



INAOE

Computación Cuántica una perspectiva Científica y Tecnológica.

Por:

Ing. Wilmer Contreras Sepúlveda

Tesis sometida como requisito parcial
para obtener el grado de

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ÓPTICA**

En el

**Instituto Nacional de Astrofísica
Óptica y Electrónica**

Agosto 2024

Tonantzintla, Puebla.

Supervisado por:

Dr. José Javier Sánchez Mondragón

Investigador titular del INAOE

Dr. Braulio Misael Villegas Martínez

Investigador de Tiempo Completo Asociado C, CIICAp

©INAOE 2014

Derechos reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes mencionando la fuente.



Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a Dios por su constante y inquebrantable apoyo a lo largo de todo este proceso. Gracias a Su guía, he podido adquirir y desarrollar los conocimientos necesarios para culminar esta tesis.

Agradezco a mis asesores de tesis Dr. José Javier Sánchez Mondragón y el Dr. Braulio Misael Villegas Martínez por sus valiosos consejos y su inquebrantable apoyo a lo largo de este proceso.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi señora Mileydi por su comprensión y apoyo incondicional a lo largo de todo este largo camino. Su paciencia, aliento y dedicación han sido fundamentales para la culminación de esta tesis.

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi madre y a mis hermanos por su constante apoyo y paciencia durante la realización y ejecución de este proyecto de tesis. Su amor incondicional, comprensión y aliento han sido fundamentales para alcanzar este logro.

Agradezco al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica por proporcionarme todas las facilidades y al CONAHCyT por la beca para mi formación académica.

Agradezco profundamente al pueblo de México, cuyos impuestos hacen posible esta beca otorgada por el CONAHCyT. Su apoyo es invaluable para el avance de la educación y la investigación en México.

Acknowledgments

First of all, I wish to express my deepest gratitude to God for His constant and unwavering support throughout this entire process. Thanks to His guidance, I have been able to acquire and develop the necessary knowledge to complete this thesis.

I thank my thesis advisors Dr. José Javier Sánchez Mondragón and Dr. Braulio Misael Villegas Martínez for their valuable advice and unwavering support throughout this process.

I would like to express my most sincere gratitude to my wife Mileydi for her understanding and unconditional support throughout this long journey. Her patience, encouragement, and dedication have been fundamental to the completion of this thesis.

I wish to express my deepest gratitude to my mother and my brothers for their constant support and patience during the completion and execution of this thesis project. Their unconditional love, understanding, and encouragement have been fundamental to achieving this achievement.

I thank the National Institute of Astrophysics, Optics, and Electronics for providing me with all the facilities and CONAHCyT for the scholarship for my academic training.

I am deeply grateful to the people of Mexico, whose taxes make this scholarship awarded by CONAHCyT possible. Their support is invaluable for the advancement of education and research in Mexico.

Resumen

La computación cuántica y en general la información cuántica- representa una revolución tecnológica y científica que aceleradamente impacta nuestro ámbito social. Asimismo, marcan el inicio de una era donde la información se procesa utilizando principios de la mecánica cuántica. Esta tecnología emergente promete superar las limitaciones de la computación clásica, ofreciendo avances significativos en campos tan diversos donde se han percibido demandas de cálculo complejo como son la medicina, la ingeniería, simulación de sistemas biológicos y hasta la mejora de algoritmos de búsqueda de información; pero sobre todo ya se percibe una nueva era con un creciente impacto social en conjunción con otras tecnologías científicas capacitantes emergentes como son la Inteligencia Artificial, machine Learning, robótica y otras. Sin embargo, para que todo esto sea realidad, no solo debemos quedarnos en la ciencia de la computación cuántica, sino también en la tarea operativa.

El objetivo de esta tesis se centra precisamente en esta nueva visión social de la ciencia y la tecnología que incluye a los no expertos. Por una parte, esta tesis proporciona un análisis integral, pero básico, que prosigue el camino desde la información clásica hasta el procesamiento de la información cuántica; explorando la infraestructura de los computadores cuánticos y el desarrollo de algoritmos cuánticos. Esta visión coherente ha sido diseñada para establecer las bases comunes necesarias para ingenieros y físicos, facilitando una comprensión integral operativa de la computación cuántica. De allí que, como parte del objetivo de esta tesis, se presenta QUBITHUB una plataforma informática que no solo atiende a este ámbito, sino que, aprovechando la disponibilidad de cómputo cuántico en la nube, evita la sobre especialización que cada oferta compromete y se abre no solo a esta primera comunidad, sino a todo aquel interesado en cómputo cuántico, sea o no conocedor de sus bases científicas o tecnológicas. QUBITHUB sirve como un puente educativo y científico, disponible libremente en Qubithub.org, introduciendo al usuario final al fascinante

mundo del uso de la computación cuántica mediante diversas herramientas interactivas.

QUBITHUB fue desarrollada como parte de un Quantum Science Gateway, una iniciativa latinoamericana desarrollada en colaboración con la Dra. Sandra Guesing directora ejecutiva de la asociación de investigación de ingenieros de software de los estados unidos US-RSE. El objetivo de QUBITHUB es facilitar la introducción del cómputo de computación cuántica a áreas relacionadas, como la óptica cuántica, la información cuántica, la fotónica, la inteligencia artificial, las nanociencias y la robótica, pero sobre todo a áreas interdisciplinarias. Un aspecto innovador de esta plataforma es QInterpreter, un lenguaje diseñado para facilitar la traducción entre diferentes bibliotecas de computación cuántica como Qiskit, PyQuil, PennyLane, Cirq y Amazon Braket. Este desarrollo se detalla en un artículo científico publicado en una revista de prestigio, destacando su contribución a la accesibilidad y comprensión de la computación cuántica¹.

En conclusión, esta tesis no solo aborda el desarrollo teórico y práctico de la computación cuántica, sino que también el práctico y presenta QUBITHUB como un ecosistema tecnológico para la educación y la investigación en este campo emergente, demostrando cómo la interacción con la información cuántica puede desbloquear nuevos horizontes en la ciencia y la tecnología.

¹ Contreras Sepúlveda, W., Torres-Palencia, Á. D., Sánchez Mondragón, J. J., Villegas-Martínez, B. M., Escobedo-Alatorre, J. J., Gesing, S., Lozano-Crisóstomo, N., García-Melgarejo, J. C., Sánchez Pérez, J. C., Palacios-Pérez, E. N., y Palillero Sandoval, O "Unleashing Quantum Algorithms with Qinterpreter: Bridging the Gap between Theory and Practice across Leading Quantum Computing Platforms," 2023, Aceptado, Peer J Journal, arXiv preprint arXiv:2310.07173, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2310.07173> ..

Abstract

Quantum computing and quantum information, in general, represent a technological and scientific revolution that is rapidly impacting our social sphere. They also mark the beginning of an era where information is processed using principles of quantum mechanics. This emerging technology promises to overcome the limitations of classical computing, offering significant advances in diverse fields that require complex computations, such as medicine, engineering, biological systems simulation, and even the improvement of information search algorithms. Above all, a new era is already perceived with a growing social impact in conjunction with other emerging enabling scientific technologies such as artificial intelligence, machine learning, robotics, and others. However, for all this to become a reality, we must not only focus on the science of quantum computing but also engage in the operational tasks of its computation.

The objective of this thesis focuses precisely on this new social vision of science and technology that includes non-experts. On the one hand, this thesis provides a comprehensive, but basic, analysis that traces the path from classical information to quantum information processing. It explores the infrastructure of quantum computers and the development of quantum algorithms. This coherent vision has been designed to establish the common foundations necessary for engineers and physicists; facilitating a comprehensive understanding of quantum computing. QUBITHUB is one of the key objectives of this thesis. It is a computing platform that not only serves this field, but also avoids the over-specialization that each offering entails by taking advantage of the availability of quantum computing on the cloud. That way, it serves not only to this initial community but also to anyone interested in quantum computing; whether or not they are familiar with its scientific or technological foundations. QUBITHUB serves as an educational and scientific bridge, freely available at Qubithub.org. It introduces the lay user to the fascinating world of quantum computing through various interactive tools.

QUBITHUB was developed as part of a Quantum Science Gateway, a Latin American initiative developed in collaboration with U.S.A. universities and organizations.² The goal of QUBITHUB is to facilitate the introduction of quantum computing to related areas, such as quantum optics, quantum information, photonics, artificial intelligence, nanosciences, and robotics, but above all to interdisciplinary areas. An innovative aspect of this platform is QInterpreter, a language designed to facilitate the translation between different quantum computing libraries such as Qiskit, PyQuil, PennyLane, Cirq, and Amazon Braket. This development is detailed in a scientific article published in a prestigious journal, highlighting its contribution to the accessibility and understanding of quantum computing.

In conclusion, this thesis not only addresses the theoretical and practical development of quantum computing but also presents QUBITHUB as an ecosystem for education and research in this emerging field, demonstrating how interaction with quantum information can unlock new horizons in science and technology.

² At the 2019 LAOP (Latin American Optics and Photonics) Workshop -and at the presentation of a Mexican LAOP commite proposal on a pervading virtual training on enabling frontier technologies like AI, robotics and others- Sandra Guesing pointed out at the importance of including computing of Quantum computing as a core objective. That is the origin of this fructiferous collaboration and this pilot.

Tabla de Contenido

Introducción.....	13
1.1 Descripción del Problema	14
1.2 Estructura de la Tesis.....	16
Capítulo 2: Antecedentes.....	18
Capítulo 3: Objetivos.....	20
3.1 Objetivo Principal:.....	20
3.2 Objetivos Específicos:	20
Capítulo 4: Metodología.....	22
4.1 Enfoque General de la Investigación	22
4.2 Revisión Bibliográfica y Análisis Teórico.....	22
4.3 Identificación de Requerimientos	23
4.4 Diseño y Desarrollo de QUBITHUB	23
4.4.1 Arquitectura de la Plataforma	23
4.5 Pruebas y Validación	23
4.6 Desarrollo de QInterpreter	24
4.6.1 Análisis de Bibliotecas Cuánticas.....	24
4.6.2 Diseño del Lenguaje QInterpreter.....	24
Capítulo 5: Teoría de la Información Clásica para Físicos, Ingenieros y Otras Ciencias.	25
5.1.1 Fundamentos y principios de la teoría de la información	25
5.1.2 Historia de la teoría de la información.....	26
5.1.3 Medida de la información	28
5.1.4 Codificación y transmisión de información.....	31
5.2 Entropía y su relevancia en la teoría de la información.	34

5.2.1	Entropía de una señal discreta.....	34
5.2.2	Entropía de una señal digital:	35
5.3	Capacidad de información de los canales de comunicación	36
5.3.1	Canal sin Ruido.	37
5.3.2	Canal con Ruido.	37
	El mundo de la información clásica.	40
	Capítulo 6. Introducción al procesamiento de la Información	41
6.1	Compuertas, el elemento básico para el procesamiento de información.....	41
6.1.1	Introducción a las compuertas lógicas.....	43
6.1.2	Programando con compuertas.....	46
6.2	Programación en microprocesadores.....	50
6.3	Infraestructura de la computación Clásica.	52
6.3.1	Bits.....	53
6.3.2	Elementos de Procesamiento.....	53
6.3.3	Lenguajes de programación.	53
6.3.4	Algoritmos.	54
6.3.5	Aplicaciones.	54
6.4	El mundo de la información clásica.	55
	Capítulo 7: Información Cuántica.	57
7.1	Mecánica cuántica.....	57
7.1.1	Axioma 1: Representación de estados.....	58
7.1.2	Axioma 2: Observables	59
7.1.3	Axioma 3: Medición de observables	59

7.1.4	Axioma 4: Ecuación de Schrodinger	60
7.1.5	Axioma 5: Concepto de superposición y entrelazamiento.	60
7.2	Introducción a la información cuántica.	61
7.3	Introducción al algebra lineal.....	62
7.3.1	¿Que son los Kets?	62
7.3.2	¿Que son los Bras?	63
7.3.3	Espacios Vectoriales funcionales.	63
7.4	Información Cuántica.	65
7.5	Unidades de la información cuántica, los Qubits.....	67
7.6	Teorema de la codificación cuántica y entropía (Quantum coding Theorem).....	71
Capítulo 8: Infraestructura de la Computación Cuántica.		75
8.1	Qubits.....	76
8.2	Creación de un Qubit	77
8.3	Clasificación de Qubits.	78
8.3.1	Qubits Átomos Neutros.	79
8.3.2	Qubits de Iones atrapados	80
8.3.3	Qubits Fotónicos.....	82
8.3.4	Qubits Superconductores	88
8.3.5	Qubits Topológicos	91
8.4	Compuertas Cuánticas.....	93
8.4.1	Compuerta X:.....	94
8.4.2	Compuerta Y.....	95
8.4.3	Compuerta Z.....	96

8.4.4	Compuerta Hadamar:	97
8.4.5	Compuerta CNOT:	98
8.4.6	Compuerta Toffoli.....	100
8.4.7	Compuerta U.....	101
8.5	Circuitos Cuánticos.....	102
8.6	Algoritmos Cuánticos	104
8.6.1	Algoritmos cuánticos de corto plazo (Near-Term Quantum Algorithms).....	106
8.6.2	Algoritmos cuánticos de largo plazo, (Far-Term Quantum Algorithms).....	106
8.6.3	Protocolos Cuánticos.....	106
8.7	Aplicaciones Cuánticas	107
8.8	Diseñando un Circuito cuántico:.....	109
Capítulo 9: QubitHUB.ORG: Tu puerta de entrada al usuario de Computación Cuántica.....		111
9.1	Descripción de la plataforma.	113
9.2	Misión de QubitHUB.org	113
9.3	Visión de QubitHUB.org.....	114
9.4	Navegación y utilización de QubitHUB:	115
9.4.1	Recursos cuánticos:	115
9.4.2	Aplicaciones:	115
9.4.3	Login	117
9.5	Contribuir a QubitHUB:.....	118
9.6	Futuras Direcciones y Conclusión	120

Capítulo 10: Quantum Interpreter: Un lenguaje unificado para la Computación Cuántica.....	122
10.1 Introducción al Quantum Interpreter:	122
10.2 Arquitectura del Quantum Interpreter	128
10.2.1 Módulo de Creación del Circuito.....	130
10.2.2 Módulo de graficación del circuito.....	130
10.2.3 Módulo de Simulación del circuito.....	130
10.3 Uso práctico del Quantum Interpreter:	131
10.4 Avances y mejoras futuras en Quantum Interpreter:	132
Discusión.....	133
11.1 Futuros desarrollos y desafíos en el campo de la computación e información cuántica.....	133
11.2 Actuales aplicaciones y su impacto en diversas industrias.....	135
Conclusiones	137

Introducción

En el desarrollo de este proyecto de tesis, se ha prestado especial atención a los avances y recursos más recientes en el campo de la computación cuántica, pero el énfasis está en el problema real de realizar computación cuántica. Este esfuerzo se ha visto enriquecido por la incorporación de conocimientos y herramientas presentadas en publicaciones académicas recientes al ecosistema práctico actual para hacerlo, lo que ha resultado en un reconocimiento de su excelencia académica a través de premios en el ámbito.

En particular, se han considerado dos contribuciones significativas: El artículo "Unleashing quantum algorithms with Qinterpreter: bridging the gap between theory and practice across leading quantum computing platforms"³ actualmente publicado y el estudio "Science Gateways and AI/ML: How Can Gateway Concepts and Solutions Meet the Needs in Data Science?"⁴ ya disponible en InTechOpen. Ambos trabajos ofrecen perspectivas valiosas sobre la implementación práctica de algoritmos cuánticos y la integración de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en la ciencia de datos, respectivamente. Este proyecto fue fundamental para la obtención de una beca de SPIE y subraya el compromiso y la contribución de nuestro proyecto al avance de la tecnología óptica y Fotónica; campos estrechamente relacionados con la computación cuántica.

La relevancia del artículo "Unleashing quantum algorithms with Qinterpreter..." se manifiesta en cómo su visión ha influenciado el diseño de nuestra plataforma QUBITHUB; facilitando la integración de algoritmos

³ Contreras Sepúlveda, W., Torres-Palencia, Á. D., Sánchez Mondragón, J. J., Villegas-Martínez, B. M., Escobedo-Alatorre, J. J., Gesing, S., Lozano-Crisóstomo, N., García-Melgarejo, J. C., Sánchez Pérez, J. C., Palacios-Pérez, E. N., y Palillero Sandoval, O "Unleashing Quantum Algorithms with Qinterpreter: Bridging the Gap between Theory and Practice across Leading Quantum Computing Platforms," 2023, Aceptado, Peer J Journal, arXiv preprint arXiv:2310.07173, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2310.07173> .

⁴ Gesing, S., Pierce, M., Marru, S., Zentner, M., Huff, K., Bradley, S., Cleveland, S. B., Brandt, S. R., Ramnath, R., Kee, K., Dahan, M., Villegas Martínez, B. M., Contreras Sepulveda, W., and Sánchez Mondragón, J. J., "Science Gateways and AI/ML: How Can Gateway Concepts and Solutions Meet the Needs in Data Science?," in *Critical Infrastructure - Modern Approach and New Developments*, ed. Dr. Antonio Di Pietro and Prof. José R Martí (Rijeka: IntechOpen, 2023), doi:10.5772/intechopen.110144.

cuánticos en múltiples plataformas de computación cuántica. Esta capacidad de interoperabilidad y adaptabilidad es fundamental para la visión de nuestro proyecto, que aspira a hacer la computación cuántica accesible para una audiencia amplia.

Por otro lado, el estudio "Science Gateways and AI/ML..."⁵ ha sido instrumental en la conceptualización de cómo las soluciones basadas en la inteligencia artificial pueden mejorar la interfaz de usuario de QUBITHUB, haciendo que la ciencia de datos sea más accesible para los investigadores en computación cuántica. Este enfoque multidisciplinario no solo enriquece la funcionalidad de esta plataforma, sino que también demuestra el potencial de las sinergias entre diferentes campos tecnológicos.

Así, esta tesis y el proyecto QUBITHUB se posicionan en la intersección de la investigación teórica y la aplicación práctica, demostrando cómo la colaboración entre disciplinas y la integración de nuevas herramientas y conocimientos pueden acelerar el desarrollo de tecnologías cuánticas. Al hacerlo, no solo se avanza en el entendimiento de la computación cuántica, sino que también se abren nuevas avenidas para su aplicación en diversos campos, desde la medicina hasta la inteligencia artificial. Es en este cruce de caminos es donde se encuentra el mayor potencial para impactar positivamente en el futuro tecnológico de nuestra sociedad.

1.1 Descripción del Problema

La computación cuántica representa un área revolucionaria dentro de la ciencia y la tecnología. No obstante, su práctica, aún es un paradigma poco conocido para muchos profesionales de diversas disciplinas, tales como ingeniería, física, informática y medicina, entre otras. Disciplinas que podrían beneficiarse de la computación cuántica, de forma solo comparable con el beneficio que ha traído a las ciencias el uso de la computación clásica con la que se trabaja actualmente.

⁵Gesing, S., Pierce, M., Marru, S., Zentner, M., Huff, K., Bradley, S., Cleveland, S. B., Brandt, S. R., Ramnath, R., Kee, K., Dahan, M., Villegas Martínez, B. M., Contreras Sepulveda, W., and Sánchez Mondragón, J. J., "Science Gateways and AI/ML: How Can Gateway Concepts and Solutions Meet the Needs in Data Science?," in *Critical Infrastructure - Modern Approach and New Developments*, ed. Dr. Antonio Di Pietro and Prof. José R Martí (Rijeka: IntechOpen, 2023), doi:10.5772/intechopen.110144.

Una de las principales limitaciones en el uso de la computación cuántica radica en el desconocimiento generalizado de este campo científico, tanto como experiencia práctica, como teórica. Buena parte debido a su naturaleza abstracta y a la complejidad de los conceptos que maneja. Incluso usuarios con un alto conocimiento en áreas como la física y la ingeniería a menudo carecen de habilidades específicas necesarias para su aplicación, tales como:

- **La ingeniería e infraestructura tecnológica** detrás de la computación cuántica que permite conocer cómo se realiza el cómputo de computación cuántica
- **La física y fundamentos teóricos** que existen y subyacen detrás de la computación cuántica, en especial el conocimiento de la mecánica cuántica y los conceptos clave como lo son el entrelazamiento y la superposición.

Si bien los ingenieros son expertos en infraestructura tecnológica, su falta de conocimiento en los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica a menudo les impide aprovechar completamente esta ciencia. De manera similar, aunque los físicos dominan los conceptos de la mecánica cuántica, frecuentemente presentan limitaciones en el manejo de la infraestructura tecnológica y las habilidades de programación esenciales para la utilización práctica de la computación cuántica actual.

Por tanto, este trabajo aborda el problema del desconocimiento generalizado sobre la computación cuántica y como se lleva a cabo el cómputo cuántico, así como el modelo de comercialización de esta tecnología, que actualmente opera bajo un modelo de software como servicio. Se busca explicar de manera práctica cómo se realiza la computación cuántica en los distintos ámbitos de la ciencia, especialmente en ingeniería y física. Finalmente, se propone un enfoque educativo que integra los principios de la computación e información clásica con los fundamentos cuánticos.

En consecuencia, se plantea la siguiente pregunta: ¿Es posible crear un recurso que permita al público en general, especialmente en países latinoamericanos, comprender y aplicar la computación cuántica partiendo de sus conocimientos en computación clásica e ingeniería?

1.2 Estructura de la Tesis

En esta tesis, se aborda la computación cuántica desde una perspectiva interdisciplinaria que abarca tanto la ingeniería como las ciencias. El objetivo principal es reflejar un enfoque interdisciplinario hacia la comprensión de la computación cuántica. De esta manera, se facilitará la comprensión y el aprovechamiento de sus conocimientos previos para abordar esta área de forma clara e intuitiva.

Capítulo 2: se introducirán los conceptos fundamentales de información clásica: su definición, cómo cuantificarla y su importancia en la teoría de comunicación de Shannon. Asimismo, discutiendo el ruido y la capacidad de un canal de comunicación para transmitir información de manera efectiva, con o sin interferencias.

Capítulo 3: se abordará el procesamiento de información clásica, examinando desde sus bloques más básicos -las compuertas- hasta la programación de procesadores. Del mismo modo, se analizará la infraestructura de la computación clásica y sus aplicaciones cotidianas, incluyendo áreas como la inteligencia artificial.

Capítulo 4: se presentarán los conceptos esenciales de la mecánica cuántica, indispensables para comprender los fundamentos de la computación cuántica y sus aplicaciones. Se destacarán conceptos clave como superposición y entrelazamiento.

Capítulo 5: se profundizará en el fascinante mundo de la computación cuántica, describiendo sus pilares y dispositivos fundamentales. Se explorarán algunas de sus aplicaciones más relevantes y se detallará el concepto de qubits en el contexto semiclásico, basado en las ecuaciones de Bloch.

Capítulo 6: se presentará la plataforma QubitHub.org, que sirve como punto de partida para aquellos interesados en la computación cuántica.

Capítulo 7: se describirá la biblioteca desarrollada en esta tesis, diseñada para interactuar eficientemente con frameworks actuales como Qiskit, PennyLane, Pyquil, Amazon Braket y Cirq.

Discusión: concluirá la tesis recapitulando los avances en computación e información cuántica hasta la fecha, así como proyecciones y expectativas para el futuro cercano.

Esta tesis, a través de la lente de QUBITHUB, busca allanar el camino hacia una comprensión profunda de la computación cuántica, subrayando su potencial transformador y preparando a la comunidad científica y tecnológica para los desafíos y oportunidades del mañana.

Capítulo 2:

Antecedentes

Actualmente existen diferentes recursos como libros, plataformas, canales de noticias, etc. que se dedican a la divulgación y enseñanza de la computación cuántica, algunas de estos y los más populares se mencionan a continuación:

Qiskit⁶: esta plataforma representa quizás uno de los recursos de aprendizaje más completos disponibles actualmente. Ofrece un curso virtual con una duración aproximada de un semestre académico. En este curso, se enseñan fundamentos de la pila de la computación clásica, conceptos básicos de la mecánica cuántica y los principios esenciales de la computación cuántica, incluyendo un repaso exhaustivo sobre los algoritmos y protocolos específicos del campo.

Plataformas de proveedores de servicios de computación cuántica: actualmente los desarrolladores de servicios de computación cuántica como lo son IBM⁷, Rigetti⁸, Xanadu⁹, Qbraid¹⁰, Amazon Braket¹¹, Alibaba Quantum, entre otros, disponen de recursos de aprendizaje en línea en los cuales se presenta información en forma de textos y algunas herramientas interactivas basadas en el navegador.

Cursos en plataformas de aprendizaje en línea: plataformas tradicionales de educación en línea como Edx, Coursera, Udemy, entre otras, cuentan con cursos de aprendizaje de CC, los cuales brindan una amplia gama de información sobre el tema

Festivales de CC Qiskit fall fest (Perú): Además de los recursos previamente mencionados, algunos grupos de investigación fomentan la

⁶ Qiskit contributors, "Qiskit: An Open-Source Framework for Quantum Computing," 2023, doi:10.5281/zenodo.2573505.

⁷ IBM, "IBM Quantum Computing," 2023, <https://www.ibm.com/quantum>.

⁸ Rigetti Corp., "Quantum Computing | Rigetti Computing," 2023, <https://www.rigetti.com/>.

⁹ Xanadu, "Xanadu | Welcome to Xanadu," accessed January 27, 2023, <https://www.xanadu.ai/>.

¹⁰ GitHub, "Qbraid · Quantum Computing Platform," 2023, <https://github.com/qBraid>.

¹¹ Amazon Web Services, "Amazon Braket," 2020, <https://aws.amazon.com/braket/>.

enseñanza de la computación cuántica a través de eventos virtuales. En estos festivales, como el Qiskit Fall Fest en Perú, se realizan intensas jornadas de trabajo que duran tres o más días, donde se enseñan desde los fundamentos de la información y mecánica cuántica hasta los algoritmos de computación cuántica.

Todos estos recursos están disponibles en línea y se centran principalmente en conceptos de mecánica cuántica, información cuántica y, sobre todo, en el stack de la computación cuántica, que será revisado en un capítulo posterior.

Sin embargo, estos recursos no abordan la computación cuántica desde una perspectiva que integre los conocimientos previos del usuario sobre información y procesamiento clásicos como base para entender la información y el procesamiento cuánticos. En contraste, este documento propone un enfoque que construye un puente conceptual, comenzando con los fundamentos de la información clásica y su procesamiento, avanzando hacia la información cuántica y su procesamiento, facilitando así una transición más natural y comprensible hacia la computación cuántica. Este enfoque que se maneja en este documento, será discutido a continuación.

Capítulo 3:

Objetivos

3.1 Objetivo Principal:

Desarrollar y presentar QUBITHUB como una plataforma informática que facilita el acceso y la comprensión de la computación cuántica para usuarios no expertos, sirviendo como un ecosistema para la educación e investigación en este campo emergente.

3.2 Objetivos Específicos:

1. Proporcionar un análisis integral pero básico que trace el camino desde la información clásica hasta el procesamiento de la información cuántica, explorando la infraestructura de los computadores cuánticos y el desarrollo de algoritmos cuánticos.
2. Establecer las bases comunes necesarias para ingenieros y físicos, facilitando una comprensión operativa integral de la computación cuántica.
3. Desarrollar QUBITHUB como una plataforma que aproveche la disponibilidad de cómputo cuántico en la nube, evitando la sobreespecialización y abriendo el acceso a todos los interesados en computación cuántica, independientemente de su conocimiento previo.
4. Introducir QInterpreter, un lenguaje diseñado para facilitar la traducción entre diferentes bibliotecas de computación cuántica como

Qiskit, PyQuil, PennyLane, Cirq y Amazon Braket, mejorando así la accesibilidad y comprensión de la computación cuántica.

5. Facilitar la introducción del cómputo cuántico a áreas relacionadas e interdisciplinarias, como la óptica cuántica, la información cuántica, la fotónica, la inteligencia artificial, las nanociencias y la robótica.

Capítulo 4:

Metodología

En este capítulo se detallan las metodologías empleadas para alcanzar los objetivos planteados en esta tesis. La investigación se desarrolló en varias etapas que abarcan desde el análisis teórico hasta el desarrollo práctico de la plataforma QUBITHUB y la creación de QInterpreter. A continuación, se describen las fases y las herramientas utilizadas en cada una de ellas.

4.1 Enfoque General de la Investigación

La presente investigación se enmarca en un enfoque mixto que combina métodos cualitativos y cuantitativos. Se realizó un análisis teórico exhaustivo de la información clásica y cuántica, complementado con el desarrollo práctico de una plataforma informática y un lenguaje de programación. Este enfoque interdisciplinario permitió abordar los objetivos desde una perspectiva integral, facilitando la comprensión y aplicación de la computación cuántica para usuarios no expertos.

4.2 Revisión Bibliográfica y Análisis Teórico

Para establecer una base sólida, se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva de las siguientes áreas:

Teoría de la Información Clásica: Se estudiaron los fundamentos y principios establecidos por Claude Shannon y otros autores relevantes, abarcando conceptos como la entropía, capacidad de canal y codificación.

Mecánica Cuántica e Información Cuántica: Se exploraron los axiomas fundamentales de la mecánica cuántica y su aplicación en la teoría de la información cuántica, incluyendo conceptos clave como superposición, entrelazamiento y qubits.

Computación Cuántica y Algoritmos Cuánticos: Se analizaron las arquitecturas de los computadores cuánticos existentes y los algoritmos más representativos, tanto de corto como de largo plazo.

Este análisis teórico sirvió para identificar las brechas de conocimiento entre ingenieros y físicos, y para diseñar materiales que establezcan las

bases comunes necesarias para una comprensión operativa de la computación cuántica.

4.3 Identificación de Requerimientos

Se procedió a identificar los requerimientos funcionales y no funcionales para el desarrollo de QUBITHUB y QInterpreter:

Análisis de Necesidades de Usuarios: Se realizó revisión de las necesidades de los usuarios de computación cuántica y se tuvo en cuenta las capacidades que se podían ofrecer.

