Informe Exhaustivo sobre Computación Cuántica: Fundamentos, Tecnologías y Perspectivas Futuras

Capítulo 1: Documento Informativo (Briefing Document)

Resumen Ejecutivo

La computación cuántica representa un cambio de paradigma fundamental, abandonando los principios de la computación clásica para aprovechar los fenómenos contraintuitivos de la mecánica cuántica. A diferencia de los bits clásicos, restringidos a los estados 0 o 1, el cúbit —la unidad de información cuántica— puede existir en una superposición de ambos estados simultáneamente. Este principio, junto con el entrelazamiento, permite a las computadoras cuánticas explorar espacios computacionales de dimensión exponencial, inaccesibles para las supercomputadoras actuales. Esta capacidad promete resolver problemas hoy intratables en áreas críticas como la simulación molecular, la optimización a gran escala y la criptografía.

El campo se desarrolla actualmente en torno a dos paradigmas principales: el modelo basado en compuertas, un enfoque universal, y el recocido cuántico, un modelo especializado para problemas de optimización. A pesar de sus diferencias, ambos enfrentan un obstáculo monumental: la decoherencia sigue siendo la barrera fundamental que dicta el ritmo de la innovación y define los límites de la era NISQ. La fragilidad de los estados cuánticos y su tendencia a colapsar debido al ruido ambiental es el foco central de la investigación, impulsando el desarrollo de la corrección de errores cuánticos (QEC), la mejora de la fidelidad de los cúbits y la escalabilidad.

El ecosistema cuántico se encuentra en una fase de desarrollo crucial, un punto de inflexión que marca la transición de la posibilidad teórica a la ingeniería tangible, aunque ruidosa. Hitos como la "supremacía cuántica" han sido demostrados por actores como Google, mientras que la "utilidad cuántica" —el punto en que un computador cuántico resuelve un problema científico más allá de la simulación clásica de fuerza bruta— ha sido alcanzada, según IBM. Impulsado por una intensa competencia industrial y académica, el campo avanza hacia el objetivo final de la "ventaja cuántica", donde las máquinas cuánticas ofrezcan soluciones superiores a problemas prácticos, redefiniendo así los límites de lo computable.

1.1 Introducción a la Era de la Computación Cuántica

La computación cuántica es una disciplina emergente que aprovecha las leyes de la mecánica cuántica para procesar información de formas radicalmente nuevas, ofreciendo el potencial para resolver problemas complejos que son intratables incluso para las supercomputadoras clásicas más avanzadas. Esta sección establece las bases conceptuales de este campo, diferenciando el enfoque cuántico del clásico, explorando sus orígenes históricos y analizando el dinámico panorama actual que define la carrera hacia la computación de próxima generación.

Computación Clásica	Computación Cuántica
Fundamento: Utiliza bits, que solo pueden tener un valor de 0 o 1 en un momento dado.	**Fundamento:** Utiliza cúbits (quantum bits), que pueden existir en un estado de 0, 1 o una superposición de ambos al mismo tiempo.
Procesamiento: Procesa la información de manera secuencial, comparando estados	**Procesamiento:** Aprovecha principios como la superposición, el entrelazamiento y la

distintos a través de puertas lógicas (AND, OR, XOR, etc.).	interferencia para realizar cálculos en un vasto espacio multidimensional.
Idoneidad: Ideal para la gran mayoría de las tareas informáticas cotidianas, desde la navegación web hasta el análisis de datos estructurados.	**Idoneidad:** Especializada en problemas complejos con un gran número de variables, como la simulación de sistemas cuánticos, la optimización y la criptografía.

La génesis de este campo se remonta a 1982, cuando el físico Richard Feynman propuso la idea de una máquina cuántica diseñada específicamente para simular la física cuántica, argumentando que la naturaleza, al ser fundamentalmente cuántica, requeriría un computador basado en los mismos principios para ser modelada con precisión.

En 2024, el campo experimenta un crecimiento "tremendo". Corporaciones establecidas como IBM, Google y Microsoft, junto a empresas especializadas como D-Wave y una creciente legión de startups innovadoras (Rigetti, IonQ, Xanadu), compiten intensamente en la construcción de computadoras cuánticas a gran escala. Este esfuerzo concertado, que abarca tanto el hardware como el software, está acelerando el progreso hacia la realización práctica de la visión de Feynman. Estos avances tecnológicos se basan en la explotación de principios cuánticos fundamentales que otorgan a estas máquinas su poder computacional único.

1.2 Principios Fundamentales de la Mecánica Cuántica

El poder sin precedentes de la computación cuántica reside en su capacidad para manipular fenómenos contraintuitivos del mundo subatómico. A diferencia de la lógica determinista de la computación clásica, el enfoque cuántico explota las extrañas y poderosas reglas de la mecánica cuántica. Esta sección desglosa los cuatro pilares conceptuales que permiten a las computadoras cuánticas acceder a un espacio computacional vasto e inaccesible para las máquinas clásicas, sentando las bases de su potencial transformador.

- **Cúbit y Superposición:** El análogo cuántico del bit clásico es el **cúbit**. A diferencia de un bit, que solo puede ser 0 o 1, un cúbit puede existir en una combinación lineal de ambos estados simultáneamente, un principio conocido como **superposición**. Matemáticamente, el estado de un cúbit se representa como $a|0\rangle + b|1\rangle$, donde a y b son amplitudes de probabilidad complejas. Esta capacidad permite que n cúbits representen 2^n valores potenciales a la vez, creando un espacio computacional (conocido como espacio de Hilbert) que crece exponencialmente y otorga a las computadoras cuánticas su inmenso paralelismo.
- **Entrelazamiento:** El **entrelazamiento** es una correlación profunda y no local entre dos o más cúbits. Cuando los cúbits están entrelazados, el estado de uno afecta instantáneamente al estado del otro, sin importar la distancia física que los separe. Este fenómeno, que Einstein describió como "acción fantasmal a distancia", es un recurso crucial para la computación cuántica, ya que permite la codificación densa de información y la simulación de redes complejas y altamente conectadas.
- **Interferencia:** La **interferencia** es el motor de la computación cuántica. Al igual que las ondas pueden sumarse (interferencia constructiva) o anularse (interferencia destructiva), los algoritmos cuánticos manipulan las **amplitudes de probabilidad** de los cúbits para guiar el cálculo hacia la solución correcta. Los algoritmos están diseñados para amplificar

las probabilidades de los resultados correctos y cancelar las de los incorrectos, asegurando que la respuesta deseada emerja con alta probabilidad al final del cómputo. Una analogía útil es imaginar que se está en el centro de un laberinto complejo; mientras un computador clásico probaría cada camino secuencialmente, uno cuántico podría derivar el camino correcto como si tuviera una vista panorámica, utilizando la interferencia para cancelar las rutas incorrectas y amplificar la correcta.

- **Medición y Decoherencia:** La **medición** es el acto de observar un cúbit, lo que provoca que su estado de superposición colapse a un estado clásico definitivo (0 o 1). Este proceso es inherentemente probabilístico. Sin embargo, los cúbits son extremadamente frágiles. Cualquier interacción no deseada con su entorno —como fluctuaciones de temperatura, vibraciones o interferencia electromagnética— puede destruir sus delicadas propiedades cuánticas. Este proceso, conocido como **decoherencia**, es el mayor obstáculo para construir computadoras cuánticas a gran escala y tolerantes a fallos.

Estos principios se implementan a través de diferentes modelos o paradigmas de computación, cada uno con sus propias fortalezas y arquitecturas.

1.3 Paradigmas de Computación Cuántica y Algoritmos

No existe un método único para construir y operar una computadora cuántica; el campo ha evolucionado en torno a diferentes modelos computacionales. Cada paradigma aprovecha los principios cuánticos de manera distinta, lo que los hace más adecuados para ciertos tipos de problemas. Esta sección analiza los dos modelos dominantes —el basado en compuertas y el de recocido cuántico—, contrastando sus fortalezas, debilidades y los algoritmos emblemáticos asociados a cada uno.

Característica	**Modelo Basado en Compuertas (Gate-Based)**	**Recocido Cuántico (Quantum Annealing)**
Modelo Computacional	Utiliza una secuencia de operaciones discretas, llamadas compuertas cuánticas, para manipular el estado de los cúbits. Es análogo a los circuitos lógicos en la computación clásica.	Utiliza un proceso de evolución continua (adiabático) para guiar un sistema cuántico hacia su estado de mínima energía, que corresponde a la solución de un problema de optimización.
Universalidad	**Universal.** Puede, en teoría, ejecutar cualquier algoritmo cuántico y resolver una amplia gama de problemas.	**Especializado.** Diseñado específicamente para resolver problemas de optimización y muestreo. No es un modelo universal.
Casos de Uso Principales	Simulación de sistemas cuánticos, criptografía, búsqueda en bases de datos.	Optimización logística, finanzas (optimización de carteras), aprendizaje automático, ciencia de materiales.
Sensibilidad al Error	Altamente sensible a la decoherencia y al ruido de las compuertas. Requiere una robusta	Menos sensible a ciertos tipos de errores, ya que aprovecha la tendencia natural del sistema a encontrar estados de baja

	Corrección de Errores Cuánticos (QEC) para escalar.	energía, haciéndolo más robusto frente a ciertas perturbaciones computacionales.
Ejemplos de Algoritmos	Algoritmo de Shor, Algoritmo de Grover, Algoritmos Variacionales (VQE).	Implementación de cómputo cuántico adiabático, Algoritmo de Optimización Aproximada Cuántica (QAOA).

La utilidad de estos paradigmas se materializa a través de algoritmos específicos diseñados para explotar sus capacidades:

- **Algoritmo de Shor (1994):** Diseñado para el modelo basado en compuertas, es famoso por su capacidad para factorizar números enteros de manera exponencialmente más rápida que cualquier algoritmo clásico conocido. Esto representa una amenaza existencial para los sistemas de criptografía de clave pública actuales, como RSA.
- **Algoritmo de Grover (1996):** Ofrece una aceleración cuadrática para la búsqueda en bases de datos no estructuradas. Aunque menos drástica que la de Shor, esta mejora es significativa para una amplia gama de problemas computacionales.
- **Algoritmos Variacionales (ej. VQE):** Populares en la era NISQ, estos algoritmos híbridos utilizan una computadora cuántica para preparar y medir estados, y una computadora clásica para optimizar los parámetros del circuito. Son prometedores para problemas de química cuántica y optimización.
- **QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm):** Es un algoritmo híbrido, a menudo asociado con el recocido cuántico digital, diseñado para encontrar soluciones aproximadas a problemas de optimización combinatoria.

