



REPORTE DE TECNOLOGÍA:
**COMPUTACIÓN
CUÁNTICA**



Descargo de responsabilidad: Se utilizó un programa de inteligencia artificial para reformatear la imagen que ilustra este texto.



Copyright © 2025 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



AUTORES

Lucía Latorre
Ignacio Cerrato
Lorenzo de Leo

SUPERVISOR

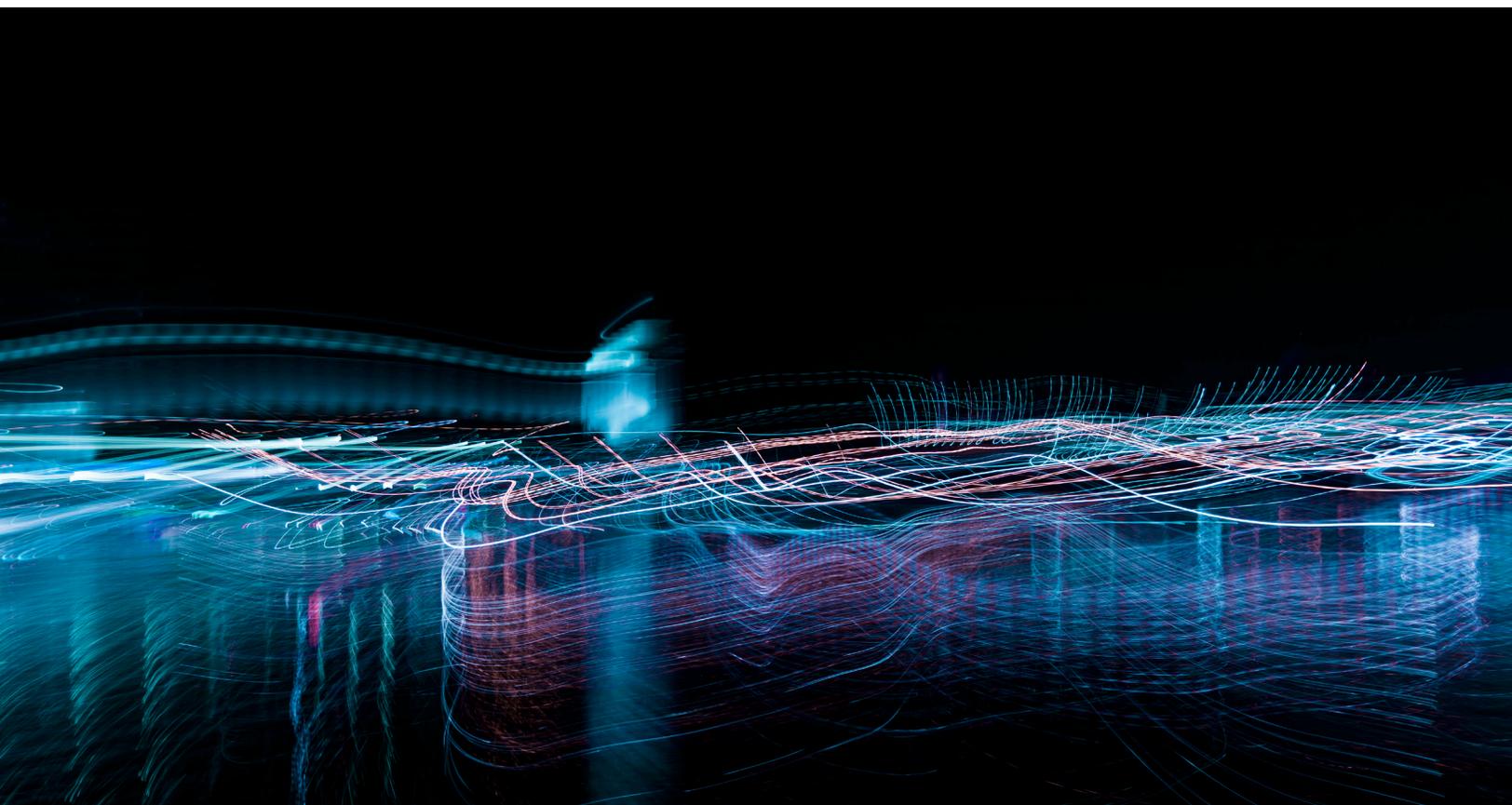
Mariana Gutiérrez

COLABORADORES

José Daniel Zarate
Eduardo Rego
Rodrigo Villamayor

TechLab

Los TechReports son una iniciativa del Laboratorio de Tecnologías Emergentes del departamento de TI del BID, conocido como TechLab, que se encarga de explorar, experimentar y difundir información sobre nuevas tecnologías para conocer su impacto en el Grupo BID y la región de ALC.



Agradecimientos: El equipo del BID desea agradecer a todas las personas que participaron en entrevistas y brindaron información clave para este documento.



TABLA DE CONTENIDO

● RESUMEN EJECUTIVO	6
● PUBLICACIONES RELACIONADAS	7
● DEFINICIÓN	8
Principios clave de la Mecánica Cuántica	8
Cómo funcionan los Ordenadores Cuánticos	9
Comparación con la Computación Clásica	10
● ESTADO ACTUAL DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA	11
Tipos de Ordenadores Cuánticos	11
Software Cuántico y Programación	13
Hitos y Logros Recientes	13
Investigación Gubernamental y Académica	14
● APLICACIONES DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA	16
Problemas de Optimización	16
Aprendizaje Automático e IA	17
Descubrimiento de Fármacos y Salud	18
Cambio Climático y Ciencias Ambientales	19
Industria Química	19
Modelización Financiera y Servicios	19
● COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN ALC	20
● DESAFÍOS EN LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA	22
Ruido Cuántico, Estabilidad y Coherencia de los Cúbits	22
Escalabilidad de los Sistemas Cuánticos	23
Corrección de Errores Cuánticos	23
Obstáculos en la Fabricación y la Ingeniería	24

●	RIESGOS Y PREOCUPACIONES	25
	Amenaza a los métodos de cifrado actuales	25
	Consideraciones éticas	26
●	EL FUTURO DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA	28
	Predicciones para la comercialización	28
●	REFERENCIAS	30



RESUMEN EJECUTIVO

La computación cuántica es un campo emergente que utiliza los principios de la mecánica cuántica para transformar el procesamiento de la información, ofreciendo capacidades computacionales que superan a las de los ordenadores clásicos en la resolución de problemas complejos específicos.

La base de la informática cuántica es el bit cuántico, o *cúbit*, un análogo cuántico del bit clásico, que puede existir en múltiples estados simultáneamente gracias a un fenómeno conocido como superposición. Esta habilidad permite a los ordenadores cuánticos realizar cálculos paralelos, aumentando significativamente su capacidad de procesamiento en determinados tipos de problemas. La computación cuántica tiene el potencial para impulsar avances en diversas áreas, como el descubrimiento de fármacos, la ciencia de materiales, la criptografía y la modelización financiera.

Este informe ofrece una guía general de la computación cuántica, incluyendo sus principios fundamentales, el funcionamiento de los ordenadores cuánticos y las principales diferencias entre la computación cuántica y la clásica. El análisis también aborda el estado actual de la informática cuántica, haciendo referencia a los avances recientes en hardware, software e iniciativas de investigación, así como a los distintos tipos de ordenadores cuánticos que se están desarrollando en la actualidad.