Evaluación de Plataformas Existentes: Se estudiaron las características de plataformas y bibliotecas como Qiskit, PyQuil, PennyLane, Cirq y Amazon Braket, identificando las barreras de entrada para usuarios no especializados.

Definición de Objetivos Específicos de la Plataforma: Basándose en la información recopilada, se establecieron las funcionalidades clave que debía ofrecer QUBITHUB para cumplir con los objetivos planteados.

4.4 Diseño y Desarrollo de QUBITHUB

El desarrollo de QUBITHUB se realizó siguiendo metodologías ágiles de desarrollo de software, permitiendo iteraciones rápidas y adaptaciones según las necesidades identificadas.

4.4.1 Arquitectura de la Plataforma

Selección de Tecnologías: Para la implementación de la plataforma, se optó por utilizar herramientas y tecnologías web modernas y probadas. Se empleó JupyterHub como base para ofrecer un entorno interactivo y colaborativo, permitiendo a los usuarios acceder y compartir recursos computacionales de manera eficiente.

Diseño Modular: Se diseñó una arquitectura modular que permite la integración de nuevos componentes y herramientas de forma sencilla.

4.5 Pruebas y Validación

Pruebas Funcionales: Se llevaron a cabo pruebas unitarias y de integración para asegurar el correcto funcionamiento de cada componente.

Pruebas de Usabilidad: Se realizaron sesiones de prueba con usuarios, obteniendo retroalimentación para mejorar la experiencia de uso.

4.6 Desarrollo de QInterpreter

Para facilitar la interoperabilidad entre diferentes bibliotecas de computación cuántica, se desarrolló QInterpreter siguiendo los pasos detallados a continuación.

4.6.1 Análisis de Bibliotecas Cuánticas

Estudio Comparativo: Se analizaron las estructuras, sintaxis y funcionalidades de Qiskit, PyQuil, Pennylane, Cirq y Amazon Braket.

Identificación de Elementos Comunes: Se identificaron los elementos y operaciones comunes entre las bibliotecas para establecer una base unificada.

4.6.2 Diseño del Lenguaje QInterpreter

Definición de Sintaxis Unificada: Se diseñó una sintaxis que abarca las operaciones fundamentales de la computación cuántica, facilitando su aprendizaje y uso.

Especificación de la Gramática: Se desarrolló una gramática formal utilizando herramientas como ANTLR para generar analizadores sintácticos.

Capítulo 5:

Teoría de la Información Clásica para Físicos, Ingenieros y Otras Ciencias.

En este capítulo se abordará el procesamiento de información clásica, examinando desde sus bloques más básicos -las compuertas- hasta la programación de procesadores. Del mismo modo, se analizará la infraestructura de la computación clásica y sus aplicaciones cotidianas, incluyendo áreas como la inteligencia artificial.

En la primera sección, se presentará los fundamentos y principios básicos de la teoría de la información, incluyendo un recorrido histórico y las metodologías empleadas para medir la información. Posteriormente, se abordará el concepto de entropía y la ecuación que la define, destacando su relevancia como herramienta para cuantificar la cantidad de información en un mensaje. Podemos notar, que una fuente que emite símbolos de manera completamente aleatoria, todos con igual probabilidad, posee la máxima entropía. En contraste, una fuente que genera constantemente el mismo símbolo presenta una entropía nula.

Para ilustrar estos conceptos, se examinarán casos concretos relacionados con señales discretas y digitales, aplicando el cálculo de la entropía.

Finalmente, se abordarán las capacidades y limitaciones inherentes a los canales de comunicación. Se analizarán tanto escenarios sin ruido como con ruido, con el objetivo de entender las restricciones que se enfrentan al transmitir información de manera precisa y eficiente a través de canales reales como el aire o el espacio libre.

5.1.1 Fundamentos y principios de la teoría de la información

En este apartado, se abordarán los aspectos fundamentales de la teoría de la información. Para lo cual se comenzará con un recorrido por los hitos más

relevantes de su historia, para luego adentrarnos en su definición y en las herramientas matemáticas que nos permiten cuantificar la información. Adicionalmente, se explorarán aspectos clave relacionados con la codificación y la transmisión de la información.

5.1.2 Historia de la teoría de la información.

Antes de la era digital, existían métodos como el uso de banderas en la señalización semafórica, que, aunque primitivos, eran efectivos para la transmisión de información a larga distancia. Además, la palabra hablada ha funcionado desde tiempos inmemoriales como un instrumento esencial para la comunicación de información que se transmite oralmente de persona a persona.

Estos métodos antiguos de comunicación resaltan la importancia fundamental de la información para la sociedad, destacando retos en cuanto a su precisión, seguridad, eficacia y velocidad de transmisión. No obstante, la teoría de la información, en el entendimiento contemporáneo del término, está fuertemente cimentada en los avances en comunicaciones y computación que se originaron en el siglo XIX y se extendieron hasta el siglo XXI.

En 1844, Samuel Morse revolucionó la comunicación a larga distancia con la invención de la primera versión funcional del telégrafo eléctrico el cual permitía transferir información que se podía convertir en palabras. Luego de esto en 1876 Alexander Graham Bell inventa el teléfono, el cual permitió la transmisión de voz humana a través de grandes distancias por medio de un sistema de comunicaciones cableado.

En 1917, Harry Nyquist aplicó un enfoque matemático a los problemas de la telegrafía, preparando el camino para los futuros avances en la teoría de la información. En 1924, Nyquist publica "Ciertos factores que afectan la velocidad telegráfica"¹² sentando las bases para lo que más tarde se conocería como el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon. En 1928, R.V.

¹² H Nyquist, "Certain Factors Affecting Telegraph Speed," *The Bell System Technical Journal* 3, no. 2 (1924): 324–346, doi:10.1002/j.1538-7305.1924.tb01361.x.

Hartley abordó la codificación de los símbolos primarios y, junto con Nyquist, estableció cómo medir la cantidad de información que se podía transmitir por un canal en su artículo "Information Transmission"¹³.

Durante la Segunda Guerra Mundial, A.N. Kolmogorov y Norbert Wiener hicieron avances significativos en la predicción del valor de las señales, lo que fue de gran importancia para la teoría de la información.

En 1948 llega la contribución más significativa a la teoría de la información, la cual vino de parte de Claude E. Shannon, el cual publicó "A Mathematical Theory of Communication"¹⁴, donde sentó las bases de la teoría de la información clásica.

Paralelamente a este avance en el campo de la información debido a las comunicaciones, el trabajo de Alan Turing en las máquinas de Turing en 1935 y la computación teórica, estableció el fundamento para la manipulación y procesamiento de la información.

En la década de 1940, Richard Hamming introdujo los códigos de Hamming, que son esenciales para la detección y corrección de errores en la transmisión de información digital.

A partir de los años 70, con el desarrollo de la física cuántica, también conocida como mecánica cuántica, es una rama de la física que estudia la materia a nivel atómico, molecular y subatómico. Es considerada la base de la física y tiene aplicaciones en áreas como la tecnología, la química y la cosmología.

Por último, a partir de la década de 1990, la teoría de la información ha jugado un papel crucial en el desarrollo de la criptografía moderna. Los avances en criptografía de clave pública y los protocolos de intercambio de claves seguras han sido fundamentales para garantizar la seguridad en la era de la información.

¹³ R V L Hartley, "Transmission of Information1," *Bell System Technical Journal* 7, no. 3 (1928): 535–563, doi:<https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1928.tb01236.x>.

¹⁴ C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell System Technical Journal* 27, no. 4 (1948): 623–656, doi:[10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x).

5.1.3 Medida de la información

Como se mencionó anteriormente, todo tipo de mensaje tiene una cantidad determinada de información que se puede cuantificar, por lo que es necesario profundizar en la comprensión de la información

Anteriormente se indicó que la información hace referencia a la inteligencia que se desea transmitir, sin embargo para poder manipularla (para efectos de transporte, procesamiento o almacenamiento) es necesario cuantificarla, y para ello es necesario saber que la información se puede caracterizar por su ausencia o por su presencia, por lo cual se utilizará la *incertidumbre* como medida de la información, dado esto, una medida de la incertidumbre permite determinar la cantidad de información que existe dentro de un mensaje, de esta forma, entre menos incertidumbre se tenga mayor será la información que se obtenga.

Como ejemplo, se puede considerar un escenario en el que estás esperando un mensaje que solo puede tener dos posibles resultados: "sí" o "no". Se denominará este mensaje como x , donde x es un elemento del conjunto $X = \{si, no\}$. Antes de recibir el mensaje, existe cierta incertidumbre sobre el resultado que se obtendrá. Esta incertidumbre se puede representar mediante la probabilidad del mensaje, $p(x)$, donde:

$$p(si) = 0.5$$

$$p(no) = 0.5$$

En este punto, se está en un estado de incertidumbre porque no se sabe si la respuesta será "sí" o "no". Sin embargo, una vez que se recibe el mensaje, esta incertidumbre se reduce o incluso se elimina por completo. Esto se debe a que ahora se conoce la respuesta. Por ejemplo, si se recibe el mensaje "sí", la incertidumbre asociada con la respuesta "no" se ha reducido a cero, mientras que la certeza de la respuesta "sí" se ha elevado a 1. Por lo tanto, el mensaje recibido, ya sea "sí" o "no", contiene información en el sentido de que ha reducido el estado de incertidumbre inicial.

Ahora que se conoce que la información se puede caracterizar con la incertidumbre, se definirá una forma de cuantificar la cantidad de

información, para esto se deducirá la ecuación de la información que fue deducida en 1948 por Claude Shannon¹⁵, en este escenario, desde el principio se entiende que la cantidad de información está relacionada con la probabilidad $p(x)$."

$$I \propto \frac{1}{p(x)}$$

Para determinar la fórmula que cuantifique correctamente la cantidad de información se supondrá que se tiene un grupo de N elementos equiprobables, y se requiere identificar a un elemento en específico. Entonces es necesario hacer una pregunta que divida al grupo en dos, de esta forma la cantidad de candidatos después de una pregunta es $N/2$, después de dos preguntas es $N/4$, y así sucesivamente.

Si se hacen k preguntas y se divide el grupo de candidatos por la mitad en cada ocasión, la cantidad de candidatos que quedan es: $N = 2^k$. Para encontrar a un candidato específico, al final del proceso de preguntas, se busca que solo quede 1 candidato. Es decir, se espera que:

$$\frac{N}{2^k} = 1$$

De lo anterior, se puede deducir que:

$$k = \log_2(N)$$

Por lo tanto, el número de preguntas k o la "información" I necesaria para identificar un candidato específico de N candidatos equiprobables es:

$$I = \log_2(N) \quad (1)$$

En donde la base del logaritmo indica que se trata de un sistema binario o un sistema de unos y ceros, lo que equivale a que cada pregunta que se haga para determinar el elemento de los N posibles, tendrá dos respuestas equiprobables.

¹⁵ C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication,"

Esta formulación es la base de la teoría de la información de Claude Shannon¹⁶ y es una medida de la cantidad de "información" que se necesita para identificar un evento específico de entre muchos posibles eventos.

Pero ahora si los elementos no son equiprobables, lo que sucede es que existen preguntas que dividen al grupo en subgrupos de diferente tamaño proporcionales a la frecuencia con que aparecen los elementos, esto quiere decir que, un elemento que tenga una probabilidad $p(x)$ tiene una representación cuantitativa en la lista de un valor "a", proporcional a $a = N * p(x)$. En donde si se requiere identificar a ese elemento en concreto la cantidad de información o el número de preguntas necesarias se puede determinar mediante la ecuación (1):

$$I = \log_2 \left(\frac{N}{a} \right)$$

Esto es debido a que se requiere dividir la lista en la cantidad de veces que se repite este elemento, de esta forma:

$$I = \log_2 \left(\frac{N}{N * p(x)} \right) = \log_2 \left(\frac{1}{p(x)} \right)$$

Finalmente se ha encontrado la ecuación que indica la cantidad de preguntas necesarias para encontrar un elemento no equiprobable:

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{p(x)} \right) \quad (2)$$

De esta forma, se acaba de deducir la ecuación de la información, misma que Shannon describe en su "A mathematical theory of communications", una forma generalizada de la información se presenta en (3).

$$I = \log_b \left(\frac{1}{p(x)} \right) \quad (3)$$

¹⁶ C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," Bell Syst. Tech. J., vol. 27, no. 4, pp. 623–656, 1948, doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x.

En donde las unidades de información se definen con respecto a la base "b" del logaritmo, en el cual:

- Cuando $b = 2$, es decir una base binaria, la unidad de la información es el "bit", esta unidad es la más conocida hoy en día.
- Cuando $b = e$, la unidad de la información es el "nat".
- Cuando $b = 10$, la unidad es el "dit"

Por lo tanto, si se suma la información esperada que se obtiene al identificar cada elemento, teniendo en cuenta sus probabilidades, se tiene que:

$$I_{\text{promedio}} = p(x_1) \log_2 \left(\frac{1}{p(x_1)} \right) + p(x_2) \log_2 \left(\frac{1}{p(x_2)} \right) + \dots + p(x_N) \log_2 \left(\frac{1}{p(x_N)} \right)$$
$$I_{\text{promedio}} = \sum_{i=1}^N p(x_i) \cdot \log_2 \left(\frac{1}{p(x_i)} \right)$$

En otras palabras, I_{promedio} es la cantidad promedio de preguntas que se necesitarían para identificar un objeto, si se adopta una estrategia óptima que tenga en cuenta las probabilidades de cada objeto.

Si todas las probabilidades son iguales I_{promedio} se reduce a la fórmula original $I = \log_2(N)$, que también es definida como la cantidad de información máxima o I_{max} .

5.1.4 Codificación y transmisión de información.

Para definir claramente el concepto de información, es preciso hacer referencia al sistema de comunicación básico, más exactamente al sistema que propone Shannon en "Mathematica theory of Communications", este es mostrado en la Figura 1:

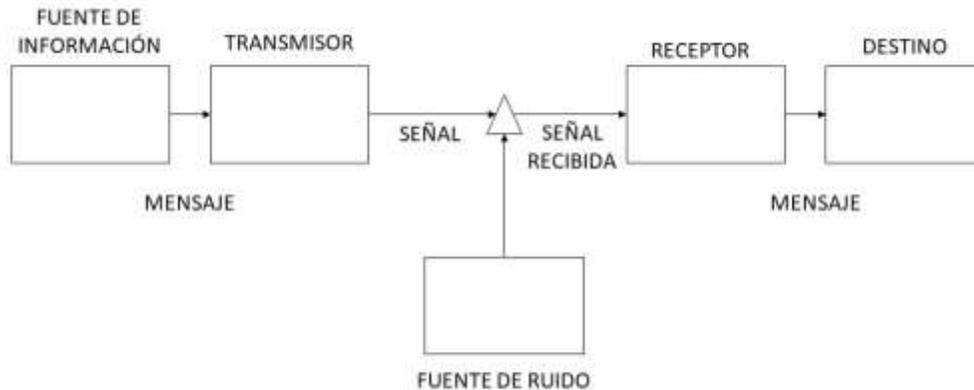


Figura 1. Sistema básico de comunicaciones.

Este sistema cuenta con los siguientes elementos:

Fuente de información: se refiere al generador de la información, la cual va a ser posteriormente enviada al receptor, es aquí donde se evidencia el verdadero carácter de la información, puesto que se presentan tres conceptos muy similares, pero con matices:

Información: se refiere a la inteligencia que se desea transmitir, la sustancia subyacente que da sentido a los mensajes. Esta puede ser:

- Una *receta de cocina* que es transmitido por medio de un video de YouTube.
- La *luz*, $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{M} \right)$,¹⁷ como fuente de energía para las celdas solares o los procesos de fotosíntesis.
- El *estado de ánimo* de un pájaro, el cual se transmite por una onda de sonido
- Un estado cuántico de un átomo $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$.¹⁸

Mensaje: es la forma en la que la información se empaqueta para su transmisión, es el medio en donde viaja la información, el que se

¹⁷ Lukas Novotny and Bert Hecht, *Principles of Nano-Optics*, 2nd ed. (Cambridge University Press, 2012), doi:10.1017/CBO9780511794193.

¹⁸ Moya-Cessa, H. M., and Soto Eguibar, F., *Introduction to Quantum Optics* (Rinton PressInc, 2011), <https://books.google.com.co/books?id=yI0FywAACA AJ>.

encarga de materializar esta inteligencia que se desea transmitir, ésta puede verse en:

- El *video de YouTube* que contine la información acerca de la receta de cocina.
- La onda electromagnética que representa la luz $E(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\{\mathbf{E}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}\}$ ¹⁹, que viaja a través del espacio y puede ser absorbida por celdas solares o por las plantas.
- La onda de sonido $f(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \phi)$, la cual transmite el estado de ánimo del ave.
- El qubit que encapsula los estados del átomo.

Adicionalmente, es válido mencionar que cualquier tipo de mensaje sin importar su formato tiene una cantidad precisa de información que se puede medir, lo cual se conocerán más adelante.

Señal: es el mensaje viajando a través de un medio ya sea luz, sonido, electricidad, una combinación de estos u otros. Las señales se pueden apreciar claramente en:

- La señal eléctrica u óptica que transporta el video de la receta de cocina a través de la internet.
- Los haces de luz que llevan la energía directamente a las celdas solares o a las plantas.
- La onda acústica que transporta la información del ave
- Los fotones que transportan los qubits de un punto a otro.

Transmisor: Es el dispositivo encargado de tomar la información y convertirla en una señal.

Canal: Es el medio por el cual viaja la señal.

Fuente de Ruido: Es cualquier perturbación que reduce la calidad de la señal.

¹⁹N. York, P. Northwest, E. Physics, I. B. M. Zurich, S. National, and S. Foundation, Principles of Nano-Optics, vol. 10, no. 3. 2007. doi: 10.1016/s1369-7021(07)70020-2.

Receptor: Es el que recibe la señal y a su vez la transforma en información.

Destinatario: Es el usuario final quien recibe la información.

5.2 Entropía y su relevancia en la teoría de la información.

De acuerdo a la teoría de Shannon, esta información promedio, también es conocida como la entropía H de la fuente.

$$H = \sum_{i=1}^N p(x_i) \cdot \log_2 \left(\frac{1}{p(x_i)} \right) \quad (4)$$

La entropía de la fuente además de proporcionar la cantidad de incertidumbre, da a conocer la información promedio que es enviada en un mensaje. De lo que podemos concluir que, una fuente que produce símbolos de manera completamente aleatoria (todos con igual probabilidad) tendrá la entropía más alta. Por otro lado, una fuente que siempre produce el mismo símbolo tendrá una entropía igual a cero.

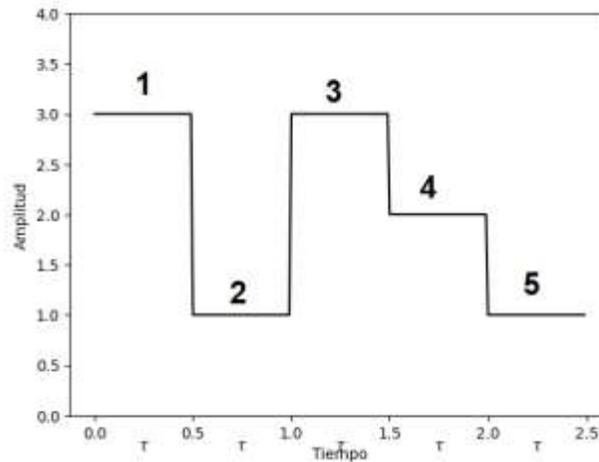


Figura 2. Señal discreta

5.2.1 Entropía de una señal discreta.

En las telecomunicaciones y más específico en la transmisión de información, a menudo se emplean señales discretas. Una señal discreta es

un tipo de señal que solo está definida en tiempos discretos²⁰, como la que es mostrada en la Figura 2. La entropía de este tipo de señales se puede calcular para cada valor discreto, es decir, para los pulsos 1,2,3,4 y 5, en donde se tienen 3 amplitudes en toda la señal y cada pulso presenta una información de:

$$I = \log_2(3)$$

Teniendo en cuenta que se tienen cinco pulsos, finalmente s una entropía la entropía total es de:

$$H = 5 \log_2(3) = \log_2(3^5) = 7.9 \text{ bits/simbolo}$$

Con lo cual se obtiene que la cantidad de información o incertidumbre es de 7.9 bits/símbolo.

Generalizando esto para un mensaje de m amplitudes y n pulsos, se puede deducir una formula general que se presenta en (5).

$$H = \log_2(m^n) \quad (5)$$

En esta señal, cada pulso tiene una amplitud diferente, y adicionalmente cada pulso tiene una duración temporal de τ y un periodo de T . Por lo cual, se dice que la fuente de información de la señal discreta produce pulsos a una velocidad V_I de:

$$V_I = \frac{1}{T} H = \frac{n}{T} \log_2(m) \quad (6)$$

Esta velocidad se utilizará más adelante para calcular la capacidad del canal por el cual viaja la señal.

5.2.2 Entropía de una señal digital:

Las señales digitales son señales de información binaria. Esto es, que transmiten información con base en una codificación de unos y ceros, por lo cual se dice que manejan dos niveles de información.

²⁰ S S Haykin and B Van Veen, *Señales y Sistemas* (Limusa, 2001), <https://books.google.com.co/books?id=u9iYAAAAAAAJ>.

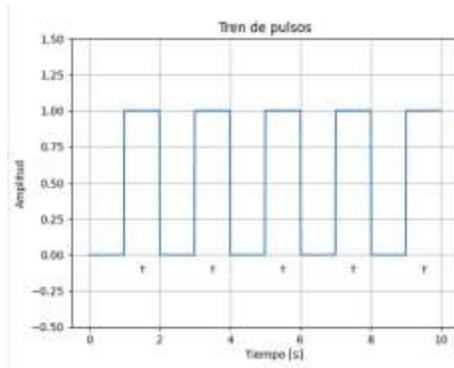


Figura 3 Señal digital, tren de pulsos

Para la señal digital mostrada en la Figura 3, se puede determinar su entropía a partir de (5), teniendo en cuenta que $m = 2$ y $n = 10$

$$H = \log_2(2^{10}) = 10 \text{ bits/simbolo}$$

Adicionalmente, la velocidad de la fuente de información es de $V_I = \frac{1}{\tau}$, en donde τ corresponde a la amplitud de cada pulso.

5.3 Capacidad de información de los canales de comunicación

Como fue definido anteriormente el canal es el medio por el cual se propaga la señal, este puede ser el aire en el caso de las señales sonoras, el vacío en caso de las señales electromagnéticas, los alambres de cobre, la fibra óptica, etc. Todos estos canales de comunicación tienen una capacidad de transmisión de mensajes, denominada "Capacidad del canal", que se representa con la letra C y permite conocer la cantidad de símbolos que se pueden enviar a través de este canal.

La capacidad del canal es definida matemáticamente como la velocidad a la cual se puede enviar información, que ya se ha definido en la ecuación (7).

$$V_I = \frac{n}{T} \log_2(m) \quad (7)$$

En donde Shannon²¹, establece que para que la comunicación sea factible y que sea posible transmitir sin errores, se debe cumplir que:

$$V_I < C$$

$V_I =$ Velocidad de la información

$C =$ Capacidad del canal.

Es decir, cuando la capacidad del canal es mayor a la tasa con que la fuente de información transmite, se cumple la condición para poder transmitir sin errores, de lo contrario habrá errores en la información. Sin embargo, esto también depende del tipo de canal que se esté manejando a continuación se describen estos últimos.

5.3.1 Canal sin Ruido.

Un canal sin ruido es un tipo de canal que no presenta pérdidas en la transmisión de información, este es definido como un canal ideal. En este caso la capacidad del canal es igual a la definida en la ecuación (6).

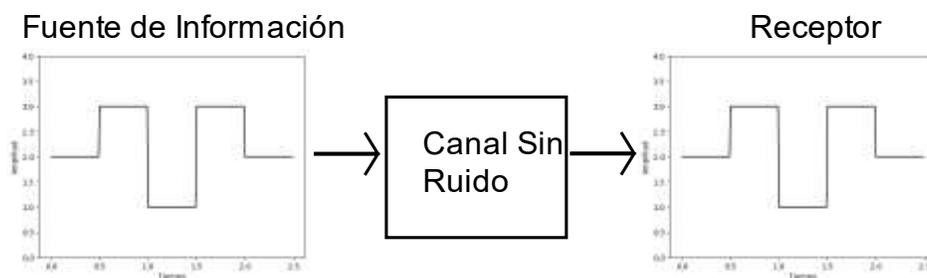


Figura 4. Canal sin ruido

Gráficamente es posible ver que un canal sin ruido es aquel en el que toda la información enviada por el emisor es transmitida al receptor sin ninguna pérdida tal como se muestra en la Figura 4.

5.3.2 Canal con Ruido.

En la realidad sabemos que en la transmisión de señales, siempre hay ruido. Por lo que debemos derivar la misma expresión para una señal con ruido. Un canal con ruido es un canal real en donde la señal que envía la fuente de

²¹ C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," Bell Syst. Tech. J., vol. 27, no. 4, pp. 623–656, 1948, doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x.

información sufre alteraciones debido a múltiples factores tales como el ruido electromagnético en el caso del vacío o el aire, la resistencia de los conductores en el caso de los canales alambrados, etc., este tipo de canal es el que se encuentra normalmente en la naturaleza. En el canal con ruido la señal que envía la fuente de información se deteriora dependiendo de las pérdidas que existan en el canal

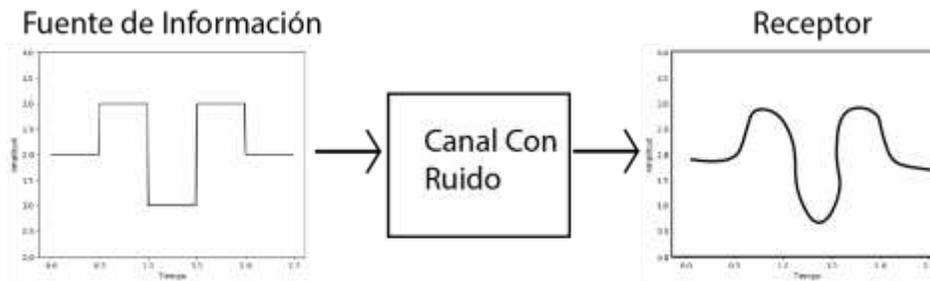


Figura 5. Canal con Ruido.

La capacidad del canal de un canal con ruido viene dada por la ecuación (8), la cual fue deducida por Shannon en su "Mathematical Theory of Communications", en esta se encuentra la variable B , que hace referencia al ancho de banda (rango de frecuencias de las señales que el canal puede transmitir sin que estas sufran una atenuación significativa) y la relación señal a ruido S/N (medida que compara la potencia de una señal útil (señal de interés) con la potencia del ruido presente en el sistema de comunicación). La fórmula de la capacidad del canal con ruido puede ser derivada fácilmente y para ello vamos a puntualizar algunas variables.

- **Ancho de banda B :** rango de frecuencias de las señales que el canal puede transmitir sin que estas sufran una atenuación significativa.
- **Relación señal a ruido S/N :** medida que compara la potencia de una señal útil (señal de interés) con la potencia del ruido presente en el sistema de comunicación

Canal sin Ruido (Canal Puro): Se considera un canal de comunicación ideal, sin ruido, con un ancho de banda B . En este escenario, el canal puede transmitir información a su máxima capacidad teórica sin interferencias.

Cuantificación de la Potencia de la Señal (S): La potencia de la señal transmitida es un indicador de la fuerza de la señal que se desea enviar a través del canal.

Cuantificación de la Potencia del Ruido (N): El ruido puede ser cualquier tipo de interferencia o distorsión que reduce la calidad de la señal y la potencia del ruido en el canal esta dada por N.

Cuantificación de la Potencia de la señal con Ruido: de aquí es natural que consideremos la potencia de una señal ruidosa, que está dada por medio de la relación señal a ruido (S/N).

Derivación de la Relación Señal a Ruido (S/N): la proporción entre la potencia de la señal y la potencia del ruido, es una relación que es crucial que determina cuánto de la señal es útil respecto al nivel de ruido.

Aplicación del Logaritmo en Base 2: Definido esto, podemos retomar nuestra discusión de transmisión de señales binarias y usar la expresión del logaritmo en base 2 (eq 4) , para transformar la relación señal a ruido en una escala que es coherente con la forma en que medimos la información (en bits). La relación de la potencia de la señal ruidosa al ruido $(S+N)/N=1+ S/N$, produce un término muy conocido. El término $1+ S/N$ en el logaritmo indica que incluso un pequeño incremento en la relación señal a ruido puede tener un gran impacto en la capacidad del canal, quedando un término de $\log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$, que cuantifica el "decaimiento" de la señal debido al ruido en términos de la capacidad máxima de transmisión de datos en el canal.

Multiplicación por el Ancho de Banda: Finalmente, se multiplica este resultado por el ancho de banda original B. Esta operación ajusta la capacidad teórica máxima del canal para reflejar el impacto del ruido. Esencialmente se está reduciendo el ancho de banda efectivo debido a la presencia de ruido.

Finalmente se obtiene la capacidad del canal que se muestra a continuación:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (8)$$

El mundo de la información clásica.

Hasta el momento se ha descrito que es y cómo se cuantifica la información clásica, también se ha hablado de la cantidad de información que se puede transmitir a través de un canal sin tener pérdida de esta misma, así mismo se ha dado a conocer que existen errores en la información que pueden llegar a destruir completamente el mensaje que se desea transmitir, sin embargo, esto tal y como se ha realizado y manejado hasta el momento es lo que se conoce hoy de manera clásica, además de esto solo se tiene una parte de la historia, ya que se conoce la información y como enviarla, pero aún no se conoce como es el proceso para manipularla, para esto, a continuación en el siguiente capítulo, se hablará de como a través de compuertas clásicas se ha podido realizar una manipulación de esta información al punto de tener hoy en día super computadoras con grandes capacidades de procesamiento, todo esto y más, se dará en el siguiente capítulo donde se discutirán los paradigmas de la programación que permiten la manipulación de la información.

Capítulo 6.

