



**DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA ESTRATEGIA
DIDÁCTICA APOYADA EN UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN
INTERACTIVA PARA LA ENSEÑANZA DE FUNDAMENTOS DE FÍSICA Y
COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN EDUCACIÓN MEDIA**

Sergio Andrés Angulo Meléndez

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Medellín

Escuela de Ingenierías

Maestría en Ciencias Naturales y Matemáticas

Medellín, Colombia

2026

**DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA ESTRATEGIA
DIDÁCTICA APOYADA EN UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN
INTERACTIVA PARA LA ENSEÑANZA DE FUNDAMENTOS DE FÍSICA Y
COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN EDUCACIÓN MEDIA**

Sergio Andrés Angulo Meléndez

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
Magister en Ciencias Naturales y Matemáticas.**

Director(a):

Dr. Ángel Rodrigo Salazar Martínez

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Medellín

Escuela de Ingenierías

Maestría en Ciencias Naturales y Matemáticas

Medellín, Colombia

2026

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía y fortaleza durante este proceso, brindándome sabiduría y perseverancia para alcanzar esta meta.

A mi familia, por su amor, apoyo incondicional y sacrificios constantes, que hicieron posible la culminación de este logro académico.

Y a todas aquellas personas que creyeron en mí y me motivaron a seguir adelante aun en los momentos más difíciles.

Agradecimiento

A Dios, por ser mi guía y fortaleza durante este proceso, brindándome sabiduría y perseverancia para alcanzar esta meta.

A mi familia, por su amor, apoyo incondicional y sacrificios constantes, que hicieron posible la culminación de este logro académico.

Y a todas aquellas personas que creyeron en mí y me motivaron a seguir adelante aun en los momentos más difíciles.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
1. PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS.....	20
4. HIPÓTESIS	21
5. MARCOTEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	21
6. METODOLOGÍA.....	29
7. RESULTADOS.....	47
8. DISCUSIÓN.....	52
9. CONCLUSIONES	55
10. RECOMENDACIONES.....	57
REFERENCIAS.....	58
ANEXOS.....	60

Listado de Tablas

Tabla 1. Competencias e indicadores de desempeño evaluados en el Parcial 2.	42
Tabla 2. Preguntas asociadas a la Competencia 1 y niveles de dificultad.....	42
Tabla 3. Preguntas asociadas a la Competencia 2 y niveles de dificultad.....	43
Tabla 4. Preguntas asociadas a la Competencia 3 y niveles de dificultad.....	44
Tabla 5. Niveles para las competencias 1 y 2.	46
Tabla 6. Niveles para las competencias 3.....	46
Tabla 7. Clasificación de niveles de desempeño para el Parcial 1.	47
Tabla 8. Estadísticos generales del Parcial 1.	48
Tabla 9. Estadísticos generales del Parcial 2.	49
Tabla 10. Resultados de desempeño para la Competencia 1.	49
Tabla 11. Porcentaje de respuestas correctas por pregunta – Competencia 1.....	50
Tabla 12. Resultados de desempeño para la Competencia 2.	50
Tabla 13. Porcentaje de respuestas correctas por pregunta – Competencia 2.....	50
Tabla 14. Resultados de desempeño para la Competencia 3.	51
Tabla 15. Porcentaje de respuestas correctas por pregunta – Competencia 3.....	51

Listado de Figuras

Figura 1. Interfaz gráfica del simulador interactivo de circuitos cuánticos para sistemas de un cúbit	34
Figura 2. Interfaz gráfica del simulador interactivo de circuitos cuánticos para sistemas de dos cúbits.....	35
Figura 3. Fragmento del Material didáctico utilizado para la introducción de. fundamentos de física cuántica.	36
Figura 4. Fragmento del Material didáctico utilizado para la enseñanza de fundamentos de computación clásica.....	37
Figura 5. <i>Uso del simulador interactivo para el análisis de compuertas cuánticas y evolución de estados.</i>	38
Figura 6. Guía didáctica utilizada durante las actividades de análisis de circuitos cuánticos.	39
Figura 7. Aplicación del Parcial 1 a los estudiantes del grado 11C.	41

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AND Compuerta lógica AND

CNOT Controlled-NOT Gate (Compuerta NOT controlada)

H Compuerta Hadamard

IA Inteligencia Artificial

NOT Compuerta lógica NOT

OR Compuerta lógica OR

Cúbit Bit Cuántico

UNESCO Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

X Compuerta Pauli-X

XOR Compuerta lógica XOR

Z Compuerta Pauli-Z

$|0\rangle$ Estado base cero de un cúbit

$|1\rangle$ Estado base uno de un cúbit

$|\alpha|^2$ Probabilidad asociada al estado $|0\rangle$

$|\beta|^2$ Probabilidad asociada al estado $|1\rangle$

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar, implementar y evaluar una estrategia didáctica apoyada en una herramienta de simulación interactiva para la enseñanza de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de grado undécimo. La investigación surge ante la necesidad de reducir la brecha entre los avances científicos asociados a la denominada segunda revolución cuántica y los contenidos abordados en la educación media, donde predomina la enseñanza de la física clásica.

La propuesta se desarrollará en el Colegio Adventista Libertad, Bucaramanga, Colombia, mediante una secuencia didáctica estructurada en dos fases: una primera orientada a la comprensión de conceptos fundamentales de la física cuántica, y una segunda centrada en la computación cuántica, incluyendo el estudio de cúbits, compuertas y circuitos cuánticos. Como componente central, se empleará un simulador interactivo que permitirá a los estudiantes explorar fenómenos de la mecánica cuántica como la superposición, el entrelazamiento y la medición cuántica.

La evaluación del proceso se realizará mediante pruebas estructuradas por competencias, considerando tres ejes principales: diferenciación entre computación clásica y cuántica, interpretación probabilística de la medición y seguimiento de circuitos cuánticos, cada uno con niveles de dificultad bajo, medio y alto. Esto permitirá analizar la comprensión conceptual de los estudiantes frente a los fenómenos cuánticos.

Se espera que esta propuesta contribuya al fortalecimiento de la enseñanza de la física en la educación media, promoviendo la incorporación de contenidos emergentes y el uso de herramientas tecnológicas que faciliten el aprendizaje de conceptos altamente abstractos, preparando a los estudiantes para los desafíos del desarrollo científico y tecnológico contemporáneo.

PALABRAS CLAVE: Computación cuántica, física cuántica, educación media, simulador interactivo, cúbits, superposición, entrelazamiento, enseñanza de la física.

ABSTRACT

The present project aims to design, implement, and evaluate a didactic strategy supported by an interactive simulation tool for teaching the fundamentals of quantum physics and quantum computing to eleventh-grade students. This research arises from the need to reduce the gap between the scientific advances associated with the so-called second quantum revolution and the contents addressed in secondary education, where the teaching of classical physics still predominates.

The proposal will be developed at Libertad Adventist School in Bucaramanga, Colombia, through a didactic sequence structured in two phases: the first focused on the understanding of fundamental concepts of quantum physics, and the second centered on quantum computing, including the study of qubits, quantum gates, and quantum circuits. As a central component, an interactive simulator will be used to allow students to explore phenomena such as superposition, entanglement, and quantum measurement.

The evaluation process will be carried out through competency-based structured tests, considering three main axes: differentiation between classical and quantum computing, probabilistic interpretation of measurement, and quantum circuit tracking, each with low, medium, and high levels of difficulty. This will make it possible to analyze students' conceptual understanding of quantum phenomena.

This proposal is expected to contribute to the strengthening of physics education at the secondary level by promoting the incorporation of emerging content and the use of technological tools that facilitate the learning of highly abstract concepts, preparing students for the challenges of contemporary scientific and technological development.

Keywords: Quantum computing, quantum physics, secondary education, interactive simulation, qubit, superposition, entanglement, physics education.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los avances científicos y tecnológicos asociados a la denominada segunda revolución cuántica han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías fundamentadas en los principios de la mecánica cuántica. Dentro de estas tecnologías emergentes, la computación cuántica se ha consolidado como una de las áreas de mayor proyección debido a sus posibles aplicaciones en campos como criptografía, inteligencia artificial, simulación molecular y procesamiento de información. En este contexto, diversos autores señalan que existe una necesidad creciente de fortalecer procesos de alfabetización científica relacionados con física y tecnologías cuánticas desde etapas tempranas de formación académica, permitiendo que los estudiantes comprendan los avances científicos contemporáneos y su impacto en la sociedad (Cuéllar García, 2023).

Teniendo en cuenta esta realidad, la Organización de las Naciones Unidas y la UNESCO proclamaron el año 2025 como el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas, con el propósito de promover el acercamiento de la sociedad a los avances relacionados con física y tecnologías cuánticas. Sin embargo, a pesar de la creciente relevancia de estas áreas, los contenidos relacionados con física cuántica y computación cuántica continúan teniendo una presencia limitada en la educación media, donde la enseñanza de la física permanece centrada principalmente en principios clásicos. En el caso colombiano, Cuéllar García (2023) menciona que los currículos de educación media aún presentan una escasa incorporación de contenidos asociados a física cuántica, situación que limita procesos de alfabetización científica acordes con el desarrollo tecnológico actual.

Por otra parte, la enseñanza de la física cuántica presenta importantes dificultades debido al carácter abstracto y contraintuitivo de muchos de sus conceptos. Temas como superposición, dualidad onda-partícula, incertidumbre y entrelazamiento cuántico suelen representar retos tanto para estudiantes como para docentes. Méndez Andrade (2025) señala que la física cuántica continúa siendo percibida como un tema complejo en niveles de secundaria y bachillerato, principalmente por la dificultad de conectar estos fenómenos con experiencias cotidianas y por la limitada disponibilidad de recursos didácticos adaptados a estos contextos educativos.

Frente a estas dificultades, diferentes investigaciones han resaltado la importancia de implementar estrategias pedagógicas innovadoras apoyadas en tecnologías digitales y simulaciones interactivas. En este sentido, Mendonza- Hernández (2023) destacan que los simuladores permiten crear ambientes virtuales de aprendizaje donde los estudiantes pueden interactuar dinámicamente con diferentes fenómenos, modificar variables y visualizar procesos que normalmente no podrían observarse directamente en el aula. Asimismo, los autores afirman que estas herramientas favorecen la motivación, el aprendizaje activo y la construcción de conocimiento mediante la experimentación y la interacción constante con el entorno virtual.

Dado que los circuitos cuánticos son fundamentales para comprender el funcionamiento de la computación cuántica, en esta investigación se desarrolló un simulador interactivo orientado a representar visualmente la evolución de estados cuánticos y la acción de

compuertas fundamentales como Hadamard, Pauli-X y CNOT. De esta manera, los estudiantes pudieron observar cómo cambian los estados cuánticos dentro de un circuito y cómo se generan fenómenos asociados a superposición y entrelazamiento.

En este contexto, la presente investigación tuvo como propósito analizar la comprensión de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de grado undécimo mediante la implementación de una estrategia pedagógica apoyada en un simulador interactivo de circuitos cuánticos y una guía didáctica de apoyo conceptual y procedimental.

La investigación se desarrolló con estudiantes de grado undécimo del Colegio Adventista Libertad de la ciudad de Bucaramanga, quienes participaron en actividades relacionadas con fundamentos de física cuántica, computación clásica, compuertas cuánticas, medición cuántica y seguimiento de circuitos cuánticos.

Asimismo, el estudio buscó responder la siguiente pregunta de investigación:

¿En qué medida una estrategia pedagógica apoyada en un simulador interactivo de circuitos cuánticos favorece la comprensión de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de grado undécimo?

Para responder esta pregunta, se estableció como objetivo general analizar la comprensión de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de grado undécimo mediante la implementación de una estrategia pedagógica apoyada en un simulador interactivo de circuitos cuánticos.

La evaluación del aprendizaje se realizó mediante dos exámenes. El primero estuvo orientado a evaluar fundamentos conceptuales de física cuántica, mientras que el segundo fue estructurado bajo un enfoque de evaluación por competencias relacionado con computación cuántica y seguimiento de circuitos cuánticos.

La importancia de esta investigación radica en la necesidad de fortalecer propuestas pedagógicas innovadoras que permitan acercar contenidos de ciencia y tecnología cuántica a estudiantes de educación media. De igual manera, el estudio aporta elementos relevantes para la enseñanza de temas abstractos mediante herramientas visuales e interactivas, favoreciendo procesos de aprendizaje significativo y alfabetización científica contemporánea.

En síntesis, la presente investigación busca contribuir al fortalecimiento de estrategias educativas orientadas a la enseñanza introductoria de física y computación cuántica, promoviendo el desarrollo de competencias científicas y tecnológicas acordes con los desafíos del contexto científico actual.

1. PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA

La enseñanza de la física en la educación media continúa enfocándose principalmente en contenidos asociados a la física clásica, mientras que temas relacionados con física moderna, computación cuántica y tecnologías emergentes presentan una incorporación limitada dentro de los procesos de formación escolar. Esta situación genera una brecha entre los avances científicos contemporáneos y los contenidos desarrollados en las aulas, dificultando que los estudiantes comprendan fenómenos y tecnologías que actualmente tienen un papel importante en el desarrollo científico y tecnológico mundial. En este sentido, Cuéllar García, (2023) señala la necesidad de fortalecer procesos de alfabetización científica acordes con los avances actuales de la ciencia y la tecnología, promoviendo espacios educativos orientados a la enseñanza de la física cuántica desde niveles de educación media.

Durante las últimas décadas, las tecnologías basadas en principios cuánticos han adquirido una creciente relevancia en áreas como computación cuántica, criptografía, simulación cuántica y procesamiento de información. De acuerdo con Cuéllar García (2023), estos avances hacen parte de la denominada segunda revolución cuántica, la cual ha impulsado importantes transformaciones científicas y tecnológicas a nivel mundial. Sin embargo, a pesar de este crecimiento, en muchos contextos educativos la enseñanza de la física continúa centrada principalmente en problemáticas asociadas a la física clásica, dejando de lado contenidos contemporáneos relacionados con tecnologías cuánticas.

Ahora bien, además de la escasa incorporación curricular de estos contenidos, existe una dificultad adicional asociada al alto nivel de abstracción característico de la física y computación cuántica. Conceptos como superposición, dualidad onda-partícula, medición cuántica, evolución de estados y entrelazamiento suelen representar dificultades importantes para estudiantes de educación media cuando son abordados únicamente mediante metodologías tradicionales basadas en exposición teórica. Méndez Andrade (2025) destacan que la física cuántica continúa siendo un tema complejo de enseñar en niveles de secundaria y bachillerato debido a la naturaleza abstracta y contraintuitiva de muchos de sus conceptos, así como a la dificultad para relacionarlos con experiencias cotidianas. Asimismo, los autores señalan que existen barreras asociadas a la falta de recursos didácticos y materiales adaptados a diferentes contextos educativos.

De igual manera, diversos estudios han evidenciado dificultades persistentes en los procesos de enseñanza y aprendizaje de la física cuántica. Sinarcas (2013) mencionan que muchos estudiantes presentan problemas conceptuales, ontológicos y epistemológicos relacionados con la comprensión de fenómenos cuánticos, especialmente cuando estos son enseñados mediante enfoques tradicionales centrados únicamente en formulaciones matemáticas o resolución mecánica de ejercicios. Además, los autores indican que los conceptos involucrados en física cuántica suelen encontrarse alejados de la experiencia cotidiana de los estudiantes, dificultando significativamente su comprensión conceptual.

En este contexto, la enseñanza tradicional puede limitar la comprensión conceptual de fenómenos cuánticos, especialmente en temas relacionados con funcionamiento de compuertas, evolución de estados cuánticos y seguimiento de circuitos cuánticos. Frente a esta situación, surge la necesidad de implementar estrategias pedagógicas innovadoras que permitan introducir estos contenidos de manera más accesible y significativa en la educación media.

Dentro de estas estrategias, las simulaciones interactivas representan una alternativa importante, ya que permiten visualizar dinámicamente procesos que no pueden observarse directamente y facilitan la representación gráfica del comportamiento de sistemas cuánticos. Mendoza-Hernández (2023) destacan que los simuladores permiten crear ambientes virtuales de aprendizaje donde los estudiantes pueden interactuar con diferentes fenómenos, modificar variables y observar gráficamente los cambios generados dentro del proceso de simulación, favoreciendo así la construcción del conocimiento mediante la experimentación interactiva.

De manera similar, Intriago-Álava (2023) señalan que las simulaciones virtuales constituyen herramientas didácticas relevantes para el aprendizaje de la física, ya que posibilitan la representación de fenómenos difíciles de observar experimentalmente y favorecen procesos de aprendizaje dinámico e interactivo. Los autores también mencionan que la incorporación de herramientas tecnológicas puede contribuir al fortalecimiento del interés y la motivación de los estudiantes hacia el aprendizaje de las ciencias.

Dado que los circuitos cuánticos constituyen uno de los elementos fundamentales para comprender el funcionamiento de la computación cuántica, el desarrollo de herramientas interactivas orientadas a representar visualmente la evolución de estados cuánticos y la acción de compuertas fundamentales puede contribuir al fortalecimiento de la comprensión conceptual de estos contenidos.

En este contexto, la presente investigación plantea la implementación de una estrategia pedagógica apoyada en un simulador interactivo de circuitos cuánticos y una guía didáctica orientada al fortalecimiento conceptual y procedimental de contenidos asociados a física y computación cuántica en estudiantes de grado undécimo.

A partir de lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿En qué medida una estrategia pedagógica apoyada en un simulador interactivo de circuitos cuánticos favorece la comprensión de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de grado undécimo?

1.1. Antecedentes

La enseñanza de la física cuántica en la educación secundaria ha sido objeto de creciente interés en las últimas décadas, especialmente en el contexto de los avances científicos y tecnológicos asociados a la denominada segunda revolución cuántica. Sin embargo, la incorporación de estos contenidos en el aula ha estado acompañada de múltiples desafíos, tanto desde el punto de vista conceptual como pedagógico, lo que ha motivado el desarrollo de diversas investigaciones orientadas a comprender y mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje en este campo.

En primer lugar, numerosos estudios han evidenciado la existencia de dificultades persistentes en la comprensión de los conceptos fundamentales de la física cuántica por parte de los estudiantes. Estas dificultades no se limitan al dominio de contenidos específicos, sino que involucran aspectos más profundos relacionados con la forma en que los estudiantes interpretan la naturaleza de los fenómenos físicos. En este sentido, se ha señalado que los estudiantes tienden a abordar los conceptos cuánticos desde esquemas de pensamiento clásico, lo que genera interpretaciones erróneas en temas como la dualidad onda-partícula, la superposición y el principio de incertidumbre (Sinarcas, 2013); (Solbes, 2010). Esta situación se ve reforzada por la complejidad intrínseca de la teoría cuántica, la cual exige una ruptura con los modelos deterministas tradicionales.

De manera complementaria, investigaciones posteriores han profundizado en la naturaleza de estas dificultades, evidenciando que no solo responden a limitaciones cognitivas, sino también a factores epistemológicos asociados a la comprensión del conocimiento científico. Así, se ha identificado que los estudiantes presentan dificultades para aceptar el carácter probabilístico de la física cuántica, así como para integrar los diferentes conceptos en un marco teórico coherente, lo que conduce a un aprendizaje fragmentado y superficial (Martínez Torregrosa, 2016); (Nikolaus, 2024).

En relación con las prácticas de enseñanza, se ha observado que la forma en que se presentan los contenidos en el aula influye de manera significativa en la comprensión de los estudiantes. Tradicionalmente, la enseñanza de la física cuántica en el nivel secundario se ha caracterizado por un enfoque centrado en la presentación de fenómenos aislados, como el efecto fotoeléctrico o el experimento de la doble rendija, sin una adecuada articulación con los principios fundamentales que los sustentan. Este enfoque ha sido cuestionado por diversos autores, quienes señalan que la falta de una estructura conceptual clara dificulta la construcción de un conocimiento significativo (Weissman E. Y., 2021); (Weissman E. Y., 2022).

Frente a estas limitaciones, se han propuesto diferentes enfoques didácticos orientados a mejorar la enseñanza de la física cuántica. Entre ellos, destaca la propuesta de organizar los contenidos a partir de principios fundamentales, estructurando la teoría en niveles jerárquicos que permitan a los estudiantes comprender la relación entre conceptos, fenómenos y aplicaciones. Este enfoque busca superar la fragmentación del conocimiento y favorecer una visión más integrada de la teoría cuántica (Weissman E. Y., 2022).

Por otro lado, el desarrollo de propuestas pedagógicas basadas en el aprendizaje significativo ha permitido resaltar la importancia de conectar los nuevos conocimientos con las estructuras cognitivas previas de los estudiantes. En este contexto, el uso de modelos, analogías y representaciones se convierte en una herramienta clave para facilitar la comprensión de conceptos abstractos (González, 2015); (Torres Arango, 2018). Asimismo, la enseñanza problematizada, que parte de situaciones reales o históricas que dieron origen a la teoría cuántica, ha demostrado ser una estrategia efectiva para promover el pensamiento crítico y la comprensión profunda del conocimiento científico (Martínez Torregrosa, 2016).

En los últimos años, el uso de tecnologías digitales ha emergido como una de las tendencias más relevantes en la enseñanza de la física cuántica. Diversos estudios han evidenciado que las simulaciones interactivas, los laboratorios virtuales y otras herramientas digitales permiten representar fenómenos que no pueden observarse directamente, facilitando la comprensión de procesos complejos y promoviendo la participación activa de los estudiantes (Haron, 2023). En particular, el uso de simuladores se ha consolidado como una estrategia didáctica eficaz para abordar conceptos como la superposición y la medición cuántica, al permitir la manipulación directa de variables y la visualización de resultados.

No obstante, a pesar de estos avances, la literatura también señala la existencia de limitaciones en la implementación de estas estrategias, relacionadas con la falta de recursos tecnológicos, la formación docente y la dependencia de enfoques tradicionales basados en el uso de libros de texto (Haron, 2023). Estas limitaciones evidencian la necesidad de continuar desarrollando propuestas pedagógicas que integren de manera efectiva la tecnología en el aula.

Desde otra perspectiva, el análisis de la percepción de los estudiantes ha permitido identificar factores que influyen en su motivación hacia el aprendizaje de la física cuántica. En este sentido, se ha observado que, aunque los estudiantes reconocen la importancia de estos contenidos desde el punto de vista científico, no siempre los consideran relevantes para su vida personal, lo que afecta su interés y disposición hacia el aprendizaje (Moraga-Calderón, 2020). Este hallazgo resalta la importancia de diseñar estrategias que no solo transmitan conocimiento, sino que también logren conectar con los intereses y contextos de los estudiantes.

En cuanto a la evaluación del aprendizaje, investigaciones recientes han destacado la necesidad de implementar instrumentos que permitan medir la comprensión conceptual de los estudiantes, más allá de la resolución de ejercicios matemáticos. En este sentido, el uso de evaluaciones basadas en competencias ha permitido analizar habilidades como la interpretación de fenómenos, el análisis de sistemas y la comprensión de modelos teóricos, proporcionando una visión más integral del aprendizaje (Nikolaus, 2024).

En síntesis, el análisis de los antecedentes y del estado actual de la investigación evidencia que, si bien se han desarrollado múltiples propuestas orientadas a mejorar la enseñanza de la física cuántica en la educación secundaria, persisten desafíos importantes relacionados con la comprensión conceptual, la motivación de los estudiantes y la implementación de estrategias pedagógicas innovadoras. En este contexto, se identifica como un vacío relevante

la necesidad de integrar de manera articulada herramientas tecnológicas, enfoques pedagógicos y estrategias de evaluación que permitan fortalecer el aprendizaje significativo de los fundamentos de la física y la computación cuántica.

En respuesta a este vacío, la presente investigación propone el diseño e implementación de un simulador de circuitos cuánticos, acompañado de una estrategia pedagógica basada en competencias, orientada a mejorar la comprensión conceptual de los estudiantes y a favorecer una aproximación más significativa a los principios de la física cuántica en el nivel de educación media.

2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación surge de la necesidad de fortalecer la enseñanza de contenidos relacionados con física y computación cuántica en la educación media, teniendo en cuenta la creciente relevancia científica y tecnológica de estas áreas en el contexto contemporáneo. Actualmente, tecnologías asociadas a computación cuántica, inteligencia artificial y procesamiento avanzado de información están adquiriendo un papel cada vez más importante dentro del desarrollo científico mundial. Sin embargo, gran parte de estos contenidos aún tienen una presencia limitada en los procesos de formación escolar.

En este sentido, la investigación se considera pertinente debido a que busca acercar a estudiantes de educación media a conceptos fundamentales asociados a física y computación cuántica mediante estrategias pedagógicas adaptadas a su nivel educativo. De igual manera, la propuesta responde a la necesidad de implementar metodologías innovadoras que permitan facilitar la comprensión de fenómenos altamente abstractos como superposición, entrelazamiento, medición cuántica y evolución de estados cuánticos.

Ahora bien, uno de los principales problemas asociados a la enseñanza de física cuántica radica en que muchos de sus conceptos no pueden observarse directamente en la experiencia cotidiana, lo que dificulta significativamente su comprensión cuando son abordados únicamente desde enfoques teóricos o matemáticos tradicionales. Por consiguiente, el uso de herramientas visuales e interactivas representa una alternativa importante para fortalecer los procesos de aprendizaje en este tipo de contenidos.

En este contexto, la presente investigación adquiere relevancia pedagógica debido a que incorpora un simulador interactivo de circuitos cuánticos orientado a representar visualmente el comportamiento de estados cuánticos y la acción de compuertas fundamentales como Hadamard, Pauli-X y CNOT. Asimismo, la propuesta incluye una guía didáctica estructurada para complementar el desarrollo conceptual y procedimental de los estudiantes.