La implementación práctica de estos modelos teóricos y algoritmos depende de un complejo ecosistema de hardware físico y herramientas de software que los hacen programables y accesibles.

1.4 Ecosistema de Hardware y Software

La realización de la computación cuántica depende de un ecosistema tecnológico complejo que abarca desde la fabricación de cúbits físicos en el nivel más bajo hasta las plataformas de software de alto nivel que permiten a los desarrolladores diseñar y ejecutar algoritmos. La elección de la tecnología de cúbits no es solo una decisión de ingeniería, sino una apuesta estratégica que define la hoja de ruta de cada competidor y sus probables nichos de ventaja cuántica.

A continuación se resumen las principales tecnologías de cúbits físicos que se están desarrollando actualmente:

Tecnología	Descripción Breve	Ventajas Clave	Desafíos Clave
Circuitos Superconductores	Bucles de material superconductor enfriados a temperaturas criogénicas. Utilizados por IBM y Google.	Velocidad de compuerta rápida, se integran bien con la electrónica de control existente.	Requieren temperaturas extremadamente bajas, tiempos de coherencia relativamente cortos, susceptibles al ruido.

Iones Atrapados	Iones (átomos cargados) suspendidos en el vacío mediante campos electromagnéticos.	Tiempos de coherencia muy largos, alta fidelidad de compuerta, alta conectividad.	Velocidad de compuerta lenta, complejidad en el escalado de las trampas y los láseres.
Fotones	Partículas de luz utilizadas como cúbits. Su estado se define por propiedades como la polarización.	Resistentes al ruido ambiental, excelentes para la comunicación cuántica a larga distancia.	Difíciles de generar y controlar de manera determinista, la creación de compuertas de dos cúbits es compleja.
Puntos Cuánticos (Quantum Dots)	Pequeños semiconductores que atrapan un solo electrón, cuyo espín actúa como un cúbit.	Potencial de alta escalabilidad utilizando la tecnología de fabricación de semiconductores existente.	Susceptibles al ruido del entorno del semiconductor, variabilidad entre cúbits.
Átomos Neutros	Átomos individuales atrapados en el espacio mediante pinzas ópticas (láseres).	Alta estabilidad, tiempos de coherencia largos, escalables a grandes conjuntos de cúbits.	La velocidad de las compuertas de dos cúbits puede ser un desafío, requiere sistemas de láser complejos.

En el ámbito del software, el panorama está emergiendo rápidamente, aunque muchas herramientas actuales son de bajo nivel, comparables a los lenguajes ensambladores de la computación clásica. Sin embargo, se han desarrollado plataformas de software de alto nivel (SDKs) para facilitar el acceso y la programación:

- **Plataformas basadas en compuertas:** Las principales son **Qiskit** (desarrollado por IBM), **Cirq** (Google) y **PyQuil** (Rigetti). Estas plataformas son de código abierto y proporcionan APIs en Python, un lenguaje ampliamente conocido, lo que reduce la barrera de entrada para los desarrolladores.
- **Plataformas de Recocido Cuántico:** D-Wave ofrece su propio ecosistema de software, que incluye **D-Wave Ocean Software** y la plataforma en la nube **Leap**, diseñados para formular y resolver problemas de optimización.

Este ecosistema de hardware y software en constante evolución es el que busca habilitar las aplicaciones prácticas que prometen transformar industrias enteras.

1.5 Aplicaciones Potenciales y la Carrera por la Ventaja Cuántica

La motivación fundamental detrás de las masivas inversiones en computación cuántica es su potencial para resolver problemas de gran impacto que actualmente están fuera del alcance de cualquier computadora clásica. La carrera por desarrollar esta tecnología está marcada por una serie de hitos que definen el progreso del campo, desde demostraciones conceptuales hasta la resolución de problemas prácticos del mundo real.

A continuación se definen los hitos clave en esta carrera:

- **Supremacía Cuántica:** Este término describe una demostración experimental en la que una computadora cuántica resuelve un problema —aunque sea artificial y sin utilidad práctica— que una supercomputadora clásica no puede resolver en un tiempo razonable. El anuncio de Google en 2019 con su procesador Sycamore fue una prueba de concepto fundamental para el campo.
- **Utilidad Cuántica:** Acuñado por IBM, este concepto marca el punto en el que una computadora cuántica ofrece soluciones fiables a problemas que están más allá del alcance de la simulación clásica de fuerza bruta, **compitiendo con los mejores métodos de aproximación clásicos conocidos**. La demostración de este hito por parte de IBM en 2023 refleja un cambio estratégico deliberado hacia la resolución de problemas científicamente relevantes, incluso antes de alcanzar una ventaja definitiva.
- **Ventaja Cuántica:** Este es el objetivo final y el más significativo. Se alcanza cuando una computadora cuántica proporciona una solución mejor, más rápida o más barata a un problema práctico y comercialmente relevante en comparación con *todos* los métodos clásicos conocidos, incluyendo algoritmos de aproximación y heurísticas.

El logro de la ventaja cuántica desbloqueará aplicaciones transformadoras en diversas industrias:

- **Química, Farmacéutica y Ciencia de Materiales:** La capacidad de simular con precisión el comportamiento de moléculas y materiales a nivel cuántico podría revolucionar el descubrimiento de fármacos, el diseño de catalizadores más eficientes (por ejemplo, para la producción de fertilizantes con menor huella de carbono) y la creación de nuevos materiales con propiedades deseadas, como superconductores a temperatura ambiente.
- **Optimización:** Muchos de los problemas más desafiantes en los negocios son problemas de optimización. La computación cuántica podría encontrar soluciones óptimas para la gestión de carteras financieras, la optimización de rutas logísticas (como el problema del viajante), y la gestión de redes energéticas complejas.
- **Criptografía y Ciberseguridad:** La computación cuántica presenta una doble cara. Por un lado, representa una amenaza para la criptografía de clave pública actual, ya que el algoritmo de Shor puede romperla. Por otro lado, habilita nuevas formas de seguridad, como la **Distribución Cuántica de Claves (QKD)** para una comunicación inherentemente segura y estimula el desarrollo de la **Criptografía Post-Cuántica (PQC)**, algoritmos resistentes a ataques cuánticos que pueden ejecutarse en hardware clásico.
- **Inteligencia Artificial y Machine Learning (QAI/QML):** Existe un creciente interés en cómo los algoritmos cuánticos podrían acelerar ciertas tareas de aprendizaje automático, como la clasificación de datos y el reconocimiento de patrones. El QML podría permitir el descubrimiento de patrones en conjuntos de datos extremadamente complejos, inaccesibles para los algoritmos de IA clásicos.

A pesar de este enorme potencial, el camino hacia la ventaja cuántica está lleno de desafíos técnicos significativos que deben superarse.

1.6 Desafíos Críticos y la Era NISQ

El estado actual de la computación cuántica se define como la era de la **"Computación Cuántica a Escala Intermedia y Ruidosa" (NISQ)**. Este término describe procesadores cuánticos con un número intermedio de cúbits (de 50 a unos pocos miles) que son "ruidosos", es decir, altamente

susceptibles a errores. Esta sección se centra en los obstáculos técnicos que impiden la construcción de computadoras cuánticas tolerantes a fallos, los cuales actúan como los principales impulsores de la inversión en I+D y los determinantes clave de la viabilidad comercial a corto plazo.

- **Decoherencia y Ruido Cuántico** El problema central y más persistente es la fragilidad de los cúbits. La **decoherencia** es la pérdida de las propiedades cuánticas (superposición y entrelazamiento) debido a la interacción de los cúbits con su entorno. Factores como fluctuaciones de temperatura, vibraciones e interferencia electromagnética actúan como "ruido" que corrompe la información cuántica, destruyendo los delicados estados necesarios para la computación. Mantener los cúbits en un estado coherente durante el tiempo suficiente para realizar cálculos complejos es el desafío principal.
- **Tasas de Error y Corrección de Errores Cuánticos (QEC)** Los errores en las operaciones cuánticas, como los **bit-flips** (un $|0\rangle$ se convierte en $|1\rangle$ o viceversa) y los **phase-flips** (un cambio en el signo de la fase), son inevitables. La **Corrección de Errores Cuánticos (QEC)** es el conjunto de técnicas diseñadas para detectar y corregir estos errores. Sin embargo, la QEC es mucho más compleja que la corrección de errores clásica debido al **teorema de no clonación**, que prohíbe crear una copia exacta de un estado cuántico desconocido. En su lugar, la QEC distribuye la información de un cúbit "lógico" a través de muchos cúbits "físicos" entrelazados. Se han propuesto códigos como el **código de Shor** y el **código de Steane**, pero los **códigos de superficie** se consideran los más prometedores para implementaciones a gran escala.
- **Escalabilidad** Aumentar el número de cúbits en un procesador es un desafío de ingeniería monumental. La escalabilidad no se trata solo de añadir más cúbits, sino de hacerlo manteniendo una alta calidad (tiempos de coherencia largos), bajas tasas de error y una alta conectividad entre ellos. A medida que aumenta el número de cúbits, también lo hace la complejidad del sistema de control clásico, el cableado, y los recursos de hardware necesarios, como la refrigeración criogénica.
- **Complejidad del Control y la Calibración** Cada cúbit debe ser controlado con una precisión extrema utilizando sistemas clásicos, como pulsos de microondas o láseres. A medida que los sistemas crecen, la orquestación de estos pulsos para ejecutar compuertas cuánticas se vuelve exponencialmente más compleja. Además, los procesadores cuánticos requieren una calibración constante para mitigar las desviaciones en el comportamiento de los cúbits y las compuertas, un proceso que consume tiempo y recursos computacionales.

La superación de estos desafíos es esencial para pasar de la era NISQ a la era de la computación cuántica tolerante a fallos, un camino que la industria ya está trazando con hojas de ruta ambiciosas.