Asimismo, el informe explora las aplicaciones de la computación cuántica en diversos sectores, resaltando su potencial para resolver problemas complejos de optimización, mejorar los algoritmos de aprendizaje automático, acelerar el descubrimiento de fármacos y contribuir a la lucha contra el cambio climático. Se presta especial atención a los desafíos que enfrenta la computación cuántica, como la estabilidad de los cúbits, la corrección de errores y la amenaza que representa para los sistemas de cifrado actuales. Finalmente, el informe profundiza en las consideraciones éticas, las preocupaciones de seguridad y la trayectoria futura de la computación cuántica, enfatizando la importancia de la innovación responsable y la colaboración entre la industria, el mundo académico y el gobierno para superar estos obstáculos y aprovechar plenamente las posibilidades de la tecnología cuántica.



PUBLICACIONES RELACIONADAS DEL BID

Es importante señalar que el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha publicado previamente dos informes exhaustivos sobre tecnologías cuánticas. Estas publicaciones proporcionan un análisis detallado y ofrecen perspectivas complementarias a la información presentada en este informe. Se recomienda a los lectores consultar estos informes para profundizar en el estudio de la computación cuántica y sus amplias implicaciones:

- **Tecnologías Cuánticas: Transformación Digital, Impacto Social y Disrupción Intersectorial** por Marcos Allende López y Marcelo Madeira Da Silva.⁴³
- **Resistencia Cuántica en Redes Blockchain** por Marcos Allende López, Marcelo Madeira Da Silva y otros.⁴⁴





DEFINICIÓN



La computación cuántica supone un enfoque innovador para el procesamiento de la información, aprovechando los principios fundamentales de la mecánica cuántica para realizar cálculos complejos de manera más eficiente que los ordenadores clásicos. La base de la informática cuántica es el bit cuántico, o cúbit, un análogo cuántico del bit clásico, que puede existir en múltiples estados simultáneamente gracias a un fenómeno conocido como superposición. Esta capacidad única permite que los ordenadores cuánticos realicen cálculos paralelos, lo que ofrece la posibilidad de incrementar exponencialmente el poder de procesamiento para ciertos tipos de problemas³.

PRINCIPIOS CLAVES DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Para comprender la computación cuántica, es necesario entender varios principios fundamentales de la mecánica cuántica.

Estos principios son clave para el funcionamiento de los ordenadores cuánticos y marcan la diferencia con los sistemas informáticos clásicos.

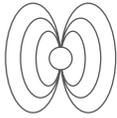


Superposición: A diferencia de los bits clásicos, que solo pueden estar en uno de dos estados (0 o 1), los cúbits pueden existir simultáneamente en una superposición de ambos estados². Esto permite a los ordenadores

cuánticos procesar múltiples posibilidades al mismo tiempo, aumentando considerablemente su capacidad computacional¹.



Entrelazamiento: Este fenómeno se produce cuando los cúbits se conectan de tal manera que el estado de un cúbit influye instantáneamente en el estado de otro, sin importar la distancia que los separa². El entrelazamiento posibilita un intercambio rápido de información y una coordinación eficiente entre cúbits, característica esencial para el desarrollo de algoritmos cuánticos avanzados. Albert Einstein lo describió como una «espeluznante acción a distancia» debido a su naturaleza no local².



Interferencia: Los ordenadores cuánticos utilizan patrones de interferencia para reforzar los resultados correctos y suprimir los incorrectos durante el procesamiento de cálculos. Esta propiedad se aprovecha para mejorar la precisión y velocidad del procesamiento cuántico².



Decoherencia: La decoherencia se refiere a la pérdida de los estados cuánticos de los cúbits debido a la interacción con su entorno, lo que hace que estos cúbits se comporten de manera más similar a los bits clásicos¹. La gestión de la decoherencia es crucial para garantizar la estabilidad y fiabilidad de los cálculos cuánticos.

CÓMO FUNCIONAN LOS ORDENADORES CUÁNTICOS

Los ordenadores cuánticos funcionan de manera diferente a los ordenadores clásicos, utilizando cúbits en lugar de bits clásicos¹. La superposición, que es la capacidad de representar tanto el 0 como el 1 simultáneamente, permite a los ordenadores cuánticos realizar múltiples cálculos a la vez¹. El componente central de un ordenador cuántico es la Unidad de Procesamiento Cuántico (QPU), que ejecuta los algoritmos cuánticos manipulando los cúbits a través de puertas cuánticas².

La representación física de los cúbits varía según la tecnología utilizada. Pueden implementarse mediante diferentes sistemas, como circuitos superconductores, iones atrapados o estructuras fotónicas. Independientemente de la tecnología utilizada, estos cúbits están diseñados para almacenar y procesar información de una manera que no es posible para los ordenadores clásicos¹. A través de operaciones como el entrelazamiento, los ordenadores cuánticos pueden aplicar transformaciones específicas a grupos de cúbits simultáneamente, lo que les permite resolver ciertos problemas complejos de manera más eficiente¹.

COMPARACIÓN CON LA COMPUTACIÓN CLÁSICA

Para entender mejor las capacidades y limitaciones de la computación cuántica, es útil compararla con la computación clásica en varias dimensiones clave:



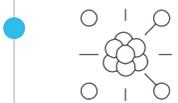
Procesamiento de la información: Los ordenadores clásicos emplean bits, que pueden representar únicamente uno de dos estados (0 o 1) en un momento dado. En cambio, los ordenadores cuánticos utilizan cúbits, que pueden representar múltiples estados simultáneamente, ofreciendo una forma fundamentalmente diferente de procesar la información³.



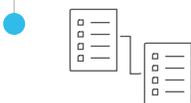
Potencia computacional: La potencia de los ordenadores cuánticos crece de forma exponencial con el número de cúbits⁴. Por ejemplo, mientras que un ordenador clásico debe procesar cada cálculo de manera secuencial, un ordenador cuántico con tres cúbits puede realizar hasta ocho (2^3) cálculos en paralelo².



Entorno operativo: Los ordenadores clásicos operan de manera eficiente a temperatura ambiente, mientras que muchos ordenadores cuánticos necesitan entornos extremadamente fríos, cercanos al cero absoluto (-273 °C), para mantener la estabilidad de los cúbits y evitar su decoherencia³[4].



Enfoque de resolución de problemas: Los ordenadores clásicos son deterministas, lo que significa que están diseñados para calcular un resultado específico en cada ejecución. En cambio, los ordenadores cuánticos utilizan un enfoque probabilístico para identificar la solución más probable a un problema, algo particularmente ventajoso cuando se enfrentan a problemas complejos y ambiguos¹.



Copia de datos y reversibilidad de circuitos: Los ordenadores clásicos pueden copiar datos fácilmente y suelen operar mediante circuitos irreversibles. Los ordenadores cuánticos, debido al teorema de no-clonación —que establece que es imposible crear una copia de un estado cuántico desconocido arbitrario— dependen de circuitos reversibles, asegurando que el estado de entrada pueda recuperarse a partir de su salida⁴.

Es importante señalar que no se espera que los ordenadores cuánticos reemplacen completamente a los ordenadores clásicos en el futuro cercano⁴. Los ordenadores cuánticos son especialmente apropiados para tareas que implican grandes volúmenes de datos y cálculos complejos, donde pueden ofrecer una ventaja de rendimiento sobre los sistemas clásicos⁴. Para tareas más comunes y cotidianas, los ordenadores clásicos seguirán siendo la herramienta predominante⁴.

En el futuro, es probable que se adopte un enfoque híbrido, en el que los ordenadores cuánticos y clásicos trabajen juntos para resolver problemas complejos de manera eficiente.