La utilización de este tipo de herramientas puede contribuir significativamente a facilitar la comprensión de conceptos abstractos mediante representaciones dinámicas e interactivas, favoreciendo procesos de aprendizaje más participativos y significativos. De igual manera, permite introducir contenidos contemporáneos de ciencia y tecnología dentro de contextos escolares donde tradicionalmente predominan enfoques centrados en física clásica.

Por otra parte, la investigación posee relevancia académica debido a que existen relativamente pocos estudios orientados a la enseñanza introductoria de computación cuántica en educación media, especialmente en contextos escolares colombianos. En consecuencia, este trabajo puede aportar elementos pedagógicos y metodológicos útiles para futuras propuestas relacionadas con enseñanza de tecnologías cuánticas en niveles preuniversitarios.

Asimismo, la investigación tiene importancia científica y educativa debido a que contribuye al fortalecimiento de procesos de alfabetización científica relacionados con tecnologías emergentes, aspecto especialmente relevante en el contexto actual marcado por el

reconocimiento internacional del año 2025 como Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas.

Finalmente, la presente investigación se considera viable debido a que se contó con una población estudiantil definida, una estrategia pedagógica estructurada, una guía didáctica y un simulador interactivo desarrollado específicamente para apoyar el proceso de enseñanza y aprendizaje de fundamentos de física y computación cuántica. Además, se dispuso de mecanismos de evaluación orientados a analizar el desempeño y la comprensión conceptual alcanzada por los estudiantes durante la implementación de la propuesta pedagógica.

3. OBJETIVOS

3.1.OBJETIVO GENERAL

- ✓ Evaluar el impacto del uso de un simulador interactivo de circuitos cuánticos, acompañado de una guía didáctica estructurada y una evaluación por competencias, en el desarrollo de la comprensión conceptual de los fundamentos de la física y la computación cuántica en estudiantes de educación media.

3.2.OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Diseñar una estrategia pedagógica orientada a la enseñanza de los fundamentos de la física y la computación cuántica en estudiantes de grado undécimo, en el contexto de la incorporación de contenidos asociados a la ciencia y tecnología cuántica en la educación media.
- ✓ Desarrollar un simulador interactivo de circuitos cuánticos como herramienta didáctica para facilitar la comprensión de conceptos fundamentales como superposición, medición y funcionamiento de compuertas cuánticas.
- ✓ Implementar la estrategia pedagógica en el aula, integrando el uso del simulador y una guía didáctica estructurada para el abordaje progresivo de los contenidos.
- ✓ Evaluar la comprensión conceptual de los estudiantes mediante una prueba estructurada por competencias aplicada en el módulo de computación cuántica, considerando diferentes niveles de dificultad (bajo, medio y alto).
- ✓ Analizar los resultados obtenidos en la evaluación, con el fin de caracterizar el nivel de comprensión alcanzado por los estudiantes en relación con la diferenciación entre computación clásica y cuántica, la interpretación probabilística y el seguimiento de circuitos cuánticos.

4. HIPÓTESIS

La presente investigación parte de la necesidad de analizar la comprensión de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de educación media mediante la implementación de una estrategia pedagógica apoyada en un simulador interactivo de circuitos cuánticos y una guía didáctica de apoyo conceptual y procedimental.

En este sentido, se plantea que el uso de herramientas visuales e interactivas puede favorecer la comprensión de conceptos abstractos asociados a física y computación cuántica, especialmente en aspectos relacionados con superposición, medición cuántica, funcionamiento de compuertas y seguimiento de circuitos cuánticos.

4.1 Hipótesis de trabajo

La implementación de una estrategia pedagógica apoyada en un simulador interactivo de circuitos cuánticos y una guía didáctica favorece la comprensión de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de grado undécimo, particularmente en competencias relacionadas con diferenciación entre computación clásica y cuántica, interpretación probabilística y seguimiento de circuitos cuánticos.

5. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

5.1. MARCO TEORICO

5.1.1. Relevancia de la enseñanza de la física cuántica en la educación secundaria

La enseñanza de la física cuántica en la educación secundaria ha adquirido una importancia creciente en el contexto actual, debido a su papel fundamental en el desarrollo de tecnologías emergentes como la computación cuántica, la inteligencia artificial, la nanotecnología y los sistemas avanzados de comunicación. Diversos estudios coinciden en que la educación científica debe evolucionar para incorporar estos avances, con el fin de reducir la brecha entre el conocimiento científico contemporáneo y los contenidos impartidos en el aula (Cuéllar García, 2023); (Cuesta-Beltrán, 2018); (Haron, 2023).

Asimismo, diferentes investigaciones destacan la necesidad de acercar contenidos relacionados con física y computación cuántica a estudiantes de educación secundaria, debido al impacto creciente que las tecnologías cuánticas tendrán en distintos campos científicos y tecnológicos. En este sentido, Cuéllar García (2023) señala que la enseñanza de estos contenidos contribuye a la democratización del conocimiento científico y favorece procesos de alfabetización científica frente a tecnologías emergentes. De igual manera, Salas (2022) resalta la importancia de introducir fundamentos de computación cuántica en

niveles de bachillerato mediante estrategias didácticas que permitan a los estudiantes interactuar activamente con los conceptos trabajados.

Pauletich (2025) señala que, a pesar de la importancia científica y tecnológica de la mecánica cuántica en la actualidad, su presencia en la educación secundaria continúa siendo limitada. La autora destaca la necesidad de desarrollar propuestas didácticas que permitan acercar estos contenidos a los estudiantes de enseñanza media mediante metodologías adaptadas a su nivel educativo. De forma similar, Devece (2019) plantea que la incorporación de contenidos de física contemporánea en secundaria permite relacionar el aprendizaje científico con tecnologías presentes en la vida cotidiana de los estudiantes, favoreciendo una mayor contextualización de los conocimientos.

Otero (2009) afirma que la mecánica cuántica constituye actualmente un conocimiento científica y socialmente relevante debido a su relación con tecnologías modernas como la electrónica basada en semiconductores, el láser, la nanotecnología y la computación cuántica. Los autores destacan la necesidad de incorporar estos contenidos en la educación secundaria mediante propuestas didácticas adaptadas al contexto escolar.

No obstante, a pesar de su relevancia, la física cuántica continúa siendo escasamente abordada en los niveles de educación básica y media, donde predomina una enseñanza centrada en la física clásica. Esta situación limita la formación científica integral de los estudiantes y restringe su capacidad para comprender fenómenos fundamentales del mundo moderno (Torres Arango, 2018). En este sentido, se ha planteado la necesidad de introducir estos contenidos desde etapas tempranas, favoreciendo el desarrollo de nuevas formas de pensamiento y comprensión de la naturaleza.

Desde la perspectiva del estudiante, la inclusión de la física cuántica en el currículo también enfrenta un reto asociado a la percepción de relevancia. Investigaciones han evidenciado que los estudiantes reconocen la importancia de estos contenidos para la ciencia y la sociedad, pero no los consideran significativos para su vida personal, fenómeno descrito como “importante, pero no para mí” (Moraga-Calderón, 2020). Este hallazgo pone de manifiesto la necesidad de diseñar propuestas pedagógicas que conecten los contenidos cuánticos con contextos significativos para los estudiantes.

5.1.2. Naturaleza conceptual de la física cuántica

La física cuántica se caracteriza por introducir un cambio paradigmático en la comprensión de la realidad física, al abandonar los principios deterministas de la física clásica y adoptar una visión probabilística del comportamiento de la materia y la energía. Conceptos como la cuantización de la energía, la dualidad onda-partícula, la superposición de estados y el entrelazamiento cuántico constituyen los pilares fundamentales de esta teoría (Michael A. Nielsen, 2010).

En este marco, el principio de superposición ocupa un lugar central, ya que establece que un sistema cuántico puede encontrarse en una superposición de múltiples estados hasta el momento de la medición. Este principio, junto con la naturaleza probabilística del colapso de

la función de onda, redefine la manera en que se conciben los fenómenos físicos, introduciendo una lógica distinta a la del mundo macroscópico (Weissman E. Y., 2022).

Asimismo, la computación cuántica surge como una aplicación directa de estos principios, al utilizar unidades de información denominadas cúbits, los cuales pueden representar múltiples estados simultáneamente mediante superposición. La manipulación de estos estados se realiza a través de compuertas cuánticas, permitiendo la construcción de circuitos capaces de resolver problemas complejos de manera más eficiente que los sistemas clásicos (Michael A. Nielsen, 2010); (Rozo Clavijo, 2025).

5.1.3. Dificultades en el aprendizaje de la física cuántica

Uno de los principales desafíos en la enseñanza de la física cuántica radica en las dificultades que presentan los estudiantes para comprender sus conceptos fundamentales. Estas dificultades han sido ampliamente documentadas en la literatura y se clasifican en dimensiones conceptuales, ontológicas y epistemológicas (Sinarcas, 2013); (Solbes, 2010).

Diversas investigaciones han evidenciado que una de las principales dificultades en la enseñanza de la teoría cuántica radica en la transición entre modelos clásicos y modelos cuánticos. (Muñoz Burbano, 2021) plantean que muchos estudiantes presentan dificultades para diferenciar ambos enfoques debido a que la enseñanza tradicional suele omitir el quiebre conceptual existente entre la física clásica y la teoría cuántica. Asimismo, los autores señalan que la ausencia de estrategias didácticas contextualizadas puede generar interpretaciones erróneas y dificultades en la comprensión de conceptos asociados a superposición, medición y estructura de la materia.

De igual manera, Pauletich (2025) menciona que uno de los principales obstáculos para incorporar contenidos de mecánica cuántica en secundaria corresponde al carácter anti intuitivo de muchos de sus conceptos y al nivel de abstracción matemática asociado a esta teoría, situación que genera dificultades tanto en estudiantes como en docentes.

Otero (2009) sostiene que gran parte de estas dificultades también se relacionan con enfoques de enseñanza excesivamente centrados en formalismos matemáticos y modelos clásicos, lo que dificulta que los estudiantes desarrollen una comprensión conceptual adecuada de los fenómenos cuánticos.

Además, Intriago-Álava (2023) afirman que la enseñanza tradicional de la física continúa centrada en metodologías expositivas y resolución mecánica de ejercicios, situación que genera desinterés y baja motivación hacia esta área del conocimiento.

Desde el punto de vista conceptual, los estudiantes suelen presentar dificultades para comprender la dualidad onda-partícula, la superposición y el principio de incertidumbre. Estas dificultades se originan, en gran medida, en la tendencia a interpretar los fenómenos cuánticos desde esquemas de pensamiento clásico, lo que genera concepciones erróneas persistentes (Martínez Torregrosa, 2016).

A nivel ontológico, los estudiantes tienen dificultades para aceptar la naturaleza no intuitiva de los objetos cuánticos, mientras que, en el plano epistemológico, enfrentan retos para comprender el carácter probabilístico del conocimiento científico en este campo. Estas limitaciones se traducen en un aprendizaje fragmentado, donde los conceptos no logran integrarse en un marco teórico coherente (Nikolaus, 2024).

Adicionalmente, investigaciones han evidenciado que incluso después de procesos de instrucción formal, los niveles de comprensión conceptual siguen siendo bajos, lo que sugiere que los enfoques tradicionales de enseñanza no son suficientes para abordar la complejidad de estos contenidos (Nikolaus, 2024).

5.1.4. Enfoques didácticos para la enseñanza de la física cuántica

Frente a estas dificultades, se han desarrollado diversos enfoques didácticos orientados a mejorar la enseñanza de la física cuántica. Uno de los más relevantes es el enfoque estructurado de la teoría, el cual propone organizar los contenidos en torno a principios fundamentales, fenómenos y aplicaciones, facilitando la comprensión global del conocimiento (Weissman E. Y., 2021); (Weissman E. Y., 2022).

En este contexto, las secuencias didácticas constituyen una alternativa relevante para introducir contenidos de mecánica cuántica en educación media. (Pauletich, 2025) propone una metodología basada en actividades interactivas, resolución de situaciones problemáticas y aprendizaje significativo, permitiendo que los estudiantes construyan progresivamente una comprensión conceptual de los fenómenos cuánticos.

Este enfoque permite superar la fragmentación conceptual característica de la enseñanza tradicional, al presentar la física cuántica como un sistema coherente y jerárquico de conocimiento. De igual manera, se ha propuesto el uso de estrategias basadas en problemas, las cuales permiten a los estudiantes comprender la necesidad histórica y científica del desarrollo de la teoría cuántica (Martínez Torregrosa, 2016).

En los últimos años, diferentes propuestas didácticas han planteado la necesidad de desarrollar estrategias de enseñanza más activas y contextualizadas para abordar contenidos de física cuántica en niveles introductorios. Savall Alemany (2017) proponen una enseñanza problematizada basada en procesos de modelización y resolución de preguntas científicas relevantes, permitiendo que los estudiantes construyan explicaciones progresivas de los fenómenos físicos.

