ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 – Número 46 - 2025

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Digital Object Identifier: 10.24054/rcta.v2i46.4074

Estado del arte de la computación cuántica sus desafíos y aplicaciones

State of the art of quantum computing its challenges and applications

PhD.(c). Richard Eliseo Mendoza Gáfaro[1], Mg. Edgar Alexis Albornoz Espinel[2], PhD.(c). Heber Armando Pabón Conde[3]

[1] ***Universidad de Pamplona,*** *Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería de Sistemas, Grupo de Investigación en Inteligencia de Datos y Computación GIIDAC, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.*
[2] ***Universidad de Pamplona,*** *Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería de Sistemas, Grupo de Investigación Ciencias Computacionales (CICOM), Pamplona, Norte de Santander, Colombia.*
[3] ***Universidad de Pamplona,*** *Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Electrónica, Grupo de Investigación Sistemas multisensoriales y reconocimiento de patrones (GISM), Pamplona, Norte de Santander, Colombia.*

Correspondencia: *{remendozag, edgaralbornoz, heber.pabon}@unipamplona.edu.co*

Recibido: *02 enero 2025.* ***Aceptado:*** *25 junio 2025.* ***Publicado:*** *01 julio 2025.*

Cómo citar: *R. E. Mendoza Gáfaro, E. A. Albornoz Espinel, y H. A. Pabón Conde, «Estado del arte de la computación cuántica sus desafíos y aplicaciones», RCTA, vol. 2, n.º 46, pp. 89–101, jul. 2025.*
Recuperado de https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/4074

Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen: El artículo es una revisión del estado del arte de la computación cuántica, sus desafíos y aplicaciones. La metodología del proyecto se basa en un enfoque riguroso y estructurado que comienza con la identificación de las bases de datos y fuentes de información relevantes en el campo de la computación cuántica. Luego, se definen los criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los estudios pertinentes. Los estudios seleccionados se someten a un análisis crítico y se extraen los datos relevantes. Los desafíos de la computación cuántica se identifican y se discuten en el contexto de los avances actuales en el campo. Las aplicaciones potenciales y actuales de la computación cuántica se exploran en detalle. Finalmente, los hallazgos se sintetizan y se presentan de manera coherente y comprensible. Este enfoque permite una comprensión profunda y actualizada del estado del arte de la computación cuántica, sus desafíos y aplicaciones.

Palabras clave: computación cuántica, revisión sistemática, estado del arte, desafíos, aplicaciones.

Abstract: The article is a review of the state of the art of quantum computing, its challenges, and applications. The project methodology is based on a rigorous and structured approach that begins with the identification of relevant databases and information sources in the field of quantum computing. Then, inclusion and exclusion criteria are defined to select pertinent studies. The selected studies undergo critical analysis, and relevant data is extracted. The challenges of quantum computing are identified and discussed in the context of current advances in the field. Potential and current applications of quantum computing are explored in detail. Finally, the findings are synthesized and presented in a coherent and understandable manner. This approach allows for a deep and up-to-date understanding of the state of the art of quantum computing, its challenges, and applications.

Keywords: quantum computing, systematic review, state of the art, challenges, applications.

1. INTRODUCCIÓN

En este documento, exploraremos los conceptos básicos de la mecánica cuántica, las diferencias entre la computación cuántica y la computación clásica, y las aplicaciones prácticas de la computación cuántica en la actualidad. También discutiremos algunos de los avances más recientes en la investigación de la computación cuántica, incluyendo la supremacía cuántica alcanzada por IBM en 2021.

1.1. Física Clásica vs Mecánica Cuántica

La física clásica y la mecánica cuántica son dos ramas de la física que describen el comportamiento de la materia y la energía a diferentes escalas. La física clásica conocida como física newtoniana, se desarrolló en el siglo XVII describe el movimiento y las interacciones de los objetos macroscópicos, como los planetas, los cuerpos celestes y los objetos cotidianos. Por otro lado, la mecánica cuántica se desarrolló en el siglo XX y describe los objetos microscópicos, estudia el comportamiento de la materia y la energía a nivel atómico y subatómico como los átomos, moléculas y partículas subatómicas, como electrones y fotones.

Los orígenes de la física clásica se remontan a la antigüedad. Ya en babilonia, antiguo Egipto y en la Grecia antigua, donde los filósofos griegos, como Aristóteles, comenzaron a estudiar el campo de la astronomía, la óptica y el movimiento de los objetos. En el siglo XVII cuando la física clásica comenzó a desarrollarse realmente, con el trabajo de Galileo Galilei, Newton y otros científicos.

Isaac Newton formulo las leyes del movimiento en su obra "Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica" ("Principios matemáticos de la filosofía natural"), publicada en 1687. Estas leyes, también conocidas como las Leyes de Newton, son los 3 principios fundamentales sobre los que se sostiene la mecánica clásica, una de las ramas de la física, su trabajo en la física clásica sentó las bases para la ciencia moderna. [1]

La física clásica incluye el estudio de la mecánica newtoniana, la termodinámica, el electromagnetismo, la óptica entre otras disciplinas. La física clásica ha tenido gran impacto en el desarrollo, las leyes de newton han sido fundamentales para el desarrollo de la ingeniería, la aviación la navegación. La teoría de la relatividad de Einstein ha tenido impacto en el desarrollo de la cohetería y los viajes espaciales. La Física clásica sigue evolucionando y es probable que continue teniendo un gran impacto en el desarrollo de la tecnología en el futuro.

Los orígenes de la mecánica cuántica se remontan al siglo XIX, cuando los científicos comenzaron a estudiar los fenómenos que no podían explicarse con las leyes de la física clásica. En 1897, Joseph John Thomson descubrió el electrón, como partícula subatómica que tiene una carga negativa. El descubrimiento del electrón y otras partículas subatómicas llevo a la comprensión de que la materia está formada por partículas muy pequeñas que obedecen a las leyes diferentes a las de los objetos macroscópicos.

En el siglo XX, la mecánica cuántica se desarrolló rápidamente gracias al trabajo de científicos como Mac Planck, Albert Einstein, Niels Bohr y Werner Heisenberg. Planck descubrió que la energía se emite y absorbe en paquetes discretos llamados cuantos. Einstein descubrió que la luz es también una partícula llamado fotón. Bohr desarrollo un modelo atómico que explica la estructura del átomo y el comportamiento de los electrones. Heisenberg formulo el principio de incertidumbre, que establece que es imposible conocer con precisión la posición y el momento de una partícula subatómica al mismo tiempo. [2]

La mecánica cuántica es una rama de la física muy compleja y desafiante, pero no ha ayudado a comprender a comprender el universo y ha sido fundamental en el desarrollo de nuevas tecnologías, como los láseres, los transistores y los computadores cuánticos y abre nuevas posibilidades para el desarrollo de nuevas tecnologías.

