilidad: aunque los cúbits fotónicos son menos susceptibles al ruido térmico, otros factores como las imperfecciones en los componentes ópticos pueden limitar su rendimiento.

Poco después de que Google afirmara haber alcanzado la supremacía cuántica, China anunció un logro aún mayor: realizar en doscientos segundos un cálculo que a un ordenador clásico le llevaría quinientos millones de años. El ordenador cuántico chino usa rayos de luz láser en lugar de electrones. Este ordenador fotónico utiliza la capacidad de la luz de vibrar en distintas direcciones para representar los números 0 o 1 mediante luz polarizada. El proceso se inicia al dirigir un rayo láser hacia un divisor de haces, el cual lo separa en dos partes que continúan avanzando y reflejándose lateralmente. Estos haces coherentes se reflejan en espejos y retornan a un punto común, donde los fotones se entrelazan, per-

mitiendo así la creación de un cúbit. El haz resultante constituye una superposición de dos fotones entrelazados. Ahora bien, si se contempla una estructura compuesta por cientos de divisores de haces y espejos, que entrelazan una serie de fotones coherentes, se puede comprender cómo el ordenador cuántico óptico logra realizar sus extraordinarias proezas. El ordenador cuántico chino calculó con setenta y seis fotones entrelazados en cien canales. Los ordenadores fotónicos son voluminosos por sus espejos y divisores de haces, que ocupan mucho espacio. Para cada problema, hay que reorganizar los componentes, impidiendo su uso como máquina programable multiuso para cálculos instantáneos. Después de cada uso, deben desmontarse y reorganizarse con precisión, lo cual es laborioso. Además, los fotones no interactúan fácilmente entre sí, dificultando la creación de cúbits complejos.

Utilizar fotones en lugar de electrones para un ordenador cuántico ofrece diversas ventajas. Los electrones interactúan intensamente con la materia ordinaria debido a su carga, lo que puede resultar en grandes perturbaciones del entorno. En contraste, los fotones no tienen carga y son menos susceptibles al ruido del entorno. Los haces de luz pueden atravesar otros haces con mínimas perturbaciones. Además, los foto-

FIGURA 6
ORDENADOR CUÁNTICO FOTÓNICO



Fuente: Xataka "Los ordenadores cuánticos fotónicos nos están acercando al mayor hito en computación cuántica: la corrección de errores"

nes se desplazan a una velocidad significativamente mayor que los electrones, viajando diez veces más rápido que las señales eléctricas. Una de las principales ventajas del ordenador fotónico es su capacidad para operar a temperatura ambiente. Esto elimina la necesidad de costosas bombas y tuberías para mantener temperaturas cercanas al cero absoluto, lo cual generalmente incrementa significativamente los costes. Los ordenadores fotónicos operan a temperatura ambiente, lo que acorta su tiempo de coherencia. Sin embargo, los haces láser de alta energía permiten cálculos rápidos, haciendo que las moléculas del entorno parezcan moverse en cámara lenta. Esto reduce los errores causados por las interacciones del entorno (véase la Figura 6). A largo plazo, las ventajas de una menor tasa de errores y una reducción de costes serían superiores a las de otros diseños.

Más recientemente, una empresa canadiense llamada Xanadu ha presentado su ordenador cuántico fotónico, que tiene una clara ventaja. Este diseño se basa en un pequeño chip en lugar de una mesa con hardware óptico complejo. A diferencia del modelo chino, el chip de Xanadu es programable y accesible en internet. Aunque tiene solo ocho cúbits y requiere sistemas de congelación para superconductores, su diseño muestra que la óptica no es una perdedora en la carrera cuántica. Como dice Zachary Vernon de Xanadu: "La óptica

es ahora uno de los principales contendientes". El tiempo lo dirá.

Los ordenadores fotónicos de silicio están ganando atención. La empresa emergente PsiQuantum se ha destacado con esta tecnología, atrayendo inversores y alcanzando una valoración de tres mil cien millones de dólares sin prototipos operativos. Su alianza con GlobalFoundries, un fabricante avanzado de chips les dio reconocimiento en Wall Street. PsiQuantum planea construir, hacia mediados de este siglo, un ordenador óptico con un millón de cúbits para aplicaciones prácticas, y consideran que sus rivales, enfocados en ordenadores cuánticos de unos cien cúbits, son demasiado conservadores.

