

COMPUTACIÓN CUÁNTICA



ÍNDICE

I. Introducción.....	1
II. Fundamentos de la computación cuántica.....	2
A) Computación clásica VS computación cuántica.....	5
B) Historia de la computación cuántica.....	5
C) Ventajas de la computación cuántica.....	9
D) Desafíos de la computación cuántica.....	10
III. Desarrollo y avances.....	11
A) Aplicaciones industriales de la computación cuántica.....	11
i. Ciberseguridad y criptografía avanzada.....	11
ii. Comunicaciones cuánticas.....	12
iii. Optimización logística y de análisis de datos.....	13
iv. Inteligencia artificial.....	13
v. Medicina y biotecnología.....	14
vi. Química y nuevos materiales.....	14
vii. Finanzas. Predicción de riesgos.....	15
B) Desarrollo regional de la computación cuántica.....	16
C) Escenarios futuros.....	18
IV. Conclusiones.....	20
V. Anexos.....	23
Anexo 1. Tecnologías y arquitecturas de qubits.....	23

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la computación cuántica ha emergido como una de las tecnologías más prometedoras de la era moderna, capaz de revolucionar no solo la informática, sino también sectores como la medicina, la seguridad cibernética, la inteligencia artificial y la logística. A diferencia de los ordenadores tradicionales, que operan sobre la base de *bits* binarios (0 y 1), la computación cuántica utiliza *qubits*, capaces de existir en múltiples estados al mismo tiempo, gracias a fenómenos de la mecánica cuántica como la superposición y el entrelazamiento.

Este informe explora en profundidad los fundamentos de la computación cuántica, facilitando una explicación de la mecánica cuántica y su aplicación en el procesamiento de datos a través de los mencionados *qubits*. Mencionando los principales principios físicos que sustentan la computación cuántica, se han deducido las ventajas que le permiten a la computación cuántica realizar cálculos exponencialmente más rápidos y complejos que los sistemas binarios clásicos.

Además, se analiza el avance histórico de esta tecnología desde sus primeras teorías, en los años 80, hasta los logros más recientes de grandes compañías tecnológicas como IBM y Google, así como los desarrollos en Europa y, particularmente, en España. Asimismo, se presentan los beneficios y aplicaciones potenciales de la computación cuántica en diversos sectores industriales, desde la optimización de cadenas de suministro hasta la creación de nuevos fármacos, la mejora de la ciberseguridad y el desarrollo de una inteligencia artificial más avanzada.

Sin embargo, la computación cuántica aún enfrenta desafíos significativos en cuanto a estabilidad, corrección de errores y escalabilidad. Se ha hecho especial hincapié en estos obstáculos, y se plantean distintos escenarios sobre el posible impacto global de esta tecnología en los próximos años, considerando su potencial para transformar no solo industrias sino también la estructura de poder global. Con una inversión constante en investigación y desarrollo, la computación cuántica está llamada a redefinir los límites de la tecnología y abrir nuevas oportunidades para resolver problemas complejos que hoy parecen insuperables.

II. FUNDAMENTOS DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

MECÁNICA CUÁNTICA

Para explicar el concepto de computación cuántica debemos comprender primero qué es la Mecánica Cuántica y cuáles son los principios por los que se rige.

La Mecánica Cuántica, también denominada Física o Teórica Cuántica, es una rama de la física que estudia la naturaleza y el comportamiento de la materia y de la energía a escala subatómica, es decir aquello que no podemos percibir por nuestros sentidos.

En la Física Clásica la energía se transmite y absorbe de forma continua. Además, la materia se halla en un momento dado en un lugar determinado. La Física Clásica se basa en el álgebra de Boole, la información se procesa en estados binarios excluyentes.

En cambio, en la Física Cuántica la energía no se emite de forma continua, sino de forma discreta a través de paquetes finitos de energía denominados cuantos. Las partículas se presentan como un fenómeno dual: la energía y materia pueden comportarse tanto como onda, y como partícula, –principio de dualismo onda-partícula-.

Por otro lado, en el mundo subatómico es imposible conocer simultáneamente con precisión el estado de una partícula en un momento determinado. Solo podemos conocer una distribución de probabilidades, –principio de incertidumbre de Heisenberg-.

El dualismo onda-partícula, junto al principio de incertidumbre de Heisenberg son dos de los pilares básicos de la Mecánica Cuántica.

QUÉ ES LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

La computación cuántica es un campo emergente de la informática que se basa en las leyes de la mecánica cuántica para procesar, codificar y almacenar la información de forma radicalmente diferente a la informática clásica.

Para poder explicar más detalladamente la computación cuántica, en primer lugar se va a hablar del Qubit, la unidad básica de información de la computación cuántica; a continuación de los principios básicos en los que se fundamenta; seguidamente se tratarán las diferencias entre la computación cuántica y la computación binaria; y por último, de las ventajas y retos a los que se enfrenta la computación cuántica.

QUBITS

El “qubit”, también denominado bit cuántico, es la unidad básica de información en la computación cuántica. Desempeñan un rol semejante al “bits” en la computación convencional, pero se comportan de una forma distinta.

Los bits actúan como pequeños interruptores. Pueden estar en posición de apagado, cuando no circula señal eléctrica -representado como 0- o en posición de encendido, cuando circula señal eléctrica -representado por un 1-. Por tanto, los bits de la computación clásica son binarios. El valor del bit clásico puede ser uno (encendido) o cero (apagado) y solo uno de ellos. Un conjunto de bits sólo puede tener un único valor o estado en un momento concreto.

En cambio, los qubits, debido al fenómeno de superposición cuántica que luego analizaremos, pueden asumir todos los estados intermedios posibles entre 0 y 1, y además de forma simultánea. A diferencia del bit clásico que solo puede adoptar un valor en un espacio de tiempo determinado, los qubits no tienen un único valor en un momento dado, sino una combinación de los estados ceros y unos simultáneamente; es decir ceros y unos a la vez y en distinta proporción.

En definitiva, igual que una moneda que lanzamos al aire no es cara ni cruz, sino infinitas posibilidades/probabilidades de ambas, los qubits pueden estar en cualquiera de los infinitos estados intermedios entre el cero y el uno.

Por tanto, la manera en que un ordenador cuántico procesa los datos es totalmente diferente al ordenador tradicional, ya que no es un código binario sino una probabilidad en una posición entre cero (0) y uno (1), lo que le permite desplegarse virtualmente e incrementar su capacidad de cálculo exponencialmente -paralelismo cuántico- a diferencia de los ordenadores clásicos que lo realizan de forma lineal-.

LEYES DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

La computación cuántica descansa en dos principios fundamentales de la mecánica cuántica. Estas leyes permiten a los ordenadores cuánticos procesar la información de forma diferente a los ordenadores tradicionales. Estos principios son:

Superposición cuántica. - El principio de superposición es una regla de la mecánica cuántica que hace referencia a la capacidad que tienen las partículas microscópicas de adoptar múltiples estados diferentes al mismo tiempo. En lugar de tener un único estado definido, como en la física clásica, en la mecánica cuántica pueden existir todos los estados posibles de forma simultánea. Esto le ocurre, por ejemplo, a los fotones, que pueden permanecer en dos posiciones distintas en un mismo espacio de tiempo, algo inconcebible en el mundo físico.

Las partículas cuánticas son una combinación simultánea de todos sus estados teóricos probables, y sólo después de realizar una medición u observación es cuando asumen un única configuración o estado. Es decir, el estado de superposición se mantiene hasta que son medidas u observadas.

Trasladando este comportamiento a los qubits, la superposición cuántica implica que, si en lugar de tener un solo qubit tuviéramos múltiples qubits se incrementaría de forma exponencial la capacidad de representación de la información. La superposición de múltiples qubits permite a los ordenadores cuánticos procesar de forma paralela y simultánea gran cantidad de información, así como realizar cálculos mucho más rápidos y de forma masiva.

Un ejemplo que puede explicar el principio de superposición es el lanzamiento de una moneda. Al lanzar una moneda acaba saliendo cara, o cruz. Sin embargo, si fuera posible mirar la moneda cuando está girando en el aire, esta puede mostrar la cara, la cruz o ambos estados al mismo tiempo. Los ordenadores clásicos trabajan cuando la moneda está en el suelo, depende de cómo caiga la moneda, cara (1) o cruz (0). Los ordenadores cuánticos funcionan cuando la moneda está en el aire, es decir cuando está en estado de superposición (existen múltiples estados antes de ser observada)

Entrelazamiento cuántico. - Se puede decir que el entrelazamiento cuántico es la capacidad que tienen las partículas cuánticas para correlacionar entre sí los resultados de su medición.

Es una propiedad que indica que el estado de dos o más partículas está interconectado, con independencia de la distancia que las separa. Por tanto, los cambios realizados en una partícula afectan de forma automática a las otras con las está correlacionada, sin importar la distancia que las separa. Este fenómeno se debe a que, cuando las partículas cuánticas están entrelazadas, forman un único sistema y dejan de tener estados indefinidos independientes.

El entrelazamiento cuántico tiene múltiples aplicaciones en el campo de la criptografía y de la teleportación cuántica.