1.7 Perspectivas Futuras y Hoja de Ruta de la Industria

A pesar de los formidables desafíos de la era NISQ, la industria de la computación cuántica opera con una visión clara y hojas de ruta estratégicas para el futuro. Los principales actores del campo no solo están enfocados en mejorar el hardware actual, sino también en construir el ecosistema completo necesario para la computación a gran escala. Esta sección examina las tendencias

emergentes y las hojas de ruta publicadas, proporcionando una visión de cómo podría evolucionar el campo en la próxima década.

Como ejemplo concreto de la progresión de la industria, la **hoja de ruta de IBM** establece objetivos ambiciosos:

- Lograr la **ventaja cuántica** en aplicaciones prácticas para 2026.
- Construir una **computadora cuántica tolerante a fallos** para 2029, un hito que marcará el inicio de la era post-NISQ.
- Escalar a sistemas con **2,000 cúbits lógicos** para 2033, capaces de abordar problemas de una complejidad sin precedentes.

Más allá de los hitos de hardware, varias tendencias clave darán forma a la próxima fase de la computación cuántica:

- **Supercomputación Centrada en lo Cuántico:** El futuro no es cuántico *versus* clásico, sino cuántico *y* clásico. El modelo dominante será un sistema híbrido donde las Unidades de Procesamiento Cuántico (QPU) trabajarán en conjunto con las CPU y GPU de las supercomputadoras clásicas. Cada tipo de procesador se encargará de las partes de un problema para las que está mejor adaptado, creando un flujo de trabajo computacional integrado y mucho más potente.
- **Internet Cuántico:** La visión a largo plazo es una red global que conecte computadoras cuánticas. Un internet cuántico utilizaría principios como el entrelazamiento para permitir una comunicación inherentemente segura a través de la Distribución Cuántica de Claves (QKD) y habilitar la computación cuántica distribuida, donde múltiples procesadores cuánticos colaboran para resolver un solo problema.
- **Desarrollo Continuo de Algoritmos:** El avance del hardware por sí solo no es suficiente. El descubrimiento de nuevos algoritmos cuánticos, especialmente aquellos diseñados para la era NISQ y los primeros sistemas tolerantes a fallos, es tan crucial como mejorar la calidad de los cúbits. La investigación algorítmica es clave para desbloquear aplicaciones que demuestren una ventaja cuántica.
- **Criptografía Post-Cuántica (PQC):** Existe una urgencia creciente por desarrollar y estandarizar nuevos algoritmos criptográficos que se ejecuten en computadoras clásicas pero que sean resistentes a los ataques de futuras computadoras cuánticas. Esta iniciativa, conocida como PQC, aborda la amenaza de "cosechar ahora, descifrar después", donde los adversarios almacenan datos cifrados hoy con la intención de descifrarlos una vez que dispongan de una computadora cuántica potente.

En conclusión, la computación cuántica ha superado el umbral de la investigación teórica para convertirse en una disciplina de ingeniería de sistemas complejos, con una hoja de ruta clara pero implacable hacia la computación de impacto transformador.

Capítulo 2: Guía de Estudio

2.1 Introducción a la Guía de Estudio

El propósito de esta guía es consolidar el conocimiento presentado en el informe anterior y proporcionar un conjunto de herramientas para la autoevaluación. A través de un cuestionario de repaso, preguntas de ensayo y un glosario de términos clave, esta sección está diseñada para reforzar la comprensión de los conceptos fundamentales, los desafíos y las perspectivas futuras de la computación cuántica, facilitando un aprendizaje más profundo y estructurado.

2.2 Cuestionario de Repaso

1. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre un bit clásico y un cúbit en términos de los estados que pueden representar?
2. Explica brevemente el principio de entrelazamiento cuántico y por qué es relevante para la computación.
3. Nombra los dos paradigmas principales de computación cuántica discutidos y su principal caso de uso.
4. ¿Qué es la decoherencia y por qué representa el mayor obstáculo para la computación cuántica a gran escala?
5. Define la era "NISQ" y describe sus características principales.
6. ¿Cuál es la amenaza que el algoritmo de Shor representa para la criptografía actual?
7. ¿Qué es un código de superficie y en qué categoría de Corrección de Errores Cuánticos (QEC) se encuentra?
8. Nombra al menos tres tecnologías físicas diferentes que se utilizan para construir cúbits.
9. ¿Cuál es la diferencia entre "supremacía cuántica" y "ventaja cuántica"?
10. ¿Qué es Qiskit y qué empresa lo desarrolla?

2.3 Clave de Respuestas del Cuestionario

1. Un bit clásico solo puede tener un valor de 0 o 1. Un cúbit, gracias al principio de superposición, puede representar un 0, un 1 o una combinación de ambos estados simultáneamente.
2. El entrelazamiento es una profunda correlación entre cúbits donde el estado de uno afecta instantáneamente al otro, sin importar la distancia. Es relevante porque permite la codificación densa de información y la ejecución de operaciones complejas en múltiples cúbits de manera coordinada.
3. Los dos paradigmas son: 1) **Modelo Basado en Compuertas**, un enfoque universal para ejecutar cualquier algoritmo cuántico, y 2) **Recocido Cuántico**, un modelo especializado diseñado para resolver problemas de optimización.
4. La decoherencia es la pérdida de las propiedades cuánticas de un cúbit (como la superposición) debido a su interacción con el entorno (ruido). Es el mayor obstáculo porque destruye la información cuántica necesaria para realizar los cálculos antes de que puedan completarse.

5. NISQ significa "Noisy Intermediate-Scale Quantum" (Cuántica a Escala Intermedia y Ruidosa). Se caracteriza por tener un número intermedio de cúbits (50-1000s) que son propensos a errores significativos (ruido) y carecen de corrección de errores a gran escala.
6. El algoritmo de Shor puede factorizar números enteros grandes de manera exponencialmente más rápida que los algoritmos clásicos. Esto le permite romper los sistemas de criptografía de clave pública, como RSA, que basan su seguridad en la dificultad de la factorización.
7. Un código de superficie es un tipo de código de Corrección de Errores Cuánticos (QEC) que distribuye la información de un cúbit lógico en una red bidimensional de cúbits físicos. Pertenece a la categoría de códigos topológicos y es considerado el candidato más prometedor para la computación cuántica tolerante a fallos.
8. Tres tecnologías físicas para construir cúbits son: circuitos superconductores, iones atrapados y fotones. (Otras respuestas válidas incluyen puntos cuánticos y átomos neutros).
9. La "supremacía cuántica" es una demostración de que una computadora cuántica puede resolver un problema (incluso uno sin aplicación práctica) que una computadora clásica no puede. La "ventaja cuántica" es el objetivo final, donde una computadora cuántica resuelve un problema práctico del mundo real de manera mejor, más rápida o más barata que cualquier método clásico.
10. Qiskit es un kit de desarrollo de software (SDK) de código abierto para trabajar con computadoras cuánticas. Es desarrollado por IBM.

2.4 Preguntas de Ensayo

1. Analiza y compara los desafíos técnicos (decoherencia, escalabilidad, corrección de errores) asociados con la construcción de computadoras cuánticas basadas en circuitos superconductores frente a las basadas en iones atrapados.
2. Discute el impacto de doble filo de la computación cuántica en la ciberseguridad global, evaluando tanto la amenaza de romper la criptografía existente como el potencial de las soluciones de Criptografía Cuántica (QKD) y Post-Cuántica (PQC).
3. Evalúa críticamente la afirmación de que "las computadoras cuánticas reemplazarán a las computadoras clásicas". Argumenta por qué un modelo de "supercomputación centrada en lo cuántico" es un resultado más probable para el futuro previsible.
4. Explica cómo los principios de superposición, entrelazamiento e interferencia se combinan en un algoritmo cuántico para resolver un problema de manera más eficiente que un enfoque clásico. Utiliza la analogía del laberinto mencionada en el informe para ilustrar tu explicación.
5. Describe la evolución de la Corrección de Errores Cuánticos (QEC), desde los primeros códigos como el de Shor hasta los enfoques más prometedores como los códigos topológicos (ej. códigos de superficie), y explica por qué la QEC es indispensable para lograr una computación cuántica tolerante a fallos.

2.5 Glosario de Términos Clave

- **Bit:** La unidad básica de información en la computación clásica, que puede tener un valor de 0 o 1.
- **Cúbit (Qubit):** La unidad básica de información en la computación cuántica. Puede existir en un estado de 0, 1 o una superposición de ambos.
- **Superposición:** El principio cuántico que permite a un cúbit estar en una combinación de múltiples estados (0 y 1) al mismo tiempo.
- **Entrelazamiento (Entanglement):** Una profunda correlación entre dos o más cúbits, donde el estado de uno está intrínsecamente ligado al de los otros, independientemente de la distancia.
- **Interferencia:** El mecanismo por el cual los algoritmos cuánticos amplifican las probabilidades de los resultados correctos y cancelan las de los incorrectos.
- **Medición:** El proceso de observar un cúbit, lo que hace que su estado de superposición colapse a un estado clásico definido (0 o 1).
- **Decoherencia:** La pérdida de las propiedades cuánticas de un cúbit debido a la interacción no deseada con su entorno (ruido), lo que provoca errores en el cómputo.
- **Computación Basada en Compuertas (Gate-Based):** Un modelo de computación cuántica universal que utiliza operaciones discretas (compuertas cuánticas) para manipular cúbits, de forma análoga a los circuitos lógicos clásicos.
- **Recocido Cuántico (Quantum Annealing):** Un paradigma de computación cuántica especializado en resolver problemas de optimización, utilizando la tendencia natural de los sistemas cuánticos a encontrar su estado de mínima energía.
- **Corrección de Errores Cuánticos (QEC):** Un conjunto de técnicas diseñadas para detectar y corregir los errores que ocurren en los cúbits debido a la decoherencia y otras fuentes de ruido.
- **NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum):** La era actual de la computación cuántica, caracterizada por procesadores con un número intermedio de cúbits que son propensos a errores (ruidosos).
- **Supremacía Cuántica:** Una demostración experimental de que una computadora cuántica puede resolver un problema que es intratable para las computadoras clásicas, aunque el problema no tenga una aplicación práctica.
- **Ventaja Cuántica:** El objetivo final de la computación cuántica, donde una máquina cuántica resuelve un problema práctico del mundo real de manera más eficiente, rápida o barata que cualquier método clásico.
- **Utilidad Cuántica:** El punto en el que una computadora cuántica ofrece soluciones fiables a problemas que están más allá del alcance de la simulación clásica de fuerza bruta y compite con los mejores métodos de aproximación clásicos conocidos.
- **Algoritmo de Shor:** Un algoritmo cuántico para la factorización de enteros, que amenaza la criptografía de clave pública actual.