Introducción al procesamiento de la Información

En este capítulo, se definirán primero las compuertas lógicas como los bloques fundamentales para el procesamiento de información en dispositivos. A continuación, se proporcionará una descripción de cómo se han desarrollado dispositivos tan básicos como una calculadora para realizar sumas aritméticas a través de ejemplos prácticos. Se explorará cómo este paradigma de la programación ha evolucionado hacia la programación de microprocesadores más complejos. Finalmente, este capítulo concluirá ofreciendo una visión general de la computación clásica en la actualidad, explicando su funcionamiento y su impacto en actividades diarias con la infraestructura de la computación clásica.

6.1 Compuertas, el elemento básico para el procesamiento de información.

Después de que Claude Shannon desarrollara sus teorías de la información, y así mismo un marco para el desarrollo de circuitos lógicos implementados sobre circuitos electrónicos, que establecía que cualquier función lógica booleana descrita en el algebra de Boole²² podía representarse mediante circuitos de conmutadores (interruptores como los relés, tubos de vacío, transistores, etc.)²³, se desencadenó una ola de desarrollos tecnológicos. Entre ellos, destaca la contribución del Dr. Jorge Stibitz, quien en 1937 construyó la primera calculadora digital capaz de sumar dos números

²² G Boole, *The Mathematical Analysis of Logic: Being an Essay Towards a Calculus of Deductive Reasoning* (Macmillan, Barclay, & Macmillan, 1847), <https://books.google.com.co/books?id=6pOtAAcixIkC>.

²³ Claude E Shannon, "A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits," *Electrical Engineering* 57, no. 12 (1938): 713–723, doi:10.1109/EE.1938.6431064.

binarios de un bit usando tubos de vacío como interruptores, este montaje propuesto por el Dr. Stibitz, es mostrado en la Figura 6.

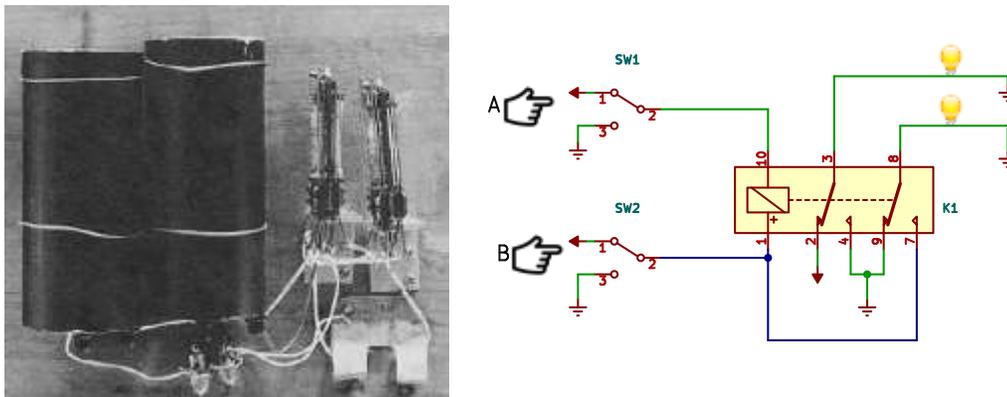


Figura 6. Primera calculadora digital de dos bits, izquierda: imagen real, derecha: circuito esquemático.

El diagrama lógico de este circuito se presenta construido con compuertas lógicas (las cuales explicaremos a continuación en la sección 3.1.1) en la Figura 7. Por claridad, explicaremos las compuertas lógicas en la siguiente sección, en particular las XOR y AND. En este circuito se puede ver que para dos entradas A y B, una compuerta XOR actúa sumando ambas entradas y una compuerta AND actúa como la encargada de guardar el bit de carry (es un bit que se transfiere a la siguiente posición más significativa durante la suma binaria cuando el resultado excede el valor máximo de una posición).

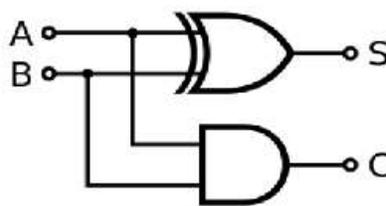


Figura 7. Sumador de un bit.

Por medio de la tabla de la verdad (Herramienta para mostrar los resultados de una operación lógica para todas las posibles combinaciones de entradas, permitiendo visualizar cómo diferentes entradas afectan el

resultado de operaciones lógicas como AND, OR, y NOT)²⁴ se puede determinar el comportamiento de este circuito, esta se presenta en la Tabla 1, en donde se ve que la suma es consistente en el sistema binario.

Tabla 1. Sumador un bit, tabla de verdad.

A	B	Salida	Carry
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Para poder comprender un poco más acerca de las compuertas lógicas y revisar este circuito con detenimiento en el siguiente capítulo se abordarán las compuertas lógicas fundamentales y su funcionamiento.

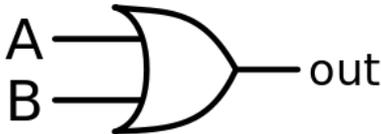
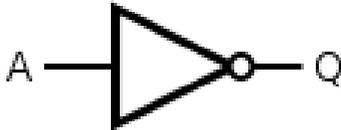
6.1.1 Introducción a las compuertas lógicas.

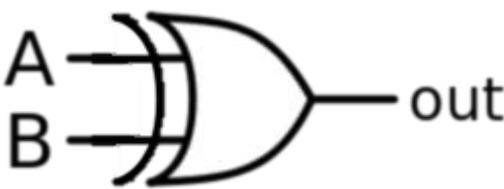
Las compuertas lógicas son un conjunto de objetos que permiten realizar operaciones de carácter lógico sobre una o más entradas binarias. Esto es dependiendo del estado de sus entradas (unos o ceros), su salida será definida por el tipo de operación lógica que se esté realizando²⁵. Las compuertas lógicas son herramientas esenciales para manipular y procesar información binaria. Si tu objetivo es invertir un bit, la compuerta NOT es tu solución, cambiando un 0 a 1 o viceversa. Cuando se requiere que una operación entregue un resultado verdadero solo si todas las condiciones de entrada son verdaderas, la compuerta AND es la más adecuada. Por otro lado, si basta con que al menos una condición de entrada sea verdadera, la compuerta OR es la indicada. Estas compuertas son fundamentales no solo para operaciones básicas sino también para construir estructuras más complejas como sumadores, algoritmos de decisión y, en niveles más avanzados, incluso en la implementación de redes neuronales y otros sistemas computacionales complejos.

²⁴ T L Floyd, *Digital Fundamentals, Global Edition*, Law Express (Pearson Education, 2015), <https://books.google.com.co/books?id=QtupBwAAQBAJ>.

²⁵ Floyd Thomas L., *Fundamentos de Sistemas Digitales y Numericos*, 2006.

A continuación, se resumen las compuertas lógicas fundamentales con las cuales se realizan múltiples operaciones tales como comparación, aritmética, conversión de código, decodificación, codificación, selección de datos, almacenamiento y recuento. Asimismo, se presenta una lista de las compuertas con su símbolo y su correspondiente tabla de la verdad para cada una de ellas.

Compuerta	Símbolo	Tabla de Verdad															
AND	 <p><i>Figura 8. Compuerta AND, símbolo.</i></p>	<p><i>Tabla 2. Tabla de verdad de compuerta AND.</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>Salida Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	Salida Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
A	B	Salida Y															
0	0	0															
0	1	0															
1	0	0															
1	1	1															
OR	 <p><i>Figura 9. Compuerta lógica OR, símbolo.</i></p>	<p><i>Tabla 3. Tabla de verdad, compuerta OR.</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>Salida</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	Salida	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
A	B	Salida															
0	0	0															
0	1	1															
1	0	1															
1	1	1															
NOT	 <p><i>Figura 10. Compuerta Not, símbolo.</i></p>	<p><i>Tabla 4. Tabla de la verdad, compuerta NOT.</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>Q</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	A	Q	0	1	1	0									
A	Q																
0	1																
1	0																

XOR		<i>Tabla 5. Tabla de la verdad, compuerta XOR.</i>														
	<i>Figura 11. Compuerta XOR, símbolo.</i>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>Salida</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	Salida	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1
A	B	Salida														
0	0	0														
0	1	1														
1	0	1														
1	1	0														

Compuerta AND:

La compuerta lógica AND es una puerta lógica que toma dos entradas y produce una salida basada en la operación lógica AND (Y) entre estas dos entradas, básicamente devuelve un valor lógico uno si ambas entradas son uno, de lo contrario devuelve un valor lógico cero.

El símbolo lógico de la compuerta AND es presentado en la Figura 8, y su tabla de la verdad se describió en la Tabla 2, en donde se puede apreciar que la salida es uno si y solo si ambas entradas son uno, una compuerta AND se puede apreciar fácilmente en la vida real cuando estas en un cajero, este solamente te proporciona dinero si digitas la clave correctamente y si existen fondos suficientes en la cuenta.

Compuerta OR:

La compuerta lógica OR, es una de las puertas fundamentales, esta toma dos entradas y genera una salida que es uno (verdadero) si y solo si una de sus entradas es uno, de lo contrario produce cero (falso). Esta compuerta presenta una tabla de la verdad que es descrita en la Tabla 3.

El símbolo lógico de la compuerta OR, es presentado en la Figura 9, esencialmente, una compuerta OR puede ser apreciada en la vida real cuando una persona tiene hambre y decide preparar uno de dos platos: carne o pollo. Cualquiera de estos puede satisfacer su necesidad, o ambos también pueden hacerlo.

Compuerta NOT:

La compuerta lógica NOT, es una puerta que presenta una entrada y una salida, en donde la salida siempre será lo contrario a la entrada, de esta forma si la entrada es uno (verdadero) la salida será cero (falso) y viceversa. La tabla de la verdad de esta compuerta se puede apreciar en la Tabla 4.

El símbolo lógico de la compuerta NOT se puede apreciar en la figura 10, en donde se aprecia que esta posee una sola entrada y una sola salida. Adicionalmente esta compuerta puede ser encontrada fácilmente en los interruptores y luz, cuando oprimimos el interruptor (0 voltaje) se enciende la luz (alto voltaje) y viceversa cuando se cierra el interruptor.

Compuerta XOR:

La compuerta XOR, también llamada OR exclusiva, es una compuerta lógica que toma dos entradas y produce una salida que es 1 (verdadero) si exactamente una de las dos entradas es 1. Si ambas entradas son iguales (ambas 0 o ambas 1), la salida será 0 (falso). La tabla de la verdad de esta compuerta puede ser encontrada en la Tabla 5, esta compuerta es esencial para la adición de números binarios.

Un ejemplo de esta compuerta se obtiene claramente en la fila del supermercado, imagina que estás en un supermercado con dos personas en fila y solo una caja registradora disponible. Si solo una de las personas decide pasar a la caja (una entrada), el vendedor puede procesar la venta sin problemas (salida 1). Pero, si ambas personas intentan pasar al mismo tiempo o ninguna lo hace, el vendedor no puede realizar ninguna venta (salida 0). La compuerta XOR funciona igual: solo cuando una de las dos opciones es verdadera, se obtiene un resultado positivo.

6.1.2 Programando con compuertas.

Para la programación de circuitos y aplicaciones clásicas, comúnmente se realiza un diseño de circuitos lógicos, en donde las compuertas lógicas son conectadas entre sí de tal forma que nos permitan obtener a la salida un determinado resultado deseado. Como ejemplo se va a abordar el sumador de un bit mostrado en la Figura 7, y luego lo se extenderá a tres bits.

Para construir el circuito lógico que se presenta en la tabla de verdad de la Tabla 1, primero se analiza la salida S , allí se puede ver claramente que la salida S , está representada por la ecuación:

$$S = A (XOR) B$$

Adicionalmente se tiene que la salida del carry, viene dada por:

$$Carry = A (AND) B$$

Al dibujar este circuito, se obtiene la Figura 7, en donde se tiene una compuerta XOR conectada a las entradas A y B que generan la salida del circuito, y una compuerta AND conectada igualmente a las entradas A y B, que generan la señal de carry del circuito.

Ahora se extenderá este ejemplo a tres números binarios, para programar el circuito que suma estos tres números en binario, primero se construye su tabla de verdad:

Tabla 6. Sumador de tres bits, tabla de verdad.

A	B	C	Suma	Carry
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
1	0	1	0	1
0	1	1	0	1
1	1	1	1	1

Luego de esto, como en la ecuación anterior se construyó la ecuación que sale de esta misma, para lo cual se usará un método descrito en²⁶, en el cual se toman los valores de salida para los cuales se hace uno la suma, estos son: 100, 010, 001, 111, con base a esto nuestra ecuación será de la forma:

²⁶ F. Thomas L., Fundamentos de Sistemas Digitales y Numéricos. 2006.

$$\text{Suma} = A\bar{B}\bar{C} + \bar{A}B\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C + ABC$$

$$\text{Suma} = A (\text{XOR}) B (\text{XOR}) C$$

Se realiza lo mismo para el Carry y se obtiene:

$$\text{Carry: } ABC\bar{C} + A\bar{B}C + \bar{A}BC + ABC$$

$$\text{Carry: } AB + (A (\text{XOR}) B)C$$

$$\text{Carry: } A (\text{AND}) B (\text{OR}) (A (\text{XOR}) B) (\text{AND}) C$$

El circuito final que se ha programado para sumar tres números binarios de un bit, se encuentra en la Figura 12. En este se puede observar que la programación con compuertas es un proceso sencillo que requiere de conocer las salidas que requerimos en código binario y con base en esta información se dibuja el circuito resultante con base a las compuertas básicas requeridas.

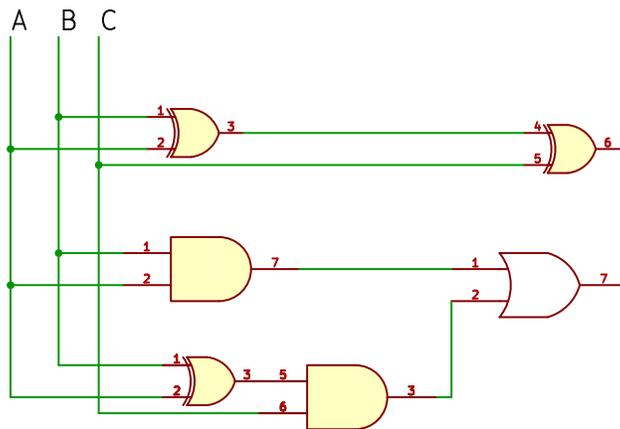


Figura 12. Sumador de tres bits.

Ahora se va a realizar un último circuito con compuertas lógicas, se tratará de extender el circuito sumador de dos bits para que sume tres dígitos, por ejemplo, la siguiente suma de los números 2 y 5 que en binario serían: 010 y 101.

Tabla 7. Suma de números 2 y 5, en binario.

0	1	0	2
1	0	1	5

$$\overline{1\ 1\ 1\ | 7}$$

Para realizar esto, se dará valor a las variables, de la forma en que se muestra en la Tabla 8, en donde las variables A_i son las unidades binarias del primer número, las variables B_i , son las unidades binarias del segundo número, las variables C_i representan los valores del carry de las sumas de A_i, B_i .

Tabla 8. Sumador de tres dígitos binarios.

$$\begin{array}{r} A_2 \quad A_1 \quad A_0 \\ B_2 \quad B_1 \quad B_0 \\ \hline S_2 + C_1 \quad S_1 + C_0 \quad S_0 \end{array}$$

Tabla 9. Sumador de tres dígitos.

A_0	B_0	S_0	C_0	A_2	B_2	C_1	S_2	C_2	A_1	B_1	C_0	S_1	C_1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
				0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
				1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
				0	1	1	0	1	0	1	1	0	1
				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Teniendo esto, se expresa la tabla de la verdad del circuito como se presenta en la Tabla 9, en esta es posible observar que son exactamente iguales a las descritas en las Tabla 6 y Tabla 1, para los cuales ya se tienen los circuitos, y por lo tanto solo es necesario reordenar, el circuito resultante se presenta en la Figura 13.

La programación utilizando compuertas es una de las formas más simples en el mundo de la computación clásica. Sin embargo, existen otros métodos que permiten obtener circuitos más simplificados y reducir el uso

de compuertas. Además, a partir de la programación basada en compuertas, surgieron importantes avances en el mundo de la computación, como la ENIAC. Esta computadora utilizaba tubos de vacío como interruptores para implementar físicamente compuertas lógicas.

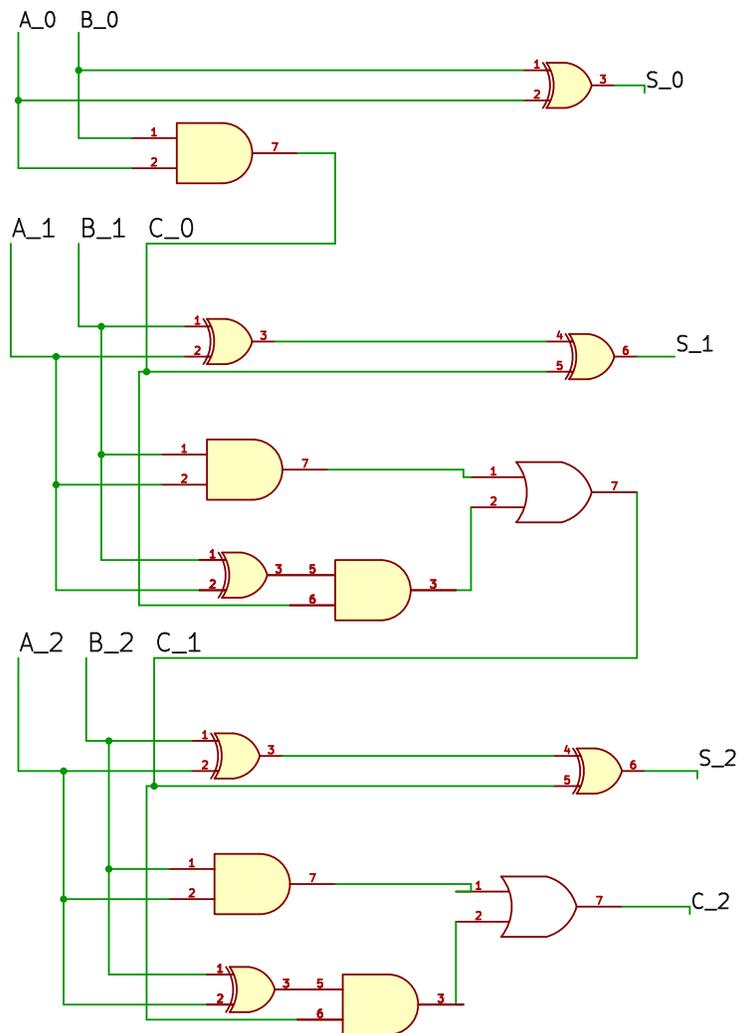


Figura 13. Sumador de tres dígitos.

6.2 Programación en microprocesadores

Después de que la tecnología avanzó desde los tubos de vacío y se desarrollaron los transistores, los dispositivos evolucionaron hasta el punto de albergar miles de transistores en un solo chip. Estos avances llevaron a la creación de los circuitos integrados, también conocidos como microchips.

En el contexto de estos circuitos integrados, se implementó una arquitectura revolucionaria conocida como la arquitectura Von Neumann. Esta arquitectura, propuesta por John Von Neumann, introdujo la separación de la memoria de programa y datos. En otras palabras, permitía que las instrucciones y los datos se almacenasen en la misma memoria y se accediera a través de un bus compartido. Esto permitió que las instrucciones se ejecutaran secuencialmente en la unidad central del dispositivo. Para interactuar con esta arquitectura, se empleaba un lenguaje ensamblador que permitía programar operaciones específicas de manera directa en el hardware.

De esta forma una simple suma de dos bits, ya no es realizada por medio de la interconexión física de diferentes compuertas electrónicas como lo hicimos en la sección anterior, sino por la carga de un programa de maquina como el lenguaje ensamblador, el cual le indicaba al procesador las instrucciones que debía de ejecutar, como ejemplo a continuación se muestra el código en ensamblador para realizar la suma de dos números de un bit, tal y como se realizó en la sección anterior.

```
; Suponiendo que los bits A y B están en los registros R0 y R1  
respectivamente
```

```
; El resultado se almacenará en el registro R2
```

```
MOV R0, A ; Cargar el bit A en el registro R0
```

```
MOV R1, B ; Cargar el bit B en el registro R1
```

```
XOR R0, R1 ; Realizar la suma de bits utilizando la operación XOR
```

```
MOV R2, R0 ; Almacenar el resultado en el registro R2
```

```
; Aquí se puede acceder al valor en el registro R2 para obtener el resultado  
de la suma
```

Es crucial notar que aún se utilizan compuertas lógicas para ejecutar estos programas; sin embargo, la diferencia radica en que estas compuertas ya están preconfiguradas en el procesador. Solo es necesario introducir las instrucciones apropiadas para que la CPU las ejecute.

Posterior al lenguaje ensamblador, surgieron lenguajes de programación de alto nivel como Fortran, C, C++, Python, entre otros. Estos lenguajes facilitan la programación gracias a su sintaxis más legible y ofrecen la flexibilidad de adoptar diversos paradigmas de programación, como la programación orientada a objetos. A pesar de estas ventajas, es crucial entender que las instrucciones generadas por estos lenguajes son finalmente traducidas a lenguaje de máquina, que a su vez dicta comandos específicos a la CPU para interactuar con las compuertas lógicas y otros componentes, tal como se ilustró en el ejemplo anterior.

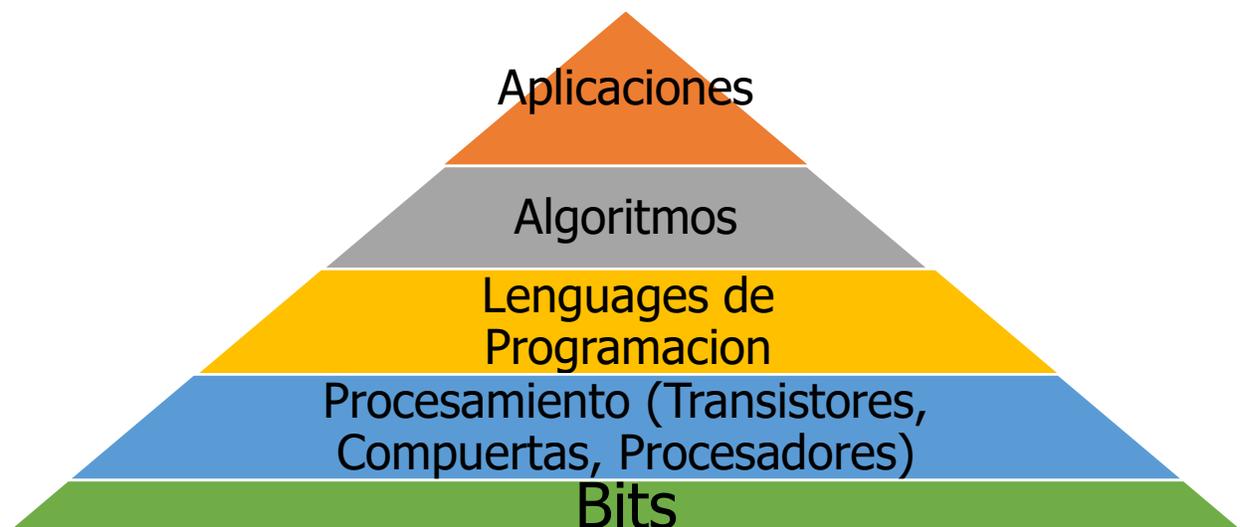


Figura 14. Infraestructura de la computación clásica.

6.3 Infraestructura de la computación Clásica.

Después de que se perfeccionó la programación de compuertas lógicas y microprocesadores, se experimentó un auge en la creación de dispositivos electrónicos de consumo. Entre estos dispositivos, el más destacado es, sin

duda, el computador clásico. Más específicamente, la arquitectura de la computación clásica se compone de diversas capas y elementos que trabajan de forma conjunta para hacer posible el procesamiento de información. Estos componentes se ilustran en la Figura 14 y se discutirán en detalle a continuación.

6.3.1 Bits

Los bits son las unidades fundamentales de la información clásica representando un cero o un uno, de estos se ha hablado en el capítulo uno, y solo queda por decir que todas las operaciones en un sistema computacional se reducen, en última instancia, a operaciones de bits.

6.3.2 Elementos de Procesamiento

Los elementos de procesamiento de la computación clásica son los dispositivos que se encargan de la manipulación de los bits, estos corresponden a los transistores, las compuertas clásicas y los procesadores los cuales se describen a continuación.

- Transistores: Actúan como interruptores electrónicos y son la base para la construcción de compuertas lógicas y procesadores.
- Compuertas Lógicas: Estas son esenciales para la ejecución de operaciones aritméticas y lógicas y son construidas a partir de transistores.
- Procesadores: Compuestos por millones de transistores y compuertas lógicas, estos son los "cerebros" del computador, responsables de llevar a cabo las instrucciones de los programas. Continuación se describen cada uno de estos:

6.3.3 Lenguajes de programación.

Los lenguajes de programación son los encargados de convertir nuestras instrucciones como humano a instrucciones que la máquina, en específico los procesadores puedan comprender, dentro de estos se tienen:

- Bajo nivel: Como el ensamblador, permite una programación muy cercana al hardware.

- Alto nivel: Lenguajes como Python, Java y C++ ofrecen abstracciones que facilitan la programación, pero que eventualmente se traducen a instrucciones de bajo nivel.

6.3.4 Algoritmos.

Los algoritmos son las recetas con las cuales se le indica a los procesadores que instrucciones ejecutar en determinado momento, pueden ser tan sencillos como el de sumar dos bits o tan complejos como los que se usan para clasificar los datos en aprendizaje de maquina o para procesar imágenes, etc. Algunos de los algoritmos más comunes son:

- Ordenación
- Búsqueda
- Estructura de datos
- Criptografía.

6.3.5 Aplicaciones.

Las aplicaciones de la computación clásica son el plato fuerte de este paradigma, van desde el sistema operativo que controla los computadores, pasando por la inteligencia artificial hasta la simulación de sistemas físicos como los encontrados en la naturaleza. Algunas de las aplicaciones son:

- Aplicaciones de Inteligencia Artificial: La IA se ha incorporado en una amplia variedad de aplicaciones, desde asistentes virtuales y sistemas de recomendación, hasta algoritmos avanzados para la detección de enfermedades y automatización industrial.
- Aplicaciones de Negocios: Estas aplicaciones gestionan tareas relacionadas con la empresa, como la administración de relaciones con el cliente (CRM), la planificación de recursos empresariales (ERP) y la automatización de servicios.
- Aplicaciones de Diseño y Multimedia: Programas como Adobe Photoshop y AutoCAD permiten a los profesionales crear contenido gráfico, diseñar productos y llevar a cabo tareas relacionadas con la animación y edición de video.

- Redes Sociales: Aplicaciones como Facebook, Instagram y Twitter han revolucionado la forma en que las personas interactúan y se comunican, haciendo del mundo un lugar más conectado.
- Aplicaciones de Salud: Desde aplicaciones que rastrean el estado físico hasta aquellas que proporcionan información médica, estas aplicaciones han tenido un impacto significativo en la atención sanitaria y el bienestar personal.
- Aplicaciones Educativas: Plataformas como Khan Academia, Coursera y aplicaciones de aprendizaje de idiomas como Duolingo están transformando la forma en que las personas adquieren conocimiento y habilidades.

6.4 El mundo de la información clásica.

Hasta ahora, se ha explorado la naturaleza de la información, su cuantificación y manipulación en el ámbito de la computación clásica. Se ha abordado la forma en que conceptos como las compuertas lógicas se aplican en áreas diversas como la inteligencia artificial. Sin embargo, estas tecnologías enfrentan limitaciones inherentes, especialmente debido a la miniaturización de los transistores. Al reducirse su tamaño, empiezan a surgir efectos cuánticos que limitan su funcionamiento y, por ende, el avance de las tecnologías electrónicas actuales. Además, la computación clásica requiere enormes recursos de procesamiento y tiempo para resolver tareas complejas, como la factorización de números primos.

Ante estos desafíos, se están desarrollando nuevas tecnologías de computación, entre las cuales destaca la computación cuántica. Esta tecnología no solo supera muchas de las limitaciones de la computación clásica, sino que también abre nuevas posibilidades, como la teleportación cuántica²⁷ y la simulación de sistemas complejos, tareas que serían extremadamente difíciles, si no imposibles, para la computación clásica.

²⁷ Oliver Slattery and Yong Su Kim, "Breakthrough in Teleportation Furthers Quantum Network Development," *Nature* 2022 605:7911 605, no. 7911 (May 2022): 624–625, doi:10.1038/d41586-022-01364-0.

El siguiente paso será adentrarnos en el fascinante mundo de la información y la computación cuántica. Para abordar este tema de manera efectiva, se comenzará por los conceptos esenciales de la mecánica cuántica que son relevantes para nuestro estudio. Esto nos proporcionará una base sólida para entender la naturaleza y cuantificación de la información en un contexto cuántico. Posteriormente, se examinará la infraestructura que sustenta la computación cuántica y cómo se manipula esta forma especializada de información. Finalmente se abordará un caso de estudio basado en la teoría del átomo de dos niveles, que se fundamenta en las ecuaciones de Bloch y que se simulará en una plataforma de computación cuántica de IBM. De esta manera, se apreciará cómo la teoría cuántica se traduce en aplicaciones prácticas y tangibles.

Capítulo 7:

Información Cuántica.

En los capítulos anteriores, se ha explorado en gran medida los aspectos más cruciales de la información y la computación clásica. Así mismo se han comprendido los términos de entropía de la información (como medio para cuantificar la cantidad de información) y del paradigma de programación por compuertas, todo ello desde la concepción clásica. Ahora es momento de estudiar, como esos conceptos se desarrollarán desde una concepción cuántica, incluyendo los fenómenos más importantes que caracterizan a la mecánica cuántica como lo son la superposición, el entanglement y la renuncia al realismo local en donde los objetos tienen propiedades definidas y existen independientemente del observador.

En este capítulo se estudiará la información cuántica como base fundamental para el conocimiento de la computación cuántica. Esto a través de los conocimientos básicos de algebra lineal y mecánica cuántica para posteriormente abordar la información cuántica como un concepto proveniente de la información clásica, que es medible y puede ser determinada a través de diferentes herramientas como la entropía cuántica o el Quantum Coding Theorem. Finalmente se establecerán los lineamientos para determinar la capacidad de un canal cuántico y sus características.