A) COMPUTACIÓN CUÁNTICA VS COMPUTACIÓN CLÁSICA

La computación clásica y la computación cuántica son dos áreas paralelas que mantienen algunas semejanzas y numerosas diferencias entre sí. Entre las principales diferencias destacamos las siguientes:

	COMPUTADORA CLÁSICA	COMPUTADORA CUÁNTICA
Unidad básica de Información	BIT	QUBIT
Velocidad resolución operaciones	Lineal	Exponencial
Lenguaje de programación	Lenguajes de programación estándares: Java, SQL, Python, etc	Algoritmos específicos y especializados
Condiciones ambientales de funcionamiento	Condiciones ambientales normales	Condiciones físicas de temperatura y presión atmosférica muy especiales
Funcionalidad	Continua	Limitada en el tiempo. Complejidad mantener Qubits estables.

B) HISTORIA DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

El origen de la computación cuántica se remonta a principios de la década de los años ochenta. Los acontecimientos más relevantes de la reciente historia de la computación cuántica son los siguientes:

Primer modelo de computación cuántica. — 1981

Paul Benioff.

El físico estadounidense, Paul Benioff, basándose en la máquina de Turing, sentó las bases para los modelos de computación cuántica al demostrar que los principios de la mecánica cuántica podrían aplicarse a la computación.

1982 —

Modelo de Richard Feynman.

El físico estadounidense y premio Nobel de Física, Richard Feynman argumentó que un ordenador cuántico poseía el potencial para simular fenómenos cuánticos de forma eficiente a los que un ordenador clásico no podía alcanzar.

Modelo de David Deutsch. Computador cuántico universal.

— 1985

El físico británico-israelí fue el primero que describió el funcionamiento de un ordenador cuántico universal a través del principio de Church-Turing ampliado. Igualmente sentó las bases para el desarrollo de algoritmos cuánticos.

1992 — Primer algoritmo cuántico.

Deutsch-Jozsa formuló un algoritmo cuántico que confirmaba que la computación cuántica podía realizar cálculos más veloces que la computación tradicional.

Charles Bennett. Teletransporte cuántico — 1993

Ese mismo año Charles Bennett de la división de investigación de IBM descubrió el teletransporte cuántico, un gran avance en la comunicación cuántica.

1994 — Algoritmo cuántico de Shor

Peter Shor aprovechando las bases de la mecánica cuántica creó un algoritmo capaz de factorizar de forma eficiente grandes números. Este algoritmo facilitaba además la descriptación de sistemas criptográficos.

Algoritmo de Grover. — 1996

Lov Grover creó un algoritmo probabilístico que realizaba búsquedas en bases de datos no ordenadas con mayor eficiencia que los ordenadores tradicionales.

Desarrollo de los primeros experimentos — 1997

Durante este año se realizó el primer teletransporte de un fotón y la primera comunicación cuántica a una distancia de 23 km mediante el empleo de criptografía.

1998-2006 — Primeros dispositivos con Qubits

Instituto Tecnológico de Massachusetts consiguió propagar el primer qubit. Universidad de Berkeley presentó el primer sistema cuántico de 2 qubits. IBM desarrollo dispositivos de 3, 5 y 7 qubits capaces de ejecutar los algoritmos de Grover y de Shor. Shor

Primer sistema comercial emplea tecnología cuántica — 2007

La empresa canadiense D-Wave Systems presentó un dispositivo de 16 qubits, "Orion". No era realmente una computadora cuántica, sino un aparato que emplea la mecánica cuántica para la resolución de problemas.

2007 — Primer Bus cuántico

Investigadores de la Universidad de Yale consiguieron crear el primer bus cuántico, uniendo componentes cuánticos a través de superconductores, que podía utilizarse como memoria cuántica

Procesador cuántico de estado sólido — 2009

Investigadores de la Universidad de Yale crearon el primer procesador cuántico en estado sólido, que funciona de forma semejante a un microprocesador clásico

2011 — Avance en la teletransportación cuántica

Un equipo de investigadores japoneses y australianos lograron transferir información cuántica completa sin pérdida de datos y manteniendo la superposición de los qubits.

Computador cuántico más potente que un ordenador clásico — 2015

La empresa D-Wave lanza un nuevo computador cuántico, el D-Wave 2X, con una unidad de procesamiento cuántico de 1000 qubits

2016 — Primer computador cuántico reprogramable

Investigadores de la Universidad de Maryland logró construir el primer ordenador cuántico reprogramable

Primer procesador cuántico de silicio — 2018

La empresa Intel y QuTech prueban con éxito un procesador de spin- qubits basado en silicio. a.

2019 — IBM presenta primer ordenador cuántico comercials

ILa empresa IBM presento el "IBM Q System One", un ordenador de 20 qubits para uso comercial que combina la computación cuántica y convencional.

Supremacía cuánticaa — 2019

Google afirma haber alcanzado la supremacía cuántica con su procesador Sycamore de 53 qubits, punto en el que las computadoras cuánticas superan de forma significativa las capacidades de los ordenadores clásicos.

2021-2023 — Nuevos avances en la compañía IBM

Durante estos años la empresa IBM ha ido desarrollando nuevos ordenadores cuánticos: el ordenador denominado Eagle de 127 qubits (2021), el ordenador Osprey de 433 qubits (2022) y el procesador cuántico Condor, de 1121 qubits (2023)ca

Nuevos avances en la compañía IBM — 2022

Investigadores de la Universidad de Gales del Sur (Australia) anunciaron la creación del primer procesador a escala atómica de la historia

2023 — Nuevo chip cuántico Intel

ULa compañía Intel lanzo el "Tunnel Falls", un nuevo chip de investigación cuántica de 12 bits, primer qubit de silicio lanzado a la comunidad de investigación..

Primer ordenador cuántico de más de 1000 qubits — 2023

Atom Computing anuncia un ordenador cuántico de 1.225 qubits

2024 — Fabricación de qubits de forma industrial

La empresa Intel y QuTech ha anunciado la fabricación de qubits de forma industrial empleando la misma tecnología que se emplea en los semiconductores.

C) VENTAJAS DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

La capacidad de la computación cuántica de explorar simultáneamente múltiples soluciones le otorga varias ventajas distintivas respecto de la computación tradicional, lo que la convierte en un elemento innovador en diversas aplicaciones. Seguidamente se enumeran alguna de las ventajas más sobresalientes:

1.- Mayor capacidad de procesamiento. Aceleración exponencial.

La computación cuántica tiene el potencial para realizar cálculos y resolver problemas exponencialmente más rápidos y complejos que la computación digital gracias a la capacidad de procesar paralelamente grandes cantidades de datos de forma simultánea y no en serie, uno tras uno, como la computación clásica.

Tareas matemáticas complejas, como factorizar grandes números, importante en el área de la criptografía y buscar en bases de datos no clasificadas, son claros ejemplos de la rapidez y capacidades de los algoritmos cuánticos.

2.- Herramienta idónea para realizar simulaciones.

Con el auxilio de algoritmos probabilísticos puede crear escenarios hipotéticos con mayor precisión y eficiencia lo que abre nuevas posibilidades en otros campos científicos, como son la ciencia de los materiales y la farmacología.

3.- Optimización.

La computación cuántica permite abordar problemas de optimización de procesos, planificación de rutas y gestión de recursos de forma más eficiente en sectores como la logística, la gestión de suministros y las finanzas.

4.- Eleva el nivel de seguridad y privacidad. Criptografía Post-Cuántica.

La Computación Cuántica destaca por la capacidad para proporcionar algoritmos de criptografía de alto cifrado, lo que incrementa considerablemente los niveles de seguridad de las comunicaciones y de la información, en especial en el ámbito de la ciberseguridad.

5.- Promueve el desarrollo de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático.

Al conjuntar ambas tecnologías, la inteligencia artificial se beneficia del poder de procesamiento cuántico, analizando mayores volúmenes de datos en menor tiempo, realizando análisis predictivos, reconociendo patrones, simplificando procesos y aprovechando el aprendizaje automático para potenciar los resultados.

6.- Exploración de nuevos enfoques.

La computación cuántica abre la puerta a nuevos enfoques y paradigmas en otros campos científicos como la medicina, la ciberseguridad, la climatología, la genética, etc.

D) DESAFÍOS DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

A pesar de su potencial y los notables avances desarrollados, la computación cuántica sigue enfrentándose a múltiples obstáculos tecnológicos y ambientales que limitan su evolución. Entre los principales desafíos encontramos:

1.- La estabilidad. Decoherencia cuántica.

Actualmente el estado cuántico de los qubits es muy frágil. Los qubits se mantienen activos durante un tiempo muy limitado. Cualquier perturbación, vibración o interferencia ambiental puede afectarles, provocando la pérdida de sus propiedades cuánticas.

Se denomina decoherencia cuántica al proceso en el que un estado cuántico pierde las propiedades cuánticas de superposición y entrelazamiento. El sistema deja de comportarse de acuerdo con los principios de la mecánica cuántica, actuando acorde a las reglas de la física tradicional.