- **Algoritmo de Grover:** Un algoritmo cuántico que proporciona una aceleración cuadrática para la búsqueda en bases de datos no estructuradas.
- **Criptografía Post-Cuántica (PQC):** Algoritmos criptográficos diseñados para ejecutarse en computadoras clásicas que son resistentes a los ataques de futuras computadoras cuánticas.
- **Distribución de Claves Cuánticas (QKD):** Un método de comunicación segura que utiliza los principios de la mecánica cuántica para distribuir claves de cifrado de una manera que cualquier intento de espionaje es detectable.
- **Qiskit:** Un kit de desarrollo de software (SDK) de código abierto, desarrollado por IBM, para programar computadoras cuánticas.
- **Código de Superficie (Surface Code):** Un tipo de código de corrección de errores cuánticos topológico que es un candidato principal para construir computadoras cuánticas tolerantes a fallos.
- **Código Tó-rico (Toric Code):** Uno de los primeros y más importantes códigos topológicos, definido en una red bidimensional con condiciones de contorno periódicas (un toro).

Esta guía de estudio proporciona los recursos necesarios para consolidar los conceptos clave y evaluar la comprensión del vasto y emocionante campo de la computación cuántica.

Capítulo 3: Preguntas Frecuentes (FAQs)

3.1 Introducción a las Preguntas Frecuentes

Esta sección aborda las diez preguntas más importantes y comunes sobre la computación cuántica. El objetivo es proporcionar respuestas claras, directas y accesibles, basadas en la evidencia y el consenso de las fuentes analizadas, para desmitificar conceptos complejos y ofrecer una perspectiva realista sobre el estado actual y futuro de esta tecnología transformadora.

3.2 Listado de Preguntas y Respuestas

1. **¿Cuál es la diferencia real entre un bit y un cúbit?**
2. La diferencia fundamental radica en cómo almacenan y procesan la información. Un bit clásico es un interruptor: solo puede estar en un estado a la vez, ya sea 0 (apagado) o 1 (encendido). Toda la computación clásica se basa en manipular secuencias de estos estados definidos.
3. Un cúbit, en cambio, opera bajo las reglas de la mecánica cuántica. Gracias al principio de **superposición**, un cúbit puede ser 0, 1, o una combinación de ambos al mismo tiempo. Piense en ello no como un interruptor, sino como un dial que puede apuntar a cualquier punto en la superficie de una esfera. Esta capacidad de existir en múltiples estados a la vez permite que un sistema de n cúbits explore 2^n posibilidades simultáneamente, otorgando a las computadoras cuánticas un espacio computacional exponencialmente más grande que el de las clásicas.
4. **¿Qué hace que las computadoras cuánticas sean potencialmente tan poderosas?**

5. Su poder no proviene de ser simplemente "más rápidas" en todo, sino de su capacidad para abordar problemas de una manera fundamentalmente diferente. La fuente de su poder se basa en tres principios cuánticos clave que trabajan en conjunto: la **superposición**, el **entrelazamiento** y la **interferencia**.

6. La superposición permite a los cúbits procesar una vasta cantidad de posibilidades en paralelo. El entrelazamiento crea correlaciones complejas entre cúbits, permitiendo que el sistema maneje problemas con interacciones intrincadas entre muchas variables. Finalmente, la interferencia actúa como el "motor" del algoritmo, amplificando las rutas computacionales que llevan a la respuesta correcta y cancelando las incorrectas. Esta combinación les permite encontrar soluciones a ciertos tipos de problemas —especialmente en simulación, optimización y factorización— que son computacionalmente inviables para cualquier computadora clásica.

7. **¿Cuáles son los mayores desafíos que impiden la adopción generalizada de la computación cuántica hoy en día?**

8. El mayor desafío es la extrema fragilidad de los cúbits, un problema conocido como **decoherencia**. Los cúbits pierden su estado cuántico debido a la más mínima interacción con su entorno (ruido), como fluctuaciones de temperatura o interferencia electromagnética. Esto introduce altas tasas de error en los cálculos, haciendo que los resultados no sean fiables.

9. Para combatir esto, se necesita la **Corrección de Errores Cuánticos (QEC)**, que es inmensamente compleja y requiere una gran cantidad de cúbits físicos para codificar un único cúbit lógico y protegido. Otros desafíos significativos incluyen la **escalabilidad** (construir sistemas con un gran número de cúbits de alta calidad y bien conectados) y la complejidad del **control y la calibración** de los cúbits, que requiere una precisión extrema. Superar estos obstáculos es el foco principal de la investigación actual.

10. **¿Las computadoras cuánticas reemplazarán a las computadoras que usamos todos los días?**

11. No, es muy poco probable. Las computadoras cuánticas no están diseñadas para reemplazar a las computadoras clásicas. Piense en ellas como procesadores especializados, similares a las GPU que se utilizan para gráficos. Las computadoras clásicas son extremadamente eficientes en la mayoría de las tareas cotidianas, como navegar por internet, procesar textos o ejecutar software empresarial.

12. El futuro más probable es un modelo de **supercomputación centrada en lo cuántico**, un sistema híbrido donde las computadoras cuánticas y las clásicas trabajan juntas. Las partes de un problema que son intratables para una máquina clásica se enviarán a una Unidad de Procesamiento Cuántico (QPU), mientras que el resto del cálculo se manejará con CPU y GPU tradicionales. Su PC o smartphone seguirá siendo un dispositivo clásico.

13. **¿Qué es el Recocido Cuántico y cómo se diferencia de una computadora cuántica "universal"?**

14. El **Recocido Cuántico** es un tipo especializado de computación cuántica diseñado específicamente para resolver problemas de optimización. Funciona guiando un sistema de cúbits para que evolucione de forma natural hacia su estado de energía más bajo, que

corresponde a la solución óptima del problema. Es como soltar una canica en un paisaje montañoso y dejar que la gravedad la guíe hacia el valle más profundo. Empresas como D-Wave se especializan en este enfoque.

15. Una computadora cuántica **universal** (o basada en compuertas) es mucho más general. Utiliza secuencias de operaciones lógicas llamadas "compuertas cuánticas" para manipular los cúbits y puede, en teoría, ejecutar cualquier algoritmo cuántico (como los de Shor y Grover). Es análoga a una CPU clásica, que puede ser programada para realizar cualquier tarea. En resumen, el recocido cuántico es una herramienta especializada para un tipo de problema, mientras que una computadora cuántica universal es una máquina programable de propósito general.

16. **¿Cómo amenaza exactamente la computación cuántica a la ciberseguridad actual?**

17. La amenaza se centra en la criptografía de clave pública, el pilar de la seguridad en internet (HTTPS, transacciones bancarias, etc.). La seguridad de sistemas como RSA se basa en la dificultad computacional de factorizar números enteros muy grandes. Para una computadora clásica, esta tarea llevaría miles de años.

18. Sin embargo, en 1994, Peter Shor desarrolló un algoritmo cuántico que puede factorizar estos números de manera exponencialmente más rápida. Una computadora cuántica a gran escala y tolerante a fallos podría ejecutar el algoritmo de Shor y romper la criptografía actual, dejando expuestas las comunicaciones y los datos cifrados. Esto ha impulsado la investigación en **Criptografía Post-Cuántica (PQC)**, que busca desarrollar nuevos estándares de cifrado resistentes a los ataques cuánticos.

19. **¿Qué significa que estamos en la era "NISQ" de la computación cuántica?**

20. **NISQ** es el acrónimo de "Noisy Intermediate-Scale Quantum" (Cuántica a Escala Intermedia y Ruidosa). Describe el estado actual de la tecnología de hardware cuántico. "Escala Intermedia" se refiere a que los procesadores tienen entre 50 y unos pocos miles de cúbits, no los millones que se necesitarían para una computación tolerante a fallos a gran escala.

21. "Ruidosa" es la característica más importante: significa que estos cúbits son muy propensos a errores debido a la **decoherencia** y a un control imperfecto. Los cálculos en las máquinas NISQ son inherentemente imprecisos y los algoritmos deben diseñarse para ser robustos frente a este ruido. La era NISQ es una fase de desarrollo crucial, donde se exploran las capacidades de hardware imperfecto mientras se trabaja para construir sistemas futuros tolerantes a fallos.

22. **¿Cuáles son los principales tipos de cúbits físicos que se están desarrollando y cuáles son sus pros y contras?**

23. Existen varias tecnologías compitiendo, cada una con sus propias ventajas y desventajas:

    - **Circuitos Superconductores:** Usados por IBM y Google. **Pros:** Son rápidos en la ejecución de compuertas. **Contras:** Requieren temperaturas extremadamente frías (cercanas al cero absoluto) y tienen tiempos de coherencia más cortos.

- **Iones Atrapados:** Usados por empresas como IonQ. **Pros:** Tienen tiempos de coherencia muy largos y alta fidelidad en las operaciones. **Contras:** Son mucho más lentos para ejecutar compuertas en comparación con los superconductores.
- **Fotones:** Cúbits basados en partículas de luz. **Pros:** Son resistentes al ruido ambiental y excelentes para la comunicación cuántica. **Contras:** Es difícil generar y controlar fotones de manera fiable, y crear interacciones entre ellos (compuertas de dos cúbits) es un desafío.
- **Otros enfoques** incluyen **puntos cuánticos** y **átomos neutros**, que también ofrecen diferentes equilibrios entre escalabilidad, coherencia y velocidad de operación.