Tabla 1: *Comparativo Física Clásica vs Mecánica Cuántica*

Física clásica	Mecánica cuántica
Se ocupa de objetos macroscópicos, como objetos grandes y objetos en movimiento lento.	Se ocupa de objetos microscópicos, como átomos, moléculas y partículas subatómicas.
Se basa en las leyes de Newton, que describen el movimiento de los objetos.	Se basa en las leyes de la mecánica cuántica, que describen el comportamiento de la materia y la energía a nivel atómico y subatómico.
Es una teoría determinista, lo que significa que, si conoce el estado inicial de un sistema, puede predecir su estado futuro.	Es una teoría probabilística, lo que significa que no es posible predecir con certeza el estado futuro de un sistema, sino solo la probabilidad de que se encuentre en un determinado estado.

Es una teoría muy exitosa que ha explicado muchos fenómenos del mundo cotidiano.	Es una teoría mucho más compleja y difícil de entender que la física clásica, pero ha explicado muchos fenómenos que no pueden ser explicados por la física clásica, como el comportamiento de la luz, el átomo y la energía nuclear.
Tiene muchas aplicaciones en la tecnología, como la construcción de automóviles, aviones y computadoras.	Tiene el potencial de revolucionar muchas industrias en el futuro, como la medicina, la energía y la informática.

2. METODOLOGÍA

La metodología del proyecto de revisión sistemática del estado del arte de la computación cuántica, sus desafíos y aplicaciones, se basa en un enfoque riguroso y estructurado. Comienza con la identificación de las bases de datos y fuentes de información relevantes en el campo de la computación cuántica. Luego, se definen los criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los estudios pertinentes. Los estudios seleccionados se someten a un análisis crítico y se extraen los datos relevantes. Los desafíos de la computación cuántica se identifican y se discuten en el contexto de los avances actuales en el campo. Las aplicaciones potenciales y actuales de la computación cuántica se exploran en detalle. Finalmente, los hallazgos se sintetizan y se presentan de manera coherente y comprensible. Este enfoque permite una comprensión profunda y actualizada del estado del arte de la computación cuántica, sus desafíos y aplicaciones.

3. RESULTADOS

3.1. Breve Historia de la Computación Cuántica

La primera revolución cuántica tuvo lugar entre 1900 y 1930. Durante este tiempo se desarrollaron los principios de la mecánica cuántica, que es la teoría que describe el comportamiento de la materia y la energía a escalas atómicas y subatómicas.

La primera revolución cuántica tuvo lugar entre 1900 y 1930. Durante este tiempo se desarrollaron los principios de la mecánica cuántica, que es la teoría que describe el comportamiento de la materia y la energía a escalas atómicas y subatómicas.

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX se lanzó la predicción de la catástrofe ultravioleta, también conocida como la catástrofe de Rayleigh-Jeans que afirmaba que un cuerpo negro ideal en equilibrio térmico emitiría una cantidad ilimitada de energía a medida que la longitud de onda disminuyera en el rango ultravioleta. Esta ley no se comportaba bien a altas frecuencia (longitudes de onda cortas) y predecía una cantidad infinita de energía emitida en el rango ultravioleta, lo que contradecía las observaciones experimentales. Esto se resolvió con el trabajo de Max Planck.

Max Planck fue físico alemán considerado el padre de la teoría cuántica resuelve la catástrofe ultravioleta en su artículo "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum" (Sobre la teoría de la distribución de energía en el espectro normal), en el journal “Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft” publicado en 1900. [1]

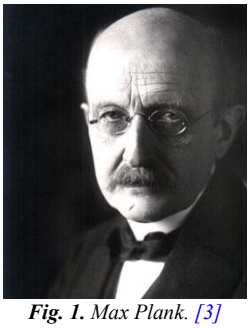

Fig. 1. *Max Plank. [3]*

En este artículo, Planck propuso que la energía de la luz no se emite ni se absorbe de forma continua, sino en pequeñas cantidades discretas llamadas cuantos. Esta propuesta conocida como ley del Planck, resolvió la catástrofe ultravioleta acuñada por Paul Ehrenfest en 1911. Este trabajo sentó las bases para el desarrollo de la teoría cuántica y le valió a Plank el premio nobel de Física en 1918. [2]

En 1913, Niels Borh fue un físico danés desarrollo el modelo de estructura atómica de Bohr que introdujo la teoría de los electrones que orbitan el núcleo atómico. Premio nobel de Física en 1922 por su investigación la estructura del átomo y de la radiación que emana de ellos. [4]

Fig. 2. *Neils Bohr. [5]*

Fig. 3. *Arnold Sommerfeld. [7]*

En 1916, Arnold Sommerfeld fue un físico alemán que perfecciono el modelo atómico de Bohr introduciendo dos modificaciones básicas; orbitas casi elípticas para los electrones y velocidades relativistas. [6]

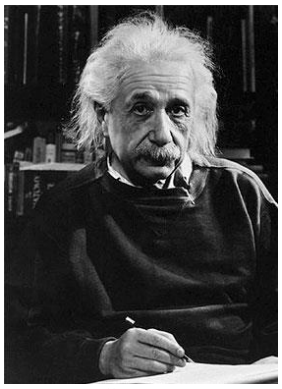

Fig. 4. *Albert Einstein. [8]*

Albert Einstein es considerado uno de los físicos más importantes fundadores de la teoría cuántica debido a la descripción de la luz como cuantos en su teoría del efecto fotoeléctrico, por el cual recibió el Premio Nobel en 1921.