En la actualidad la decoherencia cuántica genera grandes desafíos de ingeniería y arquitectura. Para construir ordenadores cuánticos que mantengan la coherencia de los qubits se requieren estructuras técnicas especiales, complejos sistemas de refrigeración, que mantengan la temperatura próxima al cero absoluto, que controlen el entorno y lo protejan de interferencias electromagnéticas y ambientales.

2.- La escalabilidad.

La escalabilidad hace referencia a la capacidad de aumentar la cantidad de qubits en un sistema cuántico para permitir resolver operaciones más complejas.

Los ordenadores cuánticos actuales aún están en sus primeras etapas y tienen una capacidad limitada de qubits. A medida que se incrementan los qubits más complicado resulta mantener la interconectividad y las propiedades cuánticas de los qubits. Aumentar esta cantidad de manera controlada y efectiva es una tarea compleja y requerirá avances tecnológicos significativos.

3.- Corrección de errores y tolerancia a fallos.

Los ordenadores cuánticos son muy sensibles al ruido ambiental, a las interferencias electromagnéticas, a la temperatura y a otros factores externos lo que provoca errores en las operaciones cuánticas.

La implementación de sistemas con tolerancias a fallos y corrección de errores es fundamental para garantizar la precisión y la confianza de las operaciones en los ordenadores cuánticos.

4.- Complejidad en el desarrollo de algoritmos cuánticos.

Los algoritmos cuánticos difieren fundamentalmente de los clásicos y requieren un nuevo enfoque para la programación y la resolución de problemas. Además, a medida que aumentan las capacidades de los ordenadores cuánticos, aumenta también la necesidad de nuevos algoritmos.

Aunque existen algunos algoritmos cuánticos que han demostrado ser efectivos, como por ejemplo el algoritmo de Shor para la factorización de números grandes, el software y los lenguajes de programación que pueden emplearse en la actualidad son escasos y se encuentran en sus primeras fases de desarrollo.

III. DESARROLLO Y AVANCES

A) APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Las capacidades que ofrece la computación cuántica han despertado un gran interés en el ámbito industrial y empresarial, y ha abierto un abanico de posibilidades de resolver cuestiones que, hasta el día de hoy, era difícil de responder. Los sectores que se están viendo más beneficiados por esta tecnología son los siguientes:

i. Ciberseguridad y criptografía

Uno de los campos con mayor potencial de evolución de la computación cuántica es la ciberseguridad, especialmente en el área de la criptografía. Actualmente, muchos sistemas criptográficos se basan en la factorización de números grandes, algo que los ordenadores clásicos no pueden descifrar con eficacia. Sin embargo, un ordenador cuántico lo suficientemente potente podría descifrar estos sistemas y vulnerar la seguridad no solo de los sistemas de las empresas sino también del propio Internet. Todo ello ha impulsado el desarrollo de la criptografía cuántica, que permite encriptar sistemas de seguridad haciéndolos prácticamente invulnerables.

La nueva generación de sistemas criptográficos utiliza principios de la física cuántica para asegurar la inviolabilidad de las comunicaciones, haciendo prácticamente imposible interceptar o alterar la información sin ser detectado.

Sin embargo, también existen desarrollos en criptografía post-cuántica que buscan resistir estos avances y garantizar la seguridad de la información en un mundo con ordenadores cuánticos.

Un ejemplo actual de su uso y aplicación es el desarrollo de algoritmos cuánticos resistentes o *quantum-safe* por parte de la compañía IBM. Estos algoritmos están diseñados para proteger los datos contra las futuras amenazas que representarán los ordenadores cuánticos para los esquemas criptográficos actuales. IBM ha estado trabajando durante décadas en el desarrollo de estos algoritmos quantum-safe para anticiparse a la amenaza que la computación cuántica supone para la criptografía actual. Estos algoritmos buscan mantener la seguridad de la información confidencial de empresas y usuarios frente a la capacidad de los futuros ordenadores cuánticos de romper los esquemas criptográficos más utilizados actualmente. El objetivo es crear nuevos métodos criptográficos que sean resistentes a los ataques tanto de computadoras clásicas como cuánticas, asegurando así la protección de datos sensibles en el futuro.

ii. Comunicaciones cuánticas

Las comunicaciones cuánticas es otro campo con múltiples aplicaciones en el mundo real. Se basan en el principio de entrelazamiento cuántico, que permite transmitir información de manera instantánea entre *qubits*, y por tanto la creación de internet cuántico. En Europa, ya se están desarrollando redes cuánticas que permiten la transmisión segura de datos.

Actualmente se están desarrollando sistemas de distribución de claves cuánticas (QKD - Quantum Key Distribution). Esta tecnología aprovecha los principios de la mecánica cuántica para crear un método de comunicación virtualmente imposible de interceptar.

Los avances en criptografía cuántica ya están siendo explorados en Europa, donde se han llevado a cabo pruebas de transmisión de datos a través de redes cuánticas. Estos sistemas permiten una comunicación cuántica segura, lo que será fundamental para proteger datos sensibles en sectores como las finanzas, la defensa y la salud.

China es una de las principales naciones que ha impulsado la implementación práctica de comunicaciones cuánticas. En 2017, realizaron una videoconferencia intercontinental segura entre Beijing y Viena utilizando el satélite cuántico Micius. Este sistema utiliza fotones entrelazados cuánticamente para generar claves de encriptación. Si alguien intenta interceptar la comunicación, el estado cuántico de los fotones se altera, alertando inmediatamente a los usuarios sobre el intento de intrusión (la tecnología QKD permite crear redes de comunicación ultra seguras). China ha estado desarrollando una red troncal de comunicaciones cuánticas que se extiende por miles de kilómetros, conectando ciudades importantes como Beijing y Shanghai. Estas redes cuánticas no solo ofrecen una seguridad sin precedentes, sino que también sientan las bases para futuras aplicaciones de la computación cuántica en comunicaciones, como la creación de una *internet cuántica*.

Aunque todavía está en etapas tempranas, esta tecnología demuestra el potencial de la computación cuántica para revolucionar la forma en que aseguramos nuestras comunicaciones, especialmente en un mundo donde la ciberseguridad es cada vez más crucial.

En el futuro, estas redes podrían sustituir a las actuales infraestructuras de comunicación en sectores como la banca o el gobierno, donde la seguridad y la confidencialidad de la información son primordiales. Además, estas comunicaciones también mejorarán la conectividad entre ordenadores cuánticos, permitiendo el desarrollo de redes interconectadas que compartan información en tiempo real sin riesgo de ser interceptadas.

iii. Optimización logística y análisis de datos

La capacidad de procesar grandes volúmenes de datos de manera rápida y eficiente es una de las principales ventajas de la computación cuántica.

En el sector industrial, particularmente en la logística, la computación cuántica se está utilizando para optimizar las cadenas de suministro y en el transporte. Los ordenadores cuánticos pueden mejorar la eficiencia en la distribución de mercancías y reducir los tiempos de respuesta y los costes mediante el desarrollo de algoritmos que puedan analizar en tiempo real, el tráfico y la demanda de productos, los inventarios y los costes.

Esto es especialmente relevante para industrias con redes logísticas complejas, como las dedicadas a la fabricación de productos y el transporte de pasajeros. En Europa, se están probando soluciones cuánticas en sectores como el transporte y la distribución, utilizando análisis de big data cuántico para optimizar procesos que involucran grandes cantidades de información.

iv. Inteligencia artificial

Otra de las áreas clave donde la computación cuántica tiene un gran impacto es en el desarrollo de inteligencia artificial. La Inteligencia Artificial cuántica tiene el potencial de mejorar el rendimiento de los modelos de aprendizaje al reducir significativamente los tiempos de entrenamiento y procesamiento. Esto permitirá, por ejemplo, desarrollar modelos predictivos más precisos y aplicables en tiempo real en sectores como el marketing, la medicina personalizada, y la robótica industrial.

El desarrollo de algoritmos de “machine learning cuántico” es uno de los campos de investigación más activos en Europa, con centros de investigación y empresas colaborando para desarrollar nuevas aplicaciones que mejoren la toma de decisiones empresariales y la eficiencia operativa. La combinación de big data y computación cuántica promete llevar la inteligencia artificial a un nuevo nivel, con aplicaciones prácticas en áreas como la detección de fraudes o el análisis predictivo en finanzas.

v. Medicina y biotecnología

En el campo de la medicina la simulación cuántica tiene gran potencial y permite y permitirá conseguir grandes avances en las siguientes áreas de trabajo:

Diseño de nuevos medicamentos. La computación cuántica se aplica para simular interacciones entre moléculas de medicamentos y objetivos biológicos, acelerando así el proceso de descubrimiento y optimización de nuevos fármacos. Esto reduce el tiempo y los costos asociados con el desarrollo de tratamientos farmacológicos.

Diagnóstico y seguimiento de enfermedades. Se están desarrollando técnicas basadas en computación cuántica que pueden detectar la eficacia de tratamientos como la quimioterapia después de una sola dosis, lo que mejora significativamente el seguimiento de los pacientes.

Medicina personalizada. - La capacidad de procesar grandes volúmenes de datos genómicos y moleculares permite diseñar tratamientos más precisos y personalizados para cada paciente.