El silicio tiene una dualidad clave en su programa: puede fabricar transistores para controlar electrones y transmitir luz en ciertas frecuencias de infrarrojo. Esta característica es esencial para entrelazar fotones. Además, pueden solucionar el problema de corrección de errores mediante redundancia con cúbits de refuerzo. Con un millón de ellos, PsiQuantum cree que pueden controlar errores y realizar cálculos reales en el ordenador.

CHIPS CUÁNTICOS BASADOS EN CÚBITS DE PUNTOS CUÁNTICOS

Los chips cuánticos basados en cúbits de puntos cuánticos son una de las tecno-

logías prometedoras en la computación cuántica (ver figura 7). Los puntos cuánticos son nanocristales semiconductores extremadamente pequeños (del orden de nanómetros) que tienen propiedades cuánticas debido a su confinamiento tridimensional. En ellos, los electrones están restringidos a moverse en un espacio limitado, creando estados cuánticos discretos. Este confinamiento los convierte en estructuras similares a “átomos artificiales”. Los puntos cuánticos pueden ser utilizados como cúbits en un chip cuántico, ya que sus estados electrónicos (por ejemplo, el espín de un electrón) pueden representar los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$ de un cúbit. En un punto cuántico, los electrones pueden ser atrapados en regiones específicas mediante la manipulación de potenciales eléctricos (utilizando estructuras como puertas de control). El espín del electrón o su estado de carga se utiliza para codificar información cuántica. Los estados cuánticos están determinados por las propiedades electrónicas o de espín del electrón en el punto cuántico. Estos estados pueden ser manipulados mediante pulsos eléctricos, magnéticos u ópticos, dependiendo del diseño del sistema. Se pueden crear interacciones entre puntos cuánticos vecinos mediante técnicas como acoplamiento capacitivo o de túnel. Este acoplamiento permite realizar operaciones cuánticas fundamentales, como puertas de dos cúbits.

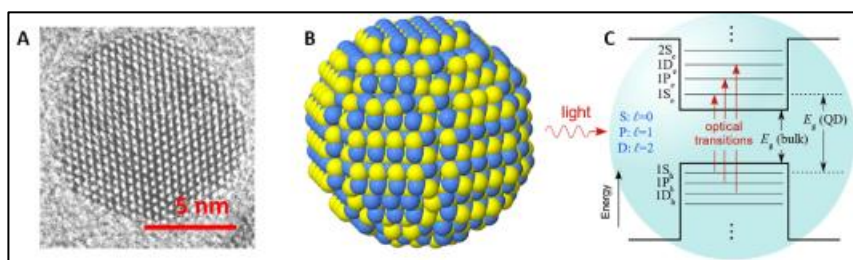
Las ventajas de los cúbits basados en puntos cuánticos son su escalabilidad pues los puntos cuánticos pueden fabricarse utili-

zando técnicas avanzadas de fabricación de semiconductores, lo que facilita su integración en chips; también ofrecen un control preciso al ser posible controlar y manipular los estados cuánticos mediante circuitos eléctricos, lo que es compatible con las tecnologías actuales de microelectrónica; y por último su compactación siendo los puntos cuánticos extremadamente pequeños lo que permite construir sistemas cuánticos densos.

Como desafíos habría que señalar: la coherencia cuántica, los cúbits basados en puntos cuánticos son sensibles al ruido eléctrico y magnético, lo que limita el tiempo de coherencia (la duración en la que los cúbits pueden mantener su estado cuántico); la escalabilidad práctica ya que aunque en teoría es posible escalar estos sistemas, integrar millones de cúbits con alta fidelidad y bajos errores es un desafío técnico; así como, el acoplamiento entre cúbits distantes porque se requiere mejorar los mecanismos para lograr interacciones fiables entre cúbits separados. Empresas e instituciones como Intel, Quantum Motion, y QuTech están trabajando en chips cuánticos basados en puntos cuánticos.