En 1922, Walther Gerlach fue un físico alemán que codescubridor la cuantización del spin en un campo magnético, el ahora conocido efecto Ster-Gerlach. El experimento fue concebido por Otto Stern en 1921, consistió en enviar un haz de átomos de plata a través de un campo magnético homogéneo. [9]

El spin fue introducido por Ralph Kronig e, independientemente, descubierto por primera vez en 1925 por Samuel Goudsmit y George Uhlenbeck. Goudsmit y Uhlenbeck estaban estudiando el espectro de líneas de emisión del átomo de hidrogeno. El spin es una propiedad física de las partículas elementales por el cual tiene un momento angular intrínseco de valor fijo. [10]

Fig. 5. *Werner Heisenberg. [12]*

En 1927, Werner Heisenberg físico teórico aleman formula el Principio de incertidumbre de Heisenberg, que afirma que es imposible medir al mismo tiempo de forma precisa la posición y el momento lineal de una partícula. [11]

En 1935, Albert Eistein, Boris Podolsky y Nathan Rosen publicaron un artículo que se conocería como la paradoja EPR. En este articulo los autores pretendía demostrar que el principio de indeterminación de Heisenberg presentaba excepciones en su aplicación. [13], [14]

Paul Dirac público su artículo titulado “Una nueva notación para la mecánica cuántica” en el volumen 35, número 3 de las Actas Matemáticas de la Sociedad Filosófica de Cambridge en julio de 1939. La nueva notación proporciona una forma concisa y elegante de escribir tanto las cantidades abstractas como sus coordenadas en un solo esquema. Esta notación ha sido ampliamente utilizada en la mecánica cuántica y en la computación cuántica. [15], [16]

Fig. 6. *Paul Dirac. [17]*

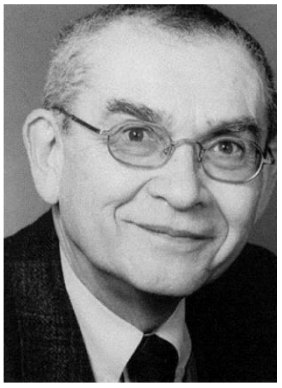

Fig. 7. *Yuri Manin. [19]*

En 1980, Yuri Manin fue un matemático ruso conocido por su trabajo en la teoría de la información cuántica propuso en su libro “Computable and Uncomputable” la idea de una computadora cuántica. [18]

En 1982, Paul Benioff es un físico estadounidense público el articulo “Quantum Mechanical Models of Turing Machines That Dissipate No Energy” propuso una idea de que la cinta de la máquina de Turín podría ser reemplazada por una secuencia de sistemas cuánticos simples de dos estados llamados qubits,

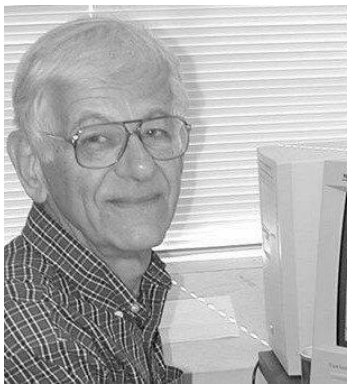

Fig. 8. *Paul Benioff. [21]*

proporcionando una manera primitiva de codificar una secuencia de dígitos binarios. [20]

En 1981, Richard Feynman físico teórico estadounidense propuso el modelo de computadora cuántica basado en el circuito lógico-combinacional construido con puertas cuánticas reversibles. En su artículo “Simulating Physics with Computers”

publicado en el International Journal of Theoretical Physics propuso la idea de usar computadoras cuánticas para simular sistemas cuánticos que son difíciles de simular usando computadoras digitales clásicas. [22]

Fig. 7. *Richard Feynman [23]*

En 1985, David Deutsch es un físico británico que describió el primer ordenador cuántico universal, capaz de simular cualquier otro ordenador cuántico (principio de Church-Turing). La tesis de Church-Turing dice "todo algoritmo es equivalente a una máquina de turing" esto formula hipotéticamente la equivalencia entre los conceptos de función computable y máquina de Turing. En 1989, formula el primer algoritmo cuántico y es uno de los formuladores de la teoría de los mundos paralelos. [24]

Fig. 8. *David Deutsch [25]*

En 1993, Charles H. Bennett es un físico estadounidense trabajador del IBM Research propuso el protocolo de teleportación cuántica, que permite transferir información cuántica entre dos puntos separados y abrió la vía al desarrollo de las comunicaciones cuánticas

En 1994, Dan Simón científico de la computación estadounidense invento el algoritmo de Simón que proporciono el primer ejemplo de aceleración exponencial sobre el mejor algoritmo cuántico. Actualmente es ingeniero principal de seguridad en AWS Cryptography. [26]

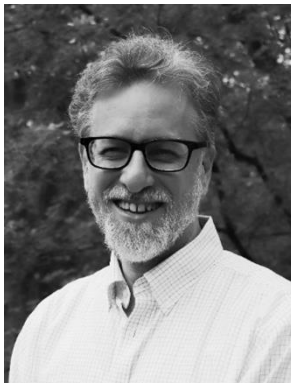

Fig. 9. *Dan Simon [27]*

En 1994, Peter Shor matemático estadounidense en el MIT crea el algoritmo cuántico de Shor para factorizar números no primos en tiempo polinómico. Este algoritmo al ser implementado en una computadora cuántica practica tiene el potencial de hacer obsoletas muchas criptografías de clave publica, como RSA. [28]

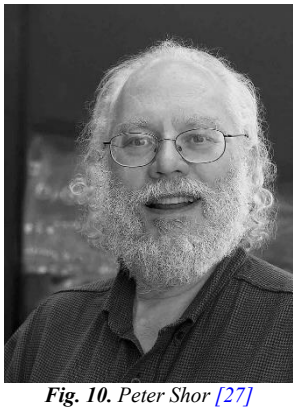

Fig. 10. *Peter Shor [27]*

En 1996, Lov Kumar Grover científico informático indio-estadounidense inventa el algoritmo cuántico de Grover es un algoritmo para la búsqueda no estructurada de una secuencia de datos con N componente. El algoritmo utiliza las propiedades de la superposición y la interferencia cuántica para encontrar con alta probabilidad el elemento que satisface una condición dada, usando solo O(√N) y con necesidad adicional de espacio de almacenamiento de O (log N) evaluaciones de la función. El algoritmo de Grover tiene aplicaciones la inversión de funciones, la criptografía y la optimización. [29]

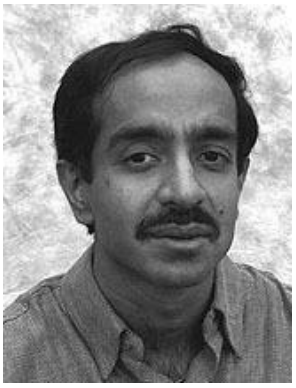

Fig. 11. *Lov Kumar Grover [30]*

En 1998, un equipo de investigadores del Laboratorio Nacional de Los Álamos y del Instituto Tecnológico de Massachusetts lograron propagar el primer qubit a través de una solución de aminoácidos. Este fue un hito importante en el desarrollo de la computación cuántica, ya que permitió analizar la información que transporta un qubit. [31]

La segunda revolución cuántica se está produciendo actualmente. Durante este tiempo, se están desarrollando nuevas tecnologías que se basan en los principios de la mecánica cuántica.