ESTADO ACTUAL DE LA **COMPUTACIÓN CUÁNTICA**



En los últimos años, la computación cuántica ha experimentado avances significativos, tanto en el desarrollo de hardware como en el software, así como en las iniciativas de investigación. Esta sección ofrece una visión general del estado actual de la computación cuántica, incluyendo los tipos de ordenadores cuánticos, los avances en software y programación cuántica, los hitos recientes y los esfuerzos de investigación en los ámbitos gubernamental y académico.

TIPOS DE ORDENADORES CUÁNTICOS

Como se ha señalado previamente, el elemento central de los ordenadores cuánticos es el uso de cúbits como unidades fundamentales de información, a diferencia de los ordenadores clásicos que emplean bits tradicionales⁵. Existen diversos enfoques para implementar los cúbits, utilizando diferentes sistemas físicos, lo que da lugar a distintas configuraciones en el diseño de ordenadores cuánticos. Actualmente, se están desarrollando varios tipos de ordenadores cuánticos, cada uno con su propia arquitectura única⁷:

1. Cúbits superconductores

Los Esta es una de las tecnologías más utilizadas en la computación cuántica, en la que los cúbits se generan utilizando circuitos hechos de materiales superconductores. Estos circuitos tienen la capacidad de mantener estados cuánticos a temperaturas extremadamente bajas, donde la resistencia eléctrica desaparece, lo que permite un control

preciso de los estados de los cúbits.

2. Cúbits de iones atrapados

En este modelo, los iones individuales, o átomos cargados, se atrapan y mantienen en su lugar mediante campos electromagnéticos. Posteriormente, estos iones son manipulados con láseres para realizar operaciones cuánticas. Los cúbits de iones atrapados ofrecen operaciones de alta fidelidad y tiempos de coherencia prolongados.

3. Cúbits fotónicos

Este método utiliza fotones como unidades fundamentales de información, aprovechando las propiedades únicas de la luz para codificar y procesar la información cuántica.

4. Cúbits de átomos neutrales

Esta tecnología emergente emplea átomos neutros como cúbits. Al no tener carga eléctrica neta, estos átomos se atrapan y manipulan mediante rayos láser y campos magnéticos. Normalmente, los átomos se organizan en redes ópticas o se sujetan mediante pinzas ópticas.

5. Puntos cuánticos

Este enfoque utiliza estructuras semiconductoras para atrapar y manipular electrones individuales como cúbits. Los estados de los cúbits se representan mediante estados de espín o los niveles de energía de estos electrones atrapados.

Además de estos enfoques ya consolidados, los investigadores también están explorando tecnologías emergentes de cúbits que, en su mayoría, siguen siendo teóricas. Por ejemplo, conceptos como los electrones en neón sólido o los electrones sobre helio superfluido han generado interés como posibles candidatos para la implementación de cúbits²⁴. No obstante, la tecnología emergente más prometedora hasta la fecha son los «fermiones de Majorana», los cuales pueden generarse en el límite de fase de un hilo superconductor o en los vórtices de campos magnéticos intensos²⁴. Los fermiones de Majorana —partículas que son su propia antipartícula— podrían permitir la creación de cúbits altamente escalables y de alta fidelidad, protegidos por características topológicas que ofrecen mayor estabilidad. A pesar de su potencial, se necesitan más avances en investigación para hacer de esta tecnología una realidad práctica.

Existen una cantidad significativa de investigaciones en curso en el campo de la computación cuántica, orientadas a mejorar las capacidades y ampliar las aplicaciones de estas tecnologías. Un ejemplo reciente de innovación proviene de la Universidad de California en Irvine y el Laboratorio Nacional de Los Álamos, donde se descubrió un método para transformar materiales comunes, como el vidrio, en conductores aptos para ordenadores cuánticos¹³. Este avance subraya el dinamismo y la experimentación continua necesarios para superar las limitaciones actuales y desbloquear todo el potencial de la computación cuántica.

SOFTWARE CUÁNTICO Y PROGRAMACIÓN

A medida que avanza el hardware cuántico, el desarrollo de software cuántico y de herramientas de programación adquiere cada vez más importancia. Como respuesta a esta necesidad, han surgido varios lenguajes de programación cuántica y kits de desarrollo de software (SDK) para facilitar la creación y ejecución de algoritmos cuánticos^{8,9}:

- 6. Python** Python se ha consolidado como el lenguaje más popular en la computación cuántica, gracias a su simplicidad y la disponibilidad de numerosos paquetes dedicados a esta área.
- 7. Qiskit** Desarrollado por IBM, Qiskit es un SDK de código abierto que permite trabajar con ordenadores cuánticos a nivel de circuitos, pulsos y algoritmos.
- 8. Q#** Lenguaje de programación desarrollado por Microsoft, diseñado específicamente para escribir algoritmos cuánticos. Q# admite el control de flujo clásico durante la ejecución de un algoritmo cuántico.
- 9. Cirq** El marco de código abierto de Google para ordenadores cuánticos de escala intermedia ruidosa (NISQ). Cirq viene con simuladores integrados para funciones de onda y matrices de densidad.
- 10. Julia** Cada vez más popular en la computación cuántica, Julia ofrece un rendimiento más rápido y mejor gestión de la memoria para el preprocesamiento y posprocesamiento clásico, así como para simulaciones.

Estos lenguajes de programación y SDK proporcionan herramientas para crear y manipular programas cuánticos, simular sistemas cuánticos y ejecutar algoritmos en dispositivos cuánticos reales o simuladores.

HITOS Y LOGROS RECIENTES

El campo de la computación cuántica está avanzando rápidamente, impulsado por varias tendencias clave y áreas de enfoque. Un hito significativo fue el logro de la supremacía cuántica, cuando un procesador cuántico superó a los superordenadores clásicos más poderosos en tareas específicas⁵. Investigadores y empresas también están consiguiendo importantes avances en la escalabilidad de los ordenadores cuánticos, con un aumento

constante en el número de cúbits integrados en los procesadores cuánticos¹⁰. Estos avances se complementan con esfuerzos orientados a mejorar la calidad y la conectividad de los cúbits, lo que ha llevado al desarrollo de arquitecturas cuánticas modulares que permiten enlazar múltiples procesadores cuánticos¹⁰.

Otra área crucial de progreso es la corrección de errores cuánticos, en la que se están haciendo importantes avances en la creación de códigos de corrección para cúbits, lo que mejora la fiabilidad y el rendimiento de los cálculos cuánticos¹⁰. Además, se han introducido nuevas métricas, como el volumen cuántico, que evalúan el rendimiento de un sistema, considerando tanto la cantidad como la calidad de los cúbits⁶. Estos avances reflejan los esfuerzos continuos para superar los desafíos técnicos y acercarse a la viabilidad de la computación cuántica a gran escala.

INVESTIGACIÓN GUBERNAMENTAL Y ACADÉMICA

La computación cuántica está experimentando avances significativos, impulsados por iniciativas gubernamentales clave y una investigación académica activa a nivel global. Los gobiernos reconocen cada vez más el potencial transformador de las tecnologías cuánticas, no solo en la investigación científica, sino también en la competitividad económica, la seguridad nacional y el desarrollo de infraestructuras. Este reconocimiento ha dado lugar a un aumento en la financiación, programas colaborativos e iniciativas estratégicas destinadas a acelerar la investigación y el desarrollo de la computación cuántica.