24. **¿Es real la amenaza existencial de una IA superinteligente impulsada por computadoras cuánticas, como en las películas?**
25. Según los expertos que trabajan en estos campos, la idea de una IA aniquiladora al estilo "Terminator" impulsada por computadoras cuánticas es, por ahora, un concepto muy remoto y más propio de la ciencia ficción. La inteligencia artificial actual, aunque potente en tareas específicas, todavía se encuentra en una etapa preliminar en lo que respecta a la inteligencia general y la autoconciencia.
26. Aunque teóricamente una computadora cuántica podría acelerar ciertos algoritmos de IA, el consenso es que el peligro más real e inmediato de la IA no es la aniquilación de la humanidad, sino la **automatización de empleos** y sus consecuencias sociales y económicas. La computación cuántica no se considera un factor de riesgo existencial en el futuro previsible; el enfoque de la comunidad científica está en resolver los desafíos de ingeniería mucho más fundamentales para hacer que estas máquinas sean simplemente fiables.
27. **¿Qué es la "Corrección de Errores Cuánticos" y por qué es tan crucial?**
28. La **Corrección de Errores Cuánticos (QEC)** es un conjunto de técnicas diseñadas para proteger la información cuántica del ruido y la decoherencia. Dado que los cúbits son inherentemente frágiles y los errores son inevitables, la QEC es absolutamente esencial para construir una computadora cuántica a gran escala y tolerante a fallos.
29. A diferencia de la corrección de errores clásica, donde simplemente se pueden hacer copias de los bits, el **teorema de no clonación** prohíbe copiar un estado cuántico desconocido. Por lo tanto, la QEC funciona de una manera más sutil: codifica la información de un único cúbit "lógico" (el que realiza el cálculo) en el estado entrelazado de muchos cúbits "físicos". Al realizar mediciones de paridad en estos cúbits físicos sin perturbar el estado lógico, se pueden detectar y corregir errores (como bit-flips o phase-flips). Sin la QEC, los errores se acumularían rápidamente, haciendo que cualquier cálculo largo sea inútil.

Esta sección ha abordado algunas de las preguntas más comunes, proporcionando una base sólida para comprender el estado actual de la computación cuántica.

Capítulo 4: Cronología del Desarrollo Clave

4.1 Introducción a la Cronología

Esta sección presenta una cronología de hitos significativos en el desarrollo de la computación cuántica. Se pone un énfasis especial en la evolución de los Códigos de Corrección de Errores Cuánticos (QEC), ya que representan una línea de investigación fundamental y paralela al desarrollo del hardware. La invención y refinamiento de estos códigos son tan cruciales como la construcción de los propios cúbits para el futuro de la computación cuántica tolerante a fallos.

4.2 Hitos en la Computación y Corrección de Errores Cuánticos

- **1982:** El físico Richard Feynman propone la idea de un "simulador cuántico", una máquina que utiliza los principios de la mecánica cuántica para simular sistemas cuánticos, sentando las bases conceptuales de la computación cuántica.
- **1994:** Peter Shor desarrolla su revolucionario algoritmo de factorización, demostrando que una computadora cuántica podría romper la criptografía de clave pública moderna.
- **1995:** Peter Shor propone el primer código de corrección de errores cuánticos, conocido como el "Código de Shor" de 9 cúbits.
- **1996:** Andrew Steane desarrolla el "Código de Steane" de 7 cúbits. En el mismo año, Lov Grover presenta su algoritmo de búsqueda cuántica, que ofrece una aceleración cuadrática.
- **1997:** Alexei Kitaev introduce los "Códigos Topológicos", una nueva y poderosa familia de QEC basada en propiedades globales de una estructura.
- **2002:** Daniel Gottesman propone el "Código de Superficie", un código topológico 2D que se convierte en el candidato más prometedor para construir computadoras cuánticas tolerantes a fallos.
- **2006:** Se proponen los "Códigos Bacon-Shor", un tipo de código de subsistema, y los "Códigos de Color 3D", una generalización de los códigos de superficie.
- **2009:** Se desarrollan los "Códigos de producto de hipergrafos".
- **2013:** Se introduce el "Gráfico de producto homológico".
- **2019:** Google AI anuncia haber alcanzado la "supremacía cuántica" con su procesador Sycamore.
- **2020:** Se proponen los "Códigos de cúbit de bandera" (Flag-qubit codes), que utilizan cúbits adicionales para mejorar la detección de errores en grafos de bajo grado.
- **2023:** IBM anuncia la demostración de la "utilidad cuántica", resolviendo problemas científicos más allá de la simulación clásica de fuerza bruta.

Esta cronología no solo destaca los hitos en hardware, sino que revela una narrativa paralela y esencial: la coevolución de la teoría de corrección de errores, indispensable para superar la era NISQ y materializar el potencial de los algoritmos de Shor y Grover.

Capítulo 5: Listado de Fuentes Científicas

5.1 Introducción al Listado de Fuentes

Esta sección consolida las referencias académicas citadas en los documentos fuente. Proporciona una bibliografía completa que sirve como punto de partida para una exploración más profunda de los temas tratados en este informe, abarcando desde los fundamentos teóricos hasta las implementaciones experimentales y los desafíos actuales en la computación cuántica.

5.2 Bibliografía Consolidada

- Aharonov, D., Van Dam, W., Kempe, J., Landau, Z., Lloyd, S., & Regev, O. (2007). Adiabatic Quantum Computation Is Equivalent To Standard Quantum Computation. *SIAM Journal On Computing, 37*, 166-194.
- Albash, T., & Lidar, D. A. (2018). Adiabatic quantum computation. *Reviews of Modern Physics, 90*(1), 015002.
- Albash, T., Et Al. (2015). Dynamics Of A Quantum Phase Transition. *Physical Review A, 92*, 042321.
- Albash, T., Lidar, D. A., Martonosi, M., & Roetteler, M. (2018). Demonstrating The Robustness Of A Hybrid Quantum Annealer. *Physical Review X, 8*, 031016.
- Albash, T., Lidar, D. A., Martoňák, R., & Zanardi, P. (2018). Colloquium: Quantum Annealing And Analog Quantum Computation. *Reviews Of Modern Physics, 90*, 021001.
- Albash, T., Martin-mayor, V., Hen, I., & Troyer, M. (2018). Temperature Scaling Of The Quantum Annealing Performance. *Physical Review A, 98*, 022313.
- Aliferis, P., Gottesman, D., and Preskill, J. (2005). Quantum accuracy threshold for concatenated distance-3 codes. *arXiv preprint quant-ph/0504218*.
- Amin, M. H., Andriyash, E., Rolfe, J., Kulczycki, B., & Melko, R. (2015). Quantum Boltzmann Machines. *Physical Review X, 5*, 031011.
- Amin, M. H., Love, P. J., & Truncik, C. J. S. (2009). Thermally Assisted Adiabatic Quantum Computation. *Physical Review Letters, 103*, 260503.
- Amin, M. H. S., Love, P. J., & Truncik, C. J. S. (2009). Dynamical Suppression Of Decoherence In Two-state Quantum Systems. *Physical Review Letters, 103*, 260503.
- Aramon, M., Rosenberg, G., Valiante, E., Miyazawa, T., Tamura, H., & Katzgraber, H. G. (2019). Physics-inspired optimization for quadratic unconstrained problems using a digital annealer. *Frontiers in Physics, 7*.
- Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., ... & Brandao, F. G. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature, 574*(7779), 505-510.
- Arute, F., Et Al. (2020). Quantum Approximate Optimization Of The Maxcut Problem On A Superconducting Qubit Processor. *Nature Physics, 16*, 1043–1048.
- Aspuru-Guzik, A., Dutoi, A. D., Love, P. J., & Head-Gordon, M. (2005). Simulated quantum computation of molecular energies. *Science, 309*(5741), 1704–1707.

- Avižienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B., & Landwehr, C. (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, *1*(1), 11-33.
- Bacon, D. (2006). Operator quantum error-correcting subsystems for self-correcting quantum memories. *Physical Review A, 73*(1), 012340.
- Bapst, V., Foini, L., Krzakala, F., Zdeborová, L., & Mézard, M. (2013). The Quantum Adiabatic Algorithm Applied To Random Optimization Problems: A Quantitative Study. *Physical Review X, 3*, 041008.
- Barak, B., Chou, C.-N., Goldenberg, L., & Servedio, R. A. (2020). Certified Randomness From A Two-state System. *Nature Physics, 16*, 281–286.
- Bennett, C. H., & Divincenzo, D. P. (2000). Quantum Information And Computation. *Nature, 406*, 247-255.
- Bergholm, V., Izaac, J., Schuld, M., Gogolin, C., Ahmed, S., Ajith, V., ... & Alam, M. S. (2018). Pennylane: Automatic differentiation of hybrid quantum-classical computations. *arXiv preprint arXiv:1811.04968*.
- Bernstein, D. J., & Lange, T. (2017). Post-quantum cryptography. *Nature, 549*(7671), 188-194.
- Biamonte, J. D., & Love, P. J. (2008). Realizable Hamiltonians For Universal Adiabatic Quantum Computation. *Physical Review A, 78*, 012352.
- Biamonte, J. D., Bergholm, V., & Whitfield, J. D. (2011). Adiabatic Quantum Simulation Of Quantum Field Theory In One Dimension. *Physical Review Letters, 106*, 150501.
- Biamonte, J., Bergholm, V., & Whitfield, J. D. (2008). Quantum Simulation Of Quantum Field Theory Using Continuous-variable Cluster States. *Physical Review A, 78*, 022303.
- Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Bromley, T. R., Cenci, M., & O'brien, J. L. (2017). Quantum Machine Learning. *Nature, 549*, 195–202.
- Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, P., Rebentrost, P., Wiebe, N., & Lloyd, S. (2017). Quantum machine learning. *Nature, 549*(7671), 195-202.
- Biswas, S., & Das, P. (2023). Analysis of quantum cryptology and the RSA algorithms defense against attacks using shor's algorithm in a post quantum environment. In *International Conference on Computational Intelligence in Communications and Business Analytics* (pp. 72-87). Springer.
- Boixo, S., Et Al. (2016). Characterizing Quantum Supremacy In Near-term Devices. *Nature Physics, 12*, 1031-1037.
- Boixo, S., Et Al. (2016). Computational Multiqubit Tunnelling In Programmable Quantum Annealers. *Nature Physics, 12*, 1038-1044.
- Boixo, S., Isakov, S. V., Zlokovic, M., & Royer, J. (2018). Characterizing Quantum Supremacy In Near-term Devices. *Nature Physics, 14*, 595-600.