De igual manera, Muñoz Burbano (2021) destacan que las secuencias de enseñanza-aprendizaje basadas en investigación favorecen procesos de comprensión conceptual y permiten integrar actividades contextualizadas, discusión grupal y reflexión científica dentro del aula.

Otero (2009) también propone el desarrollo de secuencias didácticas orientadas a la reconstrucción progresiva de conceptos cuánticos mediante preguntas problematizadoras, participación activa y actividades contextualizadas que favorezcan la comprensión conceptual.

Por otro lado, el aprendizaje significativo se constituye como un referente fundamental en la enseñanza de estos contenidos, al plantear que el conocimiento se construye a partir de la integración de nuevas ideas con estructuras cognitivas previas (González, 2015). En este sentido, el uso de modelos, representaciones y analogías resulta esencial para facilitar la comprensión de conceptos abstractos.

Asimismo, la teoría de los campos conceptuales destaca la importancia de las situaciones problemáticas en la construcción del conocimiento, lo que refuerza la necesidad de diseñar actividades contextualizadas que promuevan el aprendizaje activo (Torres Arango, 2018).

5.1.5. Uso de tecnologías y simulaciones en la enseñanza cuántica

El uso de tecnologías digitales, especialmente simulaciones interactivas, ha demostrado ser una de las estrategias más efectivas para abordar las dificultades en la enseñanza de la física cuántica. Estas herramientas permiten representar fenómenos que no pueden ser observados directamente, facilitando la comprensión de procesos complejos (Haron, 2023).

Salas (2022) destaca que las simulaciones permiten a los estudiantes visualizar fenómenos asociados a superposición, medición y aplicación de compuertas cuánticas mediante actividades dinámicas e interactivas. Asimismo, Cuéllar García (2023) plantea que el uso de tecnologías digitales favorece procesos de aprendizaje significativo al facilitar la representación visual de conceptos complejos y fortalecer la participación activa de los estudiantes durante las actividades desarrolladas en clase.

De acuerdo con Vega (2018), el uso de las TIC y aplicaciones web en la enseñanza de la mecánica cuántica favorece la comprensión de fenómenos abstractos mediante simuladores interactivos, representaciones visuales y recursos digitales que facilitan la participación activa de los estudiantes.

Mendoza-Hernández (2023) y Cuéllar García (2023) señalan que los simuladores constituyen una estrategia de enseñanza-aprendizaje que favorece la interacción del estudiante con los fenómenos estudiados, permitiendo experimentar, modificar variables y visualizar procesos de manera dinámica e interactiva. Además, los autores destacan que estos recursos generan ambientes virtuales de aprendizaje que complementan los contenidos desarrollados en el aula y fortalecen la comprensión conceptual.

Diversas investigaciones han evidenciado que las simulaciones favorecen la participación activa de los estudiantes, el desarrollo del pensamiento crítico y la construcción de modelos mentales adecuados (Méndez Andrade, 2025). Además, permiten experimentar con sistemas cuánticos de manera controlada, lo que facilita la comprensión de conceptos como la superposición y la medición.

Asimismo, la incorporación de representaciones visuales y modelos gráficos favorece la comprensión de conceptos abstractos relacionados con superposición, estados cuánticos y sistemas de cúbits. En este sentido, Pauletich (2025) integra recursos como la esfera de Bloch y representaciones del experimento de doble rendija para fortalecer los procesos de interpretación conceptual.

Intriago-Álava (2023) sostiene que los simuladores virtuales permiten desarrollar ambientes interactivos de aprendizaje donde los estudiantes pueden experimentar libremente, repetir procedimientos y analizar diferentes escenarios sin los riesgos asociados a laboratorios físicos tradicionales.

En este contexto, la integración de simuladores de circuitos cuánticos representa una estrategia pedagógica innovadora que permite vincular los principios teóricos con aplicaciones prácticas, fortaleciendo la comprensión conceptual y la motivación de los estudiantes.

5.1.6. Evaluación del aprendizaje en física cuántica

La evaluación del aprendizaje en física cuántica constituye un aspecto fundamental para determinar la efectividad de las estrategias pedagógicas implementadas. En este sentido, se ha planteado la necesidad de diseñar instrumentos que permitan evaluar la comprensión conceptual, más allá de la resolución de ejercicios matemáticos (Nikolaus, 2024).

El uso de evaluaciones basadas en competencias permite medir habilidades como la interpretación de fenómenos, el análisis de sistemas y la comprensión de modelos teóricos, proporcionando una visión más completa del aprendizaje de los estudiantes. Este enfoque resulta especialmente relevante en el contexto de la enseñanza de la computación cuántica, donde la comprensión conceptual es clave para el desarrollo de habilidades cognitivas avanzadas.

5.1.7. Síntesis y aporte de la investigación

A partir del análisis de la literatura, se evidencia que la enseñanza de la física cuántica en educación secundaria enfrenta desafíos significativos relacionados con la abstracción de los contenidos, las dificultades de aprendizaje y las limitaciones de los enfoques pedagógicos tradicionales. Sin embargo, también se identifican avances importantes en el uso de estrategias didácticas innovadoras, como la enseñanza estructurada, el aprendizaje significativo y el uso de simulaciones interactivas.

En este contexto, la presente investigación se fundamenta en la integración de estos enfoques, mediante el diseño e implementación de un simulador de circuitos cuánticos y una estrategia pedagógica basada en competencias, con el propósito de mejorar la comprensión de los fundamentos de la física y la computación cuántica en estudiantes de educación media.

En conjunto, las investigaciones revisadas evidencian que la enseñanza de contenidos relacionados con física y computación cuántica en educación secundaria constituye un campo de creciente interés dentro de la investigación educativa. Asimismo, resaltan la importancia de desarrollar estrategias pedagógicas apoyadas en simulaciones, recursos visuales y metodologías activas que permitan disminuir las dificultades conceptuales asociadas a estos contenidos y favorecer procesos de comprensión más significativos en los estudiantes.

5.2.Marco conceptual

5.2.1. Física cuántica

La física cuántica es la rama de la física que estudia el comportamiento de la materia y la energía a escalas microscópicas, donde los fenómenos no pueden explicarse mediante las leyes de la física clásica. Se caracteriza por la introducción de principios como la cuantización de la energía, la dualidad onda-partícula y la naturaleza probabilística de los sistemas físicos (Michael A. Nielsen, 2010).

A diferencia del enfoque determinista de la física clásica, la física cuántica describe los sistemas en términos de probabilidades, lo que implica una nueva forma de interpretar la realidad física. Esta característica representa uno de los principales retos en su enseñanza, ya que requiere que los estudiantes abandonen modelos intuitivos basados en la experiencia cotidiana.

5.2.2. Cúbit

El cúbit (quantum bit) es la unidad básica de información en la computación cuántica. A diferencia del bit clásico, que solo puede tomar los valores 0 o 1, el cúbit puede encontrarse en una superposición de ambos estados simultáneamente. Matemáticamente, esto se expresa como una combinación lineal de los estados base $|0\rangle$ y $|1\rangle$ (Nielsen, 2010).

Esta propiedad permite el procesamiento paralelo de información y constituye la base del potencial de la computación cuántica. La comprensión del cúbit resulta fundamental para interpretar el funcionamiento de los circuitos cuánticos y las operaciones que se realizan sobre ellos.

5.2.3. Superposición cuántica

La superposición cuántica es un principio fundamental que establece que un sistema puede existir simultáneamente en múltiples estados hasta el momento en que se realiza una medición. Este concepto es central en la mecánica cuántica y permite explicar fenómenos que no pueden interpretarse desde la física clásica (Weissman E. Y., 2022).

En el contexto de la computación cuántica, la superposición permite que un cúbit represente múltiples configuraciones al mismo tiempo, lo que incrementa significativamente la capacidad de procesamiento de los sistemas cuánticos.

5.2.4. Entrelazamiento cuántico

El entrelazamiento cuántico es un fenómeno mediante el cual dos o más partículas comparten un estado común, de manera que la medición de una de ellas afecta instantáneamente el estado de la otra, independientemente de la distancia que las separe. Este fenómeno representa una de las características más contraintuitivas de la física cuántica y ha sido fundamental en el desarrollo de tecnologías como la criptografía cuántica y la computación cuántica.

El entrelazamiento permite establecer correlaciones entre sistemas cuánticos que no pueden explicarse mediante teorías clásicas, lo que lo convierte en un concepto clave para la comprensión de la teoría cuántica.

5.2.5. Medición cuántica y colapso de la función de onda

En la mecánica cuántica, la medición de un sistema implica el colapso de la función de onda, es decir, la transición de un estado de superposición a uno de los estados posibles. Este proceso introduce una naturaleza probabilística en la descripción de los sistemas cuánticos, ya que el resultado de la medición no puede predecirse con certeza, sino en términos de probabilidades (Weissman E. Y., 2022).

La comprensión de este concepto es fundamental para interpretar el comportamiento de los sistemas cuánticos y diferenciarlo del determinismo clásico.

5.2.6. Compuertas cuánticas

Las compuertas cuánticas son operaciones que permiten manipular el estado de los cúbits en un sistema cuántico. Estas compuertas son análogas a las compuertas lógicas de la computación clásica, pero operan sobre estados cuánticos y permiten generar superposición y entrelazamiento.

Entre las compuertas más relevantes se encuentran:

- **Pauli-X:** invierte el estado del cúbit (equivalente a NOT)
- **Hadamard (H):** genera superposición
- **Pauli-Z:** introduce cambios de fase
- **CNOT:** genera entrelazamiento entre cúbits

Estas compuertas constituyen los bloques fundamentales para la construcción de circuitos cuánticos (Nielsen, 2010).

5.2.7. Circuito cuántico

Un circuito cuántico es un modelo computacional que describe la evolución de un sistema cuántico mediante la aplicación secuencial de compuertas cuánticas sobre uno o más cúbits. Este modelo permite representar procesos de cálculo cuántico y analizar la transformación de los estados antes de la medición.

El estudio de circuitos cuánticos facilita la comprensión de los principios de la computación cuántica y su aplicación en la resolución de problemas complejos.

5.2.8. Simulación interactiva

La simulación interactiva es una herramienta digital que permite representar y manipular fenómenos complejos en entornos virtuales. En el contexto de la enseñanza de la física cuántica, las simulaciones permiten visualizar procesos que no pueden observarse directamente, como la evolución de estados cuánticos o la medición (Haron, 2023).

El uso de simulaciones favorece el aprendizaje activo, la construcción de modelos mentales y la comprensión de conceptos abstractos, constituyéndose como una estrategia didáctica clave en la enseñanza de la física cuántica.

5.2.9. Aprendizaje significativo

El aprendizaje significativo se define como el proceso mediante el cual los nuevos conocimientos se integran de manera sustancial con las estructuras cognitivas previas del estudiante. Este enfoque implica que el aprendizaje no se basa en la memorización, sino en la comprensión y la construcción activa del conocimiento (González, 2015).

En la enseñanza de la física cuántica, el aprendizaje significativo resulta fundamental debido a la complejidad de los conceptos, lo que requiere estrategias pedagógicas que faciliten la conexión entre lo conocido y lo nuevo.

5.2.10. Evaluación por competencias

La evaluación por competencias se centra en medir la capacidad del estudiante para aplicar conocimientos, interpretar fenómenos y resolver problemas, más allá de la simple memorización de contenidos. Este enfoque permite evaluar habilidades cognitivas de orden superior, como el análisis, la interpretación y la argumentación (Nikolaus, 2024).

En el contexto de la presente investigación, la evaluación por competencias permite analizar la comprensión conceptual de los estudiantes en relación con los principios de la física y la computación cuántica.

6. METODOLOGÍA

6.1. Enfoque de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo–analítico, orientado a analizar la comprensión conceptual de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de educación media mediante la implementación de una estrategia pedagógica apoyada en simulaciones interactivas.

El enfoque cuantitativo permitió organizar, clasificar e interpretar los resultados obtenidos en los exámenes aplicados a los estudiantes, identificando tendencias de desempeño y niveles de comprensión asociados a las competencias evaluadas.

Asimismo, el estudio presentó un alcance descriptivo, debido a que buscó caracterizar el comportamiento académico de los estudiantes frente a contenidos relacionados con física y computación cuántica, sin establecer relaciones causales estrictas entre variables.

La investigación se desarrolló en el contexto de los avances científicos asociados a la denominada segunda revolución cuántica y el reconocimiento del año 2025 como el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas, promovido por la UNESCO y las

Naciones Unidas, situación que resalta la necesidad de fortalecer procesos de alfabetización científica en tecnologías emergentes desde la educación media.

6.2. Tipo y diseño de la investigación

La investigación correspondió a un estudio de tipo descriptivo con diseño no experimental de corte transeccional.

Se consideró no experimental debido a que las variables no fueron manipuladas de manera controlada, sino analizadas a partir de la implementación de una estrategia pedagógica en un contexto educativo real.