Investigación en enfermedades complejas. Se están formando alianzas entre empresas de tecnología cuántica y biotecnología para desarrollar aplicaciones específicas en el estudio de enfermedades neurológicas complejas como la esclerosis múltiple, el Alzheimer y el Parkinson.

Análisis de datos médicos. La computación cuántica mejora significativamente la capacidad de procesar y analizar grandes cantidades de datos médicos, lo que puede llevar a descubrimientos importantes en patrones de enfermedades y efectividad de tratamientos.

Mejora en técnicas de imagen médica. Avances en óptica cuántica están permitiendo desarrollar técnicas de diagnóstico por imagen más rápidas y menos invasivas, como la detección de tumores en menos de media hora.

vi. Química y nuevos materiales

La simulación cuántica puede optimizar la creación de nuevos materiales y productos químicos al permitir simulaciones de alta precisión a nivel molecular, algo que las computadoras clásicas no pueden hacer con la misma eficiencia.

Simulación molecular. La computación cuántica permite simular con gran precisión las interacciones entre moléculas y átomos, lo que es extremadamente difícil para las computadoras clásicas. Esto facilita el estudio de estructuras moleculares complejas y sus propiedades.

Diseño de nuevos materiales. Los ordenadores cuánticos pueden acelerar significativamente el proceso de diseño y descubrimiento de nuevos materiales con

propiedades específicas. Esto se logra mediante la optimización de estructuras moleculares a nivel cuántico.

Catálisis química. La simulación cuántica de reacciones químicas permite una mejor comprensión y optimización de procesos catalíticos, lo que es crucial para muchas industrias, incluyendo la producción de combustibles y productos químicos.

Predicción de reactividad. Las computadoras cuánticas pueden predecir con mayor precisión las rutas de reacción, identificar estados de transición y determinar la probabilidad de diferentes reacciones químicas.

Mejora de procesos industriales. La simulación cuántica de procesos químicos a nivel molecular puede mejorar la eficiencia y sostenibilidad de diversos procesos industriales.

vii. Finanzas. Predicción de riesgos

En el ámbito financiero, los algoritmos cuánticos se están utilizando para predecir crisis financieras y optimizar las carteras de inversión. Estos algoritmos permiten analizar numerosos escenarios económicos en tiempo real, algo que no es posible con las computadoras clásicas. Así, la computación cuántica ofrece una ventaja competitiva significativa para bancos e instituciones financieras que buscan minimizar riesgos y maximizar sus ganancias.

B) DESARROLLO REGIONAL DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

La computación cuántica está emergiendo como una de las tecnologías más prometedoras del siglo XXI, ofreciendo capacidades de procesamiento superiores a las de los ordenadores clásicos. En Europa, y particularmente en España, esta tecnología está avanzando rápidamente, con aplicaciones tangibles como las citadas anteriormente.

En este apartado nos centramos en el desarrollo de la computación cuántica en la industria de la Unión Europea y España, destacando cómo estas aplicaciones están empezando a impactar sectores clave de la economía y la tecnología.

1. Unión Europea

La inversión de la UE en tecnologías cuánticas es creciente; programas como el "Quantum Flagship"¹ forman parte de su estrategia para consolidar la soberanía tecnológica y asegurar que Europa esté a la vanguardia de esta revolución. Estas financiaciones buscan aplicaciones prácticas en sectores como la optimización logística, finanzas, salud, y comunicaciones, entre otros. Empresas como IBM, que presentó el primer ordenador cuántico comercial, el Q System One, ya están colaborando con gobiernos y compañías en Europa para avanzar en la adopción de esta tecnología. A nivel práctico, la computación cuántica tiene el potencial de impactar áreas como la salud, mejorando el diseño de medicamentos a través de simulaciones cuánticas que aceleren el descubrimiento de nuevos compuestos, o en la energía, optimizando redes de distribución eléctrica

Un ejemplo clave de aplicación es la optimización del transporte y la logística mediante simulaciones que mejoran la gestión de flotas y la planificación de rutas en tiempo real. Esta mejora del sistema de transporte supera las limitaciones de los sistemas convencionales y promete generar ahorro de costos y mayor eficiencia.

¹ La Unión Europea (UE) ha invertido significativamente en la investigación y el desarrollo de tecnologías cuánticas a través del programa Quantum Flagship, con el objetivo de mantener a Europa competitiva en el escenario global. Este programa impulsa la creación de infraestructuras y ecosistemas cuánticos, que son esenciales para desarrollar aplicaciones prácticas. A largo plazo, se espera que estos esfuerzos generen soluciones disruptivas en múltiples sectores.

2. España

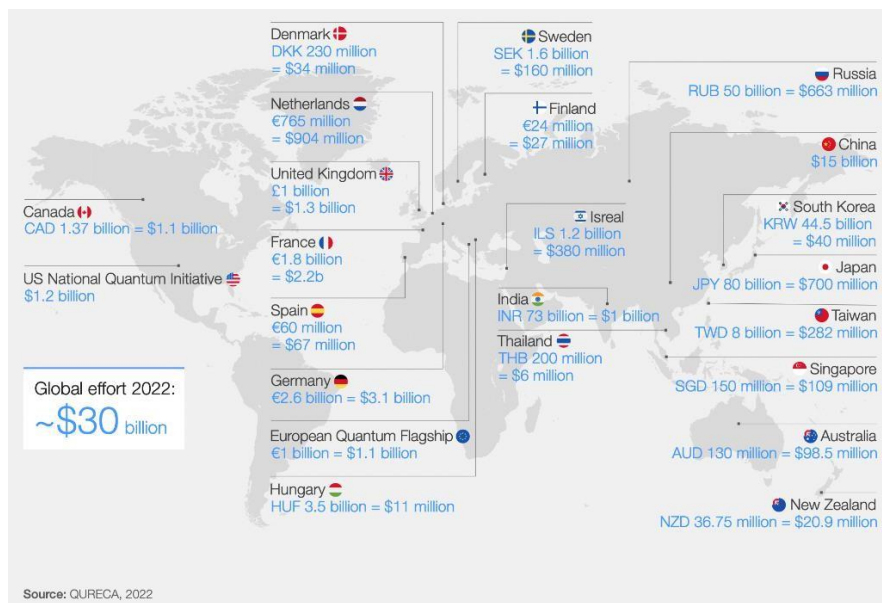
A nivel nacional se están impulsando esfuerzos notables para posicionar a regiones como el País Vasco como referentes en computación cuántica. Iniciativas lideradas por el grupo QUTIS de la UPV-EHU y startups como Quantum Mads están desarrollando soluciones para áreas como la optimización financiera, donde la capacidad de procesamiento cuántico puede analizar miles de activos a la vez, superando a los sistemas clásicos.

Otro sector destacado en España es el de las telecomunicaciones cuánticas. Empresas como Global Data Quantum están explorando la combinación de inteligencia artificial clásica con la computación cuántica para el análisis masivo de datos, con aplicaciones en sectores como la publicidad, la logística y la optimización de procesos industriales. Estos avances buscan mejorar la eficiencia y predicción de resultados, lo que abre nuevas oportunidades para las industrias españolas.

Aunque la computación cuántica está aún en una fase experimental, sus aplicaciones ya están comenzando a tener un impacto tangible en la industria. Se espera que en los próximos 10 a 20 años se produzca una adopción más amplia de esta tecnología, impulsada por avances en hardware, software y redes cuánticas. Sin embargo, aún existen desafíos por superar, como la estabilidad de los *qubits* y la necesidad de desarrollar infraestructuras que permitan el uso práctico de estos sistemas a gran escala. Las inversiones públicas y privadas, junto con la colaboración internacional, son fundamentales para que esta tecnología transforme industrias y permita a Europa y España posicionarse como líderes globales en este campo.

3. Países a la cabeza

Estados Unidos y China lideran la carrera por la computación cuántica, con un 36% y 9% de patentes respectivamente. Sin embargo, son muchos otros los países que están realizando avances significativos en el área, y realizando grandes inversiones.



C) ESCENARIOS FUTUROS

Ante los avances tecnológicos en computación cuántica se han dibujado tres escenarios posibles en un horizonte de 5 años. En el primer escenario, un país del bloque occidental consigue la mencionada supremacía cuántica. En el segundo escenario, un miembro del bloque oriental es el que la consigue. Y en el último escenario aún no se ha logrado ese hito.

En un primer escenario, la Unión Europea o bien uno de los países anglosajones triunfa en la carrera tecnológica. A la vista del estudio, la nación con mayores posibilidades de conseguirlo sería Estados Unidos, debido a que alberga las empresas más punteras y el ecosistema más proclive para la investigación y desarrollo. Uno de los gigantes tecnológicos como IBM o Google protagonizaría el suceso, patentándolo y, muy posiblemente, sería transferido al gobierno central para su explotación. De ahí que la aplicación más disruptiva pudiese ser en el campo militar y de seguridad.