Algunos avances destacados incluyen el desarrollo de cúbits con tiempos de coherencia más largos y técnicas para la fabricación de puntos cuánticos en chips de silicio, aprovechando la tecnología CMOS (complementaria a la utilizada en computadoras clásicas).

FIGURA 7
ILUSTRACIÓN DE PUNTOS CUÁNTICOS. (A) IMAGEN DE NANOCRISTALES DE CDSE. (B) ESTRUCTURA ATÓMICA DEL NANOCRISTAL DE CDSE. (C) ESTADOS ELECTRÓNICOS EN UN PUNTO CUÁNTICO NÚCLEO-CAPA, CON EL PROPIO PUNTO EN EL CENTRO



Fuente: BioPlaster Research. El premio nobel y los puntos cuánticos.

En resumen, los cúbits basados en puntos cuánticos son una tecnología prometedora debido a su potencial para integrarse con tecnologías actuales y su escalabilidad. Sin embargo, su desarrollo aún enfrenta desafíos significativos antes de ser viable para computadoras cuánticas prácticas.

CHIPS CUÁNTICOS BASADOS EN CÚBITS DE ESPÍN EN SILICIO O CÚBITS SEMICONDUCTORES

Los chips cuánticos basados en cúbits de espín en silicio o cúbits semiconductores, representan una de las tecnologías más prometedoras para construir computadoras cuánticas escalables y prácticas. Estos cúbits aprovechan el espín de un electrón o de un núcleo como portadores de información cuántica. Esta aproximación se basa en las propiedades cuánticas del silicio, que es un material bien conocido por su papel en la tecnología de semiconductores clásica.

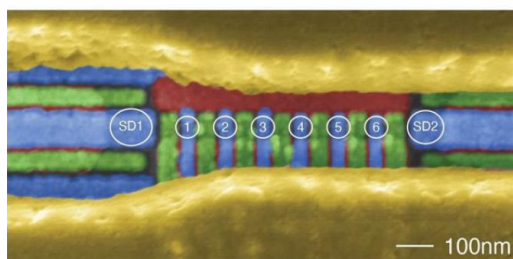
Los cúbits de espín en silicio tienen numerosas ventajas como la compatibilidad con la tecnología de fabricación existente, la cohesión con la industria del silicio, los largos tiempos de coherencia y la escalabilidad. Los cúbits de espín en silicio pueden integrarse en infraestructuras ya utilizadas por la industria de los semiconductores. Esto facilita la fabricación en masa y reduce costes a largo plazo. Por otra parte, utilizar el silicio aprovecha décadas de investigación y desarrollo en la miniaturización y optimización de chips. Además, el espín de electrones o núcleos en silicio puede mantener su estado cuántico durante períodos rela-

vamente largos, especialmente en materiales como el silicio puro de isótopo ^{28}Si , que carece de espines nucleares perturbadores. Gracias a la experiencia en la fabricación de transistores de silicio, es más fácil imaginar la escalabilidad de los cúbits de espín en matrices grandes (véase la Figura 8).

Un cúbit puede ser definido por el estado de espín de un electrón (arriba $|\uparrow\rangle$ o abajo $|\downarrow\rangle$) confinado en un punto cuántico creado dentro del silicio. Alternativamente, el espín de un núcleo atómico (como el del fósforo) dopado en el silicio también puede servir como cúbit. Se utilizan campos magnéticos o eléctricos para manipular los estados de espín. La interacción espín-órbita permite operar estos cúbits mediante pulsos de microondas o tecnología más avanzada basada en radiofrecuencia. Los cúbits pueden estar acoplados a través de interacciones como la de intercambio o mediante fotones en una cavidad resonante. La lectura del estado del cúbit se realiza mediante técnicas de detección de carga o medidas ópticas.