- Bombin, H., & Martin-Delgado, M. A. (2006). Topological quantum distillation. *Physical review letters*, *97*(18), 180501.
- Bombin, H., & Martin-Delgado, M.-A. (2007). Topological computation without braiding. *Physical review letters, 98*(16), 160502.
- Bose, R. C., & Ray-Chaudhuri, D. K. (1960). On a class of error correcting binary group codes. *Information and control, 3*(1), 68–79.
- Bova, F., Goldfarb, A., & Melko, R. G. (2021). Commercial applications of quantum computing. *EPJ quantum technology, 8*(1), 2.
- Brandl, M., Van Mourik, M., Postler, L., Nolf, A., Lakhmanskiy, K., Paiva, R., ... & Daniilidis, N. (2016). Cryogenic setup for trapped ion quantum computing. *Review of Scientific Instruments*, *87*(11), 113103.
- Bravyi, S. B., & Kitaev, A. Y. (1998). Quantum codes on a lattice with boundary. *arXiv preprint quant-ph/9811052*.
- Bravyi, S., Hastings, M. B., & Verstraete, F. (2006). Lieb-robinson bounds and the generation of correlations and topological quantum order. *Physical review letters*, *97*(5), 050401.
- Breuer, H. P., & Petruccione, F. (2002). *The Theory Of Open Quantum Systems*. Oxford University Press.
- Browne, D. (n.d.). Lectures on topological codes and quantum computation. [Online]. Available: https://sites.google.com/site/danbrowneucl/teaching/lectures-on-topological-codes-and-quantum-computation
- Browne, D., & Briegel, H. (2016). One-way quantum computation. In *Quantum information: From foundations to quantum technology applications* (pp. 449-473).
- Bruzewicz, C. D., Chiaverini, J., McConnell, R., & Sage, J. M. (2019). Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges. *Applied Physics Reviews*, *6*(2), 021314.
- Bukov, M., Day, A. R. R., Sels, D., Weinberg, P., Polkovnikov, A., & Mehta, P. (2018). Reinforcement Learning For Optimization Of Quantum Control Pulses. *Physical Review X*, *8*, 031086.
- Cacciapuoti, A. S., Caleffi, M., Tafuri, F., Cataliotti, F. S., Gherardini, S., & Bianchi, G. (2019). Quantum internet: Networking challenges in distributed quantum computing. *IEEE Network*, *34*(1), 137-143.
- Calderbank, A. R., & Shor, P. W. (1996). Good quantum error-correcting codes exist. *Physical Review A*, *54*(2), 1098.
- Cao, Y., Romero, J., Olson, J. P., Degroote, M., Johnson, P. D., Kieferová, M., ... & Aspuru-Guzik, A. (2019). Quantum chemistry in the age of quantum computing. *Chemical reviews*, *119*(19), 10856–10915.
- Cerezo, M., Arrasmith, A., Babbush, R., Benjamin, S. C., Endo, S., Fujii, K., ... & Cincio, L. (2021). Variational quantum algorithms. *Nature Reviews Physics*, *3*(9), 625-644.

- Chamberland, C., Et Al. (2020). Experimental Demonstration Of A Surface Code On A Superconducting Qubit Array. *Physical Review X, 10*, 041064.
- Chamberland, C., Zhu, G., Yoder, T. J., Hertzberg, J. B., & Cross, A. W. (2020). Topological and subsystem codes on low-degree graphs with flag qubits. *Physical Review X, 10*(1), 011022.
- Childs, A. M., Farhi, E., Goldstone, J., & Gutmann, S. (2013). Robustness Of Adiabatic Quantum Computation. *Physical Review A, 87*, 022339.
- Chow, J. M., Gambetta, J. M., Corcoles, A. D., Merkel, S. T., Smolin, J. A., Rigetti, C., ... & Ketchen, M. B. (2012). Universal quantum gate set approaching fault-tolerant thresholds with superconducting qubits. *Physical review letters, 109*(6), 060501.
- Clarke, J., & Wilhelm, F. K. (2008). Superconducting Quantum Bits. *Nature, 453*, 1031-1042.
- Córcoles, A. D., Kandala, A., Javadi-Abhari, A., McClure, D. T., Cross, A. W., Temme, K., ... & Gambetta, J. M. (2019). Challenges and opportunities of near-term quantum computing systems. *Proceedings of the IEEE, 108*(8), 1338-1352.
- Cross, A. (2018). The ibm q experience and qiskit open-source quantum computing software. In *APS March meeting abstracts* (Vol. 2018, pp. L58-003).
- Daley, A. J., Bloch, I., Kokail, C., Flannigan, S., Pearson, N., Troyer, M., & Zoller, P. (2022). Practical quantum advantage in quantum simulation. *Nature, 607*(7920), 667-676.
- D-wave Systems Inc. (n.d.). D-wave 2000Q Quantum Annealer.
- D-wave Systems Inc. (n.d.). D-wave Quantum Annealer Architecture.
- De Leon, N. P., Itoh, K. M., Kim, D., Mehta, K. K., Northup, T. E., Paik, H., ... & Steuerman, D. W. (2021). Materials challenges and opportunities for quantum computing hardware. *Science, 372*(6539), eabb2823.
- De Stefano, M., Pecorelli, F., Di Nucci, D., Palomba, F., & De Lucia, A. (2022). Software engineering for quantum programming: How far are we?. *Journal of Systems and Software, 190*, 111326.
- Debnath, S., Linke, N. M., Figgatt, C., Landsman, K. A., Wright, K., & Monroe, C. (2016). Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits. *Nature, 536*(7614), 63–66.
- Dennis, E., Kitaev, A., Landahl, A., & Preskill, J. (2002). Topological quantum memory. *Journal of Mathematical Physics, 43*(9), 4452–4505.
- Devitt, S. J., Munro, W. J., & Nemoto, K. (2013). Quantum error correction for beginners. *Reports on Progress in Physics, 76*(7), 076001.
- Devoret, M. H., & Schoelkopf, R. J. (2013). Superconducting Circuits For Quantum Information: An Outlook. *Science, 339*, 1169-1174.

- Dickson, N. G., Amin, M. H. S., Blanchard, L., Dumoulin, E., & Laforest, M. (2013). Thermally Assisted Quantum Annealing Of A 16-qubit Superconducting Circuit. *Nature Communications, 4*, 1-7.
- Dickson, N. G., Amin, M. H., & Bergeron, D. (2013). Thermally Assisted Quantum Annealing: A Correction To The Quantum Annealing Process. *Physical Review Letters, 111*, 100502.
- Ding, C., Bao, T.-Y., & Huang, H.-L. (2021). Quantum-inspired support vector machine. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 33*(12), 7210-7222.
- DiVincenzo, D. P. (2000). The Physical Implementation Of Quantum Computation. *Fortschritte Der Physik, 48*(9-11), 771-783.
- DiVincenzo, D. P., & Aliferis, P. (2007). Effective fault-tolerant quantum computation with slow measurements. *Physical review letters, 98*(2), 020501.
- Du, W., Li, B., & Tian, Y. (2008). Quantum annealing algorithms: State of the art. *Jisuanji Yanjiu yu Fazhan/Computer Research and Development, 45*(9), 1501-1508.
- Edmonds, J. (1965). Paths, trees, and flowers. *Canadian Journal of mathematics, 17*, 449–467.
- Endo, S., Cai, Z., Benjamin, S. C., & Yuan, X. (2021). Hybrid quantum-classical algorithms and quantum error mitigation. *Journal of the Physical Society of Japan, 90*(3), 032001.
- Farhi, E., Et Al. (2015). Quantum Adiabatic Algorithms And Large Spin Tunneling. *Physical Review A, 90*, 032315.
- Farhi, E., Goldstone, J., & Gutmann, S. (2011). A Quantum Approximate Optimization Algorithm. *Arxiv Preprint Arxiv:1106.3765*.
- Farhi, E., Goldstone, J., & Gutmann, S. (2014). A quantum approximate optimization algorithm. *arXiv preprint arXiv:1411.4028*.
- Farhi, E., Goldstone, J., Gutmann, S., Lapan, J., Lundgren, A., & Preda, D. (2001). A Quantum Adiabatic Evolution Algorithm Applied To Random Instances Of An Np-complete Problem. *Science, 292*, 472-476.
- Freedman, M. H., & Meyer, D. A. (2001). Projective plane and planar quantum codes. *Foundations of Computational Mathematics, 1*, 325–332.
- Gaitan, F. (2008). *Quantum error correction and fault tolerant quantum computing*. CRC Press.
- García, C. R., Rommel, S., Takarabt, S., Olmos, J. J. V., Guilley, S., Nguyen, P., & Monroy, I. T. (2024). Quantum-resistant transport layer security. *Computer Communications, 213*, 345-358.
- Gidney, C. (2021). Stim: a fast stabilizer circuit simulator. *Quantum, 5*, 497.
- Gill, S. S. (2021). Quantum and blockchain based serverless edge computing: A vision, model, new trends and future directions. *Internet Technology Letters*, e275.