Esta victoria sostendría la hegemonía mundial de Estados Unidos en el apartado tecnológico, permitiéndole seguir avanzando en una tecnología de la que no disfrutarían ni sus aliados ni sus adversarios. Las potenciales ventajas que adquirirían los norteamericanos son las mencionadas en puntos anteriores, creando una gran brecha tecnológica. La transferencia de esta tecnología a sus aliados de la OTAN no sería ni mucho menos inmediata, ya que, al ver aumentadas sus capacidades en distintos ámbitos, desde Washington se intentaría poner la mayor distancia posible con sus competidores.

Lo más probable es que desde la Unión Europea se intentase seguir la estela estadounidense, al mismo tiempo que se pone la burocracia a pleno rendimiento para dotarse de un marco legal ante la posible llegada de una nueva tecnología. Las suspicacias entrarían en juego y la idea de que “no existen naciones amigas, sino naciones con intereses comunes” daría pie a unas mayores reservas con los norteamericanos mientras no comparten sus avances.

Por otro lado, las naciones identificadas como adversarias de este bloque se sentirían más inseguras, puesto que no tendrían pleno conocimiento de las capacidades de la nueva tecnología. Países como Rusia o China verían amenazado su proyecto de alterar el orden internacional vigente, por lo que se redoblarían los esfuerzos para reducir la citada brecha en el menor tiempo posible. Previsiblemente aumentarían los casos de espionaje de todo tipo, incluyendo el industrial, dañando las relaciones bilaterales y la previsibilidad del orden mundial en su conjunto.

Si, en vez de Estados Unidos, es la Unión Europea quien logra la supremacía cuántica, se vería en una posición única en su historia. Por primera vez, tendría en su poder una tecnología muy superior a la del resto del mundo, con la que podría dotarse de mayor autonomía.

La región comunitaria estaría en la cúspide mundial con una tecnología única y la posibilidad de explotarla para su propio beneficio. Si existiese acuerdo entre las naciones europeas, una estrategia común y a largo plazo permitiría a la Unión lograr avances suficientes para hacer valer sus posiciones y dotarse de mayor voz.

Sin embargo, las tensiones y amenazas que enfrentaría podrían debilitarla. Dada la cercanía entre algunos estados miembros y otros externos, ya sean del bloque atlántico o su adversario, la tan codiciada supremacía cuántica le haría objeto de mayor presión. Se considera poco probable que la UE fuese capaz de imponer su agenda política a nivel mundial y sería previsible que acabase compartiendo sus avances con el aliado norteamericano y aplicando su tecnología para mejoras de uso civil.

El escenario más complicado sería que un país adversario del bloque occidental consiguiese primero esta tecnología.

Durante los últimos años se ha vivido un aumento de la tensión a nivel geopolítico, que ha llevado a una situación de inestabilidad internacional con varios conflictos simultáneos. Rusia y China coinciden en su aspiración de superar la actual etapa de hegemonía occidental, y, con mayor o menor beligerancia, van aumentando la presión sobre los representantes de esta.

Desde la anexión de Crimea (2014) hasta la invasión de Ucrania (2022), la agresividad exterior rusa ha coincidido con la expansión económica china, que a través del comercio ha ido sumando países a su esfera de influencia. Además, la presencia de otros actores declaradamente enemigos de occidente, como Irán o Corea del Norte, también amenaza el orden mundial liderado por Estados Unidos.

Las campañas de desinformación y propaganda, dirigidas a influir en las sociedades occidentales y protagonizadas por Rusia y China, han mostrado su capacidad de injerir en el mundo atlántico. Campañas como las realizadas durante las elecciones estadounidenses (2016) o durante la crisis de las protestas en Hong Kong (2019-2021) dan muestra de su decisión por defender sus intereses.

En el caso de que una de estas (o sus aliados) lograsen la supremacía cuántica, el mundo occidental se vería amenazado y muy vulnerable. Es probable que trataran de dirigir esa ventaja hacia un mayor desarrollo tecnológico-militar y la consecución de armas nucleares para Irán. También podrían encaminar su investigación buscando una mejor gestión de los recursos, puesto que se trata de países con mucha población y dificultades para satisfacer sus necesidades. En cualquier caso, es probable que, gracias a esa tecnología pudiesen poner fin al orden liberal y dar comienzo a una nueva etapa donde Estados Unidos quedase desbancada como potencia hegemónica.

IV. CONCLUSIONES

La computación cuántica es una nueva tecnología disruptiva que en un futuro muy cercano va a revolucionar no solo el sector de las comunicaciones y de la informática, sino también tendrá un gran impacto en muchos aspectos de nuestra vida.

A diferencia de la computación binaria, la forma de procesamiento de la información ha incrementado exponencialmente las capacidades y velocidades para resolver operaciones complejas, impensables para los ordenadores clásicos. Aunque, aún es una tecnología emergente, en los últimos años se han logrado importantes avances. Innumerables empresas, siguiendo distintas líneas de investigación, invirtiendo en tecnologías diferentes, están realizando importantes inversiones en desarrollar una tecnología estándar para la computación. Año tras año se están confeccionando nuevos prototipos que incrementan significativamente el número de qubits y por tanto las capacidades de resolución de los problemas.

Sin embargo, la computación cuántica todavía se enfrenta a importantes desafíos técnicos e incertidumbres que debe superar. Ya no es un problema de escalabilidad -número de qubits- sino especialmente de la estabilidad del hardware –de mantener la coherencia cuántica de forma duradera, de eliminar el ruido e interferencias cuánticas- y de compatibilización de software –diseño de algoritmos-. Por tanto, el camino de la computación cuántica descansará ya no en la cantidad de qubits, sino en la calidad, en el desarrollo de mecanismos de corrección de errores -en la estabilidad de los qubits- que permitan a estos ordenadores trabajar de forma continua y consistente.

El potencial de la computación cuántica se despliega en aplicaciones que abarcan desde la optimización de procesos hasta la ciberseguridad y el diseño de nuevos materiales. En el ámbito de la ciberseguridad, la computación cuántica está revolucionando la criptografía mediante algoritmos cuánticos que incrementan la seguridad de las comunicaciones y protegen los datos sensibles. La computación cuántica también se presenta como una herramienta valiosa para la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, donde permite mejorar la eficiencia en el procesamiento de grandes volúmenes de datos y en el análisis predictivo. Otro campo de relevancia es la medicina, donde la computación cuántica facilita simulaciones moleculares que aceleran el diseño de nuevos fármacos y tratamientos personalizados. En la industria logística, sus algoritmos permiten optimizar rutas y la cadena de suministro, generando beneficios económicos significativos. Además, las redes de comunicación cuántica están transformando la manera en que se transmiten y protegen los datos, sentando las bases para una posible internet cuántica que revolucionará la conectividad a nivel global.

Aunque el progreso ha sido significativo, la computación cuántica aún enfrenta numerosos desafíos. Uno de los principales obstáculos es la decoherencia cuántica, que provoca que los qubits pierdan sus propiedades cuánticas con rapidez debido a interferencias ambientales, reduciendo así la precisión de los cálculos. Otro desafío importante es la escalabilidad: construir y mantener un sistema con un número creciente

de qubits interconectados es complejo y requiere innovaciones en arquitectura y tecnología. Adicionalmente, la corrección de errores sigue siendo una barrera, dado que las operaciones cuánticas son extremadamente sensibles a perturbaciones externas. La infraestructura de soporte también representa un reto. La mayoría de los ordenadores cuánticos requieren temperaturas extremadamente bajas para mantener la estabilidad de los qubits, lo que implica costos elevados y una limitación en la accesibilidad. El desarrollo de algoritmos específicos para sistemas cuánticos es aún incipiente, y los lenguajes de programación adaptados a este entorno no son tan avanzados como los de la computación clásica.

A nivel global, el potencial de la computación cuántica está movilizando grandes inversiones en investigación y desarrollo, con una competencia marcada entre bloques geopolíticos. Europa, a través de iniciativas como el Quantum Flagship, se ha comprometido a posicionarse como líder en esta tecnología, invirtiendo en aplicaciones prácticas para sectores como la salud, las finanzas, y la logística. En España, el desarrollo en computación cuántica está siendo promovido en sectores como las telecomunicaciones y la inteligencia artificial, con miras a consolidarse como un referente en esta tecnología. Los posibles escenarios a futuro incluyen un impacto significativo en la competitividad tecnológica y la seguridad geopolítica. La carrera hacia la "supremacía cuántica" podría redefinir la hegemonía mundial, pues los países o bloques que logren dominar la computación cuántica tendrán una ventaja estratégica considerable. Este escenario plantea tanto oportunidades como riesgos, ya que los países que no consigan desarrollar capacidades cuánticas avanzadas podrían enfrentarse a una brecha tecnológica que afecte su posición en la economía y la política global.

La computación cuántica promete transformar industrias clave y redefinir el futuro tecnológico. Sin embargo, alcanzar su implementación generalizada requerirá avances significativos en la estabilización y escalabilidad de los sistemas de qubits, el desarrollo de infraestructura avanzada y la creación de algoritmos robustos. Las aplicaciones potenciales y las barreras tecnológicas subrayan la importancia de una colaboración internacional y la inversión continua en investigación. La llegada de una era cuántica revolucionará desde la medicina y la inteligencia artificial hasta la ciberseguridad y la logística, ofreciendo soluciones a problemas hoy irresolubles. A pesar de los desafíos, la computación cuántica ofrece una promesa de cambio radical que, si se materializa con éxito, será uno de los mayores logros científicos y tecnológicos del siglo XXI.