La prioridad de este capítulo, no es solo estudiar cómo la información cuántica se correlaciona con la información clásica; la cual se ha descrito en los capítulos anteriores. Sino también analizar como esta se manifiesta en las computadoras cuánticas, en el proceso de transmisión de la información cuántica, para lo cual se definirá la entropía cuántica.

7.1 Mecánica cuántica

Los fenómenos que se derivan de la mecánica cuántica resultan difíciles de comprender, dado que la mayoría de las experiencias cotidianas no son aplicables a ella. Es necesaria una breve explicación de sus principios

fundamentales. Por espacio en esta tesis, se optará por una visión sintética, que permita enfocarse rápidamente en la esencia de la computación e información cuánticas (CIC). Por lo cual se utilizará su descripción axiomática, así como de algunos de los formalismos matemáticos, necesarios para trabajar con esta en la medida requerida para la computación cuántica. Conceptos como la superposición y el entrelazamiento cuántico, son características que solo se presentan en el mundo cuántico y son esenciales a la CIC.

Desde esta perspectiva, la mecánica cuántica esta formulada por 5 principios fundamentales o axiomas de la computación cuántica. Estos nos dan a conocer la forma en que la mecánica cuántica concibe al mundo físico, a continuación, se resumirán cada uno de ellos.

El cuarto axioma, ecuación de Schrodinger, establece la esencia la esencia de la mecánica cuántica. El primero a su descripción "vectorial" funcional, el segundo a sus observables en términos de operadores y el tercero en sus observables. El quinto axioma, tiene las mayores implicaciones para este trabajo, al describir no solo la superposición de estados, sino la interacción de sistemas independientes, y por ende de entanglement.

7.1.1 Axioma 1: Representación de estados

Un sistema cuántico es representado por un espacio de estados de posiciones, momentos, polarizaciones, etc.; estos estados se encuentran modelados dentro de un espacio de Hilbert infinito los cuales están dados por funciones de onda o vectores²⁸.

Para los propósitos típicos de computación cuántica, solo es necesario tratar con sistemas cuánticos finitos, lo que significa que tienen un número limitado de posibles estados, y basta considerar espacio vectoriales complejos de dimensión finita con un producto interno que están abarcados por funciones de onda del tipo $|\psi\rangle$. En esta perspectiva, los estados cuánticos

²⁸ R Shankar, *Principles of Quantum Mechanics* (Springer US, 2012), <https://books.google.com.co/books?id=sDvrBwAAQBAJ>.

y las transformaciones que actúan sobre ellos pueden expresarse de forma sencilla mediante vectores y matrices en lo que se conoce como notación bra/ket, una notación compacta propuesta por Dirac. La notación bra/ket, se basa en dos tipos de elementos: “kets” que representan vectores de columna y se utilizan para describir los estados cuánticos, mientras que los “bra”, denotados como $\langle \varphi | \psi \rangle$ representan la transpuesta conjugada de un “ket”, y se combinan para definir el producto interno de dos vectores, definido como $\langle \varphi | \psi \rangle$ ²⁹.

7.1.2 Axioma 2: Observables

En la mecánica cuántica, los aspectos medibles de un sistema físico, como la posición, el momento lineal, la energía, etc., se denominan observables, estos observables se encuentran definidos como operadores lineales, en donde los resultados posibles de una medición de un observable esta dado por los autovalores del operador hermítico asociado³⁰, estos observables se presentan como:

$$\hat{A}|a_i\rangle = a_i|a_i\rangle \quad (9)$$

En donde \hat{A} es el operador hermitico del observable A, $|a_i\rangle$ el estado propio y a_i el autovalor del operador hermitico \hat{A} .

7.1.3 Axioma 3: Medición de observables

Cada que se realiza una medida de un observable se obtiene como resultado uno de los autovalores del operador que lo representa, esto es, se obtiene el valor de a_i de la ecuación 9. Adicionalmente la probabilidad de obtener un autovalor particular está dada por la norma al cuadrado del proyector

²⁹ David J. Griffiths and Darrell F. Schroeter, *Introduction to Quantum Mechanics, Introduction to Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 2018), doi:10.1017/9781316995433.

³⁰ P A M Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Comparative Pathobiology - Studies in the Postmodern Theory of Education (Clarendon Press, 1981), <https://books.google.com.co/books?id=XehUpGiM6FIC>.

correspondiente al subespacio generado por el auto vector correspondiente a dicho autovalor, esto es:

$$P(a_i) = |\langle a_i | \psi \rangle|^2$$

En donde $\langle a_i | \psi \rangle$ es el producto interno entre el estado propio $|a_i\rangle$ y el estado general $|\psi\rangle$ ³¹.

7.1.4 Axioma 4: Ecuación de Schrodinger

Todos los sistemas cuánticos evolucionan temporalmente conforme a lo establecido por la ecuación de Schrodinger que se presenta a continuación:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle \quad (10)$$

En donde $|\psi(t)\rangle$, es el estado del sistema en el tiempo t , \hat{H} , es el operador del hamiltoniano y \hbar es la constante de plank³².

7.1.5 Axioma 5: Concepto de superposición y entrelazamiento.

Si un sistema cuántico puede presentar dos o más estados posibles tales como $|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle, \dots, |\psi_n\rangle$, entonces, cualquier combinación lineal $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle + \dots + c_n|\psi_n\rangle$ también es un estado posible del sistema, lo cual implica que el sistema se encuentra en una superposición de todos sus estados. De esta forma matemáticamente se tiene que el nuevo estado del sistema se define a continuación.

$$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle + \dots + c_n|\psi_n\rangle$$

Donde c_1, c_2, \dots, c_n son coeficientes complejos y $|\psi\rangle$ es el nuevo estado del sistema.

Adicionalmente cuando dos sistemas cuánticos interactúan entre sí, es posible que se entrelacen cuánticamente, esto es, interactuarán mutuamente de tal forma que compartirán algunas de sus propiedades o sus

³¹ J. J. Sakurai and Jim Napolitano, "Modern Quantum Mechanics - 3rd Ed," 2021.

³² Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu, and Franck Laloe, *Quantum Mechanics, Volume 1: Basic Concepts, Tools, and Applications*, 2019.

*estados estarán correlacionados mutuamente en un fenómeno que el científico Einstein definió como acción fantasmal a distancia*³³.

Este entrelazamiento cuántico permite que el resultado de una medición sobre un sistema cuántico afecte directamente al resultado de una medición sobre el siguiente estado entrelazado, definido miméticamente como el producto tensorial de dos estados individuales como se presenta a continuación.

$$|\Psi\rangle = \sum_{ij} c_{ij} |\psi_{A_i}\rangle \otimes |\psi_{B_j}\rangle \quad (11)$$

En donde c_i son los coeficientes complejos que cumplen con la normalización $\sum_{ij} |c_{ij}|^2 = 1$, los estados $|\psi_{A_i}\rangle$, $|\psi_{B_j}\rangle$ son los estados individuales de cada uno de los sistemas separados.

7.2 Introducción a la información cuántica.

Hasta ahora, se ha obtenido un breve resumen de los conceptos básicos de mecánica cuántica necesarios para adentrarse en el fascinante mundo de la información y la computación cuántica. Además, se han explorado los conceptos fundamentales que constituyen los cimientos de la teoría cuántica, desde el principio de superposición y entrelazamiento hasta los axiomas que rigen el comportamiento de los sistemas cuánticos.

Estos conceptos sientan las bases para adentrarse en el emocionante campo de la información y la computación cuántica, donde los principios cuánticos se utilizan para realizar cálculos y procesar información de maneras que desafían las capacidades de la computación clásica. En las siguientes secciones y capítulos, se profundizará en aplicaciones prácticas y algoritmos cuánticos que aprovechan estas propiedades únicas para resolver problemas de manera más eficiente que los algoritmos clásicos.

Se iniciará discutiendo el lenguaje utilizado en el manejo de la información cuántica. Se expresa en términos de vectores lineales,

³³ A Einstein, B Podolsky, and N Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?," *Phys. Rev.* 47, no. 10 (May 1935): 777–780, doi:10.1103/PhysRev.47.777.

representados como bras y kets según la notación de Dirac, esta representación nos permitirá manipular la información cuántica de manera efectiva.

7.3 Introducción al álgebra lineal

Un vector es un objeto matemático que comúnmente se conoce por tener magnitud dirección y sentido, éste se denota matemáticamente en coordenadas cartesianas por $\hat{v} = a\hat{i} + b\hat{j} + c\hat{k}$, en donde $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$, son los vectores unitarios en las direcciones x, y, z , la magnitud de \hat{v} se determina con $|\hat{v}| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$, y también puede ser representado gráficamente en un espacio tridimensional como se presenta en la **Figura 15**.

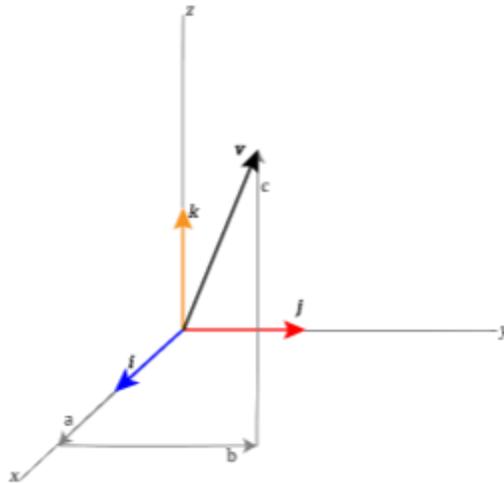


Figura 15. Ilustración gráfica de un vector.

Este vector también puede ser expresado mediante la notación de Dirac a través de Bras y Kets, en donde cada componente del vector puede ser representado como un Bra o un Ket,

7.3.1 ¿Que son los Kets?

Un "ket" es una notación que representa un vector en un espacio de Hilbert (es un espacio vectorial en el cual se pueden realizar operaciones como sumas de vectores y multiplicación por escalares, y además cuenta con un producto interno), denotado como $|a\rangle$, donde a , es el nombre del estado. En la mecánica cuántica, un ket podría representar el estado de una partícula, por ejemplo $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle)$, representa a un qubit en superposición.

Adicionalmente los kets representan a los vectores columna, tal y como se muestra a continuación para un punto en el espacio tridimensional dado por sus componentes $(x = 1, y = 2, z = 3)$, este ket se muestra a continuación.

$$|a\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Retomando el primero ejemplo para describir el vector presentado en la **Figura 15**, en el espacio tridimensional la notación Braket se representa de la forma $|v\rangle = a|i\rangle + b|j\rangle + c|k\rangle$, en donde $|i\rangle, |j\rangle, |k\rangle$ son los vectores base en las direcciones x, y, z y a, b, c , son las amplitudes de los estados base en las direcciones $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$, respectivamente.

7.3.2 ¿Que son los Bras?

Un "Bra" es al igual que los ket una notación que representa un vector en un espacio de Hilbert, sin embargo, esta vez el vector es el conjugado hermitiano de un ket, esto es $|a\rangle^\dagger = \langle a|$, donde \dagger denota la operación de adjunta hermitiana (transposición compleja conjugada). Esto se traduce a un vector fila en contraposición al vector columna que representa al Ket. El Bra es denotado como $\langle a|$, en donde a es el nombre del estado.

Como se ha mencionado los Bras representan los vectores fila, como ejemplo el mismo punto $(x = 1, y = 2, z = 3)$, representado por medio de un Bra, se presenta a continuación:

$$\langle a| = (1,2,3)$$

En cuanto al ejemplo proporcionado, es correcto en el contexto de números reales. Sin embargo, es importante recordar que, si alguna de las componentes fuera compleja, entonces debería ser conjugada en la notación del bra.

7.3.3 Espacios Vectoriales funcionales.

Ahora que se ha comprendido la notación de Dirac (Braket) en la representación de vectores, se va a utilizar para describir a los espacios

vectoriales funcionales, los cuales son elementos que se usan para describir los estados de un sistema cuántico.

Un espacio vectorial, denotado como $|V\rangle$ es una colección de vectores que incluye $|u\rangle, |v\rangle, |w\rangle$, entre otros, formando el conjunto $|V\rangle = \{|u\rangle, |v\rangle, |w\rangle, \dots\}$, que obedecen una serie de reglas algebraicas las cuales garantizan que estos mismos se comporten de una manera definida y predecible, estas reglas se mencionan a continuación.

1. **Cerradura bajo la adición (Closure):** cuando se suman dos vectores en el espacio, el resultado es otro vector en el mismo espacio, esto es $|v\rangle + |w\rangle \in |V\rangle$.
2. **Multiplicación escalar:** cuando se multiplica un vector por un escalar, el resultado también está en el mismo espacio.
3. **Existencia de un Vector Cero:** Existe un vector especial llamado vector cero $|0\rangle$ tal que $|v\rangle + |0\rangle = |v\rangle$ para cualquier vector $|v\rangle$.
4. **Existencia de Vectores Opuestos:** Para cada vector $|v\rangle$, existe un vector $|v\rangle$ tal que $|v\rangle + (-|v\rangle) = 0$.
5. **Conmutatividad y Asociatividad:** La adición de vectores es conmutativa y asociativa: $|v\rangle + |w\rangle = |w\rangle + |v\rangle$ y $(|v\rangle + |w\rangle) + |u\rangle = |v\rangle + (|w\rangle + |u\rangle)$.
6. **Distributividad:** La multiplicación escalar se distribuye sobre la adición de vectores y escalares: $c(|v\rangle + |w\rangle) = c|v\rangle + c|w\rangle$ y $(c + d)|v\rangle = c|v\rangle + d|v\rangle$ (donde c y d son escalares).
7. **Multiplicación Escalar Asociativa:** $(cd)|v\rangle = c(d|v\rangle)$ (donde c y d son escalares).
8. **Existencia de un Escalar Unitario:** Hay un escalar especial 1 tal que $1|v\rangle = |v\rangle$ para cualquier vector $|v\rangle$.

Para una discusión más completa del algebra lineal en este tipo de notación el lector puede revisar "The Principles of Quantum Mechanics"³⁴,

³⁴ P. A. M. Dirac, The Principles of Quantum Mechanics. in Comparative Pathobiology - Studies in the Postmodern Theory of Education. Clarendon Press, 1981. [Online].

también se pueden consultar el capítulo uno de los libros “Modern Quantum Mechanics”³⁵ y “Principles of Quantum Mechanics”³⁶.

Ahora que se ha visto un poco del algebra necesaria para comprender el mundo de las tecnologías cuánticas, se procederá a realizar una breve descripción de la información cuántica y como esta afecta la forma en la que se comprende la computación cuántica.

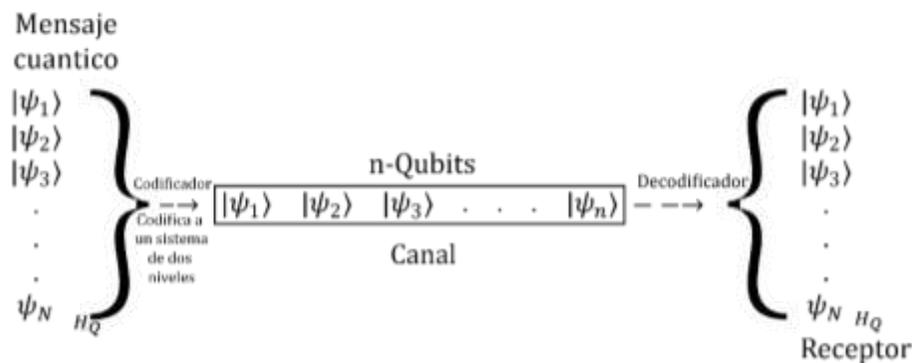


Figura 16. Sistema Cuántico.

7.4 Información Cuántica.

Similar a la información clásica, que es conceptualizada como la incertidumbre inherente en un mensaje y cuantificada a través de la ecuación (1), donde la cantidad de caracteres o símbolos establece la cuota máxima de información contenida en el mensaje. La información cuántica, por otro lado, es interpretada como la incertidumbre de la información contenida en un sistema cuántico. Esta incertidumbre cuántica se refiere al grado de información que un medio cuántico puede transmitir o resguardar. Para observar un poco mejor este concepto se va a describir el sistema cuántico como se presenta en la Figura 16.

En este sistema se pueden ver cinco principales componentes, los cuales se describen a continuación.

³⁵ Sakurai and Napolitano, “Modern Quantum Mechanics - 3rd Ed.”

³⁶ Shankar, *Principles of Quantum Mechanics*.

1. **Fuente de información cuántica:** La fuente de información cuántica es el dispositivo o sistema que genera un conjunto de estados puros (estados cuánticos bien definidos que pueden ser descritos completamente por un vector de estado). Estos estados conforman un alfabeto denotado como Σ , que contiene los mensajes $\Sigma = \{|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle, |\psi_3\rangle, \dots, |\psi_N\rangle\}$ con $|\psi_i\rangle$ perteneciendo al espacio de Hilbert H_Q . Además, cada estado tiene probabilidades asociadas dadas por $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_N\}$. Estos estados serán posteriormente transmitidos a través de un canal cuántico. La fuente de información también puede ser descrita por un operador de densidad, el cual se muestra en la ecuación (12).

$$\rho = \sum_{i=1}^n p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i| \quad (12)$$

1. **Codificador de información:** el codificador se encarga de procesar los estados puros del conjunto Σ y convertirlos a sistemas de estados de dos niveles $|\psi_n\rangle$, (comúnmente llamados qubits) que serán transmitidos a través del canal cuántico.
2. **Canal cuántico:** un canal cuántico actúa como el conducto por el cual la información cuántica es transmitida. Es imperativo que este canal preserve la integridad de la información cuántica sin interrupciones y mantenga características propicias para la transmisión de dicha información. El ejemplo más avanzado de un canal cuántico -en la actualidad- es la fibra óptica, que facilita la transmisión de información de qubits fotónicos.
3. **Decodificador:** el decodificador se encarga de recibir la información proporcionada por el canal cuántico y convertirla de nuevo en el alfabeto $\Sigma = \{|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle, |\psi_3\rangle, \dots, |\psi_N\rangle\}$, enviado por la fuente de información.

En este sistema cuántico se tienen n copias de un mensaje generado por una fuente de información cuántica. Este mensaje es codificado y enviado a través de un medio cuántico como una fibra óptica, luego un decodificador toma esta señal y la convierte nuevamente en el mensaje que llega al receptor, todo esto sucede de manera similar o idéntica al sistema clásico de comunicación, sin embargo, en este sistema se manejan tecnologías que se adaptan a los medios cuánticos.

7.5 Unidades de la información cuántica, los Qubits.

Así como los bits son las unidades fundamentales para encapsular la información en el dominio clásico, los qubits (o bits cuánticos) sirven como la representación básica de la información en el ámbito cuántico. Esto se refleja en el diagrama de la Figura 16, donde el codificador almacena la información en sistemas cuánticos de dos niveles.

Un qubit, es un sistema de dos niveles análogo a los bits clásicos que se presentó en el primer capítulo. Sin embargo, una distinción crucial es que los qubits pueden exhibir una fase en cada uno de sus dos niveles, lo que enriquece notablemente su representación. Esta peculiaridad se ilustra de manera eficaz mediante la esfera de Bloch, como la mostrada en la Figura 17, la cual es una representación gráfica concebida por el físico Félix Bloch en 1936, que proporciona una visualización intuitiva de los estados cuánticos. Es importante notar que la esfera de Bloch es una conocida representación del modelo dinámico del Átomo de dos Niveles (TLA) excitado por un campo eléctrico. Es importante hacer notar que el estándar para la esfera de Bloch en computación cuántica no coincide con el estándar de la esfera de Bloch en Física. Simplemente es necesario notar los polos como la definición de los estados puros.

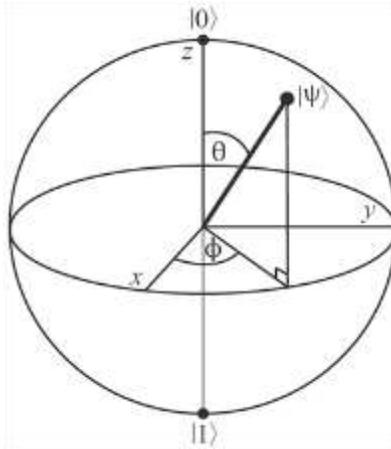


Figura 17. Sistema de dos niveles, Qubits.

En la ecuación (13), se expone la forma algebraica de un qubit o el vector de estado (state vector), donde los valores de a y b denotan las amplitudes de probabilidad para cada uno de los dos estados, y pueden asumir valores complejos:

$$|\psi\rangle = a |0\rangle + b |1\rangle \quad (13)$$

Los estados descritos aquí son $|0\rangle$ y $|1\rangle$, y pueden referirse a estados de sistemas físicos diversos como iones atrapados, polarizaciones de un fotón, o la arquitectura de un sistema topológico. Estas referencias y su implicancia en la estructura de la computación cuántica serán exploradas con mayor profundidad en el siguiente capítulo, donde se discutirá la infraestructura inherente a la computación cuántica.

Dada la premisa de que la suma de las probabilidades de ambos estados debe equivaler a la unidad, es apropiado restringir el vector de estado que caracteriza al qubit a ser un vector unitario. Esto implica que la suma de las magnitudes cuadradas de los coeficientes debe ser igual a la unidad, conforme se ilustra a continuación:

$$\sqrt{|a|^2 + |b|^2} = 1$$

Esta condición asegura la normalización del vector de estado que representa al qubit, lo cual es fundamental para mantener la coherencia con los principios de la mecánica cuántica. A través de esta normalización, es posible

transcribir el vector de estado $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$, en términos de sus componentes esféricas relativas a la esfera de Bloch, así, se logra que la función de onda del qubit quede representada como en la ecuación (14), lo cual facilita una orientación más intuitiva con la esfera de Bloch presentada en la Figura 17.

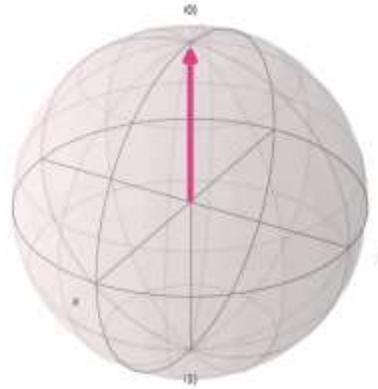
$$|\psi\rangle = \cos(\theta)|0\rangle + \sin(\theta)e^{i\phi}|1\rangle \quad (14)$$

A continuación, en la Tabla 10, se describen algunos vectores de estado y su representación gráfica en la esfera de Bloch.

Tabla 10. Vectores de estado y su esfera de Bloch.

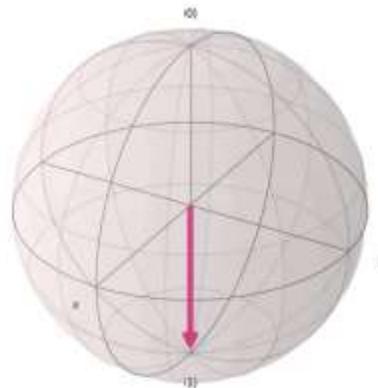
$$|\psi\rangle = 1|0\rangle + 0|1\rangle$$

$$|\psi\rangle = |0\rangle$$

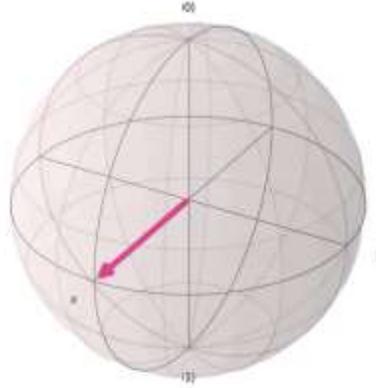


$$|\psi\rangle = 0|0\rangle + 1|1\rangle$$

$$|\psi\rangle = |1\rangle$$



$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (a|0\rangle + b|1\rangle)$$



Estos sistemas de dos niveles, pueden ser descritos semiclásicamente a través de las ecuaciones de Bloch de Física, las cuales describen la evolución temporal de un sistema de dos niveles (tal y como lo es un Qubit) interactuando con un campo electromagnético el cual puede ser una onda de luz. Las ecuaciones de Bloch se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= -\Gamma_c u - \Delta v & (15) \\ \dot{v} &= \Delta u - \Gamma_c v + \frac{\Omega}{2} w \\ \dot{w}_1 &= -\frac{\Omega}{2} v - \Gamma_i (w - w_{eq}) \end{aligned}$$

En donde:

u , es la componente dispersiva del momento dipolar.

v , es la componente de absorción del momento dipolar.

Δ , la frecuencia de resonancia dada por $(W_1 - W_0)/\hbar$.

w_{eq} , es la inversion en equilibrio

Γ_c , La tasa de decaimiento del momento dipolar

Γ_i , La tasa de decaimiento de la inversión

Es importante hacer notar que cuando la computación cuántica se ha referido a la decoherencia lo hace señalando el decaimiento atómico, mas no se ha referido al decaimiento dipolar y lo que es aún más importante no

ha hecho referencia a las propiedades de coherencia del campo excitante. Lo que es más importante aún, es que nuestras variables u , v , w no corresponden a los coeficientes de la función de onda, sino sus productos.

Es interesante compararla con la matriz de densidad sin decaimiento que surge de la Ec. (14) para tener la imagen correcta

$$|\psi\rangle\langle\psi| = \begin{pmatrix} \cos^2(\theta)|0\rangle\langle 0| & \cos(\theta)\sin(\theta)e^{-i\phi}|0\rangle\langle 1| \\ \cos(\theta)\sin(\theta)e^{i\phi}|1\rangle\langle 0| & \sin^2(\theta)|1\rangle\langle 1| \end{pmatrix}$$

$$w = \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) = \cos(2\theta)$$

$$p = u + iv = \frac{1}{2}\sin(2\theta)e^{i\phi}$$

Que fácilmente se puede identificar con la frecuencia de Rabi, sin decaimiento u otra decoherencia, mostrándonos todo un panorama de oportunidades que aún nos quedan en Física al considerarlas y usar todo lo que ya sabemos para el átomo de dos niveles en el ámbito de la Óptica Cuántica.

7.6 Teorema de la codificación cuántica y entropía (Quantum coding Theorem)

Una vez se han definido los sistemas de información cuántica y las unidades de información o qubits, es necesario cuantificar la cantidad de qubits que posee un mensaje cuántico, para lo cual se va a hacer uso de la entropía de un sistema de información. De manera clásica se definió la entropía según la ecuación (4), en donde:

$$H = \sum_{i=1}^N p(x_i) \cdot \log_2 \left(\frac{1}{p(x_i)} \right).$$

Sin embargo, esta entropía clásica no se puede aplicar directamente ya que está asociada con sistemas clásicos; por lo cual es necesario modificar la ecuación (4), para adaptarla a los sistemas de información cuántica.

Para esto, en lugar de la probabilidad del i -ésimo símbolo es necesario usar la matriz de densidad de probabilidad del sistema la cual es una matriz hermítica y positiva, semidefinida con traza igual a uno ($Tr(\rho) = 1$). Debido a esto, ya que esta matriz conserva todas las características del sistema, ahora se va a usar la traza en lugar de la suma usada en el caso clásico, quedando de la siguiente manera:

$$H_{cuantica} = traza \left(\rho \log \left(\frac{1}{\rho} \right) \right)$$

Con lo cual se ha deducido la entropía de Von Neuman la cual da a conocer la cantidad de información de un sistema cuántico y se reduce a la entropía de Shannon en el caso clásico cuando ρ es una matriz diagonal.

Teniendo claros estos conceptos, se define el teorema de codificación cuántica propuesto por Shumacher³⁷, como el medio que nos indica que para un mensaje de N caracteres la cantidad k de qubits que se requieren para codificar adecuadamente un mensaje en un sistema de información cuántica se muestra en la ecuación (16).

$$k = N H_{cuantica} \quad (16)$$

Este teorema establece que para codificar adecuadamente un mensaje de N caracteres en un sistema de información cuántica, se requieren k qubits.

Ejemplo, calculando la capacidad de un sistema cuántico de dos estados ideal:

Considerando un sistema TLA (Átomo de dos niveles), con niveles 0 y 1, ortogonales tal que $\langle 1|0 \rangle = 0$. Es posible describir su matriz de densidad por:

$$\rho = \frac{1}{2} (\rho_{00}|0\rangle\langle 0| + \rho_{11}|1\rangle\langle 1| + \rho_{01}|0\rangle\langle 1| + \rho_{10}|1\rangle\langle 0|)$$

³⁷ Richard Jozsa and Benjamin Schumacher, "A New Proof of the Quantum Noiseless Coding Theorem," *Journal of Modern Optics* 41, no. 12 (1994): 2343–2349, doi:10.1080/09500349414552191.