Los desafíos a los que se enfrenta son: el error y decoherencia, aunque el silicio ofrece tiempos de coherencia largos, la interacción con su entorno puede causar errores que dificulten operaciones fiables; la conectividad limitada pues la interacción entre cúbits adyacentes en sistemas de espín es más débil que en otros enfoques, como los basados en superconductores; y la fabricación precisa ya que el posicionamiento exacto de dopantes o puntos cuánticos a escala atómica es extremadamente complejo y requiere tecnologías avanzadas.

FIGURA 8
MÁS CERCA DE UNA COMPUTADORA CUÁNTICA BASADA EN SILICIO



Fuente: Europa Press. "Mas cerca de una computadora cuántica basada en el silicio"

Como avances recientes es necesario señalar que Laboratorios como los de la Universidad de Nueva Gales del Sur (UNSW) en Australia han desarrollado cúbits basados en átomos de fósforo en silicio. Empresas como Intel y otros actores están explorando la tecnología de cúbits en puntos cuánticos de silicio. En cuanto a la escalabilidad, se han logrado implementar matrices con varios cúbits de espín en silicio que pueden interactuar entre sí. La combinación de los cúbits de espín en silicio con avances en corrección de errores cuánticos y acoplamiento eficiente podría posicionar esta tecnología como un líder en la carrera hacia la computación cuántica práctica. Si se logra superar los retos actuales, podría emerger como una solución competitiva y ampliamente adoptada.

Empresas como Intel, junto con otros actores del sector, están trabajando en tecnologías que utilizan puntos cuánticos en silicio. Estos puntos confinan electrones individuales, cuya interacción y manipulación permiten realizar operaciones cuánticas. Intel, en particular, está adaptando su infraestructura existente de fabricación de semiconductores para construir dispositivos de silicio cuántico.

Se han implementado matrices funcionales con múltiples cúbits de espín en silicio. Estos cúbits pueden interactuar entre sí mediante mecanismos como el acoplamiento de intercambio de espín o fotones en cavidades resonantes. Estos logros representan un paso crucial hacia sistemas cuánticos escalables y útiles en el mundo real. La integración de tecnologías de corrección de errores cuánticos con cúbits de espín en silicio ha mejorado la fidelidad y robustez de las operaciones. Además, el uso de diseños innovadores para acoplar cúbits entre sí está optimizando la conectividad, un factor clave para construir arquitecturas cuánticas prácticas.

CHIPS CUÁNTICOS BASADOS EN CÚBITS TOPOLÓGICOS

Un cúbit topológico utiliza las propiedades de la topología para almacenar y manipular información cuántica. Los estados cuánticos

de estos cúbits están protegidos de perturbaciones locales debido a su naturaleza topológica, lo que los hace intrínsecamente resistentes al ruido. El concepto está relacionado con las cuasipartículas llamadas fermiones de Majorana, que son partículas que son su propia antipartícula. Estas cuasipartículas aparecen en ciertos materiales y condiciones específicas, como en los extremos de nanocables superconductores. En un cúbit topológico, la información cuántica se codifica en los estados entrelazados de estas partículas. Las cuasipartículas de Majorana se crean en materiales superconductores mediante el acoplamiento de espín y órbita bajo campos magnéticos específicos. Estas cuasipartículas se separan espacialmente, lo que dificulta que los errores locales afecten simultáneamente a ambos extremos. La información cuántica se almacena en el espacio de Hilbert generado por las propiedades no locales de los fermiones de Majorana. Los estados cuánticos están protegidos por un "gap" topológico, lo que reduce la probabilidad de errores. Los cúbits topológicos se manipulan intercambiando las cuasipartículas, un proceso llamado braiding (trenzado). Este movimiento físico implementa operaciones cuánticas que son intrínsecamente robustas al ruido.

Como ventajas de los cúbits topológicos hay que señalar la resistencia al ruido debido a su naturaleza topológica. Los cúbits son menos susceptibles a perturbaciones locales, como fluctuaciones térmicas o electromagnéticas. Esto reduce significativamente los requisitos de corrección de errores, uno de los mayores desafíos en otras arquitecturas cuánticas. Otra ventaja es la estabilidad intrínseca pues los cúbits topológicos tienen tiempos de coherencia más largos en comparación con cúbits basados en otras tecnologías, como los superconductores tradicionales o los puntos cuánticos. La tercera ventaja que ofrecen es su escalabilidad teórica pues su diseño puede integrarse en chips utilizando materiales superconductores y semiconductores avanzados, lo que podría facilitar la construcción de sistemas escalables.