A nivel mundial, los gobiernos están intensificando sus inversiones en computación cuántica, motivados por la necesidad de reforzar la seguridad nacional, particularmente frente a las posibles amenazas a los sistemas criptográficos. La preocupación de «cosechar ahora, descifrar después», donde los datos cifrados podrían almacenarse y descifrarse en el futuro utilizando ordenadores cuánticos, ha aumentado la urgencia de estas inversiones. Sin embargo, los programas gubernamentales no se limitan a la seguridad nacional; también están orientados a la competitividad económica, el liderazgo científico y el desarrollo de una fuerza laboral cualificada⁶.

Los gobiernos adoptan un enfoque integral, financiando investigaciones que abarcan desde el desarrollo de hardware y software hasta la creación de algoritmos cuánticos. Estos esfuerzos pretenden maximizar el potencial de los ordenadores cuánticos, con objetivos como alcanzar la supremacía cuántica y desarrollar aplicaciones prácticas que demuestren la ventaja cuántica. La Unión Europea, Estados Unidos, Australia y China están a la vanguardia de estas iniciativas, con programas que promueven la colaboración entre el gobierno, las instituciones académicas y la industria. Este enfoque colaborativo resulta crucial para impulsar el progreso y la futura comercialización de las tecnologías cuánticas⁶.

En Estados Unidos, la Oficina de Ciencia del Departamento de Energía (DoE) ha jugado un papel decisivo en la investigación de la computación cuántica desde 2017. Sus iniciativas se centran en mejorar el hardware cuántico, desarrollar mecanismos

avanzados para el control de cúbits y promover la ciencia fundamental necesaria para facilitar el uso práctico de los ordenadores cuánticos. Esta investigación abarca no solo aspectos teóricos, sino también aplicaciones concretas en campos como la física nuclear, y de partículas, la química y la ciencia de materiales¹¹.

De manera similar, la investigación académica lidera el camino en la computación cuántica, con un fuerte respaldo de financiación gubernamental e iniciativas institucionales. Las universidades e instituciones de investigación están explorando múltiples aspectos de la computación cuántica, incluyendo el desarrollo de algoritmos cuánticos, técnicas de corrección de errores y software cuántico. Estos esfuerzos son esenciales para hacer que los ordenadores cuánticos sean más fiables y accesibles, reduciendo la brecha entre el potencial teórico y las aplicaciones prácticas¹¹.

Un área de gran interés en la investigación cuántica es la computación cuántica modular, que permite la interconexión de múltiples procesadores cuánticos para trabajar en conjunto. Este enfoque se considera una solución clave para superar las limitaciones actuales en términos de número de cúbits y tasas de error, abriendo el camino para sistemas cuánticos más potentes y escalables. Además, el desarrollo de plataformas de prueba para la computación cuántica, apoyadas por iniciativas como las del DoE, está impulsando avances en hardware cuántico, ofreciendo a los investigadores plataformas para la experimentación y la innovación^{6,11}.



APLICACIONES DE LA **COMPUTACIÓN CUÁNTICA**



La computación cuántica tiene el potencial de revolucionar diversos sectores al ofrecer prestaciones computacionales sin precedentes, capaces de abordar algunos de los retos más complejos de la humanidad. A medida que la computación cuántica se integra con tecnologías como la inteligencia artificial generativa (IA), tiene la capacidad de transformar las estrategias empresariales y los modelos económicos, permitiendo analizar las tendencias del mercado y el comportamiento del consumidor con una precisión y velocidad sin igual³⁷. Además, la llegada de algoritmos híbridos cuántico-clásicos, que se prevé comenzarán a tener aplicaciones prácticas ya en 2025, ampliará aún más este potencial³⁵.

PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN

La computación cuántica destaca especialmente en la resolución de problemas de optimización, comunes en una amplia gama de escenarios del mundo real. Estos problemas consisten en encontrar la mejor solución dentro de un conjunto de opciones posibles, a menudo con múltiples objetivos en conflicto. Los algoritmos cuánticos, como el Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA), pueden resolver problemas de optimización de manera más eficiente que los algoritmos clásicos¹².

Un ejemplo emblemático es el «traveling salesman problem», o el «problema del viajante»⁴⁶, en el que los ordenadores cuánticos pueden explorar simultáneamente una

gran cantidad de posibles soluciones, aprovechando propiedades únicas de la mecánica cuántica como la superposición y el entrelazamiento¹³. Esta capacidad de procesamiento paralelo permite a los ordenadores cuánticos manejar grandes volúmenes de datos y resolver problemas complejos a velocidades significativamente mayores¹⁴.

En el ámbito de la optimización matemática, la computación cuántica podría resolver problemas que son prácticamente inviables en ordenadores clásicos o, al menos, sugerir una mejora sustancial en términos de velocidad con respecto al mejor algoritmo clásico disponible¹⁵. Si bien los expertos advierten sobre posibles exageraciones, especialmente en lo que respecta a los algoritmos de optimización cuántica existentes, el campo sigue mostrando un gran potencial de mejora¹².

Desde una perspectiva más práctica, en el sector financiero, la computación cuántica podría mejorar notablemente la optimización de carteras, la gestión de riesgos y el análisis de mercados en tiempo real¹⁹. Algoritmos cuánticos como el QAOA podrían resolver problemas de optimización de manera más eficiente que los algoritmos tradicionales, lo que se traduciría en decisiones de inversión más estratégicas y, potencialmente, en mayores rendimientos¹⁹. En la optimización de carteras, la computación cuántica podría facilitar la selección de la mejor combinación de activos, equilibrando riesgo y rentabilidad¹⁹. Esto podría llevar a una asignación más eficiente de los recursos y mejorar las estrategias de inversión. En la industria automotriz, las empresas están explorando cómo la computación cuántica puede optimizar diversas aplicaciones, desde los procesos de fabricación hasta el diseño de vehículos³⁸.

APRENDIZAJE AUTOMÁTICO E IA

La computación cuántica tiene el potencial de mejorar significativamente los algoritmos de aprendizaje automático e inteligencia artificial. El Quantum Machine Learning (QML) combina los principios de la computación cuántica con el aprendizaje automático, aprovechando los algoritmos cuánticos para mejorar la precisión, efectividad y eficiencia de los algoritmos existentes de aprendizaje automático¹⁴.

El QML introduce nuevos paradigmas algorítmicos, como las Redes Neuronales Cuánticas (QNN) y las Máquinas de Soporte Vectorial Cuánticas (QSVM)¹⁴. Estos algoritmos potenciados por la cuántica pueden ofrecer incrementos exponenciales en la velocidad de entrenamiento e inferencia, lo que permite el desarrollo de modelos de aprendizaje automático más sofisticados¹⁴.

Además, los ordenadores cuánticos pueden superar la maldición de la dimensionalidad en el aprendizaje automático, un fenómeno que se presenta cuando se trabajan con conjuntos de datos de alta dimensionalidad. A medida que aumenta el número de características de un conjunto de datos, estos se vuelven dispersos y crece la complejidad de identificar patrones o relaciones significativos, lo que hace que los problemas sean computacionalmente inabordables para los sistemas clásicos. Técnicas como el Quantum Principal Component Analysis (QPCA) y las Quantum Boltzmann Machines (QBM)

ofrecen soluciones escalables al manejar de manera eficiente estos conjuntos de datos de alta dimensionalidad, permitiendo que los ordenadores cuánticos resuelvan problemas que actualmente van más allá de las capacidades de los sistemas clásicos¹⁴.

DESCUBRIMIENTO DE FÁRMACOS Y SALUD

La computación cuántica promete acelerar enormemente el descubrimiento de fármacos y avanzar en la ciencia de materiales³⁸. En la industria farmacéutica, los algoritmos cuánticos pueden simular el comportamiento de las moléculas a nivel cuántico, revelando información sobre su estructura, dinámica e interacciones con otras moléculas¹⁸.