De igual manera, el estudio presentó un carácter transeccional, ya que la recolección de la información se realizó durante un periodo académico específico posterior a la implementación de las actividades pedagógicas y la aplicación de los exámenes.

Este diseño permitió analizar el fenómeno educativo en su contexto natural, evaluando el desempeño de los estudiantes frente a los contenidos desarrollados durante la propuesta pedagógica.

6.3. Método de investigación

La investigación integró elementos de los métodos descriptivo, analítico e inductivo.

El método descriptivo permitió caracterizar el desempeño académico de los estudiantes en relación con las competencias evaluadas.

Por su parte, el método analítico permitió interpretar el comportamiento de los estudiantes frente a diferentes niveles de complejidad cognitiva asociados a física y computación cuántica.

Finalmente, el método inductivo facilitó la formulación de conclusiones generales a partir de los resultados particulares obtenidos durante la implementación de la estrategia pedagógica.

6.4. Población y muestra

La población objeto de estudio estuvo conformada por estudiantes de educación media del Colegio Adventista Libertad de la ciudad de Bucaramanga.

La muestra correspondió a 102 estudiantes de grado undécimo pertenecientes a los cursos 11A, 11B y 11C, quienes participaron en la implementación de la estrategia pedagógica durante el cuarto periodo académico.

La selección de esta población respondió a la necesidad de explorar el potencial pedagógico de contenidos introductorios de física y computación cuántica en estudiantes próximos a finalizar la educación media.

6.5. Fuentes y técnicas de recolección de información

La investigación se fundamentó en fuentes primarias y secundarias.

Las fuentes primarias correspondieron a los resultados obtenidos por los estudiantes mediante la aplicación de los exámenes diseñados para evaluar fundamentos de física y computación cuántica.

Por otra parte, las fuentes secundarias estuvieron constituidas por artículos científicos, revisiones bibliográficas y literatura académica relacionada con enseñanza de física cuántica, computación cuántica y uso de simulaciones interactivas en contextos educativos.

La principal técnica de recolección de información fue el cuestionario estructurado, implementado mediante exámenes de selección múltiple con única respuesta y evaluación por competencias.

6.6. Fases de la investigación

La investigación se desarrolló en cinco fases principales:

6.6.1. Fase 1: Diseño de la estrategia pedagógica

En esta fase se diseñó una estrategia pedagógica orientada a la enseñanza progresiva de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de educación media.

La estrategia fue estructurada en dos módulos principales, desarrollados mediante presentaciones teóricas, guía didáctica y actividades apoyadas en simulación interactiva.

Módulo 1: Fundamentos de física cuántica

En este módulo se abordaron contenidos introductorios de física cuántica orientados a contextualizar históricamente el surgimiento de la mecánica cuántica y sus principales fundamentos conceptuales.

Los contenidos trabajados incluyeron:

- Modelos atómicos de Thomson, Rutherford y Bohr;
- Hipótesis de Planck y cuantización de la energía;
- Relación entre energía y frecuencia;
- Efecto fotoeléctrico;
- Fotones;
- Dualidad onda-partícula;
- Experimento de la doble rendija;
- Principio de incertidumbre;
- Superposición cuántica;
- Entrelazamiento cuántico.

Asimismo, se trabajaron actividades de análisis conceptual y preguntas orientadas a fortalecer la comprensión de fenómenos asociados a física cuántica y al comportamiento probabilístico de la materia y la energía.

El desarrollo de este módulo permitió establecer las bases conceptuales necesarias para la posterior introducción de contenidos relacionados con computación cuántica.

Módulo 2: Fundamentos de computación clásica y computación cuántica

En esta etapa se desarrollaron contenidos relacionados con computación clásica y computación cuántica, estableciendo comparaciones entre ambos modelos de procesamiento de información.

Inicialmente se abordaron fundamentos de computación clásica, incluyendo:

- Sistema binario;
- Concepto de bit;
- Funcionamiento básico del transistor;
- Compuertas lógicas clásicas OR, AND, NOT, NAND, NOR y XOR;
- Resolución de ejercicios de circuitos lógicos.

Posteriormente se introdujeron conceptos asociados a computación cuántica, entre ellos:

- Concepto de cúbit;
- Representación de estados cuánticos;
- Esfera de Bloch;
- Superposición cuántica;
- Representación matricial de estados;
- Compuertas cuánticas fundamentales;
- Medición cuántica;
- Circuitos cuánticos;
- Entrelazamiento cuántico.

Dentro de las compuertas trabajadas se incluyeron:

- Pauli-X;
- Hadamard;
- Pauli-Z;
- CNOT.

Asimismo, se desarrollaron ejercicios relacionados con evolución de estados cuánticos, análisis matricial de circuitos y procesos de medición probabilística.

Diseño de la guía didáctica

Como complemento de la estrategia pedagógica, se diseñó una guía didáctica estructurada orientada al fortalecimiento conceptual y procedimental de los contenidos desarrollados.

La guía incluyó:

- Explicaciones conceptuales;
- Representación matemática de estados cuánticos;
- Ejercicios matriciales;
- Análisis de compuertas cuánticas;
- Desarrollo de circuitos cuánticos básicos;
- Interpretación de procesos de medición y superposición.

La guía fue utilizada como apoyo durante las actividades desarrolladas con los estudiantes y permitió complementar la interacción con el simulador mediante ejercicios de razonamiento conceptual y matemático.

6.6.2. Fase 2: Desarrollo del simulador interactivo

Durante esta fase se desarrolló un simulador interactivo de circuitos cuánticos con fines educativos, orientado a facilitar la comprensión de fundamentos básicos de computación cuántica en estudiantes de grado undécimo. La herramienta fue diseñada como un entorno visual e interactivo que permitiera representar de manera dinámica la evolución de estados cuánticos y el funcionamiento de compuertas fundamentales dentro de circuitos cuánticos simples.

El simulador fue construido mediante tecnologías web, utilizando HTML, CSS y JavaScript, lo que permitió desarrollar una interfaz gráfica accesible, intuitiva y adaptable para su utilización en actividades pedagógicas dentro del aula. Asimismo, la herramienta integró representaciones matemáticas y visuales orientadas a fortalecer simultáneamente la comprensión conceptual y procedimental de los estudiantes.

La interfaz del simulador fue estructurada en dos modos principales de trabajo: simulación de un cúbit y simulación de dos cúbits. En el modo de un cúbit, los estudiantes podían trabajar con estados iniciales $|0\rangle$ y $|1\rangle$, mientras que en el modo de dos cúbits era posible seleccionar configuraciones iniciales como $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ y $|11\rangle$. Esta organización permitió introducir progresivamente conceptos asociados a computación cuántica, iniciando desde sistemas simples hasta configuraciones más complejas relacionadas con superposición y entrelazamiento.

Figura 1. Interfaz gráfica del simulador interactivo de circuitos cuánticos para sistemas de un cúbit.



Nota: Fuente Elaboración propia.

La Figura 1 presenta la interfaz desarrollada para el modo de un cúbit. En (1) se encuentra el selector del modo de trabajo y del estado inicial del cúbit, permitiendo escoger entre diferentes configuraciones iniciales. En (2) se observa el área de construcción y ejecución del circuito cuántico, donde los estudiantes podían incorporar compuertas cuánticas y ejecutar el circuito paso a paso o de manera completa. En (3) se muestra el panel de representación analítica del estado cuántico $|\psi\rangle$, junto con las amplitudes y probabilidades asociadas a cada estado base. El elemento (4) corresponde al indicador del paso actual ejecutado dentro del circuito. Finalmente, en (5) se presenta la visualización tridimensional mediante esfera de Bloch, utilizada para observar gráficamente la evolución del estado del cúbit.

Dentro de las compuertas implementadas se incluyeron Hadamard (H), Pauli-X (X), Pauli-Z (Z), compuerta controlada CNOT y medición en la base computacional. Estas compuertas podían organizarse en una cuadrícula secuencial por columnas, permitiendo que los estudiantes analizaran cómo cada operación modificaba progresivamente el estado cuántico del sistema.

La herramienta también permitió ejecutar el circuito de manera secuencial mediante la opción “Paso”, lo cual facilitó el seguimiento detallado de la evolución del sistema cuántico. Asimismo, el simulador incluyó funciones para reiniciar el circuito, ejecutar completamente la secuencia de compuertas y realizar mediciones finales sobre el sistema.

Figura 2. Interfaz gráfica del simulador interactivo de circuitos cuánticos para sistemas de dos cúbits.



Nota: Fuente Elaboración propia.

La Figura 2 presenta la interfaz correspondiente al modo de dos cúbits. En (1) se encuentra el panel de configuración inicial del sistema compuesto, donde es posible seleccionar diferentes estados base para los dos cúbits. En (2) se observa el área de construcción y ejecución del circuito cuántico para los cúbits Q0 y Q1, permitiendo incorporar compuertas y analizar la evolución del sistema. El elemento (3) corresponde al indicador del paso actual del circuito durante la simulación. En (4) se presenta el panel de representación analítica del estado cuántico del sistema compuesto, donde se visualizaron las amplitudes y probabilidades asociadas a los estados $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ y $|11\rangle$. Finalmente, en (5) se muestran las esferas de Bloch utilizadas para visualizar individualmente el comportamiento y evolución de cada cúbit del sistema.

Uno de los elementos más importantes del simulador fue la representación analítica del estado cuántico mediante notación tipo $|\psi\rangle$. Esta representación permitió visualizar las amplitudes complejas asociadas a cada estado base y sus respectivas probabilidades de medición. De esta manera, los estudiantes pudieron relacionar directamente la representación matemática con la evolución gráfica observada en el circuito y en la esfera de Bloch.

Asimismo, la incorporación de representaciones tridimensionales mediante esfera de Bloch permitió fortalecer la comprensión visual de conceptos asociados a superposición, cambio de fase y evolución de estados cuánticos. Esta característica fue especialmente importante debido al alto nivel de abstracción presente en la enseñanza de computación cuántica.

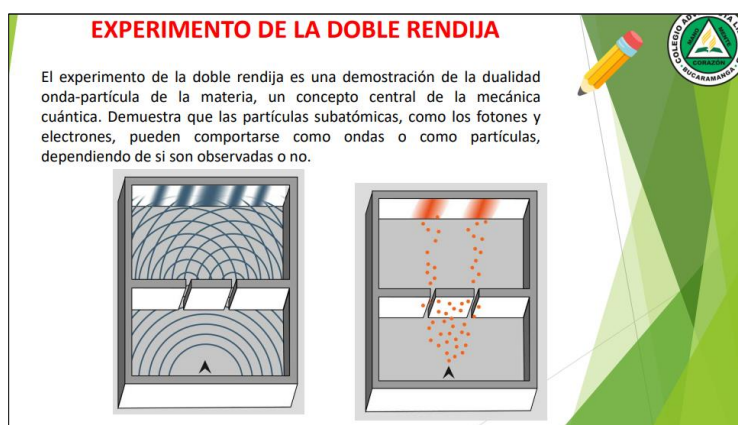
En conjunto, el simulador se constituyó como una herramienta de apoyo didáctico orientada a complementar la explicación teórica y las actividades desarrolladas en la guía pedagógica. La integración de elementos visuales, analíticos e interactivos permitió facilitar la comprensión de conceptos fundamentales relacionados con circuitos cuánticos básicos, compuertas cuánticas y evolución de estados cuánticos.

6.6.3. Fase 3: Implementación de la estrategia pedagógica

La implementación de la estrategia pedagógica se desarrolló con estudiantes de grado undécimo del Colegio Adventista Libertad, mediante una secuencia de actividades orientadas al fortalecimiento conceptual y procedimental de fundamentos de física y computación cuántica. La propuesta integró contenidos teóricos, actividades prácticas, material didáctico y el uso guiado del simulador interactivo de circuitos cuánticos desarrollado durante la investigación.

Inicialmente, se trabajaron conceptos introductorios relacionados con fundamentos de física cuántica, abordando contenidos como modelo atómico, hipótesis de Planck, efecto fotoeléctrico, fotones y experimento de la doble rendija, como se ilustra en la Figura 3.

Figura 3. Fragmento del Material didáctico utilizado para la introducción de fundamentos de física cuántica.

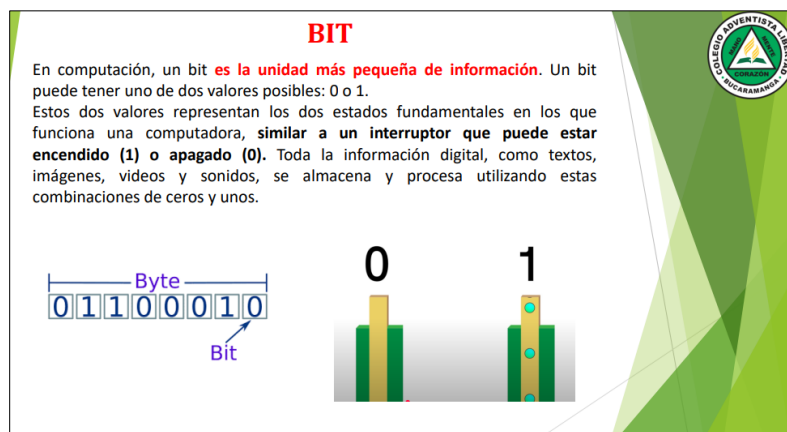


Nota: Fuente Elaboración propia.