Mientras que los desafíos de los cúbits topológicos son: la demostración experimen-

tal, debido a que aunque hay evidencias experimentales de fermiones de Majorana, aún no se ha logrado demostrar de manera concluyente su uso práctico como cúbits. Otro desafío son los materiales específicos dado que la creación de cuasipartículas de Majorana requiere condiciones muy específicas: materiales superconductores de alta calidad, nanocables semiconductores y campos magnéticos precisos. Cabe señalar además que la implementación de operaciones cuánticas mediante braiding es técnicamente desafiante y aún está en etapas iniciales de desarrollo.

Empresas como Microsoft con su programa Station Q están investigando activamente los cúbits topológicos. Algunos avances recientes incluyen el desarrollo de nanocables semiconductores-superconductores (por ejemplo, basados en materiales como InSb o InAs); la detección experimental de firmas de fermiones de Majorana en ciertos dispositivos o avances en materiales heteroestructurados que combinan propiedades superconductoras y semiconductoras.

Si los cúbits topológicos cumplen con su potencial, podrían ser un paso revolucionario para la computación cuántica. Su resistencia al ruido y necesidad reducida de corrección de errores los hace ideales para sistemas escalables. Sin embargo, queda un largo camino por recorrer antes de que esta tecnología se implemente en sistemas prácticos. Los cúbits topológicos representan una apuesta a largo plazo con el potencial de superar las limitaciones fundamentales de las arquitecturas cuánticas actuales.

El diseño de Microsoft en esta carrera utiliza procesadores topológicos. Uno de los problemas que enfrentan varios de los diseños anteriores es que la temperatura debe mantenerse en el cero absoluto. Según la teoría cuántica, además de las trampas de iones y los sistemas fotónicos, existe otra forma de crear un ordenador cuántico. Un sistema puede permanecer estable a temperatura ambiente si mantiene algunas propiedades topológicas que siempre se conservan. Los físicos buscan sistemas que mantengan la topología sin importar la temperatura, lo que reduciría los costes y aumentaría la estabilidad de los ordenadores cuánticos. En 2018, físicos de la Universidad Tecnológica

de Delft encontraron un material con estas propiedades: nanohilos de antimoniuro de indio. Este material, resultado de complejas interacciones, se denominó cuasipartícula de modo cero de Majorana.

Los medios promocionaron el material como estable a temperatura ambiente. Microsoft financió un nuevo laboratorio cuántico en su campus. Sin embargo, otro grupo no pudo replicar los resultados. El grupo de Delft luego admitió que había interpretado mal sus hallazgos y retiró su artículo. A pesar del revuelo, los físicos siguen estudiando objetos topológicos como los anyones, manteniendo este enfoque viable.

CHIPS CUÁNTICOS BASADOS EN CÚBITS DE ÁTOMOS NEUTROS

Los chips cuánticos basados en cúbits de átomos neutros son una tecnología emergente en el campo de la computación cuántica, que utiliza átomos neutros individuales como portadores de información cuántica (cúbits). A diferencia de otras plataformas, como los cúbits superconductores o los iones atrapados, los átomos neutros ofrecen ventajas específicas relacionadas con su estabilidad y escalabilidad. Los átomos neutros se enfrían cerca del cero absoluto usando técnicas como el enfriamiento láser. Esto reduce su energía cinética, permitiendo un control preciso sobre sus posiciones. Luego, los átomos se disponen en un patrón regular utilizando trampas ópticas o redes ópticas, que son patrones de luz láser que confinan a los átomos en posiciones específicas. Los cúbits se codifican en los estados internos de los átomos, como sus niveles de energía electrónica o de espín. La manipulación de los cúbits se realiza mediante pulsos de luz láser o microondas. Para realizar operaciones cuánticas, los átomos se acoplan entre sí utilizando el efecto Rydberg, que ocurre cuando los átomos se excitan a estados de alta energía donde interactúan fuertemente a largas distancias.