Ese mismo año, la Universidad de Berkeley, California, presentó la primera máquina de 2 qubits. Un año más tarde, en 1999, los laboratorios de IBM-Almaden crearon la primera máquina de 3 qubits, que fue capaz de ejecutar por primera vez el algoritmo de búsqueda de Grover.

D-Wave Systems es fundada en 1999 por Haig Farris, Geordie Rose, Bob Wiens y Alexandre Zagoskin empresa privada de computación cuántica con sede en Burnaby. D-Wave Systems es la primera empresa privada en vender computadores cuánticos, lanzo su primer sistema comercial en 2010, el D-Wave ONE. Desde entonces, la empresa ha lanzado varios modelos como el D-Wave two, un sistema de 512 qubits. En agosto de 2015, lanzaron el D-Wave 2X, un sistema de 1000 qubits. [32]

En 2005, un equipo de investigadores del Instituto de Óptica e Información de la Universidad de Innsbruck en Austria anuncio que había creado el primer Qbyte, una serie de qubits utilizando trampa de iones. El experimento utilizo un átomo de cesio enfriado cerca del cero absoluto y confinado en una trampa magnética. Los investigadore luego utilizaron un láser para manipular el spin del átomo, que es una forma de información cuántica.

En 2006, se hicieron varios avances importantes en el control cuántico. C, Negrevergne y otros investigadores en el que se presentaron un punto de referencia experimental de los métodos de control operacional en procesadores de información cuántica extendidos hasta 12 qubit. Se implementaron el control universal de este gran espacio de Hilbert utilizando dos enfoques complementarios y discutieron su precisión y escalabilidad. En el mismo año, Fei Xue y otros investigadores llevaron un estudio de controlabilidad cuántica bajo las influencias de la decoherencia cuántica inducida en el control cuántico en sí mismo.

En 2016, IBM fue la primera compañía en conectar una pequeña computadora cuántica en su nube IBM Cloud. Desde entonces cualquier persona puede acceder a una selección de servicios cuánticos en la nube basados en la tecnología IBM Quantum System One para realizar investigación y explorar nuevos problemas en sus sistemas. [33]

D-Wave Systems lanzo el D-Wave 2000Q en enero de 2017, es una mejora del D-Wave 2X que cuenta con un sistema de 2000 qubits y algunas funciones avanzadas.

En enero de 2019, IBM presento el primer computador cuántico comercial IBM Q System One basado en circuitos de 20 qubits de IBM Research, utiliza un sistema de refrigeración por dilución para enfriar los qubits a una temperatura cercana a los 0.02K. Los qubits están hechos de nitro de silicio y chips de 5 cm de diámetro. [34]

En 2019, Google anuncio que había logrado “La supremacía cuántica” empleando su procesador cuántico Sycamore de 53 qubits al completar una tarea de 200 segundos que a una supercomputadora más rápida del mundo le hubiese tomado 10.000 años. [35]

El modelo más reciente es el sistema Advantage de D-Wave lanzado el 29 de septiembre de 2020 es la primera computadora cuántica diseñada específicamente para aplicaciones comerciales y puede manejar problemas más grandes y complejos gracias al aumento en 500 de numero de qubits y en 35000 en número de acopladores. [36]

Fig. 12. *D-WAVE Advantage [37]*

El 23 de noviembre de 2021, IBM anuncio que había alcanzado la supremacía cuántica con su computadora cuántica “Eagle” cuenta con un procesador que puede manejar 127 qubits. [38]

3.2. Conceptos Básicos de Mecánica Cuántica

3.2.1. Principio de incertidumbre de Heisenberg

W. Heisenberg fórmula en 1927 el principio de incertidumbre de Heisenberg que es una restricción fundamental es la capacidad de conocer con precisión ciertos pares de características de un objeto físico medido, como la posición y el momento (o la velocidad) de una partícula subatómica al mismo tiempo. Esto se debe a que la observación de la partícula altera su estado y comportamiento. [39]

3.2.2. *Estado de superposición*

En 1924, el duque francés Luis de Broglie introdujo la idea de la naturaleza ondulatoria de los electrones y la dualidad partícula-onda. SU investigación sentó uno de los pilare de la física cuántica: la dualidad onda-partícula establece que las ondas pueden comportarse como partículas y viceversa. De Broglie calculo cual sería la longitud de las ondas de materia asociadas a la partícula, dependiendo de su velocidad y de su masa. Según Broglie, todo nuestro mundo es cuántico, no solo la luz.

El experimento mental propuesto en 1935 por el científico austriaco Erwin Schrödinger conocido como el "gato de Schrödinger", es una paradoja que muestra lo desconcertante de la mecánica cuántica. El experimento consiste en un gato en una caja sellada con un átomo radioactivo, un detector Geiger, una ampolla de veneno y un martillo. Si el átomo se desintegra, el detector Geiger lo detectara y activara el martillo, que romperá la ampolla de veneno y matara el gato. En la paradoja planteada por Schrödinger, quien recibió el Nobel de Física en 1933, el gato está vivo y muerto al mismo tiempo. [40]

***Fig. 13**. Gato de Schrödinger [40]*

En mecánica cuántica, el estado de superposición es un principio fundamental sostiene que un sistema físico como un electrón puede estar en dos o más estados a la vez. Esto significa que el sistema no tiene una sola posición, velocidad o spin definidos, sino que está en una combinación de todos los estados posibles. La superposición es responsable de muchos fenómenos cuánticos como la interferencia y la tele portación. [41]