Esta capacidad permite a los investigadores predecir cómo los posibles candidatos a fármacos interactuarán con proteínas diana, lo que facilita la toma de decisiones más informadas durante el proceso de desarrollo de medicamentos¹⁸. La computación cuántica también ofrece la posibilidad de explorar el vasto universo químico de manera mucho más competente, identificando oportunidades terapéuticas innovadoras que los métodos convencionales podrían pasar por alto¹⁸.

En las simulaciones de dinámica molecular, los algoritmos cuánticos pueden modelar el comportamiento de biomoléculas como proteínas y ácidos nucleicos con una precisión a nivel atómico¹⁸. Este nivel de exactitud mejora enormemente el diseño racional de fármacos dirigidos a vías biológicas específicas¹⁸.

Además, la computación cuántica puede acelerar los procesos de filtrado virtual y diseño de fármacos. Al evaluar de manera más precisa la afinidad de unión de los compuestos con las proteínas diana, los algoritmos cuánticos pueden agilizar el cribado de vastas bibliotecas de compuestos, identificando rápidamente los candidatos terapéuticos más prometedores¹⁸.

En el ámbito de la salud, la computación cuántica también podría facilitar la creación de entornos virtuales para estudiar variables como la temperatura de la piel, los niveles de electrolitos, la circulación sanguínea, los fluidos corporales y el metabolismo en réplicas humanas digitales, lo que podría llevar a tratamientos más personalizados y efectivos³⁷.

CAMBIO CLIMÁTICO Y CIENCIAS AMBIENTALES

La computación cuántica podría desempeñar un papel crucial en la lucha contra la crisis climática, al facilitar avances que ayuden a reducir de manera significativa las emisiones contaminantes. Gracias a la capacidad de los ordenadores cuánticos para modelar sistemas ambientales complejos y optimizar el uso de la energía, podrían surgir soluciones innovadoras que promuevan el desarrollo sostenible³⁸. Estos avances podrían transformar sectores clave como la energía, el transporte y la agricultura, contribuyendo así a mitigar los efectos del cambio climático.

INDUSTRIA QUÍMICA

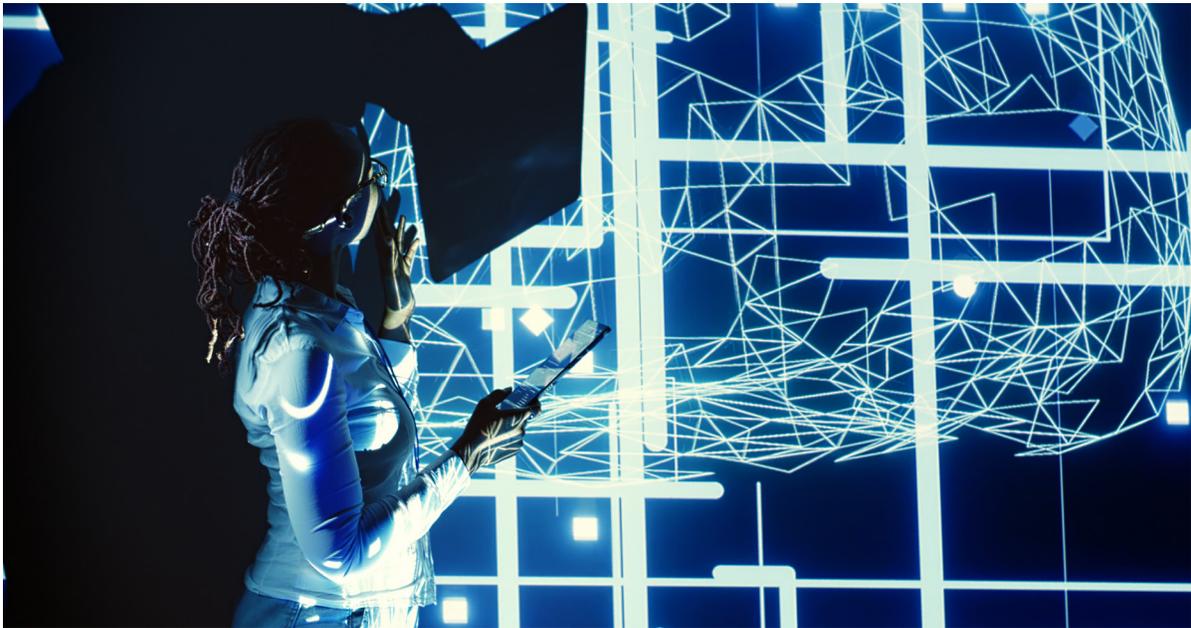
Se espera que la industria química sea uno de los primeros sectores en beneficiarse de las capacidades ampliadas de modelado y cálculo de la computación cuántica. Los algoritmos cuánticos pueden simular reacciones químicas con una precisión sin precedentes, lo que permitiría el descubrimiento de nuevos materiales y procesos que podrían revolucionar la fabricación y el desarrollo de productos³⁸. Esto podría dar lugar a métodos de producción más eficaces y el diseño de materiales con propiedades mejoradas.

MODELIZACIÓN FINANCIERA Y SERVICIOS

En el sector financiero, la computación cuántica podría traer avances importantes en la optimización de carteras, la gestión de riesgos y el análisis de mercados en tiempo real. Al permitir decisiones de inversión más estratégicas y mejorar los rendimientos, los algoritmos cuánticos pueden optimizar la selección de carteras basándose en el equilibrio entre riesgo y rentabilidad¹⁹. La capacidad de los ordenadores cuánticos para procesar y analizar grandes cantidades de datos rápidamente también podría mejorar la gestión de riesgos al proporcionar evaluaciones más precisas y oportunas que ayudarían a mitigar pérdidas y maximizar los rendimientos¹⁹. Asimismo, la rapidez de los cálculos cuánticos permitiría el análisis de mercados en tiempo real, ofreciendo a los inversores la capacidad de tomar decisiones basadas en los datos más actuales, lo cual es crucial en mercados financieros volátiles¹⁹.



COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN ALC



La computación cuántica está avanzando considerablemente en América Latina y el Caribe (ALC), así como en España, con diversos sectores comenzando a reconocer su potencial para abordar desafíos complejos. La Región está ganando cada vez más relevancia en el ámbito global de la computación cuántica, con aplicaciones que van desde la optimización logística hasta la sostenibilidad ambiental. Los ejemplos presentados en este capítulo reflejan algunas de las iniciativas en curso, aunque esta lista no es exhaustiva.

En Uruguay, la computación cuántica se aplica para mejorar la eficiencia logística, particularmente en el transporte aéreo y marítimo de carga. A través de algoritmos cuánticos avanzados, se optimizan los planes de carga, lo que permite hacer las operaciones más eficientes y rentables. Esta aplicación es especialmente valiosa en industrias donde maximizar el espacio y reducir costos son factores clave. La tecnología ha demostrado beneficios prácticos, como en la optimización del posicionamiento de carga en aeronaves de pasajeros, lo que resulta en un uso más eficiente de los recursos disponibles³⁹.

Brasil, por su parte, está utilizando la computación cuántica para transformar su sector agrícola. Los investigadores brasileños están desarrollando algoritmos cuánticos para optimizar el uso de recursos como el agua y los fertilizantes, con el objetivo de mejorar los rendimientos de los cultivos y, a la vez, reducir su impacto ambiental. Estos avances contribuyen a prácticas agrícolas más sostenibles y subrayan el papel crucial de Brasil en la agricultura global, demostrando cómo la computación cuántica puede impulsar la sostenibilidad en sectores clave⁴⁰.