Los átomos neutros presentan grandes puntos a favor. Es posible atrapar y manipular miles de átomos de forma simultánea, lo que ofrece un camino hacia sistemas cuánticos más grandes. Tienen además unifor-

midad natural, es decir, todos los átomos del mismo elemento son idénticos, lo que elimina problemas de variabilidad entre cúbits. Además, tienen un tiempo de coherencia prolongado. Los átomos neutros son menos susceptibles a interferencias externas que otras plataformas, lo que permite mantener los estados cuánticos durante más tiempo.

Sin embargo, también presentan una serie de desafíos pues manipular y leer los estados de los átomos requiere láseres extremadamente precisos. Y, aunque las interacciones basadas en estados de Rydberg son prometedoras, todavía tienen tasas de error que deben reducirse. Además, requieren sistemas avanzados para el enfriamiento y atrapamiento, lo que añade complejidad técnica. Aunque los cúbits basados en átomos neutros enfrentan desafíos técnicos, tienen un gran potencial para superar limitaciones de escalabilidad y uniformidad que afectan a otras tecnologías cuánticas. Con avances en tecnologías láser, sistemas de control y reducción de errores, esta plataforma podría convertirse en una de las más competitivas para construir computadoras cuánticas prácticas a gran escala.

Como aplicaciones potenciales se señalan la resolución de problemas de optimización complejos, simulación de sistemas físicos cuánticos, como materiales y moléculas y criptografía cuántica y comunicación segura. Pasqal y QuEra Computing son dos empresas destacadas en el desarrollo de chips basados en átomos neutros. Investigaciones recientes están explorando redes ópticas 3D y métodos híbridos que combinen átomos neutros con otras tecnologías para superar las limitaciones actuales. Este enfoque es una de las múltiples alternativas dentro del ecosistema cuántico y tiene el potencial de contribuir significativamente al desarrollo de computadoras cuánticas escalables y prácticas.

CHIPS CUÁNTICOS BASADOS EN CÚBITS DE CENTROS DE NITRÓGENO VACANTE

Los chips cuánticos basados en cúbits de centros de nitrógeno-vacante (NV) en diamante representan una tecnología inno-

vadora que aprovecha los defectos en la red cristalina del diamante para construir procesadores cuánticos y sistemas avanzados de detección. Un centro de nitrógeno-vacante (NV) es un defecto estructural en el diamante que consiste en un átomo de carbono reemplazado por un átomo de nitrógeno y una vacante adyacente (hueco) en la red cristalina del diamante. Estos centros tienen propiedades cuánticas únicas, como niveles de espín electrónico que se pueden manipular, almacenar y leer utilizando láseres y microondas. En los chips cuánticos, los centros NV se emplean como cúbits, unidades básicas de información cuántica.

Los cúbits están representados por los estados de espín del electrón del centro NV. Los estados cuánticos se manipulan con precisión mediante pulsos de luz láser y microondas. En cuanto a la integración en un chip, los centros NV se implantan en diamantes sintéticos y se controlan mediante circuitos ópticos, microondas y, en algunos casos, mecánicos.

Los chips cuánticos basados en cúbits de centros de nitrógeno vacante ofrecen diversas ventajas. A diferencia de otros sistemas cuánticos que requieren temperaturas criogénicas, los centros NV pueden funcionar a temperatura ambiente, reduciendo significativamente los costes y la complejidad de la infraestructura. Por otro lado, los cúbits NV tienen tiempos de coherencia prolongados, especialmente a bajas temperaturas, lo que es crucial para realizar cálculos cuánticos complejos. También presentan compatibilidad óptica ya que los centros NV interactúan con luz visible, facilitando su integración con tecnologías ópticas como redes de fibra óptica. Cabe añadir que los diamantes son materiales extremadamente robustos, lo que hace que estos chips sean físicamente resistentes y estables. Y por último sus aplicaciones híbridas pudiendo usarse los centros NV en combinación con tecnologías ópticas y fotónicas para construir chips cuánticos multifuncionales.