3.2.3. *Entrelazamiento cuántico*

Jhon Stewart Bell fue un físico teórico y matemático irlandés el teorema de Bell. En 1064, Bell público "On the Einstein-Podoslky-Rosen paradox" (Sobre la paradoja Einstein-Podoslky-Rosen) en el que presento la desigualdad de Bell, que es una restricción sobre la correlación entre los resultados de medidas realizadas en partículas entrelazadas. La desigualdad de Bell se ha confirmado en numerosos experimentos, esto ha llevado a la aceptación generalizada del entrelazamiento cuántico como propiedad fundamental de la naturaleza. El fenómeno que lleva su nombre se usa en aplicaciones prácticas como la computación cuántica y la criptografía. [42]

El entrelazamiento cuántico es un fenómeno cuántico en el que los estados cuánticos de dos o más objetos necesitan ser descritos mediante un único estado. Las partículas entrelazadas están conectadas de tal manera que comparten el mismo estado cuántico, incluso si están separadas por una gran distancia, incluso si están separadas por millones de años luz. El entrelazamiento es un fenómeno sin equivalente clásico. Su estado compartido puede ser su energía o su giro. Se trata de un extraño fenómeno que Albert Einstein denominó "acción fantasmal a distancia". [43]

El Premio Nobel de Física de 2022 fue para el francés Alain Aspect, el estadounidense John Clauser y el austriaco Anton Zeilinger su trabajo podría allanar el camino hacia una nueva generación de potentes computadoras y de sistemas de telecomunicaciones imposible de piratear. [44]

3.2.4. *Estado de decoherencia*

La decoherencia cuántica es un proceso por el cual se produce la perdida de coherencia de un estado cuántico. Se puede entender como la destrucción de la interferencia cuántica; la interferencia es el resultado de una de las características más peculiares de la mecánica cuántica, el principio de superposición de estados, lo que significa que puede estar en dos estados a la vez. La decoherencia cuántica es causada por la interacción de un sistema cuántico con su entorno (Por ejemplo, como la luz, el calor o las vibraciones). La decoherencia cuántica es un proceso inevitable cuando un sistema cuántico interactúa con su entorno, se pierde la coherencia cuántica, esto se debe a que el entorno introduce ruido en el sistema cuántico, lo que hace que pase de estar en superposición de estados a un solo estado. La decoherencia cuántica puede ser lenta o rápida dependiendo del entorno. También hace que los sistemas cuánticos sean más propensos a errores. [45]

3.2.5. *Bit vs Qubit*

Un bit es la unidad básica de información en las computadoras clásicas, puede tomar dos valores, 0 o

1. Un qubit o bit cuántico (del inglés quantum bit), por otro lado, es la unidad básica de información en la computación cuántica. A diferencia de un bit clásico, que solo puede tomar los valores 0 o 1, un qubit puede encontrarse en un estado de superposición cuántica, una combinación de esos dos estados. Esto significa que un qubit puede contener ambos valores (0 y 1) al mismo tiempo. Por ejemplo, un qubit en superposición tiene una probabilidad del 50% de que se mida como 0 y una probabilidad del 50% de que se mida como 1. Sin embargo, una vez que se mide un qubit, su estado cuántico colapsa en uno de sus dos estados propios (0 o 1).

Los qubits pueden construirse de varias formas, pero todos representan un 0 o una 1 digital utilizando las propiedades cuánticas de algo que pueda controlarse electrónicamente. Algunos ejemplos conocidos son los circuitos superconductores, en los que los qubits se crean manipulando el estado de una corriente eléctrica diminuta, y los iones atrapados, en los que los qubits se crean manipulando el estado de iones individuales mediante láseres. También existen los qubits topológicos, que se crean manipulando las propiedades de materiales que presentan fases topológicas, y los qubits fotónicos, en los que la información cuántica se almacena en la polarización de fotones individuales.

Las diferencias entre bits y qubits tienen una serie de efectos importantes. Los qubits pueden realizar cálculos que sería imposibles para los bits, y pueden hacerlo mucho más rápido. Esto hace que las computadoras cuánticas sean mucho más potentes que las computadoras clásicas.

3.2.6. Notación de Dirac

La notación para representar los bits cuánticos se denomina notación de Dirac. También conocida como notación bra-ket es una forma de representar los estados cuánticos y operadores en la mecánica cuántica fue desarrollada por el físico Paul Dirac. El primer artículo en el que aparece estas notaciones “A new notation for quantum mechanics”. (una nueva notación para la mecánica cuántica) publicado en 1939 en la revista “Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society”. [46]

3.2.7. Representación matemática de los Qubits

El elemento fundamental de todas las computadoras es una celda de memoria llamada bit (contracción de binary digit, o “digito binario” en inglés), que puede existir en dos estados. Normalmente denotados por 0 y 1. La computación y la información cuánticas se basa en un concepto análogo, el bit cuántico o qubit.

3.2.8. Notación Bra-Ket de Dirac

Los dos estados posibles de un qubit son él $|0\rangle$ y el $|1\rangle$, que corresponden a los estados 0 y 1 de un bit clásico. La notación se denomina notación de Dirac. La diferencia entre bits y qubits es que un qubit puede estar en un estado distinto de $|0\rangle$ y el $|1\rangle$. También es posible formar combinaciones lineales de estado, a menudo llamadas superposiciones.

$$|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle. \ (1)$$

Los números α y β denominadas amplitudes son números complejos. Las amplitudes son muy importantes porque nos dan la probabilidad de encontrar la partícula en ese estado concreto al realizar la medida. La probabilidad de medir la partícula en el estado $|0\rangle$ es $|\alpha|^2$ y la probabilidad en el estado $|1\rangle$ es $|\beta|^2$. Elevar al cuadrado α y β para hallar la probabilidad es similar a elevar al cuadrado la amplitud de onda para hallar la energía de la onda. Como la probabilidad total de observar todos los estados del sistema cuántico debe sumar 100%. Las amplitudes deben obedecer esta regla:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \ (2)$$

Se denomina regla de normalización. Los coeficientes α y β siempre pueden reescalar por algún factor para normalizar el estado cuántico. Dicho de otro modo, el estado de un qubit es un vector en un espacio vectorial complejo bidimensional. Los estados $|0\rangle$ y el $|1\rangle$ se conocen como estados de base computacional y forman la base ortogonal para este espacio vectorial. Cuando se mide un qubit, el resultado de la medición solo puede ser “0” o “1”, de forma probabilística. Por ejemplo, un qubit puede estar en el estado.

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle. \ (3)$$

Que cuando se mide, da el resultado de 0 el 50% $\left(\left|1/\sqrt{2}\right|^2\right)$ de las veces y el resultado 1 50% de las veces. Volveremos a menudo este estado, que a veces se denota como $|+\rangle$.