El problema de calcular $\log\left(\frac{1}{\rho}\right)$ en $H_{cuantica}$ es muy complejo, a menos que expresemos ρ en una representación diagonal, en cuyo caso es un problema trivial. Por lo que, en nuestro ejemplo, se considerará una representación de la siguiente forma:

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle, \quad |-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$$

Rápidamente es posible reconocer que esta base también es ortogonal i.e. $\langle+|-\rangle = 0$. Entonces la matriz de densidad en esta nueva representación está dada por:

$$\rho = \frac{1}{2}(\rho_{++}|+\rangle\langle+| + \rho_{--}|-\rangle\langle-| + \rho_{+-}|+\rangle\langle-| + \rho_{-+}|-\rangle\langle+|)$$

En particular, se va a seleccionar para la fuente, el que los estados $|+\rangle$ y $|-\rangle$ sean generados con igual probabilidad:

$$\rho = \frac{1}{2}(|+\rangle\langle+| + |-\rangle\langle-|)$$

Expresando $|+\rangle\langle+|$ y $|-\rangle\langle-|$ en la base $\{|0\rangle, |1\rangle\}$, que no es diagonal:

$$|+\rangle\langle+| = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}, \quad |-\rangle\langle-| = \begin{pmatrix} 0.5 & -0.5 \\ -0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

Sumando estas matrices y dividiendo por 2, se obtiene la matriz de densidad ρ diagonal:

$$\rho = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} I$$

En esta base, la matriz densidad ρ es diagonal y tiene valores propios 0.5 y 0.5. La entropía de von Neumann³⁸ es entonces:

³⁸ J von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Goldstine Printed Materials (Princeton University Press, 1955), <https://books.google.com.co/books?id=V-M9DwAAQBAJ>.

$$S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log(\rho)) = -(0.5 \log(0.5) + 0.5 \log(0.5)) = 1 \text{ qubit}$$

$$S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log(\rho))$$

$$S(\rho) = -\text{Tr} \left(\begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \log \left(\begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \right) \right)$$

En donde:

$$\log(\rho) = \begin{bmatrix} -\log(2) & 0 \\ 0 & -\log(2) \end{bmatrix}$$

Entonces:

$$S(\rho) = -\text{Tr} \left(\begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\log(2) & 0 \\ 0 & -\log(2) \end{bmatrix} \right)$$

Finalmente:

$$S(\rho) = -\text{Tr} \left(\begin{bmatrix} -0.5 \log(2) & 0 \\ 0 & -0.5 \log(2) \end{bmatrix} \right)$$

$$S(\rho) = -(-0.5 \log(2) - 0.5 \log(2)) \downarrow$$

$$S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log(\rho)) = -\text{Tr} \left(I \frac{1}{2} \log \left(\frac{1}{2} \right) \right) = -\log \left(\frac{1}{2} \right) \frac{1}{2} \text{Tr}(I)$$

$$= -(0.5 \log(0.5) + 0.5 \log(0.5)) = 1 \text{ qubit}$$

En este caso, la entropía de Von Neumann es 1 qubit, Lo que indica que se puede codificar la salida de esta fuente usando un qubit por señal. Según el teorema de codificación sin ruido cuántico, en el largo plazo, es posible ser capaces de representar la salida de la fuente con alta fidelidad usando 1 qubit.

Cálculos más complejos, donde la matriz de densidad no sea diagonal es el estándar. Entonces, la tarea para calcular las funciones de operadores es hacerlo en términos de encontrar los estados que diagonalizan la matriz de densidad y realizar las operaciones como aquí se ha señalado. Este es el caso de un átomo de dos niveles con decaimiento, Ec. (15).

Capítulo 8:

Infraestructura de la Computación Cuántica.

En este capítulo se profundizará en el fascinante mundo de la computación cuántica, describiendo sus pilares y dispositivos fundamentales. Se explorarán algunas de sus aplicaciones más relevantes y se detallará el concepto de qubit y su uso en la computación cuántica.

Hasta ahora, se ha explorado la información desde una perspectiva clásica, abordando su cuantificación y el procesamiento mediante computadoras y sistemas convencionales, como las compuertas lógicas (AND, OR, NOT). En el capítulo anterior, se avanzó hacia la dimensión de la información cuántica, detallando cómo cuantificarla mediante herramientas tales como la entropía cuántica y el teorema de codificación, entre otros. A diferencia del ámbito clásico, donde la información se procesa a través de arquitecturas conocidas, la información cuántica requiere de un enfoque distinto: necesita arquitecturas cuánticas específicas. Para ello, se utilizan computadoras cuánticas, las cuales operan bajo principios y tecnologías que varían según el tipo de codificación de la información cuántica y el modelo de qubits empleado.

En este apartado de la tesis, se describe la pila de conocimientos y tópicos sobre la cual se fundamenta la computación cuántica. Esta esta descrita por:

- Qubits,
- Circuitos,
- Algoritmos,
- Protocolos
- Aplicaciones,

La base sobre la cual se fundamenta toda la computación cuántica son los qubits los cuales son descritos en la sección 8.1, distinguiendo entre fotónicos, superconductores, semiconductores, topológicos, de iones atrapados y de átomos neutros. A continuación, en la sección 8.4, se

describirán los circuitos cuánticos que se realizan mediante diferentes tipos de compuertas cuánticas tales como las compuertas H, X,Y,Z, CNOT, Toffoli, entre otras. Luego de estos están los algoritmos y protocolos que se crean a partir de los circuitos básico, los cuales se describen en 8.6, algunos algoritmos comunes son: Algoritmo de Shor, Algoritmo de Grover, Algoritmo de QKD, entre otros. Finalmente se mencionan las aplicaciones, dentro de las cuales se tienen el Quantum Machine Learning, las simulaciones cuánticas, criptografía, entre otras.

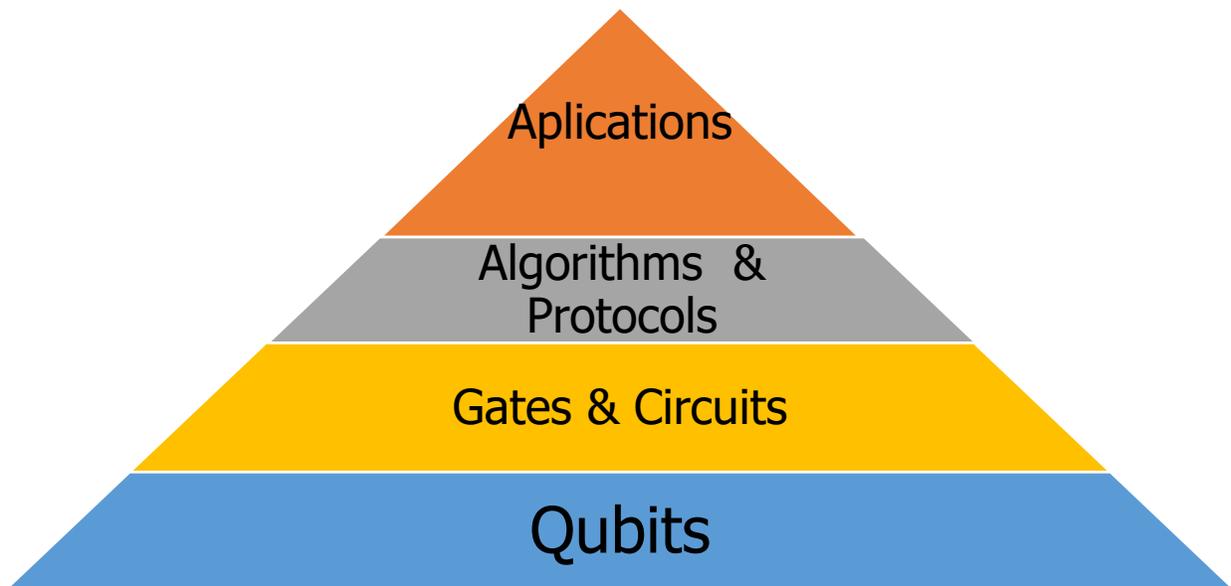


Figura 18. Infraestructura de la computación cuántica.

A continuación, se describen cada uno de estos pilares mencionados anteriormente en forma detallada, intentando describir sus características fundamentales y su funcionamiento.

8.1 Qubits

Los qubits son las unidades fundamentales de las computadoras cuánticas, desempeñando un papel análogo al de los bits en los sistemas clásicos. Actúan como las unidades básicas de información en el ámbito cuántico, y son cruciales en la definición de las tecnologías subyacentes a los ordenadores cuánticos, así como de su funcionamiento y sus limitaciones.

De la misma forma en la que los bits clásicos "0" y "1" son codificados en niveles de voltaje, por ejemplo 0 y 5 voltios en la lógica TTL (lógica transistor transistor), los qubits también representan la codificación de dos estados cuánticos, los cuales se seleccionan según las propiedades del sistema cuántico elegido.

8.2 Creación de un Qubit

De esta manera es posible crear un qubit por medio de la selección de un sistema cuántico cualquiera que presente dos niveles, para este análisis se conceptualizará la creación de un qubit utilizando el lanzamiento de una moneda en donde se presentan los estados "Cara" correspondiente al estado $|0\rangle$ y "Cruz" correspondiente al estado $|1\rangle$.

Alguien lanza una moneda al aire, y mientras está girando, la moneda puede estar en "cara", "cruz", o en cualquier punto intermedio de su giro, representando una mezcla de ambas posibilidades. Este estado de indeterminación, donde la moneda aún no ha aterrizado, es análogo a la superposición cuántica de un qubit, donde simultáneamente se encapsulan las posibilidades de estar en el estado $|0\rangle$ (cara) y $|1\rangle$ (cruz).

De esta forma, se ha creado un qubit mediante la codificación de dos estados fundamentales, $|0\rangle$ y $|1\rangle$, y permitiendo que exista en una superposición de ambos de tal forma que la moneda en el aire presenta el estado:

$$\psi = a|0\rangle + b|1\rangle$$

La posición exacta de la moneda (el qubit) en este espacio de superposición se determina por las amplitudes de probabilidad a y b , que especifican cuán probable es encontrar el qubit en el estado $|0\rangle$ o $|1\rangle$ cuando finalmente "aterriza" o, en términos cuánticos, cuando se mide.

Sin embargo, a pesar de haber conceptualizado la creación de un qubit con este modelo, es importante reconocer que en esta forma es inservible para fines prácticos de computación cuántica. La moneda en el aire, mientras ilustra la superposición, no permite realizar operaciones cuánticas complejas,

crear entrelazamiento cuántico con otra "moneda" en el aire, ni implementar algoritmos cuánticos.

8.3 Clasificación de Qubits.

En la práctica, la codificación de qubits se realiza a través de tecnologías diversas, que pueden agruparse en dos grandes categorías según las características fundamentales del sistema utilizado:

Codificación en Propiedades de Partículas Individuales: Esta categoría incluye tecnologías que utilizan partículas únicas y sus propiedades intrínsecas para representar y manipular qubits. Dentro de este grupo, se encuentran:

- **Qubits Fotónicos:** Utilizan propiedades de los fotones, como la polarización, para codificar qubits.
- **Qubits de Iones Atrapados:** Se basan en los estados energéticos o de espín de iones confinados mediante campos electromagnéticos.
- **Qubits de Átomos Neutros:** Emplean átomos neutros confinados en trampas ópticas o magnéticas, utilizando sus estados internos para la codificación de qubits.

Codificación en Propiedades Colectivas o de Estado Sólido: Este grupo se caracteriza por el uso de propiedades emergentes o colectivas de sistemas más complejos, donde la codificación de qubits se realiza a través de fenómenos que involucran múltiples partículas o estados de la materia condensada.

- **Qubits Superconductores:** Codifican qubits en los estados cuánticos de circuitos superconductores, explotando fenómenos como la superposición de corrientes.
- **Qubits Semiconductores:** Usan propiedades de los electrones en materiales semiconductores, como el espín o la carga en puntos cuánticos.
- **Qubits Topológicos:** Se basan en estados cuánticos que son estables debido a propiedades topológicas del sistema, como los aniones, que

pueden ser creados en ciertos tipos de materiales como los aisladores topológicos.

De esta forma es posible entender cómo cada tecnología de qubits explota distintos aspectos de la física para realizar la codificación y manipulación de la información cuántica. Mientras que la primera categoría se enfoca en la manipulación directa de partículas individuales, la segunda aprovecha fenómenos más complejos y colectivos, ofreciendo diferentes ventajas y desafíos para la implementación de la computación cuántica.

La implementación de cada tipo de qubit implica desafíos únicos y requiere de conocimientos especializados en distintas áreas de la física y la ingeniería. A continuación, se presenta una visión general de estos desafíos y las bases requeridas para su comprensión y desarrollo.

8.3.1 Qubits Átomos Neutros.

Cuando la cantidad de protones y electrones en un átomo es la misma, su carga se equilibra, resultando en un átomo sin carga o un átomo neutro³⁹. Los qubits de átomos neutros utilizan tecnologías ya establecidas y bastante investigadas para el:

- Atrapamiento, por medio de trampas magnéticas, pinzas ópticas más conocidas como tweezers, trampas de Paul, y las trampas de dipolo.
- El control y medición de átomos neutros⁴⁰, por medio de espectroscopía de absorción, espectroscopía de fluorescencia, espectroscopía de fotoionización, microscopía de túnel de barrido.

Para la creación de los qubits por medio de átomos neutros se seleccionan dos estados atómicos del tipo de átomo en cuestión

$$|\Psi\rangle = a|E_1\rangle + b|E_2\rangle,$$

En donde E_1 y E_2 se refieren a los estados seleccionados para la codificación de la información. Para ello se usan estados de la materia como el

³⁹ T L Brown, H E LeMay, and B E Bursten, *Química: La Ciencia Central* (Prentice Hall, 1993), <https://books.google.com.co/books?id=i-IaPQAACAAJ>.

⁴⁰ J. V. Porto et al., "Quantum Information with Neutral Atoms as Qubits," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 361, no. 1808 (2003): 1417–1427, doi:10.1098/rsta.2003.1211.

condensado de Bose Einstein. Este es un estado de la materia que se forma cuando un conjunto de átomos bosónicos se enfría a temperaturas muy bajas (cerca de 0 kelvin) en donde los átomos ocupan el estado cuántico de menor energía comportándose como un ente cuántico macroscópico.⁴¹ Por medio de la manipulación directa del hamiltoniano del sistema a través de métodos como la aplicación de láseres que modifican el hamiltoniano, o bien por la aplicación de pulsos láser individuales con los que se generan las compuertas⁴² (utilizando láseres para inducir transiciones controladas entre los estados cuánticos del átomo). Un ejemplo de esto es utilizando⁴³ los estados base hiperfinos $|F, m_F\rangle = |2, 2\rangle$ y $|F, m_F\rangle = |1, -1\rangle$ para el condensado de Bose Einstein de átomos de Rb,

8.3.2 Qubits de Iones atrapados

Los iones atrapados son átomos o moléculas cargadas eléctricamente que han sido confinados mediante el uso de campos electromagnéticos. Los qubits de iones atrapados son qubits creados mediante la ionización de diferentes tipos de materiales, comúnmente calcio, bario, iterbio, magnesio y estroncio. A través del uso de un láser⁴⁴, luego de la ionización, se liberan sobre una trampa de potencial o trampa de iones. Allí son manipulados como unidades de información (qubits).^{45, 46} mediante el uso de láseres dinamizando la interacción entre dos niveles electrónicos metaestables como se puede apreciar en la Figura 19, tomada de ⁴⁷.

⁴¹ C J Pethick and H Smith, *Bose-Einstein Condensation in Dilute Gases* (Cambridge University Press, 2002), https://books.google.com.co/books?id=iBK0G3_5iIQc.

⁴² Loïc Henriot et al., "Quantum Computing with Neutral Atoms," *Quantum* 4 (2020): 1–34, doi:10.22331/Q-2020-09-21-327.

⁴³ Porto et al., "Quantum Information with Neutral Atoms as Qubits."

⁴⁴ Colin D. Bruzewicz et al., "Trapped-Ion Quantum Computing: Progress and Challenges," *Applied Physics Reviews* 6, no. 2 (2019), doi:10.1063/1.5088164.

⁴⁵ Jack D Hidary, *Quantum Computing: An Applied Approach Second Edition*, n.d.

⁴⁶ Roee Ozeri, "The Trapped-Ion Qubit Tool Box," *Contemporary Physics* 52, no. 6 (2011): 531–550.

⁴⁷ Lucas Lamata et al., "Efficient Quantum Simulation of Fermionic and Bosonic Models in Trapped Ions," *EPJ Quantum Technology* 1, no. 1 (2014): 9, doi:10.1140/epjqt9.

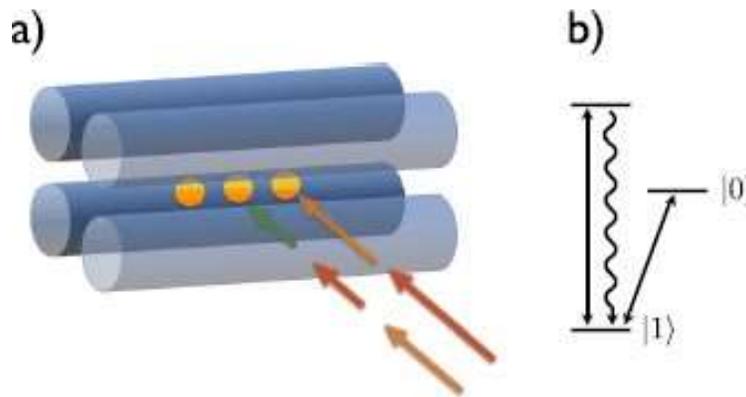


Figura 19. Qubits de iones atrapados. a) Esquema de trampa de radiofrecuencia. b) Esquema de niveles de energía del qubit. Fuente ⁴⁸.

8.3.2.1 Qubits Semiconductores:

Los qubits semiconductores son una especie de qubits que utilizan como base principal de funcionamiento los elementos semiconductores, es decir los elementos del grupo III y V de la tabla periódica, dentro de los cuales el más conocido es el Arseniuro de Galio GaAs. Dentro de éstas, su principio de funcionamiento radica principalmente en la manipulación de electrones debido a que con la tecnología actual es sencillo determinar la ubicación y el movimiento de estas partículas;⁴⁹ excepto en el caso de qubits de Majorana en el que cual se manipulan partículas llamadas Majoranas (Partículas que son sus propias antipartículas⁵⁰). Dentro de los qubits semiconductores se encuentran las siguientes clases:

- **Puntos cuánticos:** estas son pequeñas regiones de un material semiconductor que pueden atrapar y controlar electrones individuales, que a su vez actúan como qubits. Los puntos cuánticos se pueden fabricar utilizando una variedad de materiales semiconductores, incluidos semiconductores de silicio, germanio y elementos de los grupos III-V. La configuración de este tipo de qubits puede ser la de

⁴⁸ Lamata et al.

⁴⁹ Anasua Chatterjee et al., "Semiconductor Qubits in Practice," *Nature Reviews Physics* 3, no. 3 (2021): 157–177, doi:10.1038/s42254-021-00283-9.

⁵⁰ G F Bassani and S I di Fisica, *Ettore Majorana: Scientific Papers* (Springer Berlin Heidelberg, 2007), <https://books.google.com.co/books?id=nqbC1cM-5x4C>.

un electrón atrapado dentro de dos puntos cuánticos adyacentes en donde la construcción de los estados se da por medio de la ubicación del electrón como $|L\rangle$ (left) y $|R\rangle$ (right) ⁵¹.

- **Qubits de espín:** los qubits de espín utilizan el espín intrínseco de un electrón o un núcleo como qubit. En los materiales semiconductores, el espín se puede controlar mediante campos magnéticos o campos eléctricos, lo que permite manipular y medir el estado del qubit. esto se hace mediante la activación controlada de la barrera de tunelización entre puntos cuánticos vecinos de un solo electrón en estructuras bidimensionales⁵².
- **Qubits de Majorana:** Estos qubits se basan en las propiedades de los fermiones de Majorana, que son partículas exóticas que son sus propias antipartículas. Los qubits de Majorana se pueden implementar en nano cables semiconductores, que se pueden usar para crear qubits topológicos.

Las principales compañías que se dedican a desarrollar computadoras cuánticas con este tipo de qubits son: Intel, Silicon Quantum Computing, Diraq, Quantum Motion, Quantum Brilliance.

8.3.3 Qubits Fotónicos

Los qubits fotónicos utilizan como base fundamental para la codificación de información a los fotones. Esto son particular bosonicas que se caracterizan por su baja o nula interacción con la materia, pueden viajar sin muchas perdidas a través de grandes distancias en el vacío o en guías de onda como las fibras ópticas y se pueden manipular con elementos ópticos como los retardadores de fase o los polarizadores⁵³.

Además de esto permiten codificar la información cuántica de diferentes estados de libertad como polarización, momento angular orbital,

⁵¹ Chatterjee et al., "Semiconductor Qubits in Practice."

⁵² Daniel Loss, David P DiVincenzo, and P DiVincenzo, "Quantum Computation with Quantum Dots," *Phys. Rev. A* 57, no. 1 (1997): 120–126, <https://journals.aps.org/prapdf/10.1103/PhysRevA.57.120>.

⁵³ Isaac L. Chuang Michael A. Nielsen, "Quantum Computation and Quantum Information" 21, no. 1 (2020): 1–9, <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>.

energía y momento lineal^{54 55}, todos estos son variables físicas y son detallados a continuación.

8.3.3.1 Qubits fotónicos codificados por Polarización.

Los qubits fotónicos codificados por polarización, son un tipo de qubits que basan la codificación de la información por medio de los estados de polarización de la luz⁵⁶, normalmente polarización H (horizontal) y V (vertical)⁵⁷ de tal manera que se construyen unos estados base determinados por:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle + |V\rangle)$$

En donde las polarización horizontal y vertical se corresponde con los estados $|0\rangle$ y la polarización vertical con el estado $|1\rangle$ ⁵⁸. Debido a que los fotones son partículas que poco interactúan incluso con ellos mismos, obtener estados enredados entre estos es una tarea robusta que se puede ser realizada por medio del uso de la óptica no lineal, en la cual se hace incidir un rayo sobre un material no lineal y como resultado se obtienen dos rayos de frecuencias ω_s y ω_i que se encuentran enredados con una función de onda del tipo⁵⁹:

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|HV\rangle - |VH\rangle)$$

⁵⁴ Hidary, *Quantum Computing: An Applied Approach Second Edition*.

⁵⁵ Gerard J. Milburn and Andrew G. White, "Quantum Computing Using Optics," *Computational Complexity: Theory, Techniques, and Applications* 9781461418 (2012): 2437–2452, doi:10.1007/978-1-4614-1800-9_150.

⁵⁶ Malvin Carl Teich Bahaa E. A. Saleh, "Polarization and Crystal Optics," in *Fundamentals of Photonics* (John Wiley & Sons, Ltd, 1991), 193–237, doi:https://doi.org/10.1002/0471213748.ch6.

⁵⁷ Yanofsk Noson S and Mannucci Mirco A, *Quantum Computer for Computer Scientist*, 2016.

⁵⁸ Masato Koashi, Takashi Yamamoto, and Nobuyuki Imoto, "Probabilistic Manipulation of Entangled Photons," *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics* 63, no. 3 (2001): 1–4, doi:10.1103/PhysRevA.63.030301.

⁵⁹ Linda Sansoni et al., *Integrated Devices for Quantum Information and Quantum Simulation with Polarization Encoded Qubits, Quantum Optics II*, vol. 8440, 2012, doi:10.1117/12.924811.

Los computadores cuánticos que utilizan este tipo de qubits son creados a partir de elementos ópticos como lo son los polarizadores, los retardadores de frecuencia, los divisores de haces, etc.

8.3.3.2 Qubits fotónicos codificados por frecuencia:

Los qubits que codifican la información por frecuencia son creados manipulados y detectados mediante dos determinadas frecuencias ν_a y ν_b en superposición dentro de un solo fotón⁶⁰ ⁶¹, y por medio de técnicas como la espectroscopia de Ramsey pueden determinar el estado en el que se encuentra el fotón.

En algunas investigaciones como en la del autor Clemmen⁶², un fotón de frecuencia ν_a y estado $|v_a\rangle$ es enviado a través de una fibra no lineal previamente enfriada (para reducir el ruido) con lo cual se obtiene la superposición de este mismo en la frecuencia ν_a y otra frecuencia ν_b quedando con el estado:

$$|\Psi\rangle = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) e^{i\phi} |v_a\rangle + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |v_b\rangle$$

En donde θ es un ángulo que los relaciona la amplitud de cada estado y ϕ es la fase relativa entre las dos componentes de frecuencia. Para la manipulación de los estados de este qubit el autor utiliza operaciones de conversión de frecuencia basadas en la aplicación de dispositivos no lineales de segundo orden.

8.3.3.3 Qubits codificados por intervalos de tiempo.

En este enfoque, los qubits se codifican utilizando el tiempo de llegada de un único fotón en dos intervalos de tiempo distintos. La llegada temprana corresponde a un estado (por ejemplo, $|0\rangle$) y la llegada tardía corresponde a otro estado (por ejemplo, $|1\rangle$).

⁶⁰ Stéphane Clemmen et al., "Ramsey Interference with Single Photons," *Physical Review Letters* 117, no. 22 (2016), doi:10.1103/PhysRevLett.117.223601.

⁶¹ Joseph M. Lukens and Pavel Lougovski, "Frequency-Encoded Photonic Qubits for Scalable Quantum Information Processing," *Optica* 4, no. 1 (2017): 8, doi:10.1364/optica.4.000008.

⁶² Clemmen et al., "Ramsey Interference with Single Photons."

Siendo así que la información se codifica en términos de la llegada relativa de pulsos de luz⁶³.

Uno de los procedimientos para crear este tipo de qubits es el mencionado por Marcikic et al⁶⁴, en el cual:

- a) Primero: Se envía un pulso de láser corto a través de un interferómetro desbalanceado el cual es identificado como el interferómetro de bombeo.
- b) Luego de esto se envía a un cristal no lineal en donde eventualmente se crea un par de fotones mediante una conversión descendente paramétrica espontánea (SPDC) lo cual es un proceso en donde a partir de un fotón se crean dos fotones de menor energía.
- c) El estado obtenido es representado por:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|0\rangle_B - e^{i\phi}|1\rangle_A|1\rangle_B)$$

En donde $|0\rangle$, representa un foton en el primer intervalo de tiempo habiendo pasado por el brazo corto, $|1\rangle$ representa otro foton en el segundo intervalo de tiempo habiendo pasado por el brazo largo. Los índices A y B representan los fotones que van a ser enviados a los receptores Alice y Bob que son interferómetros que realizan las mediciones. En donde la fase ϕ relaciona una diferencia entre la longitud de camino optico $\Delta\tau$ de ambos fotones⁶⁵.

⁶³ Todd Pittman, "It's a Good Time for Time-Bin Qubits," *Physics* 6 (2013): 6–8, doi:10.1103/physics.6.110.

⁶⁴ I. Marcikic et al., "Distribution of Time-Bin Entangled Qubits over 50 Km of Optical Fiber," *Physical Review Letters* 93, no. 18 (2004): 1–5, doi:10.1103/PhysRevLett.93.180502.

⁶⁵ Marcikic et al.

8.3.3.4 Qubits codificados por momento angular orbital.

Esta clase de qubits utiliza como medio para codificar la información el momento angular de los fotones⁶⁶ En este enfoque, los fotones con diferentes valores de OAM, como $\ell=0$ y $\ell=1$, pueden representar los estados cuánticos $|0\rangle$ y $|1\rangle$ mediante el uso de modos transversales gaussianos de Laguerre.

Para la manipulación de este tipo de qubits en algunos estudios como el de Zeng et al⁶⁷, se desarrollan modelos puntuales de compuertas CNOT a partir de una configuración que utiliza ondas de sonido, mientras que en algunos otros como el de Nagali et Al⁶⁸, se desarrollan dispositivos "Q-Plates" el cual habilita la manipulación del momento angular del fotón dirigido por polarización como grado de libertad.

Si bien la codificación OAM se ha mostrado prometedora, existen desafíos técnicos que superar antes de que se pueda realizar una computadora cuántica basada en OAM. Algunos de estos desafíos incluyen:

- Generación y detección eficientes de estados OAM de alta dimensión.
- Implementación de puertas cuánticas de alta fidelidad para qubits codificados por OAM.
- Logrando un control y manipulación precisos de los estados OAM.
- Desarrollo de técnicas escalables de corrección de errores cuánticos para qubits OAM

⁶⁶ Alison M. Yao and Miles J. Padgett, "Orbital Angular Momentum: Origins, Behavior and Applications," *Advances in Optics and Photonics* 3, no. 2 (2011): 161, doi:10.1364/aop.3.000161.

⁶⁷ Qiang Zeng et al., "Realization of Optimized Quantum Controlled-Logic Gate Based on the Orbital Angular Momentum of Light," *Optics Express* 24, no. 8 (2016): 8186, doi:10.1364/oe.24.008186.

⁶⁸ E. Nagali et al., "Polarization Control of Single Photon Quantum Orbital Angular Momentum States," *Optics Express* 17, no. 21 (2009): 18745, doi:10.1364/oe.17.018745.

8.3.3.5 Qubits de variable continua.

Los qubits fotónicos de variable continua (CV, por sus siglas en inglés Continuous Variable) son un enfoque en el campo de la computación y comunicación cuántica que utiliza las propiedades cuánticas de la luz, específicamente los estados cuánticos de las variables continuas, como las amplitudes y fases de los campos electromagnéticos, para almacenar y procesar información. En lugar de trabajar con qubits discretos (0 y 1) como en el caso de los sistemas de computación cuántica basados en qubits, los qubits fotónicos de variable continua operan con un espectro continuo de estados cuánticos. Estos estados cuánticos pueden ser representados por estados coherentes, estados de número fotónico o estados de amplitud cuadrática, por ejemplo^{69 70}.

8.3.3.6 Qubits codificados por modos espaciales.

En este enfoque, un qubit es implementado por medio de colocar un fotón en dos modos ópticos, el cual puede ser manipulado por medio dispositivos ópticos lineales como los divisores de haz, retardadores, detectores de fotones y fuentes de un solo fotón^{71 72}.

Una de las implementaciones de qubits codificados por modos espaciales se da por medio de la manipulación de qubits codificados en caminos físicos implementados por medio de guías de onda⁷³, en donde un simple fotón puede estar en una superposición de ambos caminos en una configuración llamada "Dual rail" (doble carril) como es mostrado en la figura.

⁶⁹ L. Samuel Braunstein and Peter Van Loock, "Quantum Information with Continuous Variables," *Reviews of Modern Physics* 77, no. 2 (2005): 513–577, doi:10.1103/RevModPhys.77.513.

⁷⁰ Akira Furusawa, "Hybrid Quantum Information Processing," *AIP Conference Proceedings* 1633 (2014): 100–105, doi:10.1063/1.4903106.

⁷¹ E. Knill, R. Laflamme, and G. J. Milburn, "A Scheme for Efficient Quantum Computation with Linear Optics," *Nature* 409, no. 6816 (2001): 46–52, doi:10.1038/35051009.

⁷² Sansoni et al., *Integrated Devices for Quantum Information and Quantum Simulation with Polarization Encoded Qubits*.

⁷³ Jonathan C.F. Matthews et al., "Manipulation of Multiphoton Entanglement in Waveguide Quantum Circuits," *Nature Photonics* 3, no. 6 (2009): 346–350, doi:10.1038/nphoton.2009.93.