Por otra parte, presentan diversos desafíos. Requieren control y fabricación precisa. La creación de chips con arreglos densos y bien controlados de centros NV es técnica-

mente desafiante. Cada centro debe estar posicionado con alta precisión para facilitar su manipulación y lectura. Su escalabilidad es limitada pues la separación física entre centros NV dificulta las interacciones entre múltiples cúbits, lo que plantea barreras para construir sistemas cuánticos grandes y escalables. Además de presentar tasas de error y ruido pues aunque los centros NV son robustos, las interacciones con el entorno pueden provocar descoherencia y errores en las operaciones cuánticas. Así mismo, la fluorescencia emitida por los centros NV es débil y requiere sistemas de detección avanzados para una lectura precisa. Por último, ha de señalarse que los tiempos de manipulación y lectura de cúbits NV son más lentos en comparación con otras tecnologías, como los cúbits superconductores.

Los chips cuánticos basados en centros NV tienen varias aplicaciones interesantes. En computación cuántica, aunque no sirven para construir grandes supercomputadoras, sí son muy útiles en prototipos pequeños y en pruebas de algoritmos. Como sensores cuánticos, destacan por su enorme sensibilidad a campos magnéticos, eléctricos y a la temperatura, lo que permite crear instrumentos de alta precisión para estudiar materiales, sistemas biológicos o fenómenos físicos. En comunicación cuántica, tienen el potencial de generar y manipular fotones entrelazados, una pieza clave para desarrollar redes de comunicación seguras. Y en el campo de la microscopía y la nanomedicina, se usan para observar materiales y sistemas biológicos con una resolución sin precedentes.

Se han desarrollado chips cuánticos pequeños que integran cúbits NV con sistemas ópticos y de microondas, demostrando operaciones básicas y algoritmos simples. Los centros NV ya se emplean en sensores cuánticos avanzados para aplicaciones industriales y de investigación. Empresas como Quantum Diamond Technologies Inc. (QDTI) y Element Six están trabajando en la comercialización de diamantes NV para sensores y computación cuántica. Se exploran métodos para reducir la separación entre centros NV y técnicas híbridas

que combinen NV con fotónica o materiales superconductores.

Los chips cuánticos basados en centros NV ofrecen un enfoque robusto y flexible para aplicaciones específicas en el ecosistema cuántico. Si bien enfrentan desafíos en la escalabilidad para computación cuántica masiva, su capacidad para funcionar a temperatura ambiente y su versatilidad los posicionan como una tecnología clave en sensores cuánticos y sistemas de comunicación cuántica.

Con avances en la fabricación de diamantes sintéticos y mejoras en el control óptico y microondas, es posible que los chips NV encuentren aplicaciones más amplias en la próxima década, complementando otras plataformas cuánticas en un enfoque híbrido.

CONCLUSIONES

La creación de chips cuánticos, el corazón de los ordenadores cuánticos enfrenta un complejo equilibrio entre ventajas y desafíos, determinado en gran medida por la tecnología de cúbits utilizada.

Es necesario señalar que ninguna tecnología de cúbits domina completamente el panorama de la computación cuántica, ya que todas presentan un balance entre ventajas y desafíos. A corto plazo, los cúbits superconductores lideran la industria debido a su madurez tecnológica y escalabilidad demostrada. A largo plazo, tecnologías como los cúbits de espín en silicio y los cúbits topológicos tienen el potencial de revolucionar la industria al ofrecer sistemas más compactos, estables y eficientes. La elección de tecnología dependerá de la aplicación específica, desde simulaciones científicas hasta optimización y criptografía, ya que los diferentes diseños de cúbits ofrecen beneficios únicos según las necesidades.

Realizando un resumen por TRL -*Technology readiness levels*/Niveles de madurez de la tecnología-, se podría indicar lo siguiente:

- Cúbits superconductores. Nivel TRL (6-7). Sistemas funcionales y precomerciales; líderes en la industria.