3.3. Representación Matricial

Al escribir un único qubit en una superposición $|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, resulta útil utilizar el algebra

matricial. En representación matricial, un qubit se escribe como un vector bidimensional donde las amplitudes son los componentes del vector. [47]

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix}\alpha\\ \beta\end{pmatrix}. \qquad (4)$$

Los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$ suelen representarse como

$$|0\rangle = \begin{pmatrix}1\\ 0\end{pmatrix}, |1\rangle = \begin{pmatrix}0\\ 1\end{pmatrix}. \quad (5)$$

Experimentalmente, el estado de un qubit puede cambiarse mediante alguna acción física, como aplicar un láser electromagnético o, hacerlo pasar a través de un dispositivo óptico. Cambiar el estado de un qubit mediante una acción física corresponde matemáticamente a multiplicar el sector del qubit $|\psi\rangle$ por alguna matriz unitaria U, de modo que después de la operación el estado es ahora $|\psi'\rangle = U|\psi\rangle$.

3.4. Visualización Bibliométrica de Tendencias Emergentes en Computación Cuántica

Para este estudio es fundamental la generación de mapas bibliométricos, que faciliten la visualización de relaciones y similitudes entre palabras claves, agrupando los términos en clúster temáticos, evidenciando las áreas de concentración y tendencias emergentes en la computación cuántica. VOSviewer es una aplicación que permite analizar y explorar de forma gráfica grandes volúmenes de datos, facilitando la detección de patrones, permitiendo una interpretación más intuitiva y didáctica de los resultados.

Los documentos recuperados en SCOPUS fueron 6.298 en una ventana de tiempo de 1996 al 2025, los cuales fueron analizados con relación a la temática de "Quantum Computing", logrando extraer las palabras claves más relevantes relacionadas a la temática, la tabla 2 presenta un listado de las 20 palabras clave más relevantes en función de ocurrencia de aparición y la fuerza de enlace en los documentos analizados.

Tabla 2: *Lista de palabras clave por importancia de ocurrencia y fuerza del enlace.*

PALABRA CLAVE (KEYWORD)	OCURRENCIAS (OCURRENCES)	FUERZA TOTAL DEL ENLACE (TOTAL LINK STRENGHT)
QUANTUM COMPUTING	4806	32473
QUANTUM COMPUTERS	4490	32049
QUANTUM OPTICS	1972	16781
QUANTUM THEORY	1089	8000
QUANTUM ELECTRONICS	893	7767
QUBITS	801	6408
COMPUTATION THEORY	721	6182
QUANTUM CRYPTOGRAPHY	709	5751
QUANTUM ALGORITHMS	620	5302
QUANTUM ENTANGLEMENT	592	5219
QUANTUM CIRCUIT	564	5439
TIMING CIRCUITS	473	4652
LOGIC GATES	460	4579
QUANTA COMPUTERS	417	3698
QUANTUM COMMUNICATION	369	3156
MACHINE-LEARNING	366	3845
MACHINE LEARNING	344	3268
PHOTONS	341	2925
OPTIMIZATION	327	2667
COMPUTER CIRCUITS	322	3211
QUANTUM MACHINES	292	3148

El mapa bibliométrico que representa las diferentes temáticas agrupadas en clústers por áreas con enfoques predominantes en la literatura, permite visualizar los conceptos clave dentro del campo investigado "Quantum Computing" facilitando su comprensión y su estructura interna.
Cada clúster representa un conjunto de palabras relacionadas entre sí reflejando líneas de investigación.

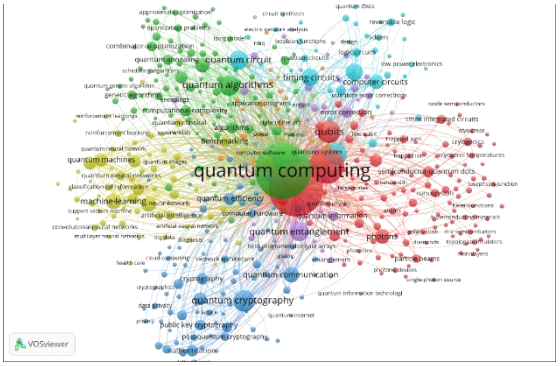

Fig. 14. *Clústeres red de palabras claves en publicaciones científicas sobre Quantum Computing*
Fuente: *Elaboración por los autores a partir del programa VOSviewer 1.6.20*

• Clúster 1 (rojo): Incluye términos como Quantum computer, Quantum applications, Quantum technologies, qubit, el cluster agrupa 125 elementos.

• Clúster 2 (verde): Incluye términos como Quantum algorithms, approximate optimization, computer science, el cluster agrupa 94 elementos.
• Clúster 3 (azul): Incluye términos como computer architecture, cloud computing, post quantum, quantum network, el cluster agrupa 93 elementos.
• Clúster 4 (amarillo): Incluye términos como artificial intelligence, big data, clustering algorithms, Deep learning, el cluster agrupa 74 elementos.
• Clúster 5 (morado): Incluye términos como errors, encoding, code, fault tolerance, el cluster agrupa 43 elementos.
• Clúster 6 (celeste): Incluye términos como circuit optimization, computer circuits, cost, logic design, el cluster agrupa 41 elementos.
• Clúster 7 (naranja): Incluye términos como computer software, program compilers, software design, el cluster agrupa 26 elementos.

La figura 15 corresponde a la red de palabras claves, con un enfoque de línea de tiempo que permite comprender la evolución de las investigaciones en el campo de la computación cuántica entre 1996 y 2025. La figura permite observar como algunas palabras clave como "quantum machines" y "quantum neural networks" han sido recurrentes en la literatura actual, evidenciando los temas a los que se les ha dado mayor atención en el período analizado.

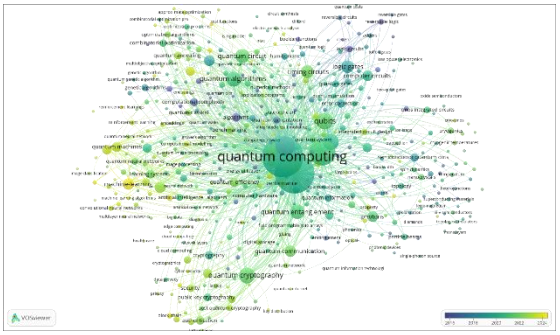

Fig. 15. *Evolución temporal de la red de palabras claves en publicaciones científicas sobre Quantum Computing*
Fuente: *Elaboración por los autores a partir del programa VOSviewer 1.6.20*

La Figura 16 presenta un mapa de densidad de palabras clave en publicaciones científicas sobre "Quantum Computing", generado mediante el software VOSviewer a partir de los datos de la base de datos Scopus en 2025. Esta figura proporciona una visión cuantitativa y cualitativa sobre la intensidad y relevancia de diferentes términos en la literatura del campo, facilitando la identificación de áreas prioritarias y desafíos en la investigación.