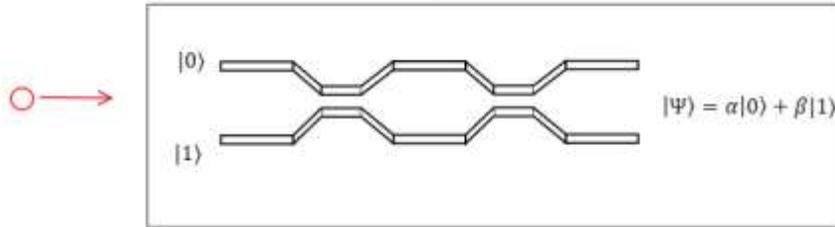


Figura 20. Qubits basados en modos ópticos

Este tipo de tecnología tiene la ventaja de que permite la creación de circuitos fotónicos integrados de baja escala. Para la manipulación de este tipo de fotones se utilizan interferómetros que son creados a través de la manipulación de las guías de onda basadas comúnmente en silicio, más puntualmente cuando se colocan dos guías de onda suficientemente cerca los modos ópticos pueden ser enredados.⁷⁴

8.3.4 Qubits Superconductores

Los qubits superconductores son dispositivos electrónicos de características similares a los circuitos LC (Figure 1. Qubit superconductor.), que utilizan como base fundamental las uniones de Josephson la cual es un dispositivo cuántico fundamental que consiste en dos superconductores separados por una barrera delgada a través de la cual pueden pasar portadores de carga en superconductores por efecto túnel cuántico⁷⁵, para su funcionamiento tal y como se menciona en ⁷⁶, estas les permite desarrollar su comportamiento cuántico mediante la generación artificial de los estados $|0\rangle$ & $|1\rangle$, Este dispositivo electrónico se compone de inductores, capacitores y unión de

⁷⁴ Alberto Politi et al., "Silica-on-Silicon Waveguide Quantum Circuits," *Science* 320, no. 5876 (2008): 646–649, doi:10.1126/science.1155441.

⁷⁵ M Tinkham, *Introduction to Superconductivity: Second Edition*, Dover Books on Physics (Dover Publications, 2004), <https://books.google.com.co/books?id=JOQoAwAAQBAJ>.

⁷⁶ M. H. Devoret, A. Wallraff, and J. M. Martinis, "Superconducting Qubits: A Short Review," 2004, <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0411174>.

Josephson y se comporta como un oscilador armónico con un hamiltoniano cuántico, de la forma:

$$H = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Phi^2}{2L} \quad (17)$$

Q = carga almacenada en el capacitor

Φ = flujo magnético a través del inductor

C = Capacitancia del capacitor

L = inductancia de la unión de Josephson.

Este hamiltoniano puede ser representado por un hamiltoniano del oscilador armónico.

$$H = k \frac{X^2}{2} + \frac{P^2}{2m} = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

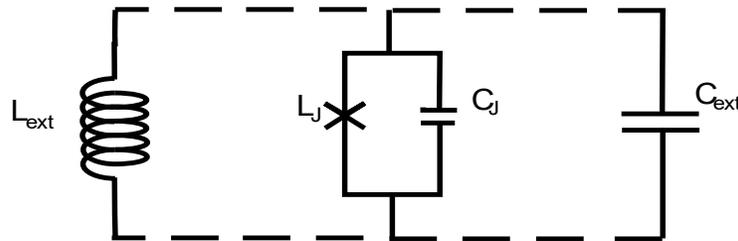


Figure 1. Qubit superconductor.

Esta unión de Josephson se compone principalmente de un sándwich en el que se tienen dos capas exteriores metálicas y una capa intermedia o aislante delgado que a temperaturas superconductoras nos permite encontrar las propiedades cuánticas. Esta unión de Josephson permite separar los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$ de tal forma que pueda ser identificados y explotados en los computadores cuánticos, como se muestra en la figura:

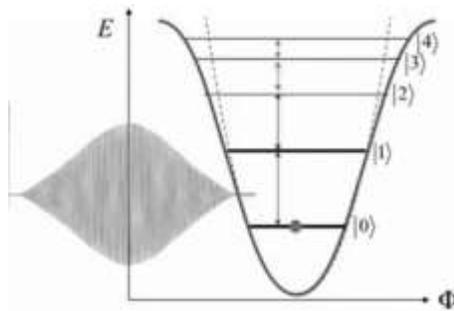


Figura 21. Estados del Qubit superconductor.

Por medio de diferentes combinaciones de la unión de Josephson, existen diferentes tecnologías de qubits superconductores, estas se mencionan a continuación:

- **Transmon qubits:** estos son el tipo de qubits superconductores más utilizados. Se basan en un circuito eléctrico simple que consta de una isla superconductora conectada a una línea de transmisión a través de un cruce Josephson. Los qubits transmon son fáciles de fabricar y ofrecen un tiempo de coherencia relativamente largo, lo que los convierte en una opción popular para construir computadoras cuánticas.
- **Qubits Xmon:** Los qubits Xmon son una variación de los qubits transmon que ofrecen características mejoradas de coherencia y control. Están diseñados para tener un factor de calidad más alto y un espectro de energía más homogéneo que los qubits transmon, lo que los hace más adecuados para la corrección de errores cuánticos.
- **Flux qubits:** estos qubits se basan en un bucle de material superconductor que contiene una pequeña unión Josephson. El estado del qubit se define por la dirección de la supercorriente que circula en el bucle, y los niveles de energía se pueden controlar ajustando el flujo magnético a través del bucle.
- **Qubits de fase:** los qubits de fase son similares a los qubits de flujo, pero se basan en un bucle superconductor que contiene dos uniones Josephson. El estado del qubit se define por la fase relativa de la función de onda superconductora en los dos brazos del bucle.

Estos qubits actualmente son desarrollados y utilizados por compañías como IBM Quantum, Google Quantum AI, DWave, INTEL, IQM, Rigetti, OQC, Alibaba.

8.3.5 Qubits Topológicos

Los qubits topológicos son aquellos que se basan su funcionamiento en la manipulación de unas partículas llamadas aniones⁷⁷ las cuales tienen la particularidad de no estar clasificadas como fermiones ni como bosones⁷⁸.

El funcionamiento de estos tipos de qubits se da por medio del uso de estados degenerados en algunos sistemas con dos partículas que se presentan como:

$$|\psi_a\rangle \text{ \& \ } |\psi_b\rangle$$

En donde $|\psi_a\rangle$ representa el sistema a de dos partículas cuyas posiciones son r_1 y r_2 , y $|\psi_b\rangle$ representa al sistema b de dos partículas cuyas posiciones son r_3 y r_4 .

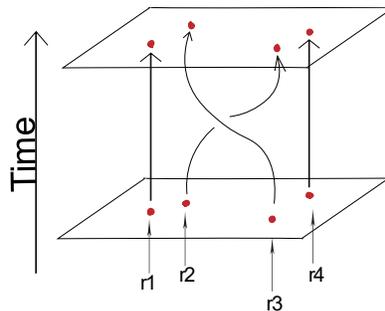


Figura 22. Qubits Topológicos

⁷⁷ Hidary, *Quantum Computing: An Applied Approach Second Edition*.

⁷⁸ Davide Castelvecchi, "Physicist Find Best Evidence yet for Elusive 2D Structures," *Nature* 583 (2020): 176, <https://www.mendeley.com/reference-manager/reader/c2f32725-2c63-3732-875d-6939455c56b0/66f986c2-31da-4d2d-52d6-3122149d81a7/>.

Teniendo el estado inicial de los sistemas $|\psi_i\rangle$ se realiza un trenzado espacial (se cambia de posición intercambiando r_2 y r_3) de las partículas no abelianas llegando a un estado $|\psi_f\rangle$, este proceso es mostrado en la Figura 22^{79, 80, 81}.

$$\begin{aligned}\Psi_i &= a_i|\psi_a\rangle + b_i|\psi_b\rangle = \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \end{pmatrix} \\ \Psi_f &= a_f|\psi_a\rangle + b_f|\psi_b\rangle = \begin{pmatrix} a_f \\ b_f \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} a_f \\ b_f \end{pmatrix} &= U \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \end{pmatrix}\end{aligned}$$

En donde U es el operador que transforma Ψ_i en Ψ_f el cual se puede definir como:

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{pmatrix}$$

En donde:

$$\begin{aligned}a_f &= u_{11}a_i + u_{12}b_i \\ b_f &= u_{21}a_i + u_{22}b_i\end{aligned}$$

Teóricamente, a través del trenzado de estas partículas no abelianas es posible construir diferentes tipos de compuertas cuánticas U , y diferentes circuitos cuánticos. Adicionalmente estos tipos de qubits cuánticos pueden ser implementados por medio de fenómenos físicos como el efecto hall⁸².

Debido a que los estados de las cuasipartículas no son codificados localmente, los qubits topológicos presentan una gran ventaja en cuanto a ruidos, pues estos teóricamente no pueden ser afectados por los ruidos

⁷⁹ Eric Rowell and Zhenghan Wang, "Mathematics of Topological Quantum Computing," *Bulletin of the American Mathematical Society* 55, no. 2 (2018): 183–238.

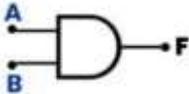
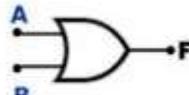
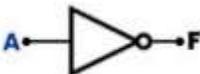
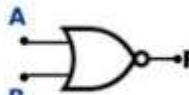
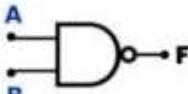
⁸⁰ Hidary, *Quantum Computing: An Applied Approach Second Edition*.

⁸¹ Sankar Das Sarma, Michael Freedman, and Chetan Nayak, "Topo Logical Quantum Computation," *Physics Today* 59, no. 7 (2006): 32–38, doi:10.1063/1.2337825.

⁸² E. Rowell and Z. Wang, "Mathematics of topological quantum computing," *Bull. Am. Math. Soc.*, vol. 55, no. 2, pp. 183–238, 2018.

naturales que los rodean y esto permite que presenten menos errores que otras tecnologías.

8.4 Compuertas Cuánticas

Nombre	Símbolo	Tabla de Verdad																				
AND		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>AND</th> <th>Salida</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>AND(0,0)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>AND(0,1)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>AND(1,0)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>AND(1,1)</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	AND	Salida	0	0	AND(0,0)	0	0	1	AND(0,1)	0	1	0	AND(1,0)	0	1	1	AND(1,1)	0
A	B	AND	Salida																			
0	0	AND(0,0)	0																			
0	1	AND(0,1)	0																			
1	0	AND(1,0)	0																			
1	1	AND(1,1)	0																			
OR		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>OR</th> <th>Salida</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>OR (0,0)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>OR (0,1)</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>OR (1,0)</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>OR (1,1)</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	OR	Salida	0	0	OR (0,0)	0	0	1	OR (0,1)	1	1	0	OR (1,0)	1	1	1	OR (1,1)	1
A	B	OR	Salida																			
0	0	OR (0,0)	0																			
0	1	OR (0,1)	1																			
1	0	OR (1,0)	1																			
1	1	OR (1,1)	1																			
NOT		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>NOT</th> <th>Salida</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>NOT (0)</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>NOT (1)</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	A	NOT	Salida	0	NOT (0)	1	1	NOT (1)	0											
A	NOT	Salida																				
0	NOT (0)	1																				
1	NOT (1)	0																				
NOR		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>XOR</th> <th>Salida</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>XOR (0,0)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>XOR (0,1)</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>XOR (1,0)</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>XOR (1,1)</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	XOR	Salida	0	0	XOR (0,0)	0	0	1	XOR (0,1)	1	1	0	XOR (1,0)	1	1	1	XOR (1,1)	0
A	B	XOR	Salida																			
0	0	XOR (0,0)	0																			
0	1	XOR (0,1)	1																			
1	0	XOR (1,0)	1																			
1	1	XOR (1,1)	0																			
NAND		<table border="1"> <thead> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>NAND</th> <th>Salida</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>NAND (0,0)</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>NAND (0,1)</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	A	B	NAND	Salida	0	0	NAND (0,0)	1	0	1	NAND (0,1)	1								
A	B	NAND	Salida																			
0	0	NAND (0,0)	1																			
0	1	NAND (0,1)	1																			

	1	0	NAND (1,0)	1
	1	1	NAND (1,1)	0

Las compuertas lógicas, juegan un papel muy importante en la computación clásica, estas permiten manipular el estado de los bits a conveniencia y realizar operaciones aritméticas entre ellos, de manera similar se presentan las compuertas cuánticas, las cuales son un pilar fundamental de la computación cuántica y permiten la manipulación de los estados cuánticos de los qubits a conveniencia y realizar diferentes tipos de operaciones y algoritmos.

De la misma forma en que se aplicó una compuerta clásica a un bit clásico (como la compuerta NOT) en la sección 6.1.1, en donde utilizando su tabla de la verdad es posible determinar el resultado de la aplicación de tal compuerta a dicho bit. Así mismo se puede aplicar una compuerta cuántica a determinado qubit y esperar una variación o cambio en el estado final de este mismo. En forma de recordatorio en la tabla 9.4 se revisan las compuertas clásicas, sus características y como estas son aplicadas sobre los bits clásicos en pro del entendimiento de la aplicación de las compuertas cuánticas sobre los qubits cuánticos.

De la misma manera en que se aplican operaciones a los bits de información clásica, también sucede lo mismo con los qubits. Sin embargo, en el caso de los qubits, se utilizan compuertas especializadas que serán descritas a continuación.

8.4.1 Compuerta X:

La compuerta cuántica X, también conocida como compuerta NOT cuántica, es una de las compuertas cuánticas básicas y se utiliza para cambiar el estado de un qubit (el análogo cuántico de un bit clásico) de 0 a 1 o de 1 a 0⁸³.

⁸³ Hidary, *Quantum Computing: An Applied Approach Second Edition*.

Matemáticamente, la compuerta cuántica X se puede representar por la siguiente matriz unitaria de 2x2:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Esta matriz actúa sobre un único qubit y se puede expresar con la siguiente tabla de la verdad:

Tabla 11. Tabla de la verdad de compuerta X.

Qubit entrada	Con puerta X	Qubit salida	de Nota
$ 0\rangle$	$X 0\rangle$	$ 1\rangle$	Al qubit en estado $ 0\rangle$ lo convierte en $ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$X 1\rangle$	$ 0\rangle$	Al qubit en estado $ 1\rangle$ lo convierte en $ 0\rangle$

En otras palabras, la compuerta cuántica X invierte el valor de un qubit. Si un qubit está en el estado $|0\rangle$, la aplicación de la compuerta X lo cambiará al estado $|1\rangle$, y viceversa.

8.4.2 Compuerta Y.

La compuerta cuántica Y es otra de las compuertas cuánticas básicas, que se utiliza para cambiar el estado de un qubit de manera similar a la compuerta X, pero con una rotación de fase adicional⁸⁴. La compuerta cuántica Y es especialmente importante en la implementación de algoritmos cuánticos que involucran rotaciones de fase, como el algoritmo de estimación de fase y el algoritmo de transformada cuántica de Fourier.

La compuerta cuántica Y se puede representar matemáticamente por la siguiente matriz unitaria de 2x2:

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

⁸⁴ Hidary.

Esta matriz actúa sobre un único qubit y se puede expresar con la siguiente tabla de la verdad:

Tabla 12. Tabla de la verdad de compuerta Y.

Qubit entrada	Con puerta Y	Qubit salida	de Nota
$ 0\rangle$	$Y 0\rangle$	$i 1\rangle$	Al qubit en estado $ 0\rangle$ lo convierte en $i 1\rangle$
$ 1\rangle$	$Y 1\rangle$	$-i 0\rangle$	Al qubit en estado $ 1\rangle$ lo convierte en $-i 0\rangle$

En otras palabras, la compuerta cuántica Y cambia el estado de un qubit al estado ortogonal, al mismo tiempo que aplica una rotación de fase de pi radianes (180 grados).

8.4.3 Compuerta Z.

La compuerta cuántica Z es otra de las compuertas cuánticas básicas, que se utiliza para aplicar una rotación de fase al estado de un qubit sin cambiar el estado de amplitud. La compuerta cuántica Z es importante en la implementación de algoritmos cuánticos que involucran rotaciones de fase, como el algoritmo de estimación de fase y el algoritmo de transformada cuántica de Fourier.

La compuerta cuántica Z se puede representar matemáticamente por la siguiente matriz unitaria de 2×2 ⁸⁵:

$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

En otras palabras, la compuerta cuántica Z aplica una fase global de pi radianes (180 grados) al estado de un qubit en el estado $|1\rangle$, mientras que no hace nada al estado en el estado $|0\rangle$. Esta matriz actúa sobre un único qubit y se puede expresar con la siguiente tabla de la verdad:

⁸⁵ Hidary.Hidary.

Tabla 13. Tabla de la verdad de compuerta Z.

Qubit entrada	Con puerta Z	Qubit salida	de Nota
$ 0\rangle$	$Z 0\rangle$	$ 0\rangle$	Al qubit en estado $ 0\rangle$ lo convierte en $ 0\rangle$
$ 1\rangle$	$Z 1\rangle$	$- 1\rangle$	Al qubit en estado $ 1\rangle$ lo convierte en $- 1\rangle$

8.4.4 Compuerta Hadamard:

La compuerta Hadamard es una de las compuertas cuánticas más importantes y útiles en la computación cuántica. Es una compuerta de un solo qubit que se utiliza para crear estados superpuestos y para realizar transformaciones de Fourier cuánticas⁸⁶. La compuerta Hadamard es útil para crear estados superpuestos, lo que es esencial para muchas aplicaciones cuánticas, como el algoritmo de Grover y el algoritmo de teleportación cuántica. También se utiliza para realizar transformaciones de Fourier cuánticas, que son importantes en la factorización de enteros y en la solución de ecuaciones cuánticas.

La compuerta Hadamard toma un qubit en un estado definido y lo coloca en una superposición de ambos estados posibles. En términos de la esfera de Bloch, la compuerta Hadamard hace que el qubit tenga una amplitud igual en los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$ y una fase relativa de π (180 grados).

La compuerta Hadamard se puede representar matemáticamente por la siguiente matriz unitaria de 2×2 :

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

⁸⁶ Anders Tipsmark et al., "Experimental Demonstration of a Hadamard Gate for Coherent State Qubits," *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics* 84, no. 5 (2011): 1–5, doi:10.1103/PhysRevA.84.050301.

Esta matriz actúa sobre un único qubit y se puede expresar de la siguiente manera:

Qubit entrada	compuerta Z	Qubit salida	de Nota
$ 0\rangle$	$H 0\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$	Al qubit en estado $ 0\rangle$ lo convierte en $\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$.
$ 1\rangle$	$H 1\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle - 1\rangle)$	Al qubit en estado $ 1\rangle$ lo convierte en $\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle - 1\rangle)$.

8.4.5 Compuerta CNOT:

La compuerta CNOT (Controlled-NOT) es una de las compuertas cuánticas más comunes en la computación cuántica y se utiliza para realizar operaciones controladas entre dos qubits. La compuerta CNOT es importante en la construcción de circuitos cuánticos y en la implementación de algoritmos cuánticos, como el algoritmo de Grover y el algoritmo de Shor. También se utiliza en la implementación de la tele portación cuántica.

La compuerta CNOT actúa sobre dos qubits, un qubit de control y un qubit objetivo, y se puede representar matemáticamente por la siguiente matriz unitaria de 4x4: ⁸⁷

$$CX = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

La compuerta CNOT funciona de la siguiente manera: si el qubit de control está en el estado $|1\rangle$, la compuerta NOT (X) se aplica al qubit objetivo. Si el

⁸⁷ Hidary, *Quantum Computing: An Applied Approach Second Edition*.

qubit de control está en el estado $|0\rangle$, no se aplica ninguna operación al qubit objetivo como es expresado en la siguiente tabla de la verdad.

Tabla 14. Tabla de la verdad de la compuerta CNOT.

Qubit entrada	Compuertas CX	Qubit salida	de Nota
$ 00\rangle$	$CX 00\rangle$	$ 00\rangle$	Al arreglo de qubits en estado $ 00\rangle$ no le produce ningún efecto porque el qubit de control está en $ 0\rangle$.
$ 01\rangle$	$CX 01\rangle$	$ 11\rangle$	Al arreglo de qubits en estado $ 01\rangle$ lo convierte en $ 11\rangle$, debido a que el qubit de control está en $ 1\rangle$ y el qubit objetivo esta en $ 0\rangle$.
$ 10\rangle$	$CX 10\rangle$	$ 10\rangle$	Al arreglo de qubits en estado $ 10\rangle$ no le produce ningún efecto porque el qubit de control está en $ 0\rangle$.
$ 11\rangle$	$CX 11\rangle$	$ 01\rangle$	Al arreglo de qubits en estado $ 01\rangle$ lo convierte en $ 01\rangle$, debido a que el qubit de control está en $ 1\rangle$ y el qubit objetivo esta en $ 0\rangle$.

Por ejemplo,

- Si el qubit de control está en el estado $|0\rangle$ y el qubit objetivo está en el estado $|0\rangle$, la compuerta CNOT no hace nada.

- Si el qubit de control está en el estado $|1\rangle$ y el qubit objetivo está en el estado $|0\rangle$, la compuerta CNOT aplica una compuerta NOT al qubit objetivo, cambiando su estado a $|1\rangle$.
- Si el qubit de control está en el estado $|1\rangle$ y el qubit objetivo está en el estado $|1\rangle$, la compuerta CNOT también aplica una compuerta NOT al qubit objetivo, cambiando su estado a $|0\rangle$.

8.4.6 Compuerta Toffoli.

La compuerta Toffoli, también conocida como compuerta CCNOT (Controlled-Controlled-NOT), es una compuerta cuántica de tres qubits que se utiliza para realizar operaciones controladas en dos qubits objetivo basadas en el estado de un qubit de control⁸⁸. La compuerta Toffoli es importante en la construcción de circuitos cuánticos y en la implementación de algoritmos cuánticos, como el algoritmo de Shor y el algoritmo de Grover. También se utiliza en la implementación de la corrección de errores cuántica y en la implementación de la tele portación cuántica.

La compuerta Toffoli actúa sobre tres qubits y se puede representar matemáticamente por la siguiente matriz unitaria de 8x8:

$$TG = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 \end{pmatrix}$$

La compuerta Toffoli funciona de la siguiente manera:

- Si los dos qubits objetivo están en el estado $|1\rangle$ y el qubit de control también está en el estado $|1\rangle$, se aplica una compuerta NOT (X) a ambos qubits objetivo.

⁸⁸ Hidary.Hidary.

- Si el qubit de control está en cualquier otro estado, no se realiza ninguna operación en los qubits objetivo.

A continuación, se presenta la tabla de la verdad de esta compuerta:

Tabla 15. Tabla de la verdad de la compuerta Toffoli.

Qubit entrada	compuerta TG	Qubit de salida
$ 000\rangle$	$TG 000\rangle$	$ 000\rangle$
$ 001\rangle$	$TG 001\rangle$	$ 111\rangle$
$ 010\rangle$	$TG 010\rangle$	$ 010\rangle$
$ 011\rangle$	$TG 011\rangle$	$ 101\rangle$
$ 100\rangle$	$TG 100\rangle$	$ 100\rangle$
$ 101\rangle$	$TG 100\rangle$	$ 100\rangle$
$ 110\rangle$	$TG 110\rangle$	$ 110\rangle$
$ 111\rangle$	$TG 111\rangle$	$ 001\rangle$

En otras palabras, la compuerta Toffoli aplica una compuerta NOT en los dos qubits objetivo solo si el qubit de control está en el estado $|1\rangle$.

8.4.7 Compuerta U

La compuerta U, también conocida como compuerta de un solo qubit arbitraria, es una compuerta cuántica general que se utiliza para realizar cualquier transformación unitaria en un solo qubit. Es una de las compuertas cuánticas más generales y esencialmente cualquier otra compuerta cuántica puede ser construida a partir de esta⁸⁹. La compuerta U es importante en la construcción de circuitos cuánticos y en la implementación de algoritmos cuánticos, ya que permite realizar cualquier transformación unitaria en un solo qubit. También se utiliza en la implementación de la corrección de errores cuántica y en la implementación de la tele portación cuántica.

La compuerta U se puede representar matemáticamente por la siguiente matriz unitaria de 2x2:

⁸⁹ Hidary, *Quantum Computing: An Applied Approach Second Edition*.

$$U = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -e^{i\phi} \sin(\theta) \\ e^{i\lambda} \sin(\theta) & e^{i(\phi+\lambda)} \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

Esta matriz actúa sobre un único qubit y depende de tres parámetros: θ , ϕ y λ . Estos parámetros definen la transformación unitaria que se aplica al qubit.

8.5 Circuitos Cuánticos

Los circuitos cuánticos representan la combinación ordenada de compuertas cuánticas que actúan sobre los qubits, modificando sus estados para llevar a cabo tareas específicas y desarrollar algoritmos, como la factorización de un número. Estos circuitos constituyen la base fundamental de los algoritmos cuánticos, que aprovechan las propiedades únicas de la mecánica cuántica, como la superposición y el entrelazamiento, para resolver problemas de manera más eficiente en comparación con los algoritmos clásicos⁹⁰.

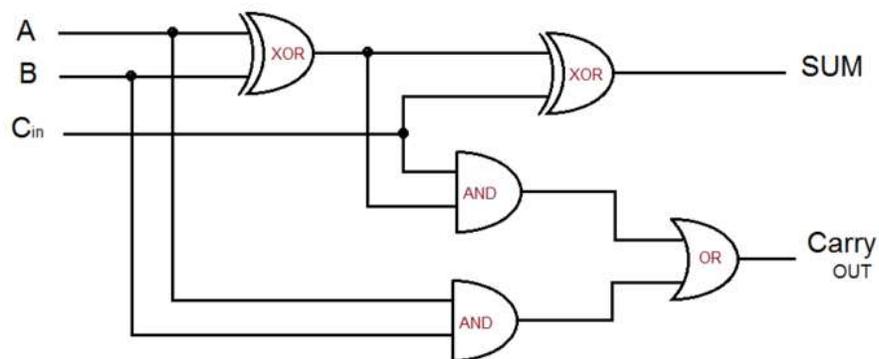


Figura 23. Circuito sumador clásico.

Los circuitos cuánticos no son muy diferentes a los circuitos clásicos, puesto que al igual que los circuitos clásicos, estos parten de una serie arreglada de qubits, luego de esto se añaden las compuertas cuánticas para obtener un resultado, de esta forma, a manera de ejemplo es posible hacer una comparación entre un circuito sumador clásico y un circuito sumador

⁹⁰ I. L. C. Michael A. Nielsen, "Quantum Computation and Quantum Information," vol. 21, no. 1, pp. 1–9, 2020, [Online]. Available: <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>

cuántico, en ambos casos se parte de las unidades de información, para luego introducir las compuertas y finalmente se obtiene el circuito resultados.

En la Fig. (23) se presenta el circuito sumador clásico (en binario) para 2 bits de información en el cual se describe que la suma los dos bits en binario. En este caso se tienen dos bits de entrada y un bit de préstamo, de esta forma se presenta la siguiente tabla de verdad para este circuito.

Tabla 16. Tabla de la verdad para el sumador clásico

A	B	C_{in}	SUM	CarryOut
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1

De manera semejante se tiene el circuito sumador cuántico de dos qubits, que se presenta a continuación:

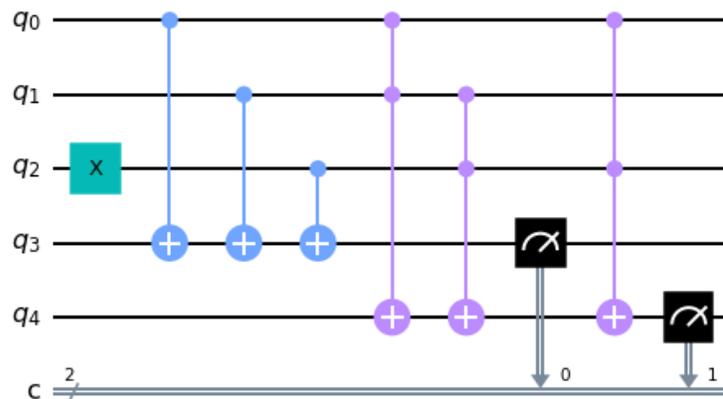


Figura 24. Circuito sumador cuántico.

De la misma forma que el circuito clásico, este circuito permite obtener la suma de dos qubits utilizando un computador cuántico tal y como se presenta en la siguiente tabla de la verdad para el circuito cuántico. Adicionalmente en el anexo uno se encuentra el código en Qiskit para elaborar este circuito.

Tabla 17. Tabla de la verdad para el sumador cuántico.

Q0(A)	Q1(B)	Q2(C_{in})	Q3(SUM)	Q4(CarryOut)
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1

Como se puede apreciar, los circuitos cuánticos permiten realizar las mismas operaciones que los circuitos clásicos. Sin embargo, con el uso de la tecnología cuántica se abre la oportunidad de explotar conceptos del mundo de la mecánica cuántica como la superposición, la interferencia y el entrelazamiento cuántico, dejando una gran ventaja que al día de hoy puede ser vista en algoritmos cuánticos que presentan una eficiencia superior en cuanto a su contraparte clásica, como lo es el caso del algoritmo de números primos de Shor.

8.6 Algoritmos Cuánticos

Los algoritmos son por definición un procedimiento paso a paso para resolver una tarea en una cantidad de tiempo finita⁹¹, más específicamente es un procedimiento que se lleva a cabo para resolver un problema, estos son la base fundamental de todas las aplicaciones de la computación clásica puesto

⁹¹ Dale Nell Weems Chip, *Programación y Resolución de Problemas Con C++*, ed. McGraw Hill México (Mexico: McGraw Hill México, 2007), <https://biblioteca.uazuay.edu.ec/buscar/item/74977>.

que permiten ejecutar todas las tareas que son llevadas a cabo en una computadora clásica, desde la ejecución del sistema operativo hasta el pago con tarjeta de crédito en una tienda en línea.

Los algoritmos clásicos han desencadenado una multitud de aplicaciones que se pueden ver cotidianamente en una amplia variedad de dispositivos electrónicos. Desde microcontroladores hasta FPGAs (Field Programmable Gate Array) y procesadores actuales, estos algoritmos son responsables de gestionar y asegurar el correcto funcionamiento de dichos dispositivos.