La Región de ALC también está enfocada en el desarrollo de prácticas de ingeniería de

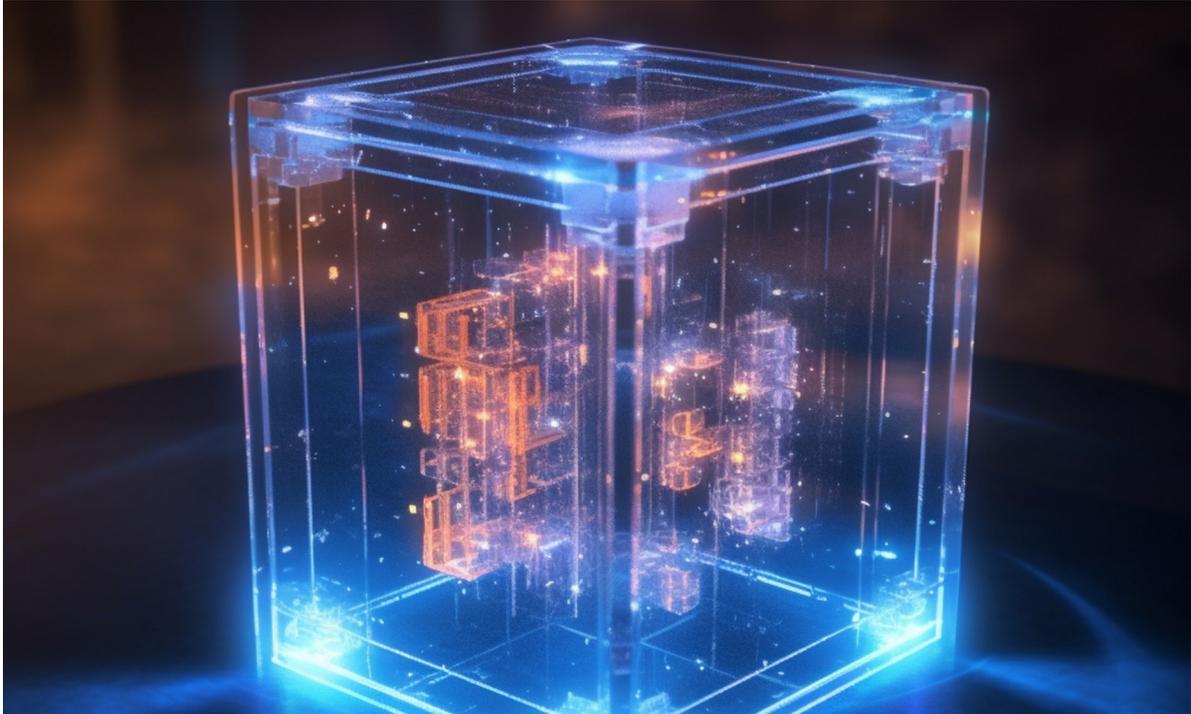
software cuántico. Investigadores en países como Brasil y México trabajan en la creación de nuevas arquitecturas de software y herramientas específicas para la computación cuántica. Estos avances son esenciales para la implementación exitosa de algoritmos cuánticos en sectores como las finanzas, las telecomunicaciones y la logística. Al abordar desafíos como la reducción de ruido y los costes asociados, estas iniciativas están allanando el camino para una adopción más amplia de la computación cuántica en la región⁴¹.

En España, el gobierno ha adoptado un enfoque proactivo para integrar la computación cuántica con otras tecnologías disruptivas, como la inteligencia artificial. La iniciativa Quantum Spain tiene como objetivo establecer el primer ordenador cuántico público en el sur de Europa, en el Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona. Se espera que este paso impulse la posición de España como líder en tecnología cuántica en Europa, permitiendo al país abordar desafíos complejos relacionados con la seguridad nacional y la competitividad económica⁴².

Asimismo, España está utilizando la computación cuántica para hacer frente a desafíos medioambientales. El proyecto CUCO⁴⁵, una de las mayores iniciativas cuánticas del país, se centra en desarrollar algoritmos cuánticos capaces de acelerar la reducción de las emisiones de CO₂. Este proyecto refleja el compromiso de España por utilizar tecnologías avanzadas en la lucha contra el cambio climático y para promover la sostenibilidad⁴².



DESAFÍOS EN LA **COMPUTACIÓN CUÁNTICA**



Aunque la computación cuántica posee un enorme potencial para resolver problemas complejos más allá de las capacidades de los ordenadores clásicos, enfrenta varios desafíos que deben superarse para alcanzar su pleno rendimiento. Esta sección explora los principales obstáculos de la computación cuántica y los esfuerzos en curso para superarlos.

RUIDO CUÁNTICO, ESTABILIDAD Y COHERENCIA DE LOS CÚBITS

A diferencia de los bits clásicos, los cúbits son inherentemente frágiles y susceptibles a perturbaciones ambientales. Esta fragilidad representa un desafío importante para mantener la estabilidad y la coherencia de los estados cuánticos.

Los sistemas cuánticos son intrínsecamente ruidosos, lo que dificulta la construcción de una máquina cuántica sin errores²⁰. Las interacciones entre los cúbits y su entorno, como fluctuaciones térmicas o interferencia electromagnética, pueden generar ruido cuántico que interrumpe los cálculos²¹. Este ruido puede provocar decoherencia, un fenómeno donde los cúbits pierden sus propiedades cuánticas y la información almacenada se ve comprometida²².

Para abordar este desafío, los investigadores se están concentrando en mejorar la calidad de los cúbits, con el objetivo de reducir las tasas de error y prolongar los tiempos de coherencia²³. Esto implica mejorar el aislamiento físico de los cúbits e implementar técnicas avanzadas de control²¹. Además, los ingenieros están desarrollando fuentes de alimentación de bajo ruido y unidades de medida de fuente (SMU) para proporcionar un voltaje de polarización limpio, ubicándolas lo más cerca posible del criostato para minimizar la interferencia ambiental²².

ESCALABILIDAD DE LOS SISTEMAS CUÁNTICOS

A medida que la computación cuántica avanza, escalar los sistemas cuánticos para incluir más cúbits se convierte en un reto cada vez mayor. La complejidad de controlar cada cúbit crece con el número total de cúbits en el sistema, lo que dificulta mantener altos niveles de calidad y *fidelidad*²⁴.

Uno de los principales obstáculos para escalar sistemas cuánticos es el aumento de las tasas de error a medida que crece el número de cúbits y puertas sucesivas²⁴. Los enfoques actuales de electrónica de control y calibración para cúbits superconductores aún no son lo suficientemente escalables como para alcanzar los niveles requeridos para sistemas de gran tamaño²⁴.

En los sistemas de iones atrapados, el principal desafío para aumentar el número de cúbits es crear entrelazamiento entre más de dos cúbits. El movimiento físico de los iones es más lento que el cambio de estados electrónicos, lo que limita la velocidad y la capacidad de entrelazamiento²⁴. Además, estos sistemas enfrentan restricciones de tamaño, ya que la fidelidad disminuye a medida que los iones deben recorrer mayores distancias²⁴.

Para superar estos obstáculos de escalabilidad, los investigadores están explorando enfoques modulares que soporten la corrección de errores²⁵. Esto implica desarrollar algoritmos cuánticos y arquitecturas de sistemas que puedan manejar de manera eficiente un mayor número de cúbits, manteniendo su calidad y coherencia.