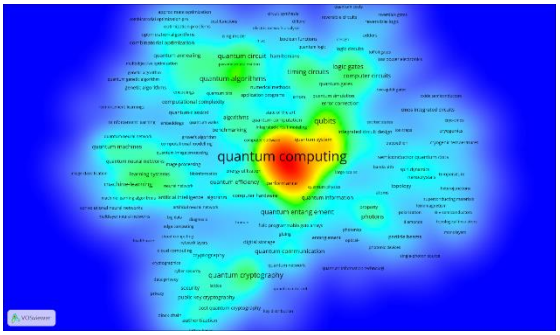

Fig. 16. *Densidad de palabras claves en publicaciones científicas sobre Quantum Computing.*
Fuente: *Elaboración por los autores a partir del programa VOSviewer 1.6.20*

4. CONCLUSIONES

En conclusión, la computación cuántica es una tecnología emergente que tiene el potencial de revolucionar la forma en que procesamos y almacenamos información. A diferencia de la computación clásica, que utiliza bits para representar información, la computación cuántica utiliza qubits, que pueden estar en múltiples estados al mismo tiempo. Esto permite que las computadoras cuánticas realicen cálculos mucho más rápidos y complejos que las computadoras clásicas.

Aunque la computación cuántica todavía se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo, ya se están explorando aplicaciones prácticas en áreas como la criptografía, la simulación de sistemas complejos y la optimización de procesos empresariales. Además, los avances recientes en la investigación de la computación cuántica, como la supremacía cuántica alcanzada por IBM en 2021, sugieren que esta tecnología tiene un futuro brillante.

En resumen, la computación cuántica es una tecnología emocionante y prometedora que tiene el potencial de transformar la forma en que vivimos y trabajamos. A medida que la investigación continúa avanzando, es probable que veamos más y más aplicaciones prácticas de la computación cuántica en el futuro cercano.

REFERENCIAS

[1] Elmundo.es, «1687: El fabuloso legado de Isaac Newton | Ciencia,» 24 03 2009. [En línea]. Available: https://www.elmundo.es/elmundo/2009/03/24/ciencia/1237892374.html. [Último acceso: 2023 07 31].

[2] teresaversyp.com, «Los orígenes de la física cuántica, Max Planck el precursor,» Teresa Versyp, 2017 11 23. [En línea]. Available: https://teresaversyp.com/articulos/origenes-fisica-cuantica/. [Último acceso: 2023 07 31].

[3] v. M. Planck, «FAKSIMILE AUS DEN VERHANDLUNGEN DER DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT,» *Physikalische Blätter,* vol. 4, nº 4, pp. 146-151, 1948.

[4] BBC News Mundo,, «Max Planck, el padre de la teoría cuántica que intentó convencer a Hitler de que permitiera trabajar a los científicos judíos,» 22 04 2019. [En línea]. Available: https://www.bbc.com/mundo/noticias-48025060.

[5] T. y. T. E. Fernández, «Biografia de Max Planck,» En Biografías y Vidas. La enciclopedia biográfica en línea, 2004. [En línea]. Available: https://www.biografiasyvidas.com/biografia/p/planck.htm. [Último acceso: 2023 07 30].

[6] Greelane, «Niels Bohr: voz principal en la creación de mecánica cuántica,» 2019. [En línea]. Available: https://www.greelane.com/es/ciencia-tecnolog%C3%ADa-matem%C3%A1ticas/ciencia/niels-bohr-biographical-profile-2699055/.

[7] Encyclopædia Britannica, «Neils Bohr,» [En línea]. Available: https://www.britannica.com/biography/Niels-Bohr#/media/1/71670/17854. [Último acceso: 2023 06 31].

[8] M. Eckert, «Extending Bohr's Model,» *Establishing Quantum Physics in Munich. SpringerBriefs in History of Science and Technology. ,* 2020.

[9] ECURED, «Arnold Sommerfeld,» 2013. [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Arnold_Sommerfeld#/media/File:Arnold_Johannes_Wilhelm_Sommerfeld.jpeg. [Último acceso: 2023 07 30].

[10] T. y. T. E. Fernández, «Albert Einstein. Biografía,» Biografías y Vidas, 2023. [En línea]. Available: https://www.biografiasyvidas.com/monografia/einstein/.

[11] Quimica.es, «Experimento de Stern y Gerlach,» [En línea]. Available: https://www.quimica.es/enciclopedia/Experimento_de_Stern_y_Gerlach.html. [Último acceso: 2023 07 29].

[12] Fisica Moderna, «Descripción de qué es el Spin y cómo se descubrió,» 2014. [En línea]. Available: https://portafolioiifisicamoderna2015.weebly.com/descripcioacuten-de-queacute-es-el-spin-y-coacutemo-se-descubrioacute.html. [Último acceso: 2023 07 29].

[13] V. Singh, «Werner Heisenberg (1901–1976) his life and science,» *Reson 9,* p. 3–5, 2004.

[14] La Factoria Historica, «WERNER HEISENBERG,» 05 03 2013. [En línea]. Available: https://factoriahistorica.wordpress.com/2013/03/05/werner-heisenberg/. [Último acceso: 2023 07 28].

[15] W. Mückenheim, «A resolution of the Einstein-Podolsky-Rosen paradox.,» *Nuovo Cimento,* vol. 35, p. 300–304, 1982.

[16] J. Bellt, «ON THE EINSTEIN PODOLSKY ROSEN PARADOX,» *Physics,* vol. 1, nº 3, pp. 195-200, 1964.

[17] D. P., «A new notation for quantum mechanics,» *Mathematical Proceedings of the,* vol. 35, nº 3, pp. 416-418, 2008.

[18] S. Jang, «Dirac Notation and Principles of Quantum Mechanics. In: Quantum Mechanics for Chemistry.,» 2023.