Posteriormente, se desarrollaron contenidos asociados a computación clásica, incluyendo conceptos como sistema binario, bits, transistores y compuertas lógicas clásicas AND y OR. Estas actividades permitieron establecer comparaciones iniciales entre computación clásica y computación cuántica, facilitando la comprensión progresiva de las diferencias entre ambos paradigmas computacionales.

Posteriormente, se desarrollaron contenidos asociados a computación clásica, incluyendo conceptos como sistema binario, bits, transistores y compuertas lógicas clásicas AND y OR, como se muestra en la Figura 4. Estas actividades permitieron establecer comparaciones iniciales entre computación clásica y computación cuántica, facilitando la comprensión progresiva de las diferencias entre ambos paradigmas computacionales.

Figura 4. Fragmento del Material didáctico utilizado para la enseñanza de fundamentos de computación clásica.



Nota: Fuente Elaboración propia

Una vez consolidados los conceptos introductorios, se abordaron contenidos específicos de computación cuántica mediante actividades apoyadas en el simulador interactivo y la guía didáctica desarrollada para la investigación. La Figura 5 presenta una de las sesiones de trabajo desarrolladas durante la implementación de la estrategia pedagógica, en la cual los estudiantes interactuaron con el simulador bajo orientación docente para analizar compuertas cuánticas y la evolución de estados cuánticos. Dentro de los temas trabajados se incluyeron conceptos como cúbit, representación matemática de estados cuánticos, superposición, esfera de Bloch, compuertas cuánticas y circuitos cuánticos básicos.

Durante esta fase, los estudiantes interactuaron directamente con el simulador para analizar procesos asociados a: superposición cuántica; medición probabilística; aplicación de compuertas Hadamard, Pauli-X y Pauli-Z; evolución de estados cuánticos; interpretación de amplitudes y probabilidades; representación de estados en la esfera de Bloch; construcción y análisis de circuitos cuánticos; generación de entrelazamiento mediante compuertas CNOT.

El uso del simulador permitió que los estudiantes visualizaran simultáneamente la representación gráfica y matemática de los estados cuánticos. De esta manera, podían observar cómo las compuertas modificaban la amplitud, fase y probabilidad de los estados del sistema, así como interpretar los cambios producidos en la esfera de Bloch.

Asimismo, la posibilidad de ejecutar los circuitos paso a paso facilitó el seguimiento secuencial de la evolución del estado cuántico, permitiendo relacionar cada transformación con la compuerta aplicada dentro del circuito.

Figura 5. *Uso del simulador interactivo para el análisis de compuertas cuánticas y evolución de estados.*



Nota: Fuente Elaboración propia.

En las actividades relacionadas con sistemas de dos cúbits, los estudiantes utilizaron el simulador para analizar circuitos asociados a generación de entrelazamiento mediante compuertas Hadamard y CNOT. Estas actividades permitieron observar cómo un sistema compuesto puede evolucionar hacia estados correlacionados que no pueden describirse independientemente.

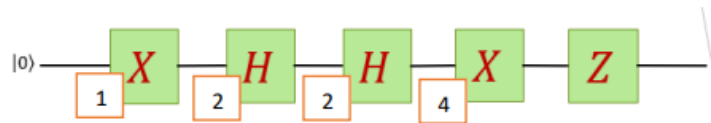
Paralelamente, se desarrolló una guía didáctica orientada a complementar las actividades realizadas con el simulador. La Figura 6 presenta la guía utilizada durante las actividades de análisis de circuitos cuánticos, en la cual se integraron explicaciones conceptuales, representaciones matriciales y ejercicios de aplicación relacionados con las principales compuertas cuánticas. La guía incluyó ejercicios de interpretación conceptual, análisis matricial de compuertas cuánticas, resolución paso a paso de circuitos y actividades de comparación entre resultados teóricos y simulaciones obtenidas en la herramienta interactiva.

Dentro de las actividades propuestas, los estudiantes debían calcular manualmente la evolución de diferentes circuitos cuánticos utilizando representaciones matriciales y posteriormente verificar los resultados mediante el simulador. Esta integración entre representación matemática y visual permitió fortalecer la comprensión conceptual de los circuitos trabajados.

Figura 6. Guía didáctica utilizada durante las actividades de análisis de circuitos cuánticos.

COMPUERTAS CUANTICAS PRINCIPALES		
Nombre de la compuerta	Concepto	Justificación matemática (Matriz unitaria)
Pauli-X (NOT cuántica)	Invierte el estado: $ 0\rangle \xrightarrow{\hat{X}} 1\rangle$ $ 1\rangle \xrightarrow{\hat{X}} 0\rangle$	$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
Hadamard (H)	Crea superposición: $ 0\rangle \xrightarrow{H} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle\right)$ $ 1\rangle \xrightarrow{H} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle\right)$	$H = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$
Pauli-Z	Cambia el signo de la amplitud del estado $ 1\rangle$, invierte su fase. $\frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{Z} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle$	$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$

Ejemplo de solución de circuito:



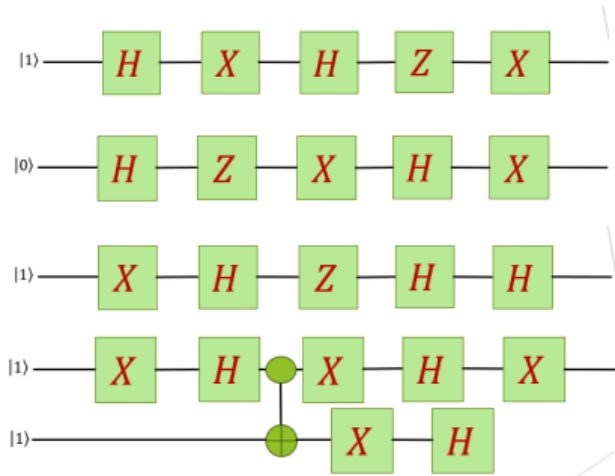
ESTADO INICIAL	OPERACIÓN	VISUALIZACIÓN
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{X} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{H} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \xrightarrow{H} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{X} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{Z} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$

Resultado Final:

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

ACTIVIDAD

Calcula paso a paso el resultado teórico del circuito, mostrando el **estado final** $|\psi\rangle$ mediante operaciones matriciales. Explica su **significado físico** (superposición, inversión, entrelazamiento, etc.) y **verifica si coincide** con lo mostrado por el simulador.



Nota: Fuente Elaboración propia.

La implementación de la estrategia pedagógica también incluyó resolución de ejercicios, análisis grupales y acompañamiento docente permanente durante el desarrollo de las actividades. En este proceso se realizaron observaciones relacionadas con la participación de los estudiantes, el uso del simulador y las dificultades conceptuales presentadas durante las actividades propuestas.

Finalmente, las actividades desarrolladas permitieron complementar la comprensión teórica mediante representaciones visuales dinámicas, favoreciendo procesos de interpretación conceptual, razonamiento lógico y análisis matemático básico aplicado a circuitos cuánticos introductorios.

6.6.4. Fase 4: Evaluación por competencias

La evaluación del aprendizaje se realizó mediante la aplicación de dos exámenes desarrollados en diferentes momentos de la implementación de la propuesta pedagógica.

Parcial 1: Fundamentos de física cuántica

El primer examen estuvo conformado por 20 preguntas de selección múltiple con única respuesta orientadas a evaluar contenidos relacionados con fundamentos conceptuales de física cuántica.

Las preguntas abordaron temas como:

- ✓ Cuantización de la energía;
- ✓ Efecto fotoeléctrico;
- ✓ Dualidad onda-partícula;

- ✓ Incertidumbre;
- ✓ Superposición;
- ✓ Modelos atómicos;
- ✓ Fundamentos modernos de la mecánica cuántica.

Posteriormente, las calificaciones fueron clasificadas en cuatro niveles de desempeño:

- ✓ Bajo (0 a 11 respuestas correctas de 20 preguntas)
- ✓ Medio; (12 a 14 respuestas correctas de 20 preguntas).
- ✓ Alto; (15 a 17 respuestas correctas de 20 preguntas).
- ✓ Superior. (18 a 20 respuestas correctas de 20 preguntas).

La Figura 7 presenta el momento de aplicación del Parcial 1 a los estudiantes de grado 11C, quienes respondieron de manera individual el instrumento diseñado para evaluar los conceptos fundamentales de física cuántica.

Figura 7. *Aplicación del Parcial 1 a los estudiantes del grado 11C.*



Parcial 2: Competencias en computación cuántica

El segundo examen fue estructurado bajo un enfoque de evaluación por competencias y estuvo orientado a analizar la comprensión conceptual de contenidos relacionados con computación cuántica trabajados mediante el uso del simulador interactivo.

Las competencias evaluadas fueron:

1. Diferenciación entre computación clásica y cuántica y función de compuertas fundamentales.
2. Interpretación probabilística y medición cuántica.
3. Seguimiento de circuitos cuánticos paso a paso.

Cada competencia fue organizada mediante preguntas con niveles de dificultad progresiva (bajo, medio, alto y superior), permitiendo evaluar diferentes niveles de complejidad cognitiva. Como se observa en la Tabla 1, cada competencia fue evaluada mediante indicadores específicos de desempeño, distribuyendo las preguntas en diferentes niveles de complejidad con el fin de valorar progresivamente la comprensión conceptual y procedimental de los estudiantes.

Tabla 1. Competencias e indicadores de desempeño evaluados en el Parcial 2.

COMPETENCIA	INDICADOR DE DESEMPEÑO	NIVEL DE DESEMPEÑO	PREGUNTA
1.Diferenciación entre computación clásica y cuántica y función de compuertas fundamentales.	Indicador conceptual: Distinción entre determinismo clásico y superposición/entrelazamiento; rol de X, H y CNOT..	BAJO: 0-1 Respuestas correctas	1
		MEDIO: 2 Respuestas correctas.	2
		ALTO: 3 respuestas correctas.	3
2.Interpretación probabilística y medición cuánticas.	Indicador de aprendizaje: Comprensión de $ \alpha ^2$ y $ \beta ^2$, colapso al medir y correlación en sistemas de uno o dos cúbits.	BAJO: 0-1 Respuestas correctas	4
		MEDIO: 2 Respuestas correctas.	5
		ALTO: 3 respuestas correctas.	6
3. Seguimiento de circuitos cuánticos paso a paso..	Indicador procedimental: Evolución del estado, cambio de fases y estado final antes de medición.	BAJO: 0-1 Respuestas correctas	7
		MEDIO: 2 Respuestas correctas.	8
		ALTO: 3 respuestas correctas.	9
		SUPERIOR: 4 Respuestas correctas.	10

Con el propósito de analizar progresivamente el nivel de complejidad cognitiva de las competencias evaluadas, las preguntas fueron estructuradas mediante diferentes niveles de dificultad. Como se presenta en la Tabla 2, la Competencia 1 fue evaluada mediante preguntas clasificadas en los niveles bajo, medio y alto, permitiendo valorar gradualmente la comprensión de los estudiantes sobre las diferencias entre la computación clásica y cuántica, así como los conceptos de superposición y entrelazamiento cuántico.

Tabla 2. Preguntas asociadas a la Competencia 1 y niveles de dificultad.

NIVEL	COMPETENCIA 1
BAJO	1. Durante una actividad, se compararon dos tipos de operaciones sobre información: ✓ En la computación clásica, una compuerta NOT siempre convierte un bit 0 en 1 y 1 en 0, produciendo un único resultado determinista. ✓ En la computación cuántica, la compuerta H aplicada sobre $0\rangle$ produce un estado donde el cúbit puede colapsar en $0\rangle$ o $1\rangle$ con igual probabilidad al medir. Con base en esta comparación, ¿cuál diferencia fundamental entre compuertas clásicas y compuertas cuánticas se pone en evidencia? A. Las compuertas clásicas pueden producir superposición si se usan varias veces seguidas. B. Las compuertas cuánticas reemplazan por completo las compuertas clásicas en todas las aplicaciones actuales.