- Gill, S. S., Kumar, A., Singh, H., Singh, M., Kaur, K., Usman, M., & Buyya, R. (2022). Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions. *Software: Practice and Experience, 52*(1), 66-114.
- Gill, S. S., Wu, H., Patros, P., Ottaviani, C., Arora, P., Pujol, V. C., ... & Uhlig, S. (2024). Modern computing: Vision and challenges. *Telematics and Informatics Reports, 13*, 1-38.
- Gill, S. S., Xu, M., Ottaviani, C., Patros, P., Bahsoon, R., Shaghaghi, A., ... & Abraham, A. (2022). Ai for next generation computing: Emerging trends and future directions. *Internet of Things, 19*, 100514.
- Gottesman, D. (1996). Class Of Quantum Error-correcting Codes Saturating The Quantum Hamming Bound. *Physical Review A, 54*, 1862-1865.
- Gottesman, D. (1997). *Stabilizer codes and quantum error correction*. California Institute of Technology.
- Gottesman, D. (1997). Stabilizer Codes And Quantum Error Correction. *Physical Review A, 56*, 322-327.
- Gottesman, D. (2009). An Introduction To Quantum Error Correction And Fault-tolerant Quantum Computation. In *Quantum Information Science and Its Contributions to Mathematics, Proceedings of Symposia in Applied Mathematics* (Vol. 68, pp. 13-58).
- Greenberger, D. M., Horne, M. A., & Zeilinger, A. (1989). Going beyond bell's theorem. In *Bell's theorem, quantum theory and conceptions of the universe* (pp. 69–72).
- Grover, L. K. (1996). A Fast Quantum Mechanical Algorithm For Database Search. *Proceedings Of The 28th Annual ACM Symposium On Theory Of Computing*, 212-219.
- Haah, J. (2011). Local stabilizer codes in three dimensions without string logical operators. *Physical Review A, 83*(4), 042330.
- Hamming, R. W. (1950). Error detecting and error correcting codes. *The Bell system technical journal, 29*(2), 147–160.
- Harris, R., Johansson, J., Berkley, A. J., Johnson, M. W., Lanting, T. M., & Bunyk, P. (2010). Experimental Demonstration Of A Robust And Scalable Flux Qubit. *Physical Review B, 81*, 134504.
- Heim, B., Soeken, M., Marshall, S., Granade, C., Roetteler, M., Geller, A., ... & Svore, K. (2020). Quantum programming languages. *Nature Reviews Physics, 2*(12), 709-722.
- Hendrickx, N., Lawrie, W., Petit, L., Sammak, A., Scappucci, G., & Veldhorst, M. (2020). A single-hole spin qubit. *Nature communications, 11*(1), 3478.
- Hey, T. (1999). Richard Feynman and computation. *Contemporary Physics, 40*(4), 257-265.
- Higgott, O., Wilson, M., Hefford, J., Dborin, J., Hanif, F., Burton, S., & Browne, D. E. (2021). Optimal local unitary encoding circuits for the surface code. *Quantum, 5*, 517.

- Howard, J., Lidiak, A., Jameson, C., Basyildiz, B., Clark, K., Zhao, T., ... & Singh, M. (2023). Implementing two-qubit gates at the quantum speed limit. *Physical Review Research*, *5*(4), 043194.
- Illiano, J., Caleffi, M., Manzalini, A., & Cacciapuoti, A. S. (2022). Quantum internet protocol stack: A comprehensive survey. *Computer Networks, 213*, 109092.
- Johnson, M. W., Amin, M. H. S., Gildert, S., Lanting, T., Hamzehei, F., & Bunyk, P. (2011). Quantum Annealing With Manufactured Spins. *Nature, 473*, 194-198.
- Jordan, S. P., Et Al. (2006). Error Correction For Gate-based Quantum Computing With Non-abelian Anyons. *Quantum Information And Computation, 6*, 251-264.
- Jordan, S. P., Farhi, E., & Shor, P. W. (2006). Error-correcting Codes For Adiabatic Quantum Computation. *Physical Review A, 74*, 052322.
- Jordan, S. P., Lee, K. S., & Preskill, J. (2012). Quantum Algorithms For Quantum Field Theories. *Science, 336*, 1130-1133.
- Kadowaki, T., & Nishimori, H. (1998). Quantum Annealing In The Transverse Ising Model. *Physical Review E, 58*, 5355-5363.
- Kandala, A., Mezzacapo, A., Temme, K., Takita, M., Brink, M., Chow, J. M., & Gambetta, J. M. (2017). Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets. *Nature*, *549*(7671), 242-246.
- Katzgraber, H. G., Hamze, F., Munoz-bauza, H., & Hoskinson, E. (2015). Glassy Phase Of Optimal Annealing. *Physical Review X, 5*, 031026.
- Kerckhoff, J., Nurdin, H. I., Pavlichin, D. S., & Mabuchi, H. (2010). Designing quantum memories with embedded control: photonic circuits for autonomous quantum error correction. *Physical Review Letters*, *105*(4), 040502.
- Kimmel, S., Low, G. H., & Yoder, T. J. (2015). Robust Calibration Of A Universal Quantum Gate Set Via Robust Phase Estimation. *Physical Review X, 5*, 021031.
- Kitaev, A. Y. (1997). Quantum computations: algorithms and error correction. *Russian Mathematical Surveys*, *52*(6), 1191.
- Kitaev, A. Y. (2003). Fault-tolerant quantum computation by anyons. *Annals of physics*, *303*(1), 2–30.
- Kolmogorov, V. (2009). Blossom v: a new implementation of a minimum cost perfect matching algorithm. *Mathematical Programming Computation*, *1*, 43–67.
- Kovalev, A. A., & Pryadko, L. P. (2013). Quantum kronecker sum-product low-density parity-check codes with finite rate. *Physical Review A, 88*(1), 012311.
- Krantz, P., Kjaergaard, M., Yan, F., Orlando, T. P., Gustavsson, S., & Oliver, W. D. (2019). A quantum engineer's guide to superconducting qubits. *Applied physics reviews*, *6*(2), 021318.
- Krenn, M., Landgraf, J., Foesel, T., & Marquardt, F. (2023). Artificial intelligence and machine learning for quantum technologies. *Physical Review A, 107*(1), 010101.

- Krinner, S., Lacroix, N., Remm, A., Di Paolo, A., Genois, E., Leroux, C., ... & Wallraff, A. (2022). Realizing repeated quantum error correction in a distance-three surface code. *Nature*, *605*(7911), 669–674.
- Kumar, A., et al. (2022). *Quantum and Blockchain for Modern Computing Systems: Vision and Advancements*. Springer.
- Kumar, A., et al. (2022). Securing the future internet of things with post-quantum cryptography. *Security and Privacy*, *5*(2), e200.
- Ladd, T. D., Jelezko, F., Laflamme, R., Nakamura, Y., Monroe, C., & O'Brien, J. L. (2010). Quantum computers. *nature*, *464*(7285), 45–53.
- Lanting, T., Et Al. (2014). Entanglement In A Quantum Annealer. *Physical Review X*, *4*, 021041.
- Li, Y., Tian, M., Liu, G., Peng, C., & Jiao, L. (2020). Quantum optimization and quantum learning: A survey. *Ieee Access*, *8*, 23568–23593.
- Lidar, D. A., & Brun, T. A. (2013). *Quantum error correction*. Cambridge university press.
- Lloyd, S. (1996). Universal Quantum Simulators. *Science, 273*, 1073-1078.
- MacKay, D. J., & Mac Kay, D. J. (2003). *Information theory, inference and learning algorithms*. Cambridge university press.
- Mafu, M., & Senekane, M. (2021). Design and implementation of efficient quantum support vector machine. In *2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)* (pp. 1-4). IEEE.
- Magesan, E., Gambetta, J. M., & Emerson, J. (2012). Robustness Of Quantum Gates In The Presence Of Noise. *Physical Review A, 85*, 042311.
- Mandrà, S., Zhu, Z., Wang, W., & Zeng, A. (2017). Exponentially Biased Ground-state Sampling Of Quantum Many-body Systems With Quantum Annealing. *Physical Review Letters, 119*, 100502.
- Martinis, J. M., Et Al. (2009). Rabi Oscillations In A Josephson-junction Qubit. *Physical Review Letters, 102*, 100502.
- Matsumoto, R., & Hagiwara, M. (2021). A survey of quantum error correction. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, *104*(12), 1654–1664.
- Mcgeoch, C. C., & Wang, G. (2013). Experimental Evaluation Of An Adiabatic Quantum Algorithm For Finding The Ground State Of A Spin Glass. *Physical Review A, 88*, 062314.
- Mermin, N. D. (2007). *Quantum Computer Science: An Introduction*. Cambridge University Press.

- Mikkelsen, M., Berezovsky, J., Stoltz, N., Coldren, L., & Awschalom, D. (2007). Optically detected coherent spin dynamics of a single electron in a quantum dot. *Nature Physics, 3*(11), 770-773.
- Morita, S., & Nishino, M. (2008). Mathematical Foundation Of Quantum Annealing. *Journal Of The Physical Society Of Japan, 77*, 104001.
- Mott, A., Et Al. (2017). Machine Learning For Error Correction In Quantum Annealing. *Science Advances, 3*, E1701812.
- Nadj-Perge, S., Frolov, S., Bakkers, E., & Kouwenhoven, L. P. (2010). Spin–orbit qubit in a semiconductor nanowire. *Nature, 468*(7327), 1084-1087.
- Nautrup, H. P., Delfosse, N., Dunjko, V., Briegel, H. J., & Friis, N. (2019). Optimizing quantum error correction codes with reinforcement learning. *Quantum, 3*, 215.
- Nayak, C., Simon, S. H., Stern, A., Freedman, M., & Sarma, S. D. (2008). Non-abelian Anyons And Topological Quantum Computation. *Reviews Of Modern Physics, 80*, 1083–1159.
- Neven, H., Denchev, V. S., Macready, W. G., & Drew-brook, M. (2009). Training A Large-scale Classifier With The Quantum Adiabatic Algorithm. *Arxiv Preprint Arxiv:0903.1931*.
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information*. Cambridge university press.
- O'Gorman, J., Nickerson, N. H., Ross, P., Morton, J. J., & Benjamin, S. C. (2016). A silicon-based surface code quantum computer. *npj Quantum Information, 2*(1), 1–14.
- Otterbach, J. S., Manenti, R., Alidoust, N., Bestwick, A., Block, M., Bloom, B., ... & Vainsencher, I. (2017). Quantum Control And Error Correction With Machine Learning. *Physical Review X, 7*, 041006.
- Paler, A., & Devitt, S. J. (2015). An introduction into fault-tolerant quantum computing. In *2015 52nd ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC)* (pp. 1-6).
- Pednault, E., Gunnels, J. A., Nannicini, G., Horesh, L., & Wisnieff, R. (2019). Leveraging secondary storage to simulate deep 54-qubit sycamore circuits. *arXiv preprint arXiv:1910.09534*.
- Peres, A. (1985). Reversible logic and quantum computers. *Physical review A, 32*(6), 3266.
- Pérez-Castillo, R., Serrano, M. A., & Piattini, M. (2021). Software modernization to embrace quantum technology. *Advances in Engineering Software, 151*, 102933.
- Peruzzo, A., McClean, J., Shadbolt, P., Yung, M.-H., Zhou, X.-Q., Love, P. J., ... & O'brien, J. L. (2014). A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor. *Nature communications, 5*(1), 4213.
- Piattini, M., Serrano, M., Perez-Castillo, R., Petersen, G., & Hevia, J. L. (2021). Toward a quantum software engineering. *IT Professional, 23*(1), 62-66.