[19] NobelPrize.org. , «Paul A.M. Dirac – Facts,» Nobel Prize Outreach AB, 2023. [En línea]. Available: https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/dirac/facts/. [Último acceso: 2023 07 31].

[20] Y. I. Manin., «Mathematics as Metaphor: Selected Essays of Yuri I. Manin,,» *Philosophia Mathematica,* vol. 17, nº 1, pp. 122-123, 2009.

[21] madridmasd.org, «Matematicas y sus fornteras,» 08 01 2023. [En línea]. Available: https://www.madrimasd.org/blogs/matematicas/files/2023/01/media_sizes_full_PT.5.031419.jpeg.

[22] P. Benioff, «Quantum mechanical Hamiltonian models of Turing machines,»

Journal of Statistical Physics, vol. 29, pp. 515-546, 1982.

[23] P. Benioff, «Computación Cuántica,» [En línea]. Available: https://computacioncuanticaufg.wordpress.com/paul-benioff/. [Último acceso: 2023 07 31].

[24] R. P. Feynman, «Simulating Physics with Computers,» vol. 21, nº 6, 1982.

[25] J. Gleick, «Richard Feynman | Biography, Nobel Prize, Books, & Facts,» Encyclopedia Britannica, 2023. [En línea]. Available: https://www.britannica.com/biography/Richard-Feynman.

[26] S. Apostolos., «Hypercomputation: Computing Beyond the Church-Turing Barrier,» 2008. [En línea].

[27] D. Deutsch, «David Deutsch,» The progress Network, 2023. [En línea]. Available: https://theprogressnetwork.org/network/david-deutsch/.

[28] Amazon Web Services, «Exploring Simon's algorithm with Daniel Simon,» Amazon Web Services, 2021. [En línea]. Available: https://aws.amazon.com/es/blogs/quantum-computing/simons-algorithm/.

[29] Amazon.com, «Dan Simon: Books, Biography, latest update,» 2017. [En línea]. Available: https://www.amazon.com/-/es/stores/author/B001HCU2N0.

[30] A. Cortes, «Premio a la computación cuántica que revolucionará los ordenadores,» El País, 2020 3 3. [En línea]. Available: https://elpais.com/ciencia/2020-03-03/premio-a-la-computacion-cuantica-que-revolucionara-los-ordenadores.html.

[31] L. K.grover, «QUANTUM SEARCH ALGORITHM CAN BE IMPROVED,» *International Journal of Quantum Information,* 2011.

[32] L. Grover, «Lov Grover,» alchetron.com, 2023. [En línea]. Available: https://alchetron.com/Lov-Grover#lov-grover-08e19c27-91b8-4fb0-b6d7-b89037176af-resize-750.jpeg.

[33] Qubit Assays, «Qubit Assays | Thermo Fisher Scientific - IE,» 2023. [En línea]. Available: https://www.thermofisher.com/co/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/molecular-spectroscopy/fluorometers/qubit/qubit-assays.html.

[34] D-WAVE, «About D-Wave: the practical quantum computing company,» 2023. [En línea]. Available: https://www.dwavesys.com/company/about-d-wave/.

[35] IBM, «IBM Quantum System One,» 2023. [En línea]. Available: https://research.ibm.com/interactive/system-one/.

[36] R. Chan, «BM unveils the world's first quantum computer that businesses can actually use to solve previously impossible problems,» Business Insider,, 19 3 2019. [En línea]. Available: https://www.businessinsider.com/ibm-unveils-ibm-q-system-one-the-first-commercial-quantum-computer-2019-1.

[37] BBC News Mundo, «Qué es la "supremacía cuántica" que Google asegura haber alcanzado (y por qué algunos lo ponen en duda),» BBC News Mundo, 23 10 2019. [En línea]. Available: https://www.bbc.com/mundo/noticias-50153229.

[38] Dwavesys.com, «Introducing Advantage,» D-Wave, 2023 07 31. [En línea]. Available: https://support.dwavesys.com/hc/en-us/articles/360056364753-Introducing-Advantage.

[39] J. Ranchal, «D-Wave presenta Advantage, una computadora cuántica que supera los 5.000 Qubits,» MuyComputerPRO, 30 09 2020. [En línea]. Available: https://www.muycomputerpro.com/2020/10/01/d-wave-advantage-5-000-qubits.

[40] Teller Report, «IBM announces it has reached quantum supremacy,» Teller Report, 23 11 2021. [En línea]. Available: https://www.tellerreport.com/tech/2021-11-23-ibm-announces-it-has-reached-quantum-supremacy.H1Ebc-t5OK.html.

[41] V. Sabater, «El principio de incertidumbre de Heisenberg,» La Mente es Maravillosa, 23 12 2018. [En línea]. Available: https://lamenteesmaravillosa.com/el-principio-de-incertidumbre-de-heisenberg/.

[42] BBC News Mundo, «Cómo encontraron la forma de salvar al gato de Schrödinger, el experimento más famoso de la física cuántica,» BBC News Mundo, 06 06 2019. [En línea]. Available:

https://www.bbc.com/mundo/noticias-48542209.

[43] O. A. Quispe, «Hacia la mecanica cuantica (Zur Quantenmechanik) - Max Born, Pascual Jordan (1925),» www.academia.edu, 02 2023. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/96762943/Hacia_la_Mecanica_Cuantica_Zur_Quantenmechanik_Max_Born_Pascual_Jordan_1925.

[44] V. A. Conocimiento, «La física cuántica y el largo camino para entenderla | OpenMind,» OpenMind, 14 12 2020. [En línea]. Available: https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/fisica/entender-la-fisica-cuantica/.

[45] BBC News Mundo, «Entrelazamiento cuántico: la primera foto de lo que Einstein describió como una "fantasmagórica acción a distancia",» BBC News Mundo, 16 07 2019. [En línea]. Available: https://www.bbc.com/mundo/noticias-49004666.

[46] BBC News Mundo, «Nobel de Física 2022: Qué es el entrelazamiento cuántico y cómo puede revolucionar la informática,» BBC News Mundo, 9 10 2022. [En línea]. Available: https://www.bbc.com/mundo/noticias-63145145.

[47] Europa.Eu, «Coherencia prolongada para unas mejores aplicaciones de información cuántica,» Europa.Eu, 2023. [En línea]. Available: https://cordis.europa.eu/article/id/418227-maintained-coherence-for-better-quantum-information-applications/es.