De la misma forma en que existen los algoritmos clásicos, también existen los algoritmos cuánticos, estos últimos se ejecutan sobre los procesadores cuánticos, y también son la base fundamental para las aplicaciones y protocolos cuánticos. Sin embargo, actualmente los algoritmos cuánticos no gozan de la misma cantidad de recursos que su contraparte cuántica, esto debido a que la cantidad de qubits que ofrecen los actuales computadores cuánticos es particularmente pequeña comparada con los bits clásicos que ofrecen los computadores clásicos, aspecto que deja a los computadores cuánticos en una gran desventaja frente a los clásicos.

Por esta razón, hoy en día existen dos tipos de paradigmas en el desarrollo de algoritmos cuánticos, estos son:

- algoritmos cuánticos de corto plazo y
- algoritmos cuánticos de plazo largo,

Los primeros están orientados a las capacidades de los computadores cuánticos actuales, los últimos se orientan a computadores cuánticos ideales que cumplen con los criterios de Divincenzo⁹² mostrados anteriormente. A continuación, se describe a detalle estos tipos de paradigmas.

⁹² D. P. DiVincenzo, "The physical implementation of quantum computation," *Fortschritte der Phys.*, vol. 48, no. 9–11, pp. 771–783, 2000, doi: 10.1002/1521-3978(200009)48:9/11<771::AID-PROP771>3.0.CO;2-E.

8.6.1 Algoritmos cuánticos de corto plazo (Near-Term Quantum Algorithms)

Este tipo de algoritmos cuánticos, como fue descrito anteriormente, son los encargados de ejecutarse sobre los computadores cuánticos que existen en el día de hoy, adaptándose a las pocas capacidades que presentan los procesadores cuánticos actuales, como son la baja cantidad de qubits y la alta cantidad de errores presentes dentro de estas tecnologías. Dentro del ámbito de los algoritmos cuánticos de corto plazo, se destacan técnicas como el Variational Quantum Eigensolver (VQE)⁹³ y Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA)⁹⁴. Estos algoritmos buscan proporcionar soluciones a problemas específicos utilizando las ventajas cuánticas disponibles, a pesar de las limitaciones tecnológicas actuales.

8.6.2 Algoritmos cuánticos de largo plazo, (Far-Term Quantum Algorithms)

Los algoritmos cuánticos de largo plazo son aquellos diseñados para ejecutarse en computadoras cuánticas con un gran número de qubits y una baja tasa de error. Estos algoritmos, en teoría, pueden resolver problemas que son computacionalmente intratables para las computadoras clásicas. Ejemplos prominentes incluyen el algoritmo de Shor para la factorización de números enteros y el algoritmo de Grover para la búsqueda en bases de datos no estructuradas. A medida que las tecnologías cuánticas evolucionen y se superen los obstáculos actuales, se espera que estos algoritmos de largo plazo desempeñen roles cruciales en la revolución de la computación cuántica.

8.6.3 Protocolos Cuánticos

Los protocolos cuánticos son normas establecidas o procedimientos en algunos sistemas cuánticos. Un ejemplo famoso es el protocolo de

⁹³ Jules Tilly et al., "The Variational Quantum Eigensolver: A Review of Methods and Best Practices," *Physics Reports* 986 (2022): 1–128.

⁹⁴ Leo Zhou et al., "Quantum Approximate Optimization Algorithm: Performance, Mechanism, and Implementation on near-Term Devices," *Physical Review X* 10, no. 2 (2020): 21067.

distribución cuántica de llaves⁹⁵ (QKD, por sus siglas en inglés: Quantum Key Distribution), que permite a dos partes intercambiar claves secretas con garantía de seguridad, gracias a las propiedades únicas de la mecánica cuántica. Además del QKD, existen otros protocolos como la teleportación cuántica, que permite el transporte de información cuántica entre dos ubicaciones sin la transferencia física de partículas. Estos protocolos forman la base para el desarrollo de redes y sistemas de comunicación cuántica seguros y eficientes.

8.7 Aplicaciones Cuánticas

A continuación, se muestra una amplia lista en la que se la computación cuántica puede ser aplicada y algunos grandes resultados con respecto a la computación clásica.

- **Criptografía:** la computación cuántica aplicada a la criptografía nos permite la realización de algoritmos como el “Quantum Key Distribución”. El cual, por medio del uso de los conceptos cuánticos como el enredamiento cuántico, desarrolla un método para transferir información desde un emisor normalmente conocido como Alice a un receptor conocido como Bob; sin el temor a que la comunicación se vea afectada por una tercera persona que pueda leer o editar el mensaje⁹⁶.
- **Inteligencia artificial:** la computación cuántica aplicada a la inteligencia artificial presenta enormes potenciales, beneficios y aplicaciones, dentro de los cuales se encuentran el desarrollo de redes neuronales cuánticas⁹⁷, el aprendizaje automático cuántico (Quantum

⁹⁵ Peng-Yong Kong, “A Review of Quantum Key Distribution Protocols in the Perspective of Smart Grid Communication Security,” *IEEE Systems Journal* 16, no. 1 (2022): 41–54, doi:10.1109/JSYST.2020.3024956.

⁹⁶ N S Yanofsky and M A Mannucci, *Quantum Computing for Computer Scientists* (Cambridge University Press, 2008), <https://books.google.com.co/books?id=U1chAwAAQBAJ>.

⁹⁷ Alexandr A. Ezhov and Dan Ventura, “Quantum Neural Networks,” 2000, 213–235, doi:10.1007/978-3-7908-1856-7_11.

Machine Learning)⁹⁸, el desarrollo de nuevos algoritmos de AI, Optimización⁹⁹, Visión por computador¹⁰⁰, etc.

- **Modelamiento financiero:** además de las tecnologías mencionadas anteriormente la computación cuántica también puede ser aplicada al área financiera mediante el modelamiento de complejos modelos financieros ¹⁰¹, ¹⁰².
- **Simulaciones cuánticas:** La computación cuántica aplicada a la simulación de sistemas cuánticos tales como las partículas y moléculas cuya naturaleza y comportamiento se describe estrictamente por la mecánica cuántica y requieren de una gran capacidad de cómputo la cual es difícil de reunir aun para los últimos grandes computadores clásicos¹⁰³.

Además de estas aplicaciones mencionadas, también se encuentran las listadas a continuación.

- Optimización
- Aprendizaje automático
- Plegamiento de proteínas (Protein folding)
- Predicción del clima
- Baterías
- Catálisis
- Paneles solares
- Descubrimiento de nuevas drogas

⁹⁸ Maria Schuld, Ilya Sinayskiy, and Francesco Petruccione, "An Introduction to Quantum Machine Learning," *Contemporary Physics* 56, no. 2 (2015): 172–185, doi:10.1080/00107514.2014.964942.

⁹⁹ Dmitriy Portnov and Tad Hogg, "Quantum Optimization," *Proceedings of the Joint Conference on Information Sciences* 5, no. 1 (2000): 778–781.

¹⁰⁰ Varadi Rajesh, Umesh Parameshwar Naik, and Mohana, "Quantum Convolutional Neural Networks (QCNN) Using Deep Learning for Computer Vision Applications," *2021 6th International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication and Technology, RTEICT 2021*, 2021, 728–734, doi:10.1109/RTEICT52294.2021.9574030.

¹⁰¹ Román Orús, Samuel Mugel, and Enrique Lizaso, "Quantum Computing for Finance: Overview and Prospects," *Reviews in Physics* 4, no. September 2018 (2019), doi:10.1016/j.revip.2019.100028.

¹⁰² Daniel J. Egger et al., "Quantum Computing for Finance: State-of-the-Art and Future Prospects," *IEEE Transactions on Quantum Engineering* 1 (2021): 1–24, doi:10.1109/tqe.2020.3030314.

¹⁰³ I. M. Georgescu, S. Ashhab, and Franco Nori, "Quantum Simulation," *Reviews of Modern Physics* 86, no. 1 (2014): 153–185, doi:10.1103/RevModPhys.86.153.

- Ecuaciones diferenciales
- Aleatoriedad
- Gravedad cuántica.

8.8 Diseñando un Circuito cuántico:

A continuación, se van a utilizar los conceptos de este capítulo, para crear un circuito cuántico básico que nos genere los estados de Bell. Estos estados de Bell son muy conocidos, debido a su importancia fundamental en la comprensión del entrelazamiento cuántico. Estos se presentan a continuación.

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

$$|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle)$$

$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$$

Para generar el primer estado de Bell se va a seguir el siguiente algoritmo:

- 1 Iniciar con dos qubits en el estado $|00\rangle$.
- 2 Aplicar una puerta Hadamard (H) al primer qubit. Esto pone el primer qubit en una superposición, resultando en el estado $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |10\rangle)$.
- 3 A continuación, aplicar una puerta CNOT (también conocida como puerta de control-X); usando el primer qubit como control y el segundo qubit como objetivo. Si el qubit de control (primer qubit) está en el estado $|1\rangle$, la puerta CNOT volcará el qubit objetivo (segundo qubit), generando el estado $|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$.

El diagrama grafico de este circuito se presenta a continuación:

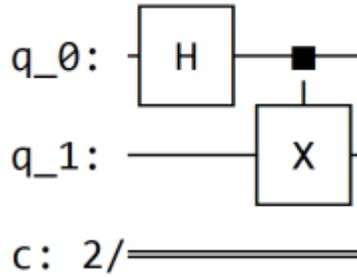


Figura 25. Circuito cuántico gráfico

Después de un exhaustivo recorrido por el fascinante mundo de la computación cuántica, es un placer presentarles la plataforma QubitHub.org. Esta nace de la inspiración y compromiso de trasladar todo el conocimiento teórico que se ha explorado capítulo tras capítulo, a una aplicación práctica y accesible para todos. La principal motivación al crear QubitHub.org ha sido la inclusión. Actualmente existen desigualdades en el acceso a la educación y, particularmente, en campos tan emergentes y prometedores como la computación cuántica, por ello, la plataforma busca ser un faro de oportunidades para aquellas personas menos favorecidas o que enfrentan barreras en su proceso de aprendizaje en este ámbito. En QubitHub.org, se cree en el poder de la educación y en democratizar el acceso a la vanguardia tecnológica, para que independientemente de su origen, las personas puedan sumergirse en el futuro de la computación.

Capítulo 9:

QubitHUB.ORG: Tu puerta de entrada al usuario de Computación Cuántica

En este capítulo se presentará la plataforma QubitHub.org, que sirve como punto de partida para aquellos interesados en la computación cuántica.

A lo largo de este trabajo, se han abordado las diversas dimensiones del procesamiento de información, desde sus fundamentos clásicos hasta las avanzadas técnicas de computación cuántica. Después de explorar tanto la teoría como la mecánica subyacente de estos conceptos, se ha llegado a un punto crucial: la aplicación práctica de este conocimiento. Para facilitar este salto del entendimiento teórico a la implementación práctica, en este trabajo de tesis se ha creado QubitHUB, una plataforma en línea dedicada a brindar herramientas esenciales en el ámbito de la computación cuántica¹⁰⁴.

Diseñado como una respuesta a los desafíos actuales en el aprendizaje y la aplicación de la computación cuántica, QubitHUB se beneficia de colaboraciones con distintos científicos y entidades, incluyendo a la Universidad de Notre Dame. La plataforma ofrece:

- **Ambiente de Desarrollo en Línea:** La plataforma ofrece un entorno tipo Python IDE accesible mediante credenciales, permitiendo a los usuarios a implementar sus códigos y aplicaciones en un ambiente similar a Jupyter Notebook¹⁰⁵.
- **Recursos de Computación Cuántica:** Los usuarios cuentan con la oportunidad de acceder a una descripción exhaustiva de las principales plataformas en el campo de la computación cuántica, junto con enlaces directos que facilitan su conexión con estas destacadas herramientas. Estos recursos se erigen como una valiosa fuente de información y

¹⁰⁴ Wilmer Contreras Sepulveda and Braulio Misael Villegas Martinez, "QubitHUB — The Quantum Science Gateway," 2023, <https://qubithub.org/>.

¹⁰⁵ João Felipe Pimentel et al., "A Large-Scale Study about Quality and Reproducibility of Jupyter Notebooks," in *2019 IEEE/ACM 16th International Conference on Mining Software Repositories (MSR)*, 2019, 507–517.

acceso para todos aquellos interesados en explorar y utilizar las tecnologías más relevantes en este ámbito.

- **Software Intérprete (Quantum Interpreter):** Se proporciona un intérprete que facilita el aprendizaje de diversos lenguajes de programación cuántica como Qiskit, Cirq, Pyquil, Pennylane y Amazon Braket. Este intérprete se describirá con más detalle en el Capítulo 8.
- **Red de Contactos Profesionales:** Además de tener acceso a recursos de aprendizaje, los usuarios tienen la posibilidad de conectar con otros profesionales en el ámbito de la información cuántica, lo que les brinda oportunidades para colaborar en proyectos multidisciplinarios y expandir su red de contactos. Esta interacción promueve un entorno para el crecimiento profesional y el desarrollo de nuevas perspectivas en el campo.

Esta plataforma está accesible en la dirección web www.qubithub.org. Al ingresar, la primera pantalla que encontrarán los usuarios se presenta en la siguiente imagen:



Figura 26. Pantalla de inicio del portal de ciencia Qubithub.org

Tras ingresar a QubitHUB.org, los usuarios se encontrarán con una interfaz intuitiva que destaca los principales servicios y características de la

plataforma. Desde esta ventana principal, es fácil acceder a una variedad de enlaces que guían al usuario hacia las distintas funcionalidades ofrecidas. Además de facilitar el acceso a las herramientas, la página principal proporciona una visión global del proyecto, delineando claramente su propósito y aspiraciones. La misión y visión del proyecto, pilares fundamentales que guían cada aspecto de QubitHUB, se detallan a continuación.

9.1 Descripción de la plataforma.

QubitHUB es una iniciativa latinoamericana centrada en el avance de la computación cuántica y sus campos interdisciplinarios relacionados, como la óptica cuántica, la información cuántica, la fotónica, la inteligencia artificial, las nanociencias y la robótica. Un objetivo clave de esta iniciativa es difundir eficazmente el conocimiento y promover la comprensión de la computación cuántica entre un espectro diverso de partes interesadas en América Latina, incluidos educadores, estudiantes, investigadores, profesionales y recién llegados con habilidades limitadas en programación e informática.

La iniciativa también tiene como objetivo fomentar un entorno inclusivo y de apoyo que no solo brinde oportunidades para establecer contactos, sino que también fomente colaboraciones en varios niveles, que van desde grupos locales, comunidades y asociaciones regionales, nacionales e internacionales. El objetivo final de estos esfuerzos es aumentar la conciencia sobre la importancia vital de adquirir las competencias relevantes necesarias para satisfacer la creciente demanda de experiencia en tecnología cuántica en los mercados laborales de los países latinoamericanos.

9.2 Misión de QubitHUB.org

La misión de esta plataforma es crear un ambiente integrado que promueva la colaboración, la innovación y la educación en computación cuántica. Mostrando un análisis comparativo de las plataformas de computación cuántica disponibles hasta la fecha. Este análisis destaca la variedad de

lenguajes de programación y bibliotecas utilizados en estas plataformas, lo que puede plantear desafíos para principiantes, recién llegados y personas que no están familiarizadas con el campo, impidiendo su capacidad para adquirir conocimientos y utilizar eficazmente los recursos de la computación cuántica.

Para abordar este problema, se ha desarrollado Qinterpreter, una biblioteca que sirve como solución combinada de Qiskit, Pyquil, Pennylane, Amazon-Braket y Cirq. Estas bibliotecas se seleccionaron en función de sus métricas de GitHub, lo que garantiza su popularidad y confiabilidad. Al consolidar estas bibliotecas, Qinterpreter establece un marco unificado que facilita la interacción y la ejecución de código en múltiples plataformas de computación cuántica.

9.3 Visión de QubitHUB.org

La visión del Proyecto QubitHUB es convertirse en la plataforma que conecte las diversas comunidades cuánticas en instituciones de investigación y universidades de México. El compromiso futuro es facilitar programas educativos industriales y de investigación, cursos en línea, redes centradas en la comunidad, capacitación y educación virtuales. Estos esfuerzos estarán alineados con modelos pedagógicos eficaces, con el objetivo final de fomentar el crecimiento y el desarrollo de la próxima generación de fuerza laboral cuántica.

En este contexto, el compromiso futuro es brindar certificaciones de habilidades basadas en competencias a través de micro grados que respondan a las necesidades de la sociedad y el mercado. Esto se enfocará principalmente en beneficiar a estudiantes de pregrado y posgrado, así como a jóvenes investigadores de México. Al hacerlo, el proyecto no sólo fomentará las oportunidades de establecer contactos, sino que también cultivará futuras colaboraciones entre los participantes.

9.4 Navegación y utilización de QubitHUB:

La plataforma QubitHUB.org ha sido diseñada pensando en el usuario, con una estructura que facilita el aprendizaje y la exploración en el ámbito de la computación cuántica. Actualmente, la plataforma cuenta con las siguientes secciones principales:

9.4.1 Recursos cuánticos:

En esta sección, los usuarios tienen acceso a una serie de los recursos más destacados en computación cuántica disponibles en línea.

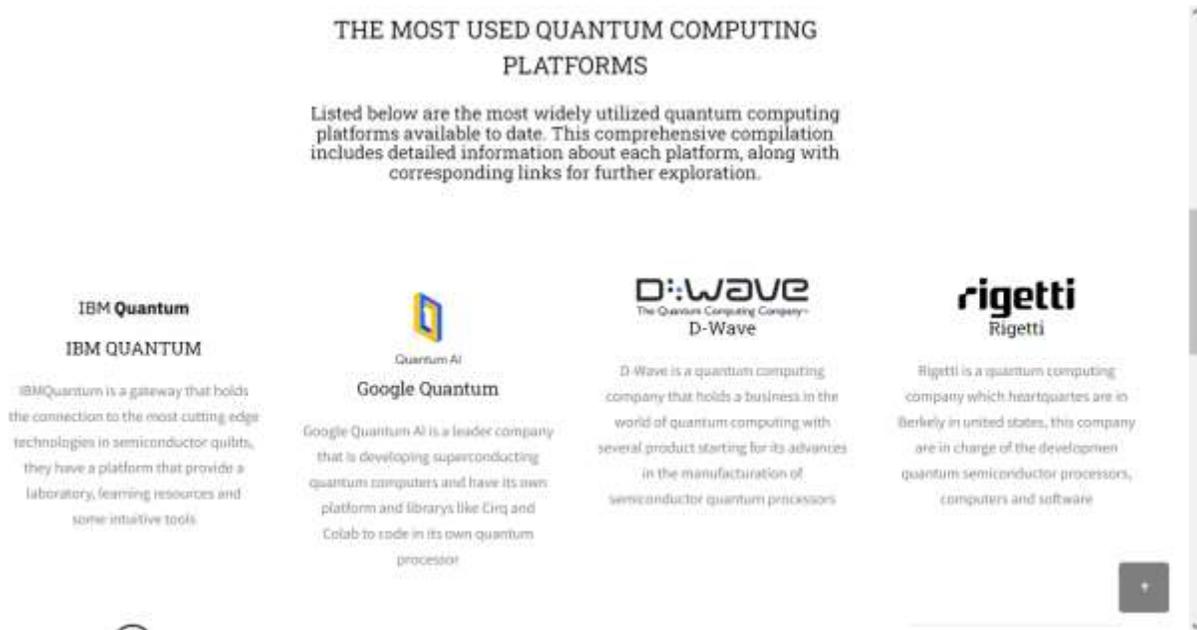


Figura 27. Sección Quantum Resources.

9.4.2 Aplicaciones:

Este espacio destaca las aplicaciones específicamente diseñadas para QubitHUB, ejemplificando así el potencial y capacidades de la plataforma. Dos de las principales aplicaciones son Qinterpretter y ShorAlgorithm.



Figura 28. Sección Applications: Qinterpreter.

9.4.2.1 Qinterpreter:

Qinterpreter es una herramienta diseñada para integrar cinco de las bibliotecas más populares en computación cuántica: Qiskit, Pyquil, Cirq, Pennylane y Amazon-Braket. Esta integración busca proporcionar una experiencia unificada para los desarrolladores. Más detalles sobre Qinterpreter se tratarán en el Capítulo 8 titulado “QuantumInterpreter”. Una captura de esta sección está disponible en la **Figura 28**.

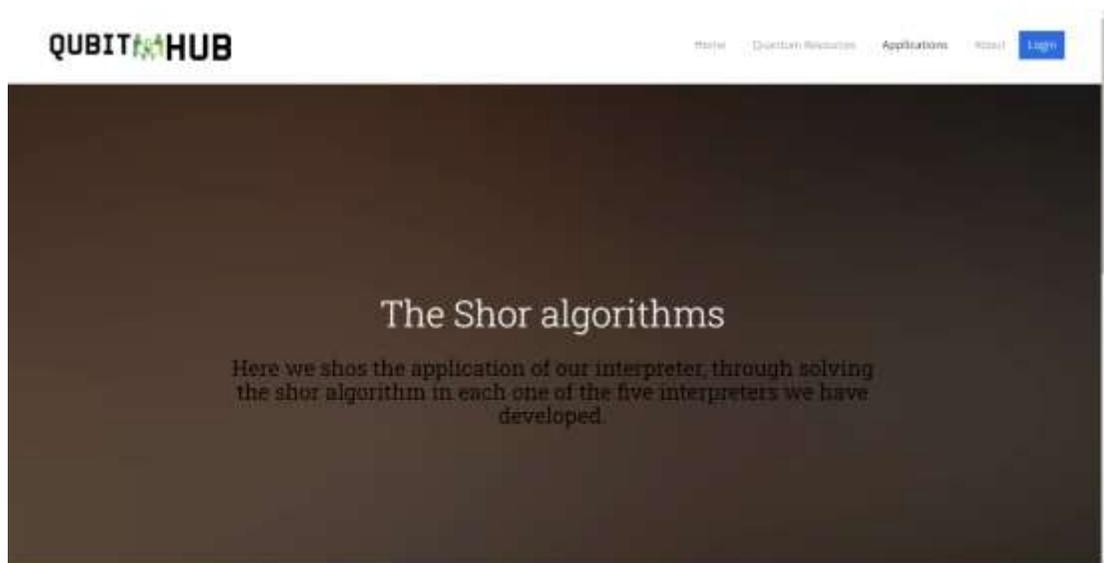


Figura 29. Sección Applications: Shor Algorithm.

9.4.2.2 Algoritmo de Shor:

La subsección de ShorAlgorithm ilustra cómo Qinterpreter puede ser usado para implementar el algoritmo de Shor. Se presentan versiones del circuito de Shor en cada uno de los cinco lenguajes mencionados. Lo más destacado es que, gracias a Qinterpreter, estos lenguajes dispares se pueden unificar y acceder mediante un solo código. Una captura de esta sección está disponible en la **Figura 29**.

9.4.2.3 Acerca de:

Esta sección brinda información sobre el talentoso equipo detrás de QubitHUB. Se reconoce la contribución y el rol de cada miembro. Al hacer clic en la imagen de un integrante, los usuarios son redirigidos a una página con detalles biográficos, títulos académicos, investigaciones en curso y datos de contacto. Una captura de esta sección está disponible en la **Figura 30**.

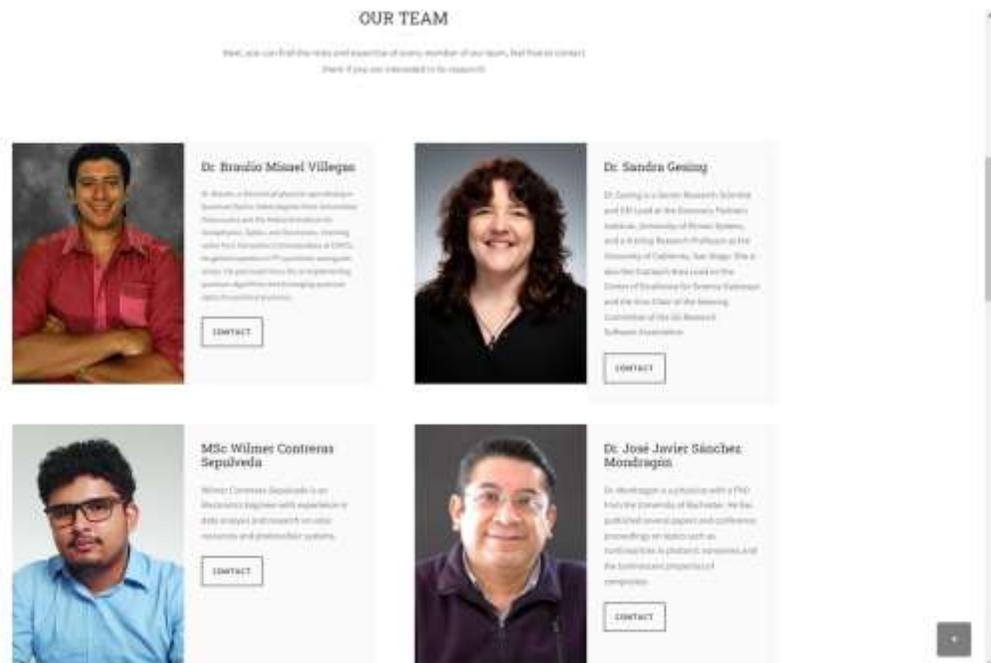


Figura 30. Sección About.

9.4.3 Login

La sección "Login" proporciona a los usuarios una puerta de entrada al laboratorio virtual de QubitHUB, un espacio exclusivamente diseñado para la

experimentación y práctica en el ámbito de la computación cuántica. Para acceder a esta área, es necesario contar con credenciales específicas, las cuales pueden solicitarse enviando un correo directamente al administrador, una vista previa de la pantalla de acceso se muestra en la **Figura 31**.

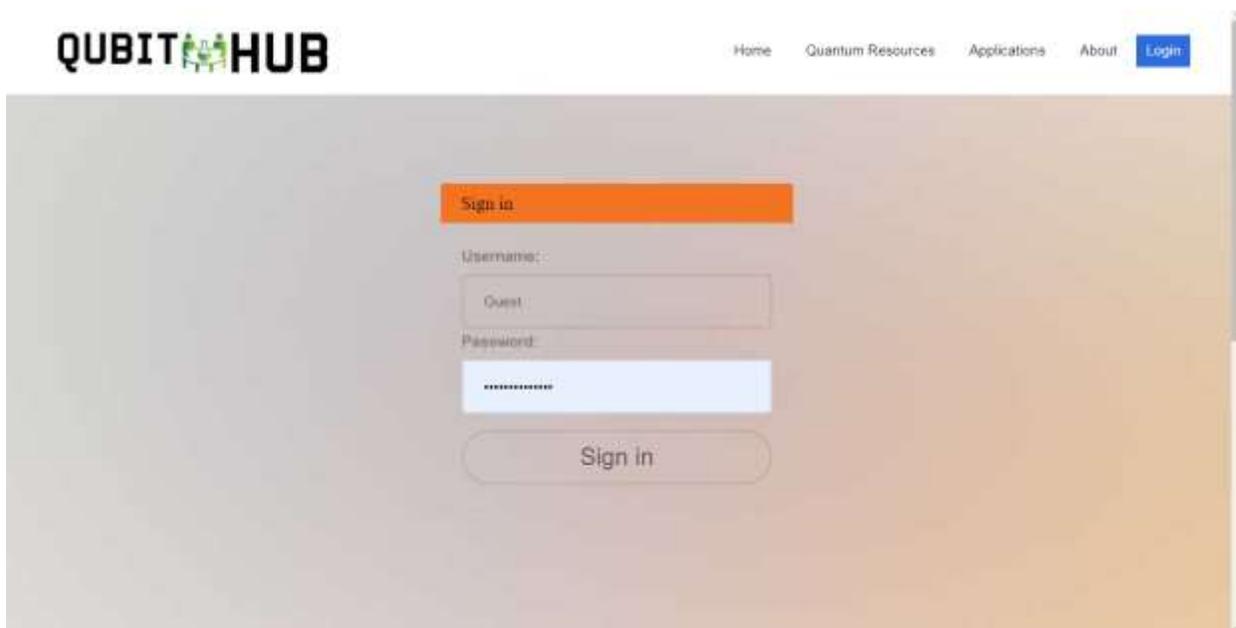


Figura 31. Sección Login.

Una vez dentro del laboratorio virtual, los usuarios se encontrarán con un entorno al estilo "JupyterHub", donde es posible crear, editar y ejecutar archivos tipo Jupyter. Estos archivos, que operan con el lenguaje Python preinstalado, permiten la ejecución de cualquier código Python. Además, se brinda la capacidad de gestionar carpetas y directorios según las necesidades del usuario. Como un valor agregado, este laboratorio ya cuenta con el código de Qinterpreter precargado, listo para ser utilizado. Una captura de la interfaz de este laboratorio se presenta en la **Figura 32**.

9.5 Contribuir a QubitHUB:

QubitHUB, está comprometido con la expansión y democratización de las tecnologías cuánticas en México y Latinoamérica. Con el respaldo estratégico

de instituciones de renombre como la Universidad de Notre Dame y la Asociación de Ingenieros de Software de Investigación de Estados Unidos, es considerable el impacto positivo que puede tener la colaboración comunitaria en los objetivos compartidos.

¿Cómo se puede contribuir?

- **Publicación de investigaciones:** Si eres un investigador o profesional en el campo, se invita al lector a compartir tus hallazgos y avances en nuestra plataforma. Así, no solo elevas el nivel académico y profesional del espacio, sino que también inspiras y educas a otros.
- **Comparte recursos:** Ya sea software, hardware, literatura o cualquier otro recurso relacionado con la tecnología cuántica, tu contribución puede ser una herramienta valiosa para otros miembros de la comunidad.
- **Participa en discusiones:** Tu voz y tu experiencia son esenciales. Al participar activamente en debates y foros, enriqueces el conocimiento colectivo y fomentas una cultura de aprendizaje colaborativo.
- **Contribuciones económicas y asesorías:** Si eres una entidad o individuo que puede ofrecer auxilios económicos, asesorías especializadas u otros recursos, tu apoyo puede ser un pilar fundamental para alcanzar nuestros objetivos. Ponte en contacto con nuestros administradores para coordinar estas valiosas colaboraciones.