CORRECCIÓN DE ERRORES CUÁNTICOS

La corrección de errores es uno de los principales retos en la computación cuántica. Aunque algunos errores son inevitables, la capacidad de detectarlos y corregirlos resulta crucial para el desarrollo de ordenadores cuánticos prácticos²⁶. Sin embargo, el proceso de verificación de errores puede introducir nuevos errores, lo que crea un ciclo complejo de detección y corrección de los mismos²⁶.

Los avances recientes en corrección de errores cuánticos muestran resultados prometedores: los investigadores han desarrollado un método para monitorear los

cúbits durante la computación y detectar errores en tiempo real. Esta técnica permite que los cúbits con errores emitan destellos de luz, mientras que los cúbits sin errores permanecen oscuros e inalterados. Este enfoque transforma los errores en un tipo específico conocido como «errores de borrado», los cuales son más fáciles de corregir que los errores cuyo origen es desconocido²⁶.

En una demostración reciente, aproximadamente el 56% de los errores de un solo cúbit y el 33% de los errores de dos cúbits fueron detectables antes de que finalizara el experimento. Es importante destacar que la acción de verificar los errores aumentó la tasa de error en menos del 0,001%²⁶. Con una mayor optimización, los investigadores creen que se podrían detectar cerca del 98% de todos los errores, lo que reduciría potencialmente los costos computacionales asociados a la corrección de errores en un orden de magnitud o más²⁶.

OBSTÁCULOS EN LA FABRICACIÓN Y LA INGENIERÍA

Conforme aumenta la escala de los sistemas cuánticos, los requisitos de espacio para el equipo de control se convierten en una cuestión crítica. La electrónica actual necesitaría espacios extremadamente grandes para alojar un millón de cúbits²¹. Para hacer frente a este reto, los investigadores trabajan en la miniaturización de los componentes de control mediante arquitecturas innovadoras, como el rediseño a nivel de chip²¹.

Otro desafío es el consumo energético de los sistemas de control. Escalar los sistemas existentes para un millón de cúbits sin cambiar su diseño requeriría una gran central eléctrica únicamente para encenderlos²¹. Esto ha creado la necesidad de desarrollar sistemas y arquitecturas de control más eficientes en términos energéticos.

La fabricación de componentes para la computación cuántica también enfrenta algunas dificultades. Si bien está surgiendo una incipiente cadena de suministro de hardware de computación cuántica, con proveedores de refrigeradores de dilución, sistemas de control y otros componentes basados en tecnologías relativamente maduras, aún sigue habiendo necesidad de componentes más especializados²⁵. Esto incluye componentes electrónicos, atenuadores y amplificadores diseñados específicamente para sistemas cuánticos²⁵.

Para superar estos retos de fabricación e ingeniería, es fundamental fomentar una mayor colaboración entre la industria, el mundo académico y el gobierno. Muchos expertos en el campo abogan por un mayor apoyo gubernamental para avanzar en la industria de la computación cuántica y desarrollar la infraestructura y las cadenas de suministro necesarias²⁵.

Mientras la computación cuántica sigue evolucionando, afrontar estos retos será imprescindible para explotar todo el potencial de la tecnología y lograr la creación de ordenadores cuánticos a gran escala, prácticos y capaces de resolver problemas complejos del mundo real.



RIESGOS Y PREOCUPACIONES



AMENAZA A LOS MÉTODOS DE CIFRADO ACTUALES

La llegada de la computación cuántica representa una amenaza considerable para los métodos de cifrado actualmente en uso, los cuales constituyen la base fundamental de la ciberseguridad. Los algoritmos modernos de cifrado se basan en la dificultad computacional de resolver ciertos problemas matemáticos, como la factorización de números grandes o la resolución de problemas de logaritmos discretos^{13,27}. Los ordenadores clásicos encuentran estos problemas difíciles de resolver en un tiempo razonable, proporcionando la base de seguridad para gran parte de Internet en la actualidad. No obstante, los ordenadores cuánticos, gracias a sus capacidades computacionales superiores, podrían resolver estos problemas con cierta facilidad, lo que pondría en peligro la seguridad de los métodos de cifrado actuales²⁷. La posibilidad de que los ordenadores cuánticos vulneren los estándares actuales de cifrado subraya la necesidad de que las organizaciones evalúen su exposición al riesgo y migren hacia la criptografía poscuántica³⁶.

El impacto de esta amenaza es amplio. Un actor hostil que disponga de capacidades cuánticas podría leer información cifrada transmitida por Internet y acceder a una cantidad incalculable de datos sensibles, como registros médicos o penales, información financiera, investigaciones comerciales de alto nivel e información clasificada sobre seguridad nacional^{28, 31}. La Agencia de Seguridad Nacional de los Estados Unidos (NSA) ha afirmado que «el impacto del uso malintencionado de un ordenador cuántico podría ser devastador

para los sistemas de seguridad nacional y para nuestra nación»²⁸.

Los protocolos de ciberseguridad que protegen tecnologías blockchain ampliamente utilizadas, como Ethereum y Bitcoin, también serían vulnerables a tales ataques³², lo que resalta la necesidad de que los desarrolladores de blockchain actualicen sus plataformas para incorporar criptografía poscuántica.

Ahora bien, la criptografía cuántica, también conocida como cifrado cuántico, ofrece una posible solución a este reto. A diferencia de la criptografía tradicional basada en principios matemáticos, la criptografía cuántica se basa en las leyes de la física¹⁶. Utiliza los principios fundamentales de la mecánica cuántica, como la incertidumbre inherente de las partículas, la capacidad de medir fotones de manera aleatoria en posiciones binarias, y el hecho de que un sistema cuántico no puede ser medido sin ser alterado¹⁶.

La Distribución Cuántica de Claves (QKD) es un excelente ejemplo de criptografía cuántica en acción. QKD permite la distribución segura de claves secretas conocidas únicamente por las partes autorizadas, lo que posibilita la detección de intentos de terceros por interceptarlas¹⁷. Esta tecnología podría proporcionar canales de comunicación imposibles de hackear, garantizando la seguridad de los datos en la era cuántica¹⁶.

CONSIDERACIONES ÉTICAS

A medida que avanzan las tecnologías cuánticas, crece la atención hacia los aspectos éticos y de estandarización asociados a la computación cuántica. La necesidad de establecer estándares se vuelve cada vez más crítica para garantizar la interoperabilidad entre diferentes sistemas. Al mismo tiempo, se requieren directrices éticas claras para abordar cuestiones relacionadas con la privacidad, la seguridad y la accesibilidad⁶.

El desarrollo de la informática cuántica plantea una serie de interrogantes éticos. Un problema importante es la asignación de recursos y la desigualdad. La computación cuántica requiere vastos recursos, tanto físicos como humanos, que actualmente solo están al alcance de unas pocas naciones, por lo que podrían aumentar las diferencias socioeconómicas mundiales³³. Además, el enorme poder de los ordenadores cuánticos podría ser utilizado indebidamente; por ejemplo, podrían ser capaces de vulnerar los sistemas de cifrado actuales, lo que resultaría en violaciones graves de la privacidad y la seguridad³³. La complejidad de los algoritmos cuánticos también plantea preocupaciones sobre la responsabilidad y la transparencia. La naturaleza compleja de estos algoritmos podría dificultar la comprensión de sus acciones y errores, haciendo más difícil asegurar un uso responsable³³.