Nos encontramos pues, ante un potencial que podría revolucionar capacidades militares, además de temas de criptografía y comunicación ya mencionados, diferentes tipos de sensores y radares, nuevos sistemas de navegación, o incluso la capacidad de poder crear una simulación de diferentes escenarios que serviría de mucho a nivel táctico y estratégico. Todo ello está determinando actualmente los pasos que se están siguiendo en la nueva carrera armamentística de muchos países, especialmente China y Estados Unidos, que han realizado importantes inversiones enfocadas a la investigación y al desarrollo cuántico en relación con aplicaciones de uso militar. Esto no solo podría

plantear un desafío de seguridad, sino también presentando dilemas éticos y una mayor predisposición a la escalada en los conflictos.

En resumen, la computación cuántica está destinada a transformar de forma radical el panorama tecnológico no solo de la informática, sino también de la industria y el comercio mundial. Aunque su desarrollo aún se encuentra en una etapa temprana, las aplicaciones que ya se están explorando muestran el enorme potencial de esta tecnología para resolver problemas complejos y mejorar procesos en una amplia variedad de sectores. Por otra parte, la naturaleza de los conflictos podría verse gravemente alterada si se llega a un nivel superior, capacidades de ataque y defensa en el ámbito de la ciberseguridad se verían potenciadas, entre otras. Por ello, el impacto de la tecnología cuántica apenas está comenzando a vislumbrarse. No obstante, quedan muchas barreras que vencer.

V. ANEXOS

ANEXO 1. TECNOLOGÍAS Y ARQUITECTURAS DE LOS QUBITS

A.- QUBITS SUPERCONDUCTORES.

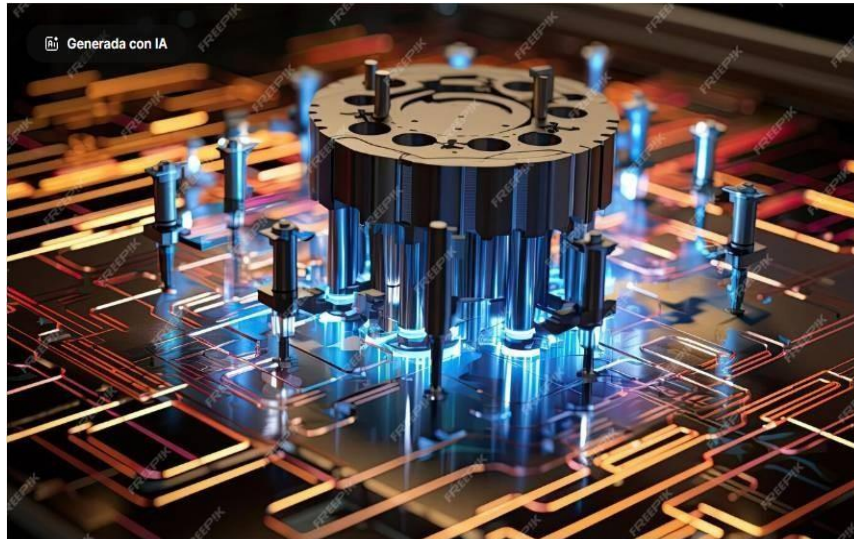
El Qubit Superconductor es el tipo más común y maduro de qubit en los sistemas de computación cuántica actuales. Están fabricados a partir de circuitos eléctricos superconductores y aprovechan el fenómeno de la superconductividad para realizar operaciones cuánticas.

La superconductividad es un estado que se alcanza a temperaturas extremadamente bajas y permite que la corriente eléctrica fluya sin resistencia. Al enfriar materiales como el aluminio o el niobio a temperaturas cercanas al cero absoluto se generan flujos de corriente eléctrica sin resistencia y por tanto estados de superposición en los circuitos electrónicos.

Existen varios tipos de qubits superconductores. Unas utilizan pulsos electromagnéticos para controlar el flujo magnético (qubits de flujo), otras la carga eléctrica (qubits transmon) y otras la diferencia de fase en áreas específicas del circuito superconductor (qubits de fase).



Multinacionales como IBM, Google, INTEL y las startups finlandesas IQM Quantum Computer y la norteamericana Rigetti Computing han optado por esta tecnología.

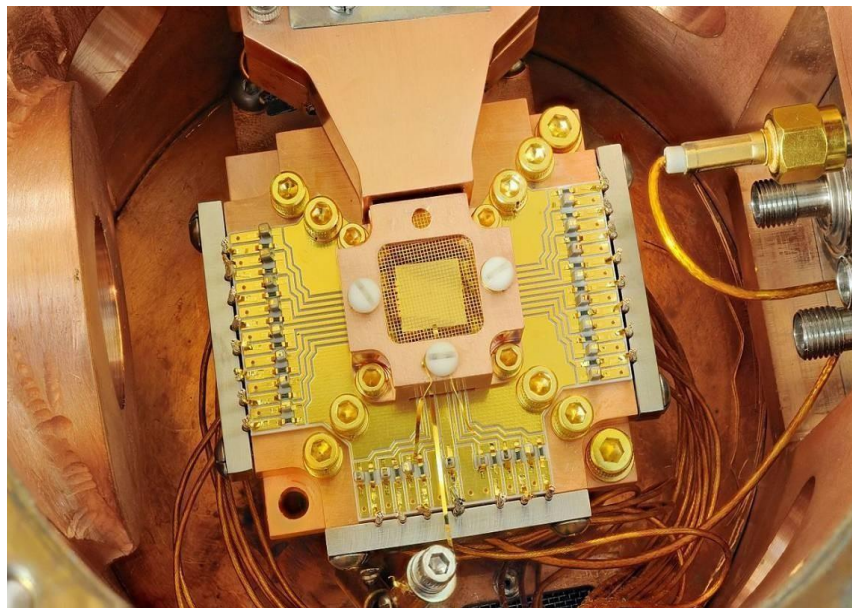


Ventajas	Inconvenientes
<p>Aceptable escalabilidad. Facilidad en agregar más qubits y nuevas tecnologías.</p> <p>Facilidad de control, fabricación y calibración de qubits.</p> <p>Velocidad de procesamiento superior.</p> <p>Cálculos cuánticos rápidos.</p>	<p>Sensibilidad al ruido. Requiere complejos sistemas de corrección de errores.</p> <p>Decoherencia. Tiempos de coherencia bajos. Complica operaciones cuánticas estables.</p> <p>Necesita temperaturas criogénicas. Requiere exigentes sistemas de refrigeración.</p> <p>Alto consumo de energía. Problemas de cableado e interconectividad. .</p>

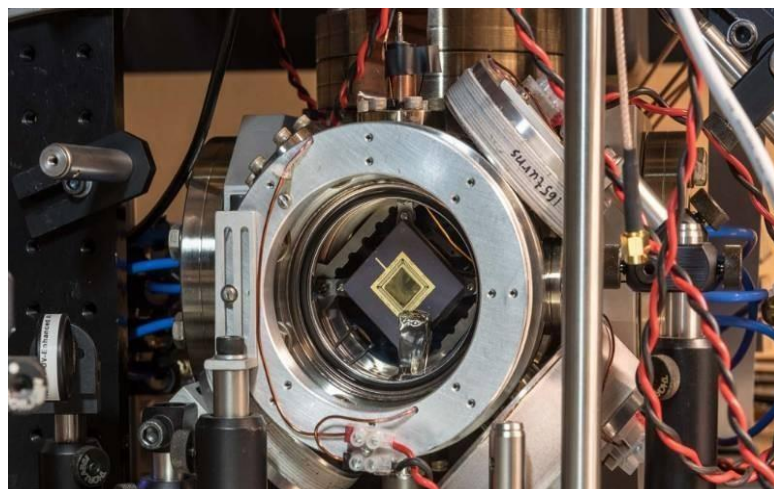
B.- QUBITS DE IONES ATRAPADOS.

Si tomamos un átomo y extraemos uno de sus electrones, adquiere una carga positiva, convirtiéndose en un ion. Los Qubits de Iones Atrapados se basan en los estados electrónicos y de giro nuclear de los iones.

Si confinamos los iones en campos electromagnéticos y los controlamos y manipulamos a través de radiación laser o de microondas estos pueden funcionar como qubits.



Entre las compañías de computación cuántica que emplean Qúbits con Trampas de Iones se encuentran Ion Q, Alpine Quantum Technologies (AQT), Oxford Ionics, EleQtron y Quantinuum.