	C. Las compuertas clásicas solo trabajan con valores fijos, mientras las compuertas cuánticas pueden generar superposición, permitiendo múltiples posibilidades antes de la medición. D. Las compuertas cuánticas funcionan de manera completamente aleatoria y no pueden controlar sus resultados.
MEDIO	2. En computación cuántica, responde a dos aspectos: (i) ¿Qué compuerta invierte el estado del cúbit, equivalente a NOT en computación clásica? (ii) Para generar entrelazamiento en un sistema de dos cúbits, ¿cuál es la secuencia mínima correcta de compuertas? A. Pauli-X (X) es equivalente a NOT; para entrelazar se aplica CNOT primero y luego Hadamard en cualquier cúbit. B. Pauli-Z (Z) es equivalente a NOT; para entrelazar se aplican dos CNOT consecutivos. C. Pauli-X (X) es equivalente a NOT; para entrelazar se aplica Hadamard al cúbit de control y luego CNOT entre ambos cúbits. D. Hadamard es equivalente a NOT; para entrelazar basta aplicar solo CNOT.
ALTO	3. En un sistema de dos cúbits se desea generar un estado entrelazado. Para lograrlo se aplica una compuerta H al primer cúbit y luego una compuerta CNOT entre ambos cúbits. ¿Cuál es el papel de la compuerta H en este proceso? A. La compuerta H asegura que ambos cúbits tengan el mismo valor. B. La compuerta H solo sirve para medir el cúbit. C. La compuerta H prepara al primer cúbit en superposición, lo que permite que la compuerta CNOT genere entrelazamiento. D. La compuerta H es la que genera directamente el entrelazamiento entre los dos cúbits.

La Tabla 3 muestra las preguntas correspondientes a la Competencia 2, orientadas a evaluar la interpretación probabilística de los estados cuánticos y la comprensión de los procesos de medición en sistemas de uno y dos cúbits.

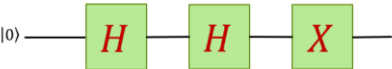
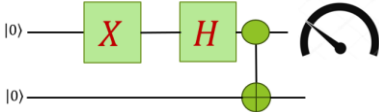
Tabla 3. Preguntas asociadas a la Competencia 2 y niveles de dificultad.

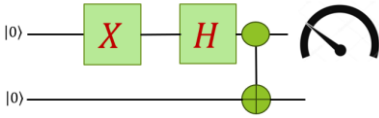
NIVEL	COMPETENCIA 2
BAJO	4. Un cúbit se encuentra en el siguiente estado expresado como vector columna: $ \psi\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$ donde α y β que cumplen: $ \alpha ^2 + \beta ^2 = 1.$ Si se realiza una medición en la base computacional $\{ 0\rangle, 1\rangle\}$, ¿cuál afirmación describe correctamente el resultado? A. La medición nunca depende de α ni β, porque el estado colapsa de manera aleatoria. B. La probabilidad de obtener $0\rangle$ es $\alpha ^2$ y la probabilidad de obtener $1\rangle$ es $\beta ^2$. C. El resultado de la medición será siempre $0\rangle$, ya que α está en la primera posición del vector. D. La probabilidad de obtener $0\rangle$ es $\beta ^2$ y la probabilidad de obtener $1\rangle$ es $\alpha ^2$.
MEDIO	5. Un cúbit se encuentra en el siguiente estado: $\psi = \frac{\sqrt{3}}{2} 0\rangle + \frac{1}{2} 1\rangle$ Luego pasa por la compuerta X, Cuál de las siguientes opciones es la correcta: A. Hay 0% de probabilidad de obtener $1\rangle$. B. Hay aproximadamente 75% de probabilidad de obtener $1\rangle$.

	C. Hay aproximadamente 50% de probabilidad de obtener $1\rangle$. D. Hay aproximadamente 25% de probabilidad de obtener $1\rangle$.
ALTO	6. Dos cúbits están en el siguiente estado: $\psi = \frac{1}{2} 00\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2} 11\rangle$ Se realiza una medición únicamente sobre el primer cúbit. A. El primer cúbit colapsará a $1\rangle$ con 75% de probabilidad y a $0\rangle$ con 25%, y aunque la medición ocurre, el segundo cúbit no se ve afectado porque sus valores son independientes. B. El primer cúbit colapsará a $0\rangle$ o $1\rangle$ con probabilidades distintas, pero el segundo cúbit conservará siempre su probabilidad original, por lo que el estado no cambia después de medir. C. El primer cúbit colapsará a $0\rangle$ con 25% de probabilidad, y si esto ocurre el estado completo colapsa a $00\rangle$; o colapsará a $1\rangle$ con 75% de probabilidad, y si esto ocurre el estado completo colapsa a $11\rangle$.

La Tabla 4 reúne las preguntas asociadas a la Competencia 3, diseñadas para evaluar la capacidad de los estudiantes para seguir la evolución de estados cuánticos mediante circuitos cuánticos y analizar los efectos de las compuertas y las mediciones sobre los cúbits.

Tabla 4. Preguntas asociadas a la Competencia 3 y niveles de dificultad.

NIVEL	COMPETENCIA 3
BAJO	5. Observa el siguiente circuito cuántico:  Seleccione la opción que describe correctamente la evolución del estado en cada paso y el estado final. A. $0\rangle \xrightarrow{H} 1\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{X} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle$ B. $0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{H} 0\rangle \xrightarrow{X} 1\rangle$ C. $0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{H} 0\rangle \xrightarrow{X} 1\rangle$ D. $0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{H} 1\rangle \xrightarrow{X} 0\rangle$
MEDIO	6. Observa el siguiente circuito cuántico:  Elige la opción que describe correctamente la evolución del estado en cada compuerta y el estado final. A. $1\rangle \xrightarrow{X} 0\rangle \xrightarrow{Z} 1\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{X} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle$ B. $1\rangle \xrightarrow{X} 0\rangle \xrightarrow{Z} - 0\rangle \xrightarrow{H} -\frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{X} - 1\rangle$ C. $1\rangle \xrightarrow{X} 0\rangle \xrightarrow{Z} 0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{X} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle$ D. $1\rangle \xrightarrow{X} 0\rangle \xrightarrow{Z} 0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{X} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle$
	Observa el siguiente circuito cuántico: 

ALTO	9. Selecciona la opción que describe correctamente la evolución del estado en cada paso y el estado antes de medir. A. $0\rangle 0\rangle \xrightarrow{X} 1\rangle 0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle 1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle 1\rangle \xrightarrow{\text{CNOT}} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle 1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle 0\rangle$ B. $0\rangle 0\rangle \xrightarrow{X} 1\rangle 0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle 0\rangle \xrightarrow{\text{CNOT}} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle 1\rangle$ C. $0\rangle 0\rangle \xrightarrow{X} 1\rangle 1\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle 1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle 1\rangle \xrightarrow{\text{CNOT}} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle 1\rangle$ D. $0\rangle 0\rangle \xrightarrow{X} 1\rangle 0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle 0\rangle \xrightarrow{\text{CNOT}} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle 1\rangle$
SUPERIOR	Observa el siguiente circuito cuántico:  10. Después de ejecutar el circuito, se mide el cúbit 1. ¿Qué sucede con el cúbit 2? A. El cúbit 2 queda en superposición, incluso después de medir el cúbit 1. B. El cúbit 2 queda en un estado sin relación con el cúbit 1. C. El cúbit 2 queda con el resultado contrario al cúbit 1. D. El cúbit 2 queda con el mismo resultado que el cúbit 1.

Las preguntas correspondientes a las demás competencias fueron organizadas bajo la misma estructura metodológica, permitiendo evaluar progresivamente la comprensión conceptual y procedimental de los estudiantes frente a contenidos asociados a computación cuántica.

6.6.5 Fase 5: Análisis de resultados

En esta fase se realizó la organización, clasificación e interpretación de los resultados obtenidos en ambos exámenes.

Para el Parcial 1 se desarrolló un análisis global basado en las calificaciones finales obtenidas por los estudiantes, clasificando el desempeño en niveles bajo, medio, alto y superior.

Por su parte, en el Parcial 2 se realizó un análisis por competencias, niveles de desempeño y porcentaje de respuestas correctas por pregunta.

Posteriormente, los resultados fueron interpretados considerando:

- ✓ El grado de complejidad conceptual de las competencias evaluadas;
- ✓ Los niveles de dificultad de las preguntas;
- ✓ El comportamiento de los estudiantes frente al uso del simulador interactivo;
- ✓ La comprensión conceptual alcanzada en contenidos asociados a física y computación cuántica.

6.7 Clasificación de niveles de desempeño

Para el análisis de resultados del Parcial 2, el cual se realizaron diez preguntas, los estudiantes fueron clasificados en diferentes niveles de desempeño de acuerdo con el número de respuestas correctas obtenidas en cada competencia.

Para las competencias 1 y 2 se establecieron tres niveles como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Niveles para las competencias 1 y 2.

RESPUESTAS CORRECTAS	NIVEL
0 – 1	Bajo
2	Medio
3	Alto

Debido a que la Competencia 3 estuvo conformada por cuatro preguntas, se incorporó un nivel adicional denominado superior, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Niveles para las competencias 3.

RESPUESTAS CORRECTAS	NIVEL
0 – 1	Bajo
2	Medio
3	Alto
4	Superior

Esta clasificación permitió caracterizar progresivamente el nivel de dominio alcanzado por los estudiantes frente a las competencias evaluadas.

6.8 Análisis de la información

La información obtenida fue organizada mediante tablas de frecuencias y porcentajes, permitiendo analizar el comportamiento general del desempeño académico de los estudiantes.

Para el Parcial 1 se realizó un análisis global basado en las calificaciones finales obtenidas por los estudiantes.

Por su parte, en el Parcial 2 se desarrolló un análisis por competencias, niveles de desempeño y porcentaje de respuestas correctas por pregunta.

Posteriormente, los resultados fueron interpretados considerando el grado de complejidad conceptual de las competencias evaluadas y el papel del simulador interactivo como herramienta de apoyo en la comprensión de contenidos asociados a computación cuántica.

7. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la implementación de la estrategia pedagógica orientada a la enseñanza de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de grado undécimo. Los hallazgos fueron organizados y analizados a partir de los resultados obtenidos en dos evaluaciones aplicadas durante el desarrollo de la investigación.

El Parcial 1 estuvo enfocado en fundamentos introductorios de física cuántica, mientras que el Parcial 2 fue estructurado bajo un enfoque de evaluación por competencias orientado a contenidos de computación cuántica trabajados mediante el uso del simulador interactivo.

Los resultados obtenidos se presentan mediante tablas, porcentajes y análisis descriptivos que permiten interpretar el comportamiento académico de los estudiantes frente a los contenidos desarrollados.

7.1 Resultados del Parcial 1: Fundamentos de física cuántica

El primer examen estuvo conformado por 20 preguntas de selección múltiple con única respuesta relacionadas con contenidos introductorios de física cuántica, entre ellos cuantización de la energía, efecto fotoeléctrico, dualidad onda-partícula, modelos atómicos, incertidumbre y superposición cuántica.

Participaron un total de 102 estudiantes pertenecientes a los cursos 11A, 11B y 11C. Las calificaciones fueron evaluadas en una escala de 0 a 10 y posteriormente clasificadas en cuatro niveles de desempeño: bajo, medio, alto y superior.

Tabla 7. Clasificación de niveles de desempeño para el Parcial 1.

NIVEL DE DESEMPEÑO	RANGO DE CALIFICACIÓN	CANTIDAD DE ESTUDIANTES	PORCENTAJE
Bajo	0.0 – 5.5	12	11.76 %
Medio	6.0 – 7.0	33	32.35 %
Alto	7.5 – 8.5	25	24.51 %
Superior	9.0 – 10	32	31.37 %

Los resultados mostrados en la Tabla 7 evidencian que el 55.88 % de los estudiantes alcanzó niveles de desempeño alto y superior. Particularmente, el nivel superior representó el porcentaje más alto de desempeño individual, con un 31.37 % de estudiantes ubicados entre las calificaciones más altas del examen.

Por otra parte, el 32.35 % de los estudiantes se clasificó en nivel medio, evidenciando una comprensión parcial pero funcional de los contenidos desarrollados. Finalmente, únicamente

el 11.76 % se ubicó en nivel bajo, correspondiente a estudiantes que presentaron mayores dificultades frente a conceptos abstractos asociados a física cuántica.

Asimismo, los resultados del Parcial 1 fueron analizados mediante estadísticos descriptivos con el propósito de obtener una visión general del desempeño del grupo. Como se observa en la Tabla 8, los indicadores obtenidos permiten identificar un comportamiento académico global favorable y una variabilidad moderada entre las calificaciones de los estudiantes.

Tabla 8. Estadísticos generales del Parcial 1.

ESTADÍSTICO	VALOR
Número total de estudiantes	102
Promedio general	7.59
Desviación estándar	1.77

Los resultados obtenidos sugieren que la estrategia pedagógica permitió generar una apropiación conceptual inicial significativa sobre contenidos introductorios de física moderna tradicionalmente considerados abstractos dentro de la educación media.

7.2 Resultados del Parcial 2: Competencias en computación cuántica

El segundo examen fue estructurado bajo un enfoque de evaluación por competencias y estuvo orientado a analizar la comprensión conceptual y procedimental de contenidos asociados a computación cuántica trabajados mediante el uso del simulador interactivo desarrollado durante la investigación.