- Pirandola, S., & Braunstein, S. L. (2016). Physics: Unite to build a quantum internet. *Nature*, *532*(7598), 169-171.
- Pittman, T., Jacobs, B., & Franson, J. (2005). Demonstration of quantum error correction using linear optics. *Physical Review A*, *71*(5), 052332.
- Preskill, J. (1998). Reliable Quantum Computers. *Proceedings Of The Royal Society A*, *454*, 385-410.
- Preskill, J. (2018). Quantum computing in the nisq era and beyond. *Quantum*, *2*, 79.
- Preskill, J. (2023). Quantum computing 40 years later. In *Feynman Lectures on Computation* (pp. 193-244). CRC Press.
- Qiang, X., Zhou, X., Wang, J., Wilkes, C. M., Loke, T., O'Gara, S., ... & O'Brien, J. L. (2018). Large-scale silicon quantum photonics implementing arbitrary two-qubit processing. *Nature photonics*, *12*(9), 534–539.
- Ray, P., Chakrabarti, B. K., & Chakraborti, A. (1989). Sherrington-kirkpatrick Model In A Transverse Field: Quantum Annealing Using Tunnelling Barriers. *Journal Of Physics A: Mathematical And General*, *22*, L1085-L1090.
- Rebentrost, P., Mohseni, M., & Lloyd, S. (2014). Quantum support vector machine for big data classification. *Physical review letters*, *113*(13), 130503.
- Recher, P., & Trauzettel, B. (2010). Quantum dots and spin qubits in graphene. *Nanotechnology*, *21*(30), 302001.
- Reed, I. S., & Solomon, G. (1960). Polynomial codes over certain finite fields. *Journal of the society for industrial and applied mathematics*, *8*(2), 300–304.
- Reed, M. D., DiCarlo, L., Nigg, S. E., Sun, L., Frunzio, L., Girvin, S. M., & Schoelkopf, R. J. (2012). Realization of three-qubit quantum error correction with superconducting circuits. *Nature*, *482*(7385), 382-385.
- Reiter, F., Sørensen, A. S., Zoller, P., & Muschik, C. (2017). Dissipative quantum error correction and application to quantum sensing with trapped ions. *Nature communications*, *8*(1), 1822.
- Roffe, J. (2019). Quantum error correction: an introductory guide. *Contemporary Physics*, *60*(3), 226–245.
- Rønnow, T. F., Wang, Z., Job, J., Boixo, S., Isakov, S. V., Wecker, D., ... & Lidar, D. A. (2014). Defining And Detecting Quantum Speedup. *Science*, *345*, 420-424.
- Rozenman, G. G., Kundu, N. K., Liu, R., Zhang, L., Maslennikov, A., Reches, Y., & Youm, H. Y. (2023). The quantum internet: A synergy of quantum information technologies and 6G networks. *IET Quantum Communication*, *4*(4), 147-166.
- Ryan-Anderson, C., Bohnet, J., Lee, K., Gresh, D., Hankin, A., Gaebler, J., ... & Brown, N. (2021). Realization of real-time fault-tolerant quantum error correction. *Physical Review X*, *11*(4), 041058.

- Santoro, G. E., Martonak, R., Tosatti, E., & Car, R. (2006). Optimization Using Quantum Mechanics: Quantum Annealing Through Adiabatic Evolution. *Science*, *312*, 1467–1470.
- Santoro, G. E., Martoňák, R., Tosatti, E., & Car, R. (2002). Theory Of Quantum Annealing Of An Ising Spin Glass. *Science*, *295*, 2427-2430.
- Sasaki, T., Yamamoto, Y., & Koashi, M. (2014). Practical quantum key distribution protocol without monitoring signal disturbance. *Nature*, *509*(7501), 475-478.
- Schindler, P., Barreiro, J. T., Monz, T., Nebendahl, V., Nigg, D., Chwalla, M., ... & Blatt, R. (2011). Experimental repetitive quantum error correction. *Science*, *332*(6033), 1059–1061.
- Schoelkopf, R. J., & Girvin, S. M. (2008). Wiring Up Superconducting Qubits. *Nature*, *451*(7179), 664-668.
- Schuld, M., Sinayskiy, I., & Petruccione, F. (2015). An introduction to quantum machine learning. *Contemporary Physics*, *56*(2), 172–185.
- Serrano, M. A., Cruz-Lemus, J. A., Perez-Castillo, R., & Piattini, M. (2022). Quantum software components and platforms: Overview and quality assessment. *ACM Computing Surveys*, *55*(8), 1-31.
- Shor, P. W. (1995). Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory. *Physical review A*, *52*(4), R2493.
- Shor, P. W. (1997). Polynomial-time Algorithms For Prime Factorization And Discrete Logarithms On A Quantum Computer. *SIAM Journal On Computing*, *26*, 1484-1509.
- Shor, P. W. (1999). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM review*, *41*(2), 303-332.
- Silva, V. (2023). Richard Feynman, demigod of physics, father of the quantum computer. In *Quantum Computing by Practice: Python Programming in the Cloud with Qiskit and IBM-Q* (pp. 49-85). Springer.
- Simon, D. R. (1997). On the power of quantum computation. *SIAM journal on computing*, *26*(5), 1474-1483.
- Singh, A., Dev, K., Siljak, H., Joshi, H. D., & Magarini, M. (2021). Quantum internet—applications, functionalities, enabling technologies, challenges, and research directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *23*(4), 2218-2247.
- Singh, M., et al. (2022). Quantum artificial intelligence for the science of climate change. In *Artificial Intelligence, Machine Learning and Blockchain in Quantum Satellite, Drone and Network* (pp. 199-207). CRC Press.
- Singh, R., et al. (2023). Edge AI: a survey. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, *3*, 71-92.
- Sisodia, M. (2020). Comparison the performance of five-qubit IBM quantum computers in terms of bell states preparation. *Quantum Information Processing*, *19*(8), 215.

- Slussarenko, S., & Pryde, G. J. (2019). Photonic quantum information processing: A concise review. *Applied Physics Reviews*, *6*(4), 041303.
- Steane, A. M. (1996). Error correcting codes in quantum theory. *Physical Review Letters*, *77*(5), 793.
- Steane, A. M. (1996). Simple quantum error-correcting codes. *Physical Review A*, *54*(6), 4741.
- Subramanian, T., et al. (2022). *Artificial Intelligence, Machine Learning and Blockchain in Quantum Satellite, Drone and Network*. CRC Press.
- Takita, M., Cross, A. W., Córcoles, A. D., Chow, J. M., & Gambetta, J. M. (2017). Experimental demonstration of fault-tolerant state preparation with superconducting qubits. *Physical review letters*, *119*(18), 180501.
- Tillich, J.-P., & Zémor, G. (2013). Quantum ldpc codes with positive rate and minimum distance proportional to the square root of the blocklength. *IEEE Transactions on Information Theory, 60*(2), 1193–1202.
- Venturelli, D., & Kais, S. (2018). A Quantum Algorithm For Machine Learning. *Journal Of Physics: Conference Series*, *1230*, 012001.
- Venturelli, D., & Kais, S. (2019). Quantum Annealing Of A Quantum Glass. *Physical Review Letters*, *123*, 140501.
- Venturelli, D., Do, R., Rieffel, E., & Frankel, S. (2018). Quantum Annealing Correction For Random Ising Problems. *Physical Review A*, *98*, 032324.
- Venuti, L. C., Albash, T., Whaley, K. B., & Lidar, D. A. (2016). Adiabatic Quantum Simulation Of A Lattice Gauge Theory In One Dimension. *Physical Review X*, *6*, 041021.
- Vietz, D., Barzen, J., Leymann, F., & Wild, K. (2021). On decision support for quantum application developers: categorization, comparison, and analysis of existing technologies. In *International Conference on Computational Science* (pp. 127-141). Springer.
- Viola, L., Et Al. (1999). Dynamical Decoupling Of Quantum Systems From Their Environment. *Physical Review Letters*, *82*, 2417-2420.
- Viola, L., Et Al. (2019). Dynamical Decoupling Of A Superconducting Qubit Array From Unwanted Interactions With The Environment. *Nature Communications*, *10*, 1-8.
- Von Neumann, J. (2018). *Mathematical foundations of quantum mechanics: New edition*. Princeton university press.
- Vourdas, A. (2004). Quantum systems with finite Hilbert space. *Reports on Progress in Physics*, *67*(3), 267.
- Walia, G. K., et al. (2023). AI-empowered fog/edge resource management for iot applications: A comprehensive review, research challenges and future perspectives. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.

- Wang, X.-L., Chen, L.-K., Li, W., Huang, H.-L., Liu, C., Chen, C., ... & Pan, J.-W. (2016). Experimental ten-photon entanglement. *Physical review letters*, *117*(21), 210502.
- Wehner, S., Elkouss, D., & Hanson, R. (2018). Quantum internet: A vision for the road ahead. *Science*, *362*(6412), eaam9288.
- Wendin, G. (2017). Quantum information processing with superconducting circuits: a review. *Reports on Progress in Physics*, *80*(10), 106001.
- Wen, X.-G. (2017). Colloquium: Zoo of quantum-topological phases of matter. *Reviews of Modern Physics*, *89*(4), 041004.
- Williams, C. P. (2011). *Quantum Gates*. In *Explorations in Quantum Computing* (pp. 51-122). London: Springer.
- Willsch, M., Willsch, D., Nocon, M., Jin, F., Geissler, T., ... & Xiang, L. (2020). Support Vector Machines On The D-wave Quantum Annealer. *Quantum Machine Intelligence*, *2*, 1–13.
- Witten, E. (1989). Quantum field theory and the jones polynomial. *Communications in Mathematical Physics*, *121*(3), 351–399.
- Wootters, W. K., & Zurek, W. H. (1982). A single quantum cannot be cloned. *Nature*, *299*, 802–803.
- Yang, Z., Zolanvari, M., & Jain, R. (2023). A survey of important issues in quantum computing and communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.
- Zhou, L., Wang, H., & Li, M. (2020). Quantum Approximate Optimization Algorithm For The Maxcut Problem On A Random Graph. *Physical Review A*, *102*, 022601.