Ventajas	Inconvenientes
<p>Notable tiempo de coherencia. Mayor estabilidad en estado de superposición.</p> <p>Resistentes al ruido y a la vibración. Funcionamiento a menor temperatura. Operaciones de alta fidelidad. Bajas tasas de error. Menor necesidad corrección de errores.</p> <p>Reconfiguración. Mayor capacidad de interacción con otros qubits.</p>	<p>Escalabilidad compleja. Dificultad de incrementar qubits.</p> <p>Menor velocidad de procesamiento.</p> <p>Mayor complejidad en la gestión, control y mantenimiento del sistema.</p> <p>Volumen en las instalaciones.</p>

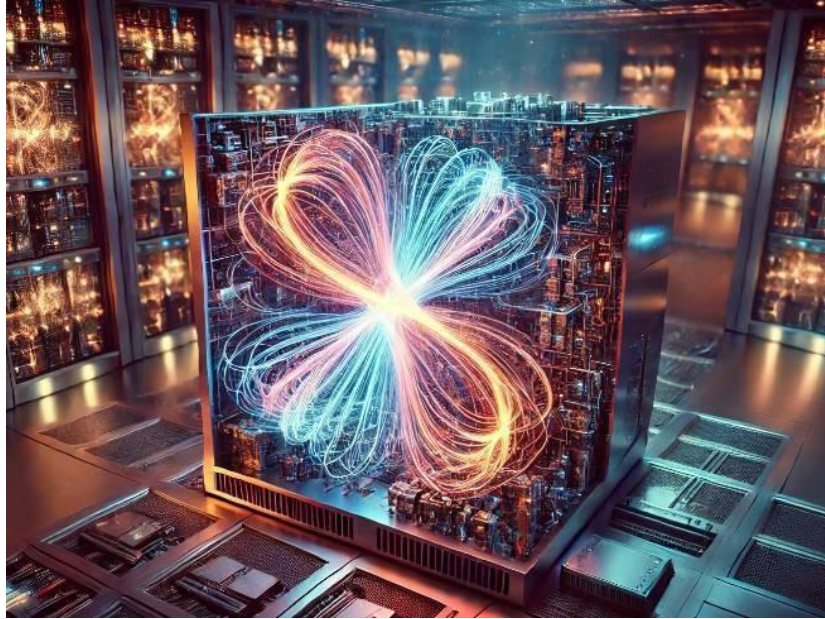
3.- QUBITS FOTÓNICOS.

Los qubits fotónicos utilizan partículas de luz para transportar y procesar información cuántica. Aprovechan las propiedades cuánticas de la luz, como la polarización y la fase, para construir qubits codificados por un único fotón en superposición.

Estos fotones se manipulan mediante componentes ópticos como divisores de haz y desfasadores. Posteriormente los detectores de fotones leen los resultados.



Los principales actores que utilizan este enfoque son la empresa británica ORCA, la canadiense Xanadu y la americana PsiQuantum.

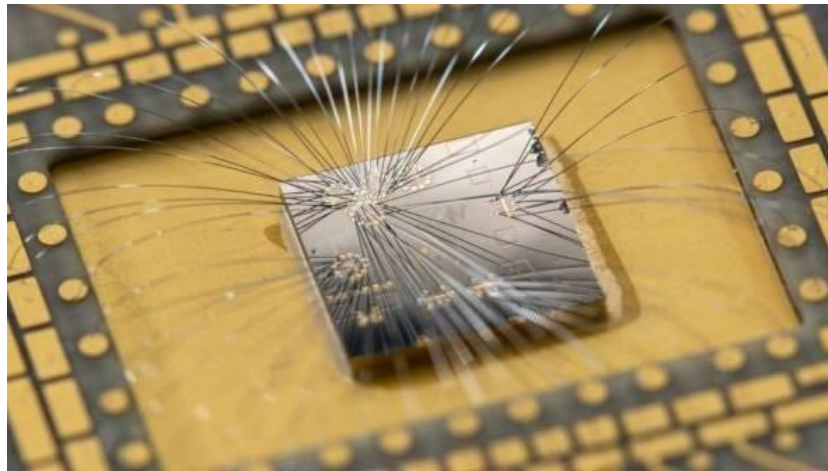


Ventajas	Inconvenientes
<p>Menor sensibilidad al entorno. Mejor resistencia al ruido ambiental.</p> <p>Buena coherencia. Operaciones cuánticas más fiables. Estado cuántico estable.</p> <p>Capacidad de viajar a largas distancia. Ideal para comunicación cuántica.</p> <p>Funcionan a temperatura ambiente. No requieren de sobreenfriamiento.</p> <p>Adaptación a variedad de entornos.</p>	<p>Corrección de errores. Fotones difíciles de controlar. Pérdida de información.</p> <p>Dificultad generar fotones alta eficiencia.</p> <p>Equipos voluminosos. Dificultad alojar los equipos que guían los fotones.</p> <p>Conectividad de fotones limitada. Desafíos de escalamiento.</p> <p>Complejidad de las operaciones decompuesta.</p>

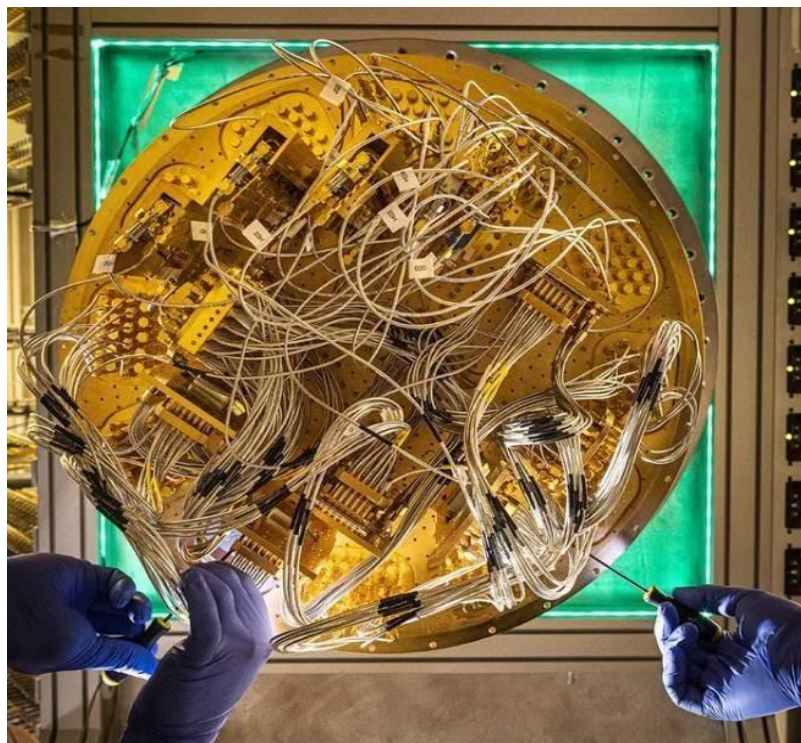
4.- QUBITS TOPOLÓGICOS.

A diferencia de las restantes tecnologías cuyos qubits se basan en las propiedades de los átomos u otras partículas individuales, los Qubits Topológicos descansan en las propiedades topológicas de los materiales, la disposición y la conectividad.

Son qubits que se aprovechan de las propiedades únicas de los denominados “aniones”, un tipo de partículas en sistemas bidimensionales para producir corriente eléctrica sin presentar resistencia. Los aniones se entrelazan entre si de una manera especial almacenando la información cuántica en los patrones de entrelazamiento. Entrelazamiento cuántico.



Esta tecnología nueva y prometedora, en fase de experimentación, está siendo desarrollada principalmente por la multinacional Microsoft y la compañía americana Quantinuum.



Ventajas	Inconvenientes
<p>Robustez. Alta tolerancia a los errores. Resistente al ruido térmico y ambiental.</p> <p>Potencial escalabilidad.</p> <p>Algoritmos cuánticos mejorados.</p> <p>Decoherencia reducida.</p>	<p>Etapa experimental de desarrollo. Marcoteórico en gran medida.</p> <p>Temperaturas extremadamente bajas para operar.</p>

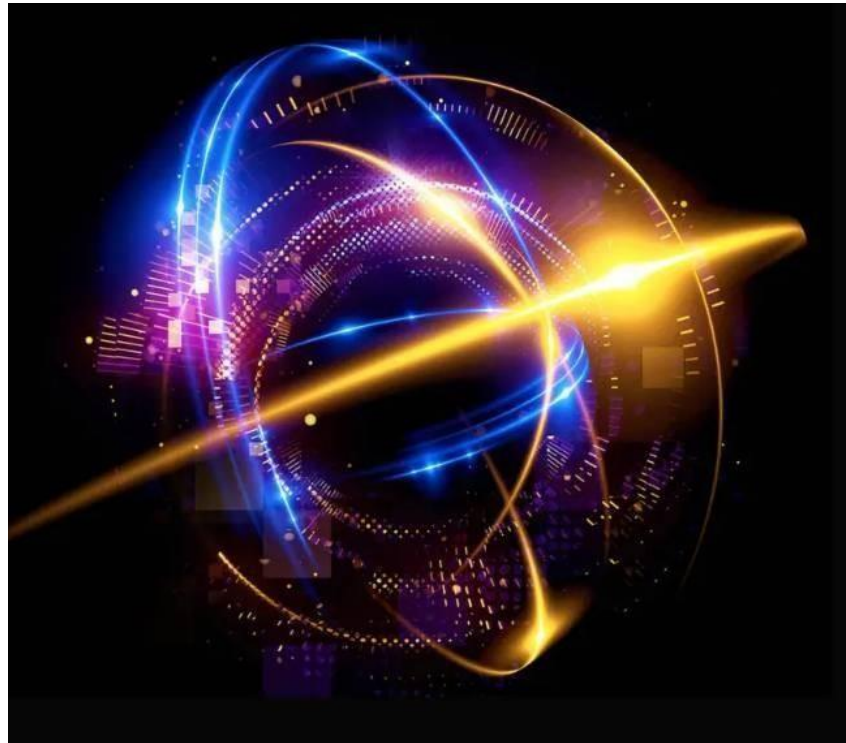
5.- QUBITS DE SPIN.