En respuesta a estas preocupaciones éticas, organizaciones como el Foro Económico Mundial y las Academias Nacionales de Ciencias están desarrollando marcos para guiar el desarrollo y uso responsable de las tecnologías cuánticas³³; y ciertos gobiernos están implementando medidas preventivas para mitigar los riesgos asociados con la computación cuántica. Un ejemplo de ello es el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos (NIST), que está trabajando en la estandarización de nuevos protocolos de criptografía poscuántica (PQC), diseñados para resistir los ataques

tanto de ordenadores clásicos como cuánticos²⁸. De todos modos, la transición a la criptografía poscuántica será un proceso complejo, largo y costoso, que probablemente se extenderá durante muchos años²⁸.

Mientras la computación cuántica continúa evolucionando, es imperativo que las organizaciones comprendan los riesgos potenciales que plantea para sus operaciones y seguridad. Las organizaciones que manejan y procesan datos deben considerar cuidadosamente el valor a largo plazo de sus datos y las consecuencias de que estos datos sean comprometidos o utilizados indebidamente por actores malintencionados³¹.



EL FUTURO DE LA **COMPUTACIÓN CUÁNTICA**



El futuro de la computación cuántica es inmensamente prometedor, con avances potenciales y un impacto de gran alcance en diversas industrias. Conforme la tecnología madure, los expertos anticipan importantes progresos en su comercialización, en descubrimientos científicos y en aplicaciones industriales.

En los últimos años, se han logrado avances relevantes en la corrección de errores, superando las expectativas teóricas previas con progresos prácticos³⁴. Este desarrollo es crucial para alcanzar una computación cuántica tolerante a fallos, un requisito fundamental para aprovechar todo el potencial de esta tecnología.

Para el año 2025, se prevé que los equipos de desarrollo cambien su enfoque, dejando atrás la expansión del número de cúbits para centrarse en mejorar la precisión y el rendimiento de estos³⁵. Esta transición marca una madurez en el campo, con un creciente énfasis en la calidad de los cúbits, más que en su cantidad³⁶.

PREDICCIONES PARA LA COMERCIALIZACIÓN

La informática cuántica sigue evolucionando y se espera que alcance un valor de billones de dólares en la próxima década³⁸.

Se prevé que la comercialización de la informática cuántica se desarrolle en tres fases distintas. La primera fase, conocida como la era NISQ (Cuántica de Escala Intermedia Ruidosa), se extenderá hasta aproximadamente el 2030. Esta fase ha enfrentado retos técnicos, particularmente en el desarrollo de hardware, como la mejora de la fidelidad de los cúbits mientras se incrementa su número³⁴. A pesar de estos obstáculos, se espera que las máquinas cuánticas basadas en metodologías analógicas generen valor tangible a corto plazo, especialmente en áreas como simulaciones de materiales y productos químicos, con ingresos anuales que podrían variar entre 100 y 500 millones de dólares durante la era NISQ³⁴.

La segunda fase, denominada «ventaja cuántica», se espera que ocurra entre 2030 y 2040. Durante este periodo, es probable que los ordenadores cuánticos demuestren una clara superioridad sobre los sistemas clásicos para tareas específicas³⁵. La fase final, la tolerancia a fallos a gran escala, se prevé que surja después de 2040³⁴.



REFERENCIAS

- 1 - <https://www.ibm.com/topics/quantum-computing>
- 2 - <https://www.eetimes.eu/physical-principles-underpinning-quantum-computing/>
- 3 - <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/tip/Classical-vs-quantum-computing-What-are-the-differences>
- 4 - <https://www.quantropi.com/quantum-versus-classical-computing-and-the-quantum-threat/>
- 5 - https://www.sciencedaily.com/news/computers_math/quantum_computers/
- 6 - <https://www.quera.com/blog-posts/government-quantum-computing-initiatives>
- 7 - <https://thequantuminsider.com/2023/06/06/types-of-quantum-computers/>
- 8 - <https://www.quera.com/blog-posts/quantum-computing-programming-languages>
- 9 - <https://thequantuminsider.com/2022/07/28/state-of-quantum-computing-programming-languages-in-2022/>
- 10 - <https://www.technologyreview.com/2023/01/06/1066317/whats-next-for-quantum-computing/>
- 11 - <https://www.energy.gov/science/doe-explainsquantum-computing>
- 12 - <https://medium.com/qiskit/cutting-through-the-hype-of-quantum-optimization-6d4b5c95e377>
- 13 - <https://www.sciencedaily.com/releases/2024/01/240131183507.htm>
- 14 - <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2024/06/24/the-future-of-ai-unleashing-the-power-of-quantum-machine-learning/>
- 15 - https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_optimization_algorithms
- 16 - <https://www.ibm.com/topics/quantum-cryptography>
- 17 - <https://heqa-sec.com/blog/quantum-cryptography-in-real-world-applications/>
- 18 - <https://www.bmcoder.com/the-role-of-quantum-computing-in-drug-discovery-and-material-science>
- 19 - <https://www.defianceetfs.com/harnessing-the-potential-of-quantum-computing-in-financial-modeling/>
- 20 - <https://pme.uchicago.edu/news/new-system-boosts-efficiency-quantum-error-correction>
- 21 - <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/tech-forward/understanding-quantum-controls-role-in-scaling-quantum-computing>
- 22 - <https://thequantuminsider.com/2024/07/13/guest-post-controlling-the-qubits-overcoming-dc-bias-and-size-challenges-in-quantum/>

- 23 - <https://www.quantum-machines.co/blog/controlling-1000-qubits-how-to-scale-quantum-computing/>
- 24 - <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/tech-forward/potential-and-challenges-of-quantum-computing-hardware-technologies>
- 25 - <https://www.axios.com/2024/02/18/quantum-computers-engineering-manufacturing>
- 26 - <https://engineering.princeton.edu/news/2023/10/11/illuminating-errors-creates-new-paradigm-quantum-computing>
- 27 - <https://medium.com/@ashfaqe.sa12/quantum-supremacy-unpacking-its-meaning-and-significance-part-2-dcdbe9aed3f2>
- 28 - <https://www.rand.org/pubs/commentary/2023/09/when-a-quantum-computer-is-able-to-break-our-encryption.html>
- 31 - <https://kpmg.com/au/en/home/insights/2024/04/cyber-security-risk-from-quantum-computing.html>
- 32 - <https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/topics/cyber-risk/quantum-computing-ethics-risks.html>
- 33 - <https://www.quera.com/blog-posts/quantum-ethics>
- 34 - <https://www.bcg.com/publications/2024/long-term-forecast-for-quantum-computing-still-looks-bright>
- 35 - <https://www.quantum-machines.co/blog/quantum-computing-predictions-for-2024/>
- 36 - <https://www.techopedia.com/future-of-quantum-computing>
- 37 - <https://www.fortunebusinessinsights.com/quantum-computing-market-104855>
- 38 - <https://www.mckinsey.com/featured-insights/the-rise-of-quantum-computing>
- 39 - <https://quantum-south.com/quantumcomputing/quantum-south-to-participate-in-the-event-quantum-computing-in-uruguay-and-latin-america/>
- 40 - <https://www.quantumcomputingreport.com/venturus-and-quera-collaborate-to-advance-quantum-computing-in-latin-america>
- 41 - <https://arxiv.org/abs/2405.20661>
- 42 - <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/tecnologia-innovacion/computacion-cuantica-ciencia/index.cshtml>
- 43 - <https://publications.iadb.org/es/tecnologias-cuanticas-una-oportunidad-transversal-e-interdisciplinar-para-la-transformacion-digital>
- 44 - <https://publications.iadb.org/en/quantum-resistance-blockchain-networks>
- 45 - <https://www.cuco.tech/en/home/>
- 46 - <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781558608726500184>



BID

Mejorando vidas