- Cúbits basados en iones atrapados. Nivel TRL 6. Tecnología madura pero limitada en escalabilidad práctica.
- Cúbits fotónicos: Nivel TRL (4-5). Prototipos avanzados; retos en escalabilidad y corrección de errores.
- Cúbits basados en átomos neutros: Nivel TRL (4-5). los átomos neutros destacan por su promesa de escalabilidad y uniformidad, lo que podría acelerar su avance hacia niveles TRL más altos en el medio plazo.
- Cúbits de espín en silicio. Nivel TRL (4-5). Prototipos en laboratorio; escalabilidad limitada.
- Cúbits basados en centros de nitrógeno vacante: los cúbits NV se encuentran principalmente en un nivel de desarrollo experimental avanzado (TRL 4-5) en computación cuántica. Sin embargo, en aplicaciones de sensores cuánticos y tecnología de detección, ya están en uso comercial y operativo (TRL 7-9).
- Cúbits topológicos. Nivel TRL (2-3). En investigación fundamental; sin aplicaciones prácticas inmediatas.

Todas las tecnologías de cúbits necesarias para la creación de chips cuánticos, el corazón de los ordenadores cuánticos, presentan sus ventajas y desafíos, y ninguna ha alcanzado un nivel de comercialización generalizado. En computación cuántica, a diferencia de en la computación clásica, todavía no se ha descubierto el equivalente al transistor, que permita el escalado, en este caso, mediante la ley de Neven. El transistor, considerado uno de los mayores inventos del siglo XX, ha permitido que cada dos años se doble el número de transistores en un chip, según establece la ley de Moore, pero en el caso de la computación cuántica todavía se está a la espera de encontrar cuál será finalmente el "transistor" cuántico y si se encontrará. En cualquier caso, unir enfoques clásicos y cuánticos, abre una nueva ventana de posibilidades. Más allá de la competición entre tecnologías, el verdadero avance parece estar en encontrar formas de combinarlas para superar las limitaciones de cada una y alcanzar niveles de capacidad computacional que antes parecían imposibles.

SOBRE EL AUTOR

Juan Miguel Ibáñez de Aldecoa Quintana es ingeniero industrial (especialidad electrónica) por la Universidad Pontificia Comillas (ICAI-ICADE). Actualmente ejerce su labor profesional como Ingeniero Industrial del Estado. Cuenta también con un Máster en Dirección de Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones por la Universidad Politécnica de Madrid.

ECONOMÍA INDUSTRIAL
ISSN 0422-2784

SUSCRIPCIÓN ANUAL

ECONOMÍA INDUSTRIAL (4 NÚMEROS AL AÑO)			
	ESPAÑA 1 año	EUROPA 1 año	RESTO DEL MUNDO 1 año
SUSCRIPCIÓN	40,00 €	40,00 €	40,00 €
Gastos de envío en España	3,60 €	5,24 €	6,68 €
Mas 4% de IVA Excepto Canarias, Ceuta y Melilla	1,74 €		
TOTAL	45,34 €	45,24 €	46,68 €

EJEMPLARES SUELTOS

ECONOMÍA INDUSTRIAL			
	ESPAÑA 1 ejemplar	EUROPA 1 ejemplar	RESTO DEL MUNDO 1 ejemplar
NÚMERO SUELTO	15,00 €	15,00 €	15,00 €
Gastos de envío en España	0,90 €	1,31 €	1,67 €
Mas 4% de IVA Excepto Canarias, Ceuta y Melilla	0,64 €		
TOTAL	16,54 €	16,31 €	16,67 €

Suscripciones y venta de ejemplares sueltos

Ministerio de Industria y Turismo. Centro de Publicaciones.
C/ Panamá, 1. Planta 0, despacho 11.
Teléfonos: 91 349 43 66 (suscripciones y ventas)
Correo electrónico: CentroPublicaciones@mintur.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA
Y TURISMO

SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

SUBDIRECCIÓN GENERAL
DE ESTUDIOS Y PUBLICACIONES
CENTRO DE PUBLICACIONES