Cada electrón tiene una propiedad física denominada “spin”, por la cual cada partícula tiene un momento angular intrínseco de valor fijo. Los Qubits de Spin utilizan el spin intrínseco de un electrón como base para el procesamiento de la información cuántica.

Cada qubit está codificado en el estado de spin del electrón y la información cuántica se pueden controlar aplicando campos magnéticos u otras interacciones.



Las compañías que actualmente están realizando mayores inversiones en el desarrollo de esta tecnología son Corporación Intel (INTC) y Toshiba Quantum Technology.



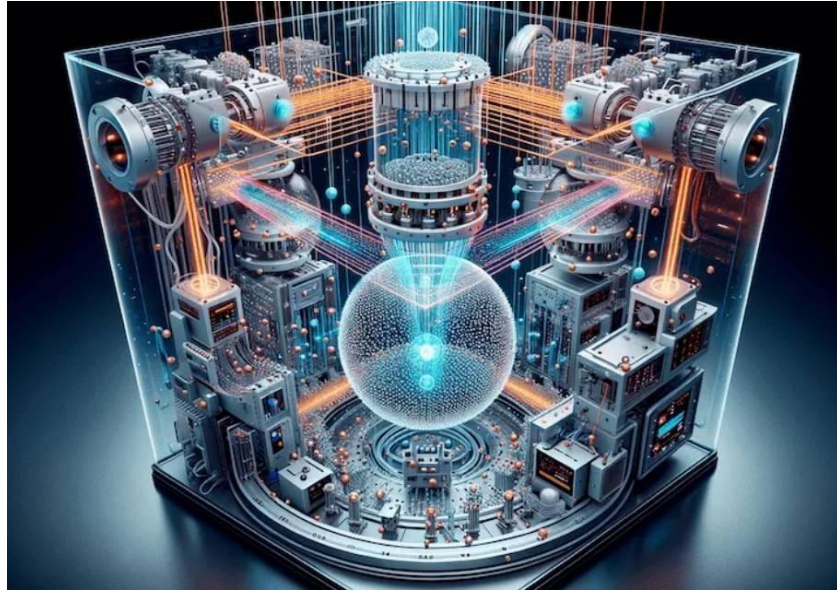
Ventajas	Inconvenientes
<p>Potencial miniaturización y sencillez en la fabricación. Empaquetamiento y compactación.</p> <p>Escalabilidad. Uso de tecnología de fabricación de semiconductores.</p> <p>Potencialidad de operar a temperaturas más altas. Menor sensibilidad a fluctuaciones de temperatura. No sistemas criogénicos complejos.</p>	<p>Dificultad de controlar e interactuar con el spin del electrón.</p> <p>Conectividad de qubit limitada.</p> <p>Dificultad en leer la información almacenada.</p> <p>Tiempos de coherencia mejorables.</p> <p>Susceptibilidad al ruido ambiental.</p>

6.- QUBITS DE ÁTOMOS NEUTROS.

Enfoque muy similar a la tecnología de trampas de iones, pero a diferencia la computación cuántica de átomos neutros se basa en átomos individuales que no tienen carga, normalmente átomos alcalinos como el cesio, el estroncio o el rubidio, lo que les

permite mantenerse cerca unos de otros.

Esta tecnología utiliza técnicas de enfriamiento y atrapamiento por láser sobre átomos neutros que se encuentran suspendidos y aislados en el vacío y manipula sus estados cuánticos mediante pulsos ópticos o de microondas. De esa manera la información cuántica se codifica en estados atómicos de baja energía que son muy estables.



Este enfoque está siendo desarrollado por empresas americanas como QuEraComputation y, Atom Computing y la startup francesa Pasqal.



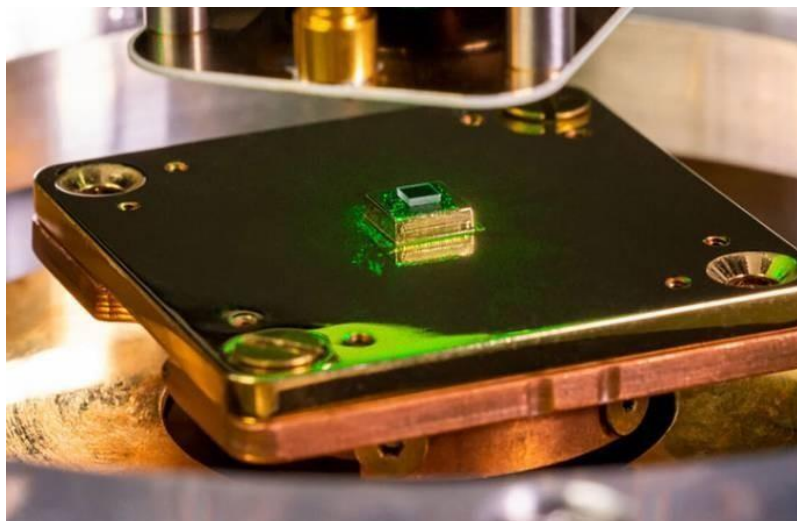
Ventajas	Inconvenientes
<p>Mejor escalabilidad de la información cuántica. Potencial para una alta densidad de agrupación.</p> <p>Fidelidad. Precisión y estabilidad. Fácil conectividad. Operaciones en paralelo.</p> <p>Arquitectura flexible y reconfigurable. Sencillez en el cableado.</p> <p>Mayor coherencia. Bajo nivel de ruido. Menores niveles de errores.</p> <p>Temperatura ambiente.</p>	<p>Lentitud en la velocidad en las operaciones de compuerta.</p> <p>Fiabilidad en la arquitectura para tolerancia a los fallos.</p> <p>Interacción débil entre átomos.</p>

7.- QUBITS CON CENTROS DE NITROGENO VACANTE (NV).

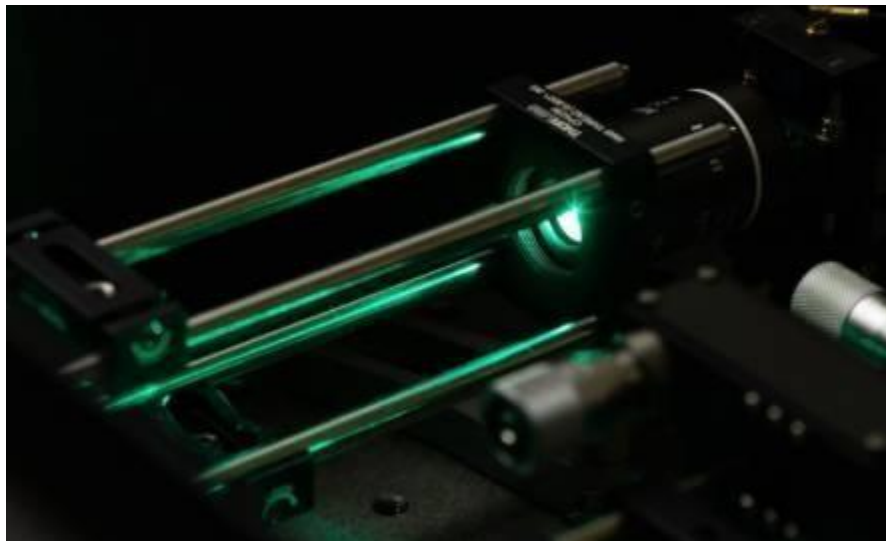
Esta línea de investigación aprovecha las propiedades de un defecto hallado en los cristales de diamantes, el denominado centro de nitrógeno-vacante, para formar qubits.

Estos centros tienen capacidad de absorber y emitir luz -efecto de fotoluminiscencia- y se producen cuando un átomo de nitrógeno reemplaza a uno de los átomos de carbono en una red de diamantes. Además, poseen un estado de spin electrónico que puede servir de base para codificar la información cuántica.

Este estado de spin se puede manipular y leer mediante campos ópticos lo que permite el procesamiento y la computación de la información.



Compañías como la australiana Quatum Brilliance y las alemanas, Saxon Q y XeedQ están desarrollando centros de nanocristales en diamantes.



Ventajas	Inconvenientes
<p>Robustez frente a perturbaciones ambientales.</p> <p>Largos tiempos de coherencia del spin. Facilidad en la lectura cuántica.</p> <p>Temperatura ambiente. No requiere sistema de refrigeración. Menos costos, menos espacio y menos consumo energía.</p> <p>Implementación en distintos entornos</p>	<p>Escalabilidad. Dificultad de entrelazamiento.</p> <p>Complejidad en el proceso de fabricación.</p> <p>Aleatoriedad de centros de vacantes en los diamantes.</p>