La visión de QubitHub es ambiciosa, pero con la ayuda de personas y entidades apasionadas, es seguro que es posible hacer de las tecnologías cuánticas una realidad accesible para todos en la región.

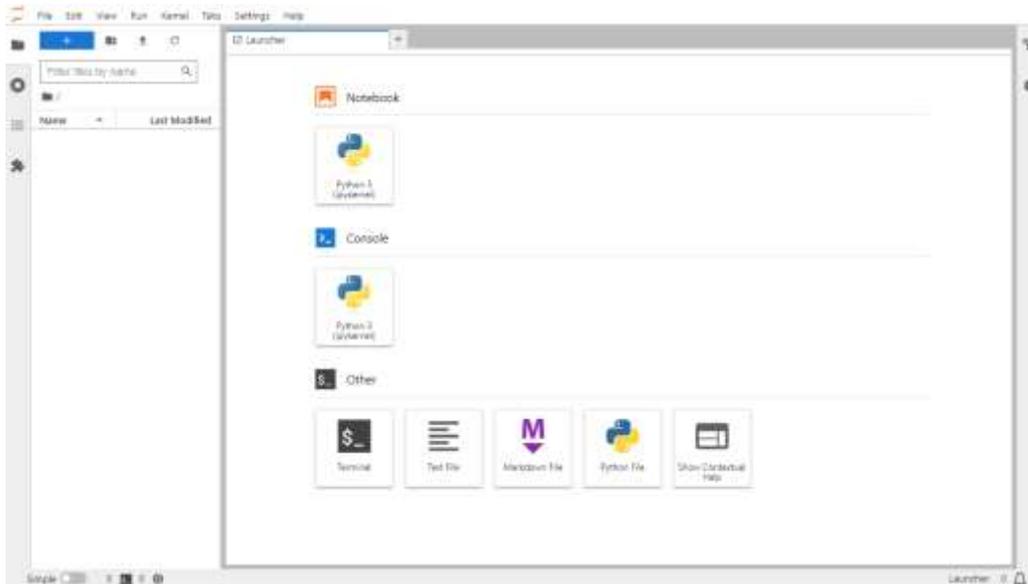


Figura 32. Laboratorio de QubitHUB

9.6 Futuras Direcciones y Conclusión

En esta etapa de desarrollo, QubitHUB se halla dando sus primeros y decididos pasos hacia la consolidación de un ecosistema cuántico. Actualmente, QubitHub se sustenta sobre tres pilares fundamentales: plataforma en línea con su laboratorio de desarrollo ya expuesto, el software Qinterpreter y la valiosa colaboración de distintos científicos y entidades, incluyendo a la prestigiosa Universidad de Notre Dame y la Asociación de Ingenieros de Software de Investigación de Estados Unidos. Mirando hacia el futuro, se realizarán varias expansiones y mejoras:

- **Sección de Noticias:** QubitHub esta en proceso de añadir un segmento en la plataforma donde se pueda mantener al público actualizado con las últimas noticias y avances en el mundo de la computación cuántica.
- **Colaboraciones con Expertos:** La búsqueda activa de líderes y figuras prominentes en el ámbito de la computación cuántica está en marcha. Su participación se traducirá en guías y tutoriales,

proporcionando a los nuevos usuarios en el campo una introducción comprensible y robusta.

- **Código Abierto Qinterpreter:** el código de Qinterpreter ha sido liberado al dominio público para que investigadores de todo el mundo puedan contribuir y enriquecer esta herramienta.
- **Alianzas Estratégicas:** La búsqueda de alianzas no se limita a la región. QubitHub está activamente buscando establecer vínculos con universidades y entidades tanto nacionales como internacionales. La meta es clara: acumular una gama más amplia de recursos y conocimientos para fortalecer la plataforma.
- **Expansión Física:** Más allá de la comunidad en línea, QubitHub aspira a tener laboratorios físicos especializados en computación cuántica. Estos espacios brindan a estudiantes y colaboradores la posibilidad de llevar a cabo investigaciones prácticas y experimentos de vanguardia.

En conclusión, aunque QubitHUB está en sus etapas iniciales, la visión es grande y el camino está lleno de oportunidades. QubitHub está comprometido en convertirse en un referente de la computación cuántica en la región y más allá.

Capítulo 10:

Quantum Interpreter: Un lenguaje unificado para la Computación Cuántica

En este capítulo se describe la librería desarrollada en esta tesis, diseñada para interactuar eficientemente con frameworks actuales como Qiskit, PennyLane, Pyquil, Amazon Braket y Cirq.

Qinterpreter es un software diseñado para integrar las cinco bibliotecas cuánticas basadas en Python más utilizadas, a saber, Qiskit, Pyquil, PennyLane, Amazon-Braket y Cirq, todas ellas desarrolladas por destacados líderes de la industria, incluidos IBM, Amazon, Google, Rigetti Computing y Xanadú. La unificación de estas bibliotecas cuánticas culmina en la creación de un paquete singular y completo llamado Qinterpreter.

10.1 Introducción al Quantum Interpreter:

En el mundo en rápido crecimiento de la computación cuántica, diversas bibliotecas y lenguajes han surgido, permitiendo a los investigadores y desarrolladores interactuar e implementar soluciones en computadoras cuánticas. Estas bibliotecas sirven como intermediarios entre el usuario y la maquinaria cuántica subyacente, facilitando la comunicación mediante lo que se conoce como "backends". Estos backends actúan como interfaces, permitiendo a los usuarios seleccionar y especificar el tipo de computador cuántico que desean utilizar.

Dada la variedad de estas bibliotecas, a menudo puede resultar desafiante para los desarrolladores adaptarse a cada una de ellas, ya que cada una presenta su propia sintaxis y peculiaridades. A modo de ilustración, a continuación, se presentará cómo se crea el primer estado de Bell utilizando cinco de las bibliotecas más populares en el campo: Qiskit, Pyquil, PennyLane, Amazon-Braket y Cirq.

Primer estado de Bell en **Qiskit**

#Primero, se importan las librerías requeridas, previamente instaladas

```
from qiskit import *  
from qiskit.visualization import plot_histogram
```

Luego se define el circuito cuántico para crear el estado de Bell

```
bell = QuantumCircuit(2, 2)  
bell.h(0)  
bell.cx(0, 1)
```

#Despues de ello, se imprime el circuito

```
bell.print_circuit()
```

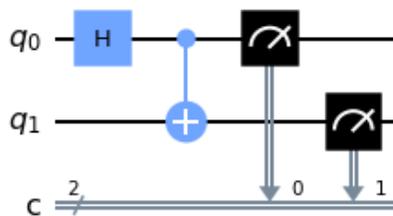


Figura 33. Estado de Bell en Qiskit.

Finalmente, se simula el circuito

por medio del backend qasm_simulator se imprime un histograma.

```
simulator = Aer.get_backend('qasm_simulator')  
result = execute(circ, simulator).result()  
counts = result.get_counts(circ)  
plot_histogram(counts, title='Bell-State counts')
```

Los resultados son mostrados a continuación:

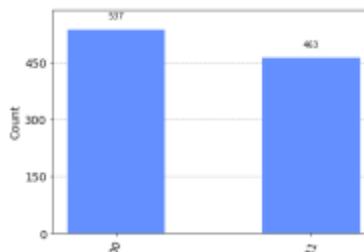


Figura 34. Simulación Estado de Bell Qiskit.

A continuación, se presenta el código que se debe ejecutar para crear este mismo estado de Bell en la librería de Cirq:

Primer estado de Bell en Cirq:

```
#Se importan las librerías requeridas
import cirq

# Se crea el circuito para el estado de bell
q0, q1 = cirq.LineQubit.range(2)
bell_circuit = cirq.Circuit()
bell_circuit.append(cirq.H(q0))
bell_circuit.append(cirq.CNOT(q0, q1))

# Se imprime el circuito
print(bell_circuit)
```

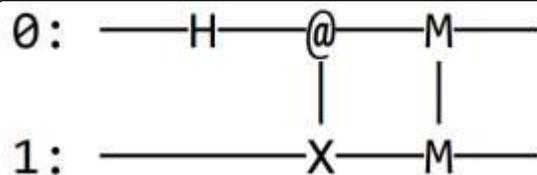


Figura 35. Estado de Bell en Cirq.

```
# Se realiza la simulación en Cirq,
# Se imprimen los resultados en un histograma
s = cirq.Simulator()
samples = s.run(bell_circuit, repetitions=1000)
cirq.plot_state_histogram(samples, plt.subplot())
plt.show()
```

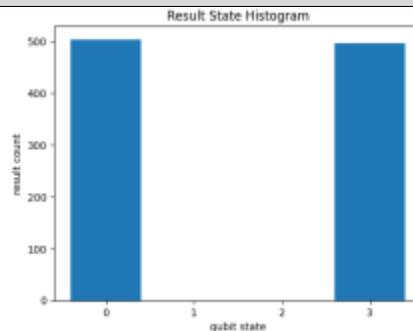


Figura 36. Simulación Estado de Bell Cirq.

A continuación, se presenta el código que se debe ejecutar para ejecutar este mismo estado de Bell en la librería de Pyquil:

Primer estado de Bell en Pyquil:

```
#Se importan las librerías requeridas
from pyquil import Program
from pyquil.gates import H, CNOT
from pyquil.api import WavefunctionSimulator

# Se crea el circuito
p = Program()
q0 = 0
q1 = 1
p += H(q0)
p += CNOT(q0, q1)

#Se grafica el circuito:
print(p)
```

H 0
CNOT 0 1

Figura 37. Simulación Estado de Bell Pyquil.

```
#Ahora se simula el circuito.
wavefunction_simulator = WavefunctionSimulator()
wavefunction = wavefunction_simulator.wavefunction(p)
print(wavefunction)
probabilities = np.abs(wavefunction.amplitudes)**2
labels = ['00', '01', '10', '11']
plt.bar(labels, probabilities)
plt.xlabel('Estados')
plt.ylabel('Probabilidad')
plt.show()
```

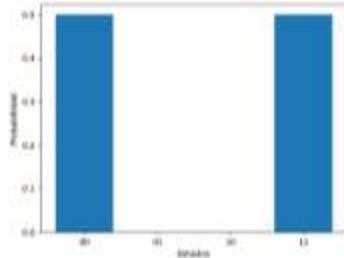


Figura 38. Simulación Estado de Bell Pyquil.

A continuación, se presenta el código que se debe ejecutar para ejecutar este mismo estado de Bell en la librería de **PennyLane**:

Primer estado de Bell en PennyLane:

```
#Se importan las librerías necesarias
import pennylane as qml
from pennylane import numpy as np
# Crea un dispositivo cuántico con 2 qubits.
dev = qml.device('default.qubit', wires=2)
@qml.qnode(dev)
def bell_state():
    qml.Hadamard(wires=0)
    qml.CNOT(wires=[0, 1])
    return qml.expval(qml.PauliZ(0)), qml.expval(qml.PauliZ(1))

print(qml.draw(circuit, decimals=None)(""))
```

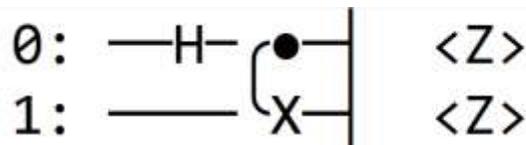


Figura 39. Simulación Estado de Bell PennyLane.

```
# Se realiza la simulación.
#Se imprimen los resultados de la simulación. En este caso PennyLane no
#cuenta con un comando hacer histograma de los resultados
```

```
resultados = bell_state()
print(f"Expectativa de mediciones en Z para los qubits:")
print(f"Qubit 0: {resultados[0]}")
print(f"Qubit 1: {resultados[1]}")
```

Expectativa de mediciones en Z para los qubits:

Qubit 0: 0.0

Qubit 1: 0.0

A continuación, se presenta el código que se debe crear para ejecutar este mismo estado de Bell en la librería de **Amazon Braket**:

```
Primer estado de Bell en AmazonBraket-Sdk:
#Se importan las librerías requeridas
    from braket.circuits import Circuit
    from braket.devices import LocalSimulator
# Se crea el circuito
    circuito_bell = Circuit().h(0).cnot(0, 1)
# Se imprime el circuito
    print(circuito_bell)

    T : |0|1|

    q0 : -H-C-
         |
    q1 : ---X-

    T : |0|1|

# Se simula el circuito
    dispositivo = LocalSimulator()
    resultado = dispositivo.run(circuito_bell, shots=1000).result()
    cuentas = resultado.measurement_counts
    print(cuentas)

#A continuación los resultados, esta vez sin histograma debido a que
#Amazon Braket no implementa esta herramienta dentro de su librería.

    Counter({'11': 514, '00': 486})
```

Figura 40. Simulación Estado de Bell AmazonBraket.

Como se puede apreciar, cada una de estas librerías a pesar de que se desarrollan en Python, utilizan herramientas, enfoques, módulos y sintaxis diferentes sin ningún tipo de estándar, lo cual dificulta el aprendizaje de la computación cuántica de manera práctica, incrementando la pendiente en la curva de aprendizaje.

Esta variabilidad en las bibliotecas y el potencial desafío que representa para la comunidad cuántica es lo que ha llevado a desarrollar Qinterpreter. Esta herramienta ha sido diseñada meticulosamente para amalgamar estos diversos lenguajes de programación cuántica en una interfaz unificada y coherente, minimizando así la curva de aprendizaje y permitiendo a los usuarios enfocarse más en el desarrollo de algoritmos y soluciones cuánticas eficientes en lugar de invertir tiempo valioso en entender las diversas sintaxis y peculiaridades de diferentes lenguajes y bibliotecas.

Para ver como Qinterpreter ayuda al usuario a comenzar su exploración por el mundo de la computación cuántica, se presentan.

10.2 Arquitectura del Quantum Interpreter

El Qinterpreter está basado en el paradigma de programación orientado a objetos, lo que facilita la reusabilidad y modularidad a través del diseño de diferentes clases. El código fuente está disponible en [GitHub](<https://github.com/Qubithub/Qinterpreter/tree/main>), donde se puede encontrar información detallada y el código de desarrollo de la aplicación. La estructura del código es la siguiente:

Directorio Raíz: QuantumGateway

Este directorio actúa como el contenedor principal de todos los módulos y submódulos del intérprete.

Archivos en QuantumGateway:

__init__.py: Inicializa el directorio como un paquete Python, permitiendo la importación de los módulos contenidos.

main.py: Provee la interfaz de alto nivel para interactuar con los circuitos cuánticos. Contiene funciones (`translate_to_framework(circuit, framework)`, `simulate_circuit(circuit, framework)`) para la traducción de circuitos a diferentes frameworks y para la simulación de estos.

quantum_circuit.py: Define la clase `QuantumCircuit`, que permite la creación y manipulación de circuitos cuánticos, incluyendo la adición de puertas y qubits.

Subdirectorio: quantum_translator

Este subdirectorio contiene implementaciones específicas para traducir circuitos cuánticos a las plataformas soportadas.

__init__.py: Permite la importación de los traductores.

quantum_translator.py: define una clase base para los traductores específicos de cada plataforma cuántica.

Traductores Específicos:

`braket_translator.py:` Traduce a Amazon Braket.

`cirq_translator.py:` Traduce a Google Cirq.

`pennylane_translator.py:` Traduce a PennyLane.

`pyquil_translator.py:` Traduce a PyQuil de Rigetti.

`qiskit_translator.py:` Traduce a IBM Qiskit.

Adicionalmente el Qinterpreter se puede resumir de manera operativa en principales módulos, que se desarrollan una vez se hallan importado las librerías del Qinterpreter. A continuación, se presentan de manera rápida cada uno de los tres módulos.

10.2.1 Módulo de Creación del Circuito

El primer módulo del Qinterpreter se enfoca en crear el circuito para lo cual primero se realiza la definición del circuito y posteriormente se agregan las compuertas cuánticas de las que se compone el circuito.

Para definir el circuito se utiliza el comando QuantumCircuit, en donde m y n son la cantidad de registros cuánticos y clásicos.

```
circuito = QuantumCircuit(m, n)
```

Luego de esto se agregan las compuertas por medio del comando circuit.add_gate, en el cual NameOfGate representa el nombre de la compuerta y Qubit el index del Qubit al cual va a ser aplicada la compuerta.

```
circuit.add_gate(QuantumGate("NameOfGate", [Qubit]))
```

Dentro de las compuertas que pueden ser implementadas en Qinterpreter se encuentran H, X,Y,Z, Cnot, Toffoli, Rx, Ry, Rz y otras.

10.2.2 Módulo de graficación del circuito

Este módulo permite mostrar la gráfica del circuito en cada uno de los frameworks seleccionados, para lo cual primeramente se selecciona el framework (Qiskit, Pyquil, Cirq, Pennylane, Amazon-Braket) sobre el cual se desea trabajar.

Para seleccionar el framework se guarda el nombre del framework en un registro, este puede variar entre Qiskit, Pyquil, Cirq, Pennylane y Amazonbraket, y luego se transfiere a la función translate_to_framework, y posteriormente se imprime el circuito mediante la función print_circuit.

```
selected_framework = 'pyquil'  
translated_circuit = translate_to_framework(circuit, selected_framework)  
translated_circuit.print_circuit()
```

10.2.3 Módulo de Simulación del circuito.

Finalmente, una vez elaborado y graficado (opcionalmente) el circuito, se puede realizar una simulación del circuito cuántico mediante el módulo de

simulación, para lo cual se utiliza el comando mostrado a continuación, en donde `selected_framework`, es el framework que se ha seleccionado.

```
print(simulate circuit(circuit, selected_framework))
```

De esta forma se logra simular el circuito en cada una de estas librerías.

10.3 Uso práctico del Quantum Interpreter:

A continuación, se presenta el estado de Bell ejecutado sobre el Qinterpreter, el cual, por medio del cambio de una línea de código, se obtienen todos los resultados que se encuentran con cada lenguaje descrito anteriormente.

Primer Estado de Bell en Qinterpreter.

```
#Primero se importan las librerías requeridas.
from quantumgateway.quantum_circuit import QuantumCircuit, QuantumGate
from quantumgateway.quantum_translator.braket_translator import
BraketTranslator
from quantumgateway.quantum_translator.cirq_translator import
CirqTranslator
from quantumgateway.quantum_translator.qiskit_translator import
QiskitTranslator
from quantumgateway.quantum_translator.pennylane_translator import
PennyLaneTranslator
from quantumgateway.quantum_translator.pyquil_translator import
PyQuilTranslator
from quantumgateway.main import translate_to_framework, simulate_circuit
#Luego de esto construimos nuestro circuito.

circuit = QuantumCircuit(2,2)
circuit.add_gate(QuantumGate("h", [0]))
circuit.add_gate(QuantumGate("cnot", [0,1]))
circuit.add_gate(QuantumGate("MEASURE", [0,0]))
circuit.add_gate(QuantumGate("MEASURE", [1,1]))

#Se selecciona el Framework Sobre el cual se pretende trabajar.

selected_framework = 'pyquil' # Change this to the desired framework
translated_circuit = translate_to_framework(circuit, selected_framework)

#Se grafica el circuito en el framework seleccionado
translated_circuit.print_circuit()
```

```
#Finalmente se simula el circuito.  
print("The results of our simulated circuit are: ")  
print(simulate_circuit(circuit, selected_framework))
```

En el circuito previamente presentado, la única modificación necesaria es el valor del registro "selected_framework". Este ajuste permite la selección de cualquier librería, ya sea Qiskit, Pyquil, Cirq, Pennylane o AmazonBraket, produciendo los resultados que se han mostrado previamente en la sección 8.1, donde se exhiben los resultados específicos para cada framework.

Para obtener una información más completa y detallada sobre Qinterpreter, se invita al lector a consultar el artículo "Qinterpreter", disponible en Arxiv a través del siguiente enlace "[\[2310.07173\] Unleashing quantum algorithms with Qinterpreter: bridging the gap between theory and practice across leading quantum computing platforms \(arxiv.org\)](https://arxiv.org/abs/2310.07173)"¹⁰⁶.

10.4 Avances y mejoras futuras en Quantum Interpreter:

En una perspectiva futura, Qinterpreter se ampliará para integrar cada una de estas bibliotecas como backends. Esta evolución permitirá el acceso y utilización de los computadores cuánticos que operan detrás de cada biblioteca. El usuario tendrá la libertad de elegir el computador cuántico que desee emplear, ya sea de IBM, Google, Xanadu u otros, y ejecutar su algoritmo específico en la plataforma seleccionada. Esta característica no solo asegura una mayor fiabilidad en los resultados generados, sino que además habilita una comparación eficaz y precisa del rendimiento de diferentes computadores cuánticos en el desarrollo y ejecución de algoritmos específicos.

¹⁰⁶ Sepúlveda et al., "Unleashing Quantum Algorithms with Qinterpreter: Bridging the Gap between Theory and Practice across Leading Quantum Computing Platforms."

Discusión

En este capítulo se hablará acerca del futuro de QubitHub.org en el marco del futuro de la computación cuántica. La computación cuántica ha sido percibida como una actividad de un primer mundo y de potencias, creando una nueva brecha con nuestros países. Sin embargo, no es así, y los únicos que podemos percibirlo y resolverlo somos nosotros mismos. Nuestro objetivo es empoderar a nuestros países en esa capacidad. Nuestro grupo tiene amplias experiencias, y esto es la herramienta para hacerlo. Es claro que la práctica de computación cuántica y otras tecnologías capacitantes tienen el potencial para impulsar un progreso tecnológico sin precedentes. Estamos conscientes de que, en manos equivocadas, podría representar riesgos significativos, por lo tanto, es imperativo abordar estos aspectos con una visión equilibrada, anticipando las futuras aplicaciones de esta tecnología, los desafíos inherentes a su novedad y las medidas que se deben tomar para asegurar un futuro donde la computación cuántica juegue un rol beneficioso para todos; y eso implica tener los recursos humanos para hacerlo.

11.1 Futuros desarrollos y desafíos en el campo de la computación e información cuántica.

A pesar de su promesa revolucionaria, la adopción generalizada de la computación cuántica enfrenta una serie de desafíos significativos, que son cruciales para su éxito a largo plazo:

- **Estabilidad y Escalabilidad de los Sistemas Cuánticos:** La estabilidad y la escalabilidad continúan siendo el talón de Aquiles de la tecnología cuántica. Sin embargo, avances recientes, como el desarrollo por parte de Intel de su computador cuántico Osprey de 433 qubits, señalan un progreso significativo hacia la superación de estos obstáculos.
- **Preparación de la Fuerza Laboral:** La brecha en la educación cuántica representa otro desafío considerable. La falta de conocimiento generalizado sobre la física cuántica y sus aplicaciones prácticas entre

la comunidad ingenieril y científica limita la capacidad de innovación y desarrollo. Es esencial cultivar una nueva generación de profesionales capacitados que puedan explorar plenamente el potencial de esta tecnología emergente.

- **Cuestiones Éticas y de Seguridad:** La computación cuántica plantea preguntas éticas y de seguridad sin precedentes, particularmente en lo que respecta al riesgo de que sistemas cuánticos avanzados se utilicen para vulnerar la criptografía clásica, poniendo en peligro la seguridad de información crítica. Esta posibilidad exige una reconsideración de los sistemas de seguridad actuales y el desarrollo de nuevos protocolos criptográficos cuántico-resistentes.

Para QubitHub.org, estos desafíos no son solo obstáculos a superar, sino también oportunidades para liderar. En QubitHUB se tiene el compromiso de ir más allá del desarrollo y la mejora técnica de la plataforma. En la plataforma se aspira a ser un catalizador en la promoción de un diálogo global en torno a estas cuestiones críticas, abordándolas a través de múltiples frentes:

- **Desarrollo de Algoritmos e Investigación:** Impulsando la innovación en computación cuántica para abordar directamente los desafíos de estabilidad y escalabilidad, y desarrollar nuevas aplicaciones que muestren el verdadero potencial de la tecnología.
- **Educación y Capacitación:** Ofreciendo recursos educativos, talleres y cursos que democratizan el conocimiento de la computación cuántica, preparando a estudiantes, profesionales y entusiastas para los desafíos y oportunidades de esta nueva era tecnológica.
 - **Desarrollo de Comunidades Virtuales de Investigación, Desarrollo e Innovación.** Un acertado paso en esta dirección es precisamente su disponibilidad en la nube, lo que llama a esfuerzos colaborativos internacionales, interdisciplinarios y crecientemente populares. Para esto se requiere que infraestructura necesariamente localizada (i.e. laboratorios experimentales) sean

crecientemente accesibles a colaboraciones, macroproyectos y a entrenamiento avanzado.

- **Promoción de la Ética y la Seguridad:** Liderando la conversación sobre la importancia de un enfoque ético hacia la computación cuántica, incluyendo el desarrollo de algoritmos que refuercen la seguridad y la privacidad en el ámbito cuántico.

QubitHub.org se posiciona en la vanguardia de este emocionante campo, no solo como un proveedor de soluciones tecnológicas sino como un líder pensante, comprometido con el avance responsable de la computación cuántica. Al abordar estos desafíos de frente, QubitHub.org no solo facilita el camino hacia la adopción de la computación cuántica, sino que también asegura que su desarrollo se realice de manera ética y sustentable, beneficiando a la sociedad en su conjunto.

11.2 Actuales aplicaciones y su impacto en diversas industrias.

Ya se está viendo el impacto de la computación cuántica en industrias como la farmacéutica, donde acelera el descubrimiento de nuevos medicamentos, y en la financiera, mejorando los modelos de riesgo y fraude. QubitHub.org se compromete a ser un recurso valioso para el desarrollo de nuevas aplicaciones, ofreciendo:

- Material pedagógico para la preparación de los profesionales.
- La posibilidad de crear nuevos algoritmos a través de su plataforma interactiva, lo que permite ejecutar código sobre el software de JupyterHub.
- Un incremento en la capacidad de cómputo de esta plataforma, lo que permite alojar más usuarios con mejores capacidades de cómputo.
- Colaboraciones con otras universidades y empresas que faciliten el intercambio de conocimiento.
- Plataforma para micro diplomas que fortalezcan las Instituciones de Educación Superior (IES). Esta visión internacional beneficia no solo a las IES, sino sobre todo a sus egresados, su profesorado y a la región.

Finalmente se tiene que el futuro de la computación cuántica es, sin duda, brillante y lleno de promesas. Con QubitHub.org, se aspira a estar en la vanguardia de este futuro, no solo avanzando en la tecnología sino también en la forma en que la sociedad se prepara para acoger estos cambios transformadores. Al enfrentar los desafíos y aprovechar las oportunidades que la computación cuántica ofrece, es posible asegurar un futuro donde la tecnología sirva al bienestar de la humanidad, fomentando un desarrollo tecnológico responsable y ético.

Conclusiones

A lo largo de esta investigación, se ha explorado cómo superar las barreras que impiden la comprensión y aplicación efectiva de la computación cuántica por parte de profesionales de diferentes áreas de la ciencia. Respondiendo a la pregunta de investigación se ha desarrollado Qubithub.org, una plataforma integral que se ha desarrollado como respuesta en función de ayudar a nuevos investigadores y científicos a adentrarse en el mundo de la computación cuántica.

La solución propuesta, Qubithub.org, no es meramente una plataforma, sino un ecosistema completo que facilita un entendimiento profundo y aplicado de la computación cuántica.

Qubithub.org como Ecosistema Integrador

Laboratorio y Plataforma de Recursos:

Qubithub.org fusiona las funcionalidades de un laboratorio práctico en línea con un vasto repositorio de contenido educativo. Esta combinación no solo proporciona los medios para aprender sobre la computación cuántica, sino que también permite la implementación y prueba inmediata de conceptos teóricos.

Integración del Documento de Tesis:

El documento de tesis se integra en Qubithub.org no solo como un recurso teórico, sino como la columna vertebral educativa de la plataforma. Este documento proporciona una estructura coherente que guía a los usuarios desde los fundamentos de la computación clásica hasta los aspectos avanzados de la cuántica, asegurando que la transición sea fluida y completa.

Qinterpreter como Innovación en Interoperabilidad:

Dentro del ecosistema de Qubithub.org, Qinterpreter sirve como un catalizador para la innovación y la interoperabilidad, permitiendo a los usuarios trabajar de manera eficiente entre diversos lenguajes de computación cuántica y plataformas de hardware.

Integración con otras tecnologías:

Actualmente Qinterpreter se integra con las bibliotecas de Qiskit, Pennylane, Pyquil, Amazon Braket, Cirq. Las cuales son múltiples plataformas que implementan sistemas físicos de computación cuántica.

Integración con otras iniciativas:

- Dr. Eliot Eshelman - Gerente senior de cuentas - Nvidia
- Dr. Robert Coene - vicepresidente de desarrollo comercial de América del Norte / Gerente nacional de EE. UU. - IQM Quantum Computers
- Dra. Araceli Venegas-Gomez - Fundadora y CEO - QURECA
- Dr. Alejandro Mata Ali - Responsable de Departamento - QuantumQuipu
- Dra. Nydia Assaf Aragon - Fundadora y CEO – EnLuz
- Dr. Cezary Mazurek, Director del Centro de Redes y Supercomputación de Poznan

Así mismo, QubitHub ha venido ganando una serie de colaboraciones con otros institutos e iniciativas de computación cuántica como lo son: El Centro de Computo de San Diego (**SDSC**), el Centro de Investigación en ingeniería y ciencias aplicadas (**CIICAP**), Centro de investigación en matemáticas (**CIMAT**), la asociación de investigación de ingenieros de software de los estados unidos (**US-RSE**), la universidad autónoma de Coahuila (**UADEC**).

Finalmente, nos queda decir que Qubithub.org surgió de un taller de fotónica, donde se planteó la creación de un ecosistema en la nube como modelo de investigación. Este ecosistema no solo tenía la finalidad de integrar la computación cuántica como herramienta fundamental, sino que también buscaba desarrollar capacidades en la región, facilitando la colaboración y el aprendizaje en tecnologías de punta. Así, QubitHUB se ha convertido en un espacio que conecta a investigadores con recursos y herramientas, promoviendo el avance de la computación cuántica a nivel local e internacional.