Las competencias evaluadas fueron:

1. Diferenciación entre computación clásica y cuántica y función de compuertas fundamentales.
2. Interpretación probabilística y medición cuántica.
3. Seguimiento de circuitos cuánticos paso a paso.

Las preguntas fueron organizadas mediante niveles de dificultad progresiva (bajo, medio, alto y superior), permitiendo analizar diferentes niveles de complejidad cognitiva en relación con las competencias evaluadas.

La Tabla 9 presenta los principales estadísticos descriptivos del Parcial 2. El promedio grupal obtenido fue de 5.71 sobre 10, con una desviación estándar de 1.77, lo que evidencia un desempeño general intermedio y una dispersión moderada de las calificaciones dentro del grupo evaluado.

Tabla 9. Estadísticos generales del Parcial 2.

ESTADÍSTICO	VALOR
Número total de estudiantes	102
Promedio general	5.71
Desviación estándar	1.77

A diferencia del Parcial 1, los resultados del segundo examen reflejan un mayor nivel de complejidad conceptual y procedimental, especialmente en contenidos asociados a medición cuántica, evolución de estados y seguimiento de circuitos cuánticos.

7.2.1 Competencia 1: Diferenciación entre computación clásica y cuántica y función de compuertas fundamentales

La primera competencia estuvo orientada a evaluar la capacidad de los estudiantes para diferenciar principios fundamentales entre computación clásica y computación cuántica, así como reconocer el funcionamiento básico de compuertas cuánticas fundamentales como Hadamard, Pauli-X y CNOT.

Los resultados presentados en la Tabla 10 evidencian un desempeño favorable en esta competencia, donde más de la mitad de los estudiantes alcanzó nivel alto y únicamente el 5.88 % presentó desempeño bajo. Esto sugiere que los estudiantes lograron comprender adecuadamente las diferencias fundamentales entre computación clásica y computación cuántica, así como el funcionamiento básico de las compuertas trabajadas durante las actividades desarrolladas con el simulador interactivo.

Tabla 10. Resultados de desempeño para la Competencia 1.

NIVEL DE DESEMPEÑO	NO. ESTUDIANTES	PORCENTAJE
Alto	58	56.86 %
Medio	38	37.25 %
Bajo	6	5.88 %

De igual manera, el análisis por pregunta mostró porcentajes elevados de respuestas correctas en los niveles de dificultad bajo y medio.

Los resultados de la Tabla 11 muestran que las preguntas introductorias relacionadas con diferencias entre computación clásica y computación cuántica presentaron porcentajes de respuesta correcta superiores al 90 %. Sin embargo, en la pregunta de nivel alto se observó una disminución significativa, evidenciando mayores dificultades cuando los estudiantes

debían integrar simultáneamente conceptos asociados a superposición y generación de entrelazamiento.

Tabla 11. Porcentaje de respuestas correctas por pregunta – Competencia 1.

NIVEL DE DIFICULTAD	PREGUNTA	PORCENTAJE DE RESPUESTAS CORRECTAS
Bajo	Pregunta 1	96.08 %
Medio	Pregunta 2	93.14 %
Alto	Pregunta 3	61.76 %

7.2.2 Competencia 2: Interpretación probabilística y medición cuántica

La segunda competencia estuvo orientada a evaluar la comprensión de amplitudes probabilísticas, medición cuántica, colapso de estados y correlación entre cúbits.

Como se observa en la Tabla 12, esta competencia presentó mayores dificultades conceptuales para los estudiantes. El 46.1 % se ubicó en nivel bajo y únicamente el 15.7 % alcanzó nivel alto. Estos resultados sugieren que la interpretación probabilística y los procesos de medición cuántica representan uno de los componentes de mayor complejidad cognitiva dentro de la enseñanza introductoria de computación cuántica.

Tabla 12. Resultados de desempeño para la Competencia 2.

NIVEL DE DESEMPEÑO	NO. ESTUDIANTES	PORCENTAJE
Alto	16	15.7 %
Medio	39	38.2 %
Bajo	47	46.1 %

Los resultados de la Tabla 13 muestran una disminución considerable en el porcentaje de respuestas correctas conforme aumentó el nivel de complejidad de las preguntas. Particularmente, las preguntas relacionadas con amplitudes probabilísticas y colapso de estados presentaron mayores niveles de dificultad para los estudiantes.

Tabla 13. Porcentaje de respuestas correctas por pregunta – Competencia 2.

NIVEL DE DIFICULTAD	PREGUNTA	PORCENTAJE DE RESPUESTAS CORRECTAS
Bajo	Pregunta 4	79.41 %
Medio	Pregunta 5	41.18 %
Alto	Pregunta 6	39.22 %

7.2.3 Competencia 3: Seguimiento de circuitos cuánticos paso a paso

La tercera competencia estuvo orientada a evaluar la capacidad de los estudiantes para realizar seguimiento secuencial de circuitos cuánticos, interpretar evolución de estados y analizar el estado final previo a la medición.

Los resultados mostrados en la Tabla 14 evidencian que esta competencia representó el mayor nivel de complejidad dentro de la evaluación. El 45.1 % de los estudiantes se ubicó en nivel bajo y únicamente el 2.9 % alcanzó el nivel superior.

Tabla 14. Resultados de desempeño para la Competencia 3.

NIVEL DE DESEMPEÑO	No. ESTUDIANTES	PORCENTAJE
Superior	3	2.9 %
Alto	17	16.7 %
Medio	36	35.3 %
Bajo	46	45.1 %

Este comportamiento sugiere que el seguimiento secuencial de circuitos cuánticos y la interpretación simultánea de múltiples transformaciones cuánticas constituyen procesos cognitivos considerablemente más complejos para estudiantes de educación media.

Los resultados de la Tabla 15 muestran una disminución progresiva en el porcentaje de respuestas correctas conforme aumentó el nivel de complejidad cognitiva de las preguntas. Particularmente, las preguntas de nivel alto y superior presentaron los porcentajes más bajos de desempeño, evidenciando dificultades relacionadas con seguimiento matricial, interpretación de evolución de estados y análisis de sistemas entrelazados.

Tabla 15. Porcentaje de respuestas correctas por pregunta – Competencia 3.

NIVEL DE DIFICULTAD	PREGUNTA	PORCENTAJE DE RESPUESTAS CORRECTAS
Bajo	Pregunta 7	51.96 %
Medio	Pregunta 8	47.06 %
Alto	Pregunta 9	33.33 %
Superior	Pregunta 10	27.45 %

No obstante, los resultados también evidencian que un grupo importante de estudiantes logró desarrollar procesos iniciales de razonamiento asociados a circuitos cuánticos introductorios, especialmente en actividades relacionadas con evolución básica de estados y aplicación secuencial de compuertas fundamentales.

8. DISCUSIÓN

La presente investigación tuvo como propósito analizar la comprensión conceptual de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de grado undécimo mediante la implementación de una estrategia pedagógica apoyada en simulaciones interactivas. Los resultados obtenidos permiten evidenciar que los estudiantes lograron desarrollar niveles iniciales de apropiación conceptual frente a contenidos tradicionalmente considerados abstractos dentro de la enseñanza de la física moderna y la computación cuántica.

En relación con el Parcial 1, los resultados mostraron un desempeño global favorable, donde más del 55 % de los estudiantes alcanzó niveles alto y superior. Asimismo, el promedio general obtenido fue de 7.59 sobre 10, lo cual sugiere una comprensión significativa de contenidos asociados a fundamentos introductorios de física cuántica, tales como dualidad onda-partícula, cuantización de la energía, efecto fotoeléctrico y superposición cuántica.

Estos resultados sugieren que el uso de representaciones visuales, ejemplos contextualizados y explicaciones progresivas favoreció la comprensión de fenómenos cuánticos introductorios en estudiantes de educación media. De igual manera, evidencian que conceptos de física moderna pueden ser abordados exitosamente en este nivel educativo cuando se implementan estrategias pedagógicas adecuadas y recursos didácticos orientados a reducir el nivel de abstracción conceptual.

Por otra parte, los resultados obtenidos en el Parcial 2 evidenciaron un aumento considerable en el nivel de complejidad cognitiva asociado a los contenidos de computación cuántica. El promedio general descendió a 5.71 sobre 10, reflejando mayores dificultades frente a procesos relacionados con interpretación probabilística, medición cuántica y seguimiento secuencial de circuitos cuánticos.

No obstante, los resultados también mostraron comportamientos diferenciados entre las competencias evaluadas. La Competencia 1, relacionada con diferenciación entre computación clásica y computación cuántica y función de compuertas fundamentales, presentó los resultados más favorables, con un 56.86 % de estudiantes ubicados en nivel alto y únicamente un 5.88 % en nivel bajo.

Este comportamiento puede estar asociado a que las actividades desarrolladas mediante el simulador interactivo permitieron visualizar de manera concreta diferencias fundamentales entre ambos paradigmas computacionales. La representación dinámica de compuertas Hadamard, Pauli-X y CNOT facilitó que los estudiantes relacionaran las operaciones cuánticas con cambios observables en los estados del sistema, favoreciendo procesos iniciales de comprensión conceptual.

Asimismo, los altos porcentajes de respuestas correctas obtenidos en las preguntas de nivel bajo y medio de esta competencia evidencian que los estudiantes lograron comprender adecuadamente conceptos introductorios relacionados con superposición y función básica de compuertas cuánticas. Sin embargo, la disminución observada en la pregunta de nivel alto muestra que la integración simultánea de múltiples conceptos asociados a entrelazamiento y secuencia de operaciones continúa representando una dificultad importante.

En contraste, la Competencia 2 presentó mayores dificultades conceptuales. Cerca de la mitad de los estudiantes se ubicó en nivel bajo y únicamente el 15.7 % alcanzó nivel alto. Estos resultados sugieren que la interpretación probabilística y los procesos de medición cuántica constituyen uno de los componentes más complejos dentro de la enseñanza introductoria de computación cuántica.

Las dificultades observadas en esta competencia probablemente se relacionan con el carácter abstracto de conceptos como amplitudes probabilísticas, colapso del estado y correlación entre cúbits. A diferencia de la computación clásica, donde los estados presentan valores deterministas, en computación cuántica los estudiantes deben interpretar simultáneamente representaciones matemáticas, probabilidades y procesos de medición no deterministas, lo cual exige un mayor nivel de razonamiento conceptual y matemático.

La Competencia 3 presentó el mayor nivel de dificultad dentro de la evaluación. Los resultados mostraron que únicamente el 2.9 % de los estudiantes alcanzó el nivel superior, mientras que el 45.1 % se ubicó en nivel bajo. De igual manera, los porcentajes de respuestas correctas disminuyeron progresivamente conforme aumentó el nivel de complejidad de las preguntas.

Este comportamiento evidencia que el seguimiento secuencial de circuitos cuánticos y la interpretación de la evolución de estados representan procesos cognitivos considerablemente más complejos para estudiantes de educación media. Resolver este tipo de ejercicios requiere no solo reconocer el funcionamiento individual de las compuertas, sino también interpretar transformaciones sucesivas, cambios de fase y evolución matricial del sistema cuántico.

No obstante, a pesar de las dificultades observadas, los resultados también evidencian que un grupo importante de estudiantes logró desarrollar procesos iniciales de razonamiento asociados a circuitos cuánticos básicos. Particularmente, las actividades realizadas con el simulador interactivo permitieron visualizar la evolución paso a paso de los estados cuánticos, facilitando la relación entre representación matemática, representación gráfica y comportamiento probabilístico del sistema.

En este sentido, el simulador interactivo constituyó una herramienta de apoyo pedagógico relevante dentro de la investigación. La posibilidad de ejecutar circuitos secuencialmente, observar la representación analítica de los estados y visualizar simultáneamente la esfera de Bloch permitió reducir parcialmente el nivel de abstracción asociado a los contenidos trabajados.

Asimismo, la integración entre simulación interactiva, guía didáctica y resolución manual de ejercicios favoreció procesos de análisis conceptual y razonamiento lógico frente a contenidos introductorios de computación cuántica. Esta combinación permitió que los estudiantes no se limitaran únicamente a la observación visual del simulador, sino que también relacionaran los resultados obtenidos con representaciones matriciales y procesos matemáticos básicos.

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la enseñanza introductoria de física y computación cuántica en educación media es posible cuando se implementan estrategias pedagógicas progresivas apoyadas en recursos visuales e interactivos. Sin embargo, también se identificó que conceptos asociados a medición cuántica, amplitudes probabilísticas y seguimiento de circuitos presentan mayores niveles de complejidad cognitiva, requiriendo posiblemente procesos de enseñanza más prolongados y actividades matemáticas de mayor profundidad.

Finalmente, la investigación permite evidenciar el potencial pedagógico de las simulaciones interactivas como herramientas de apoyo para la enseñanza de contenidos emergentes relacionados con tecnologías cuánticas. De igual manera, los resultados sugieren la necesidad de continuar desarrollando estrategias educativas orientadas a fortalecer procesos de alfabetización científica y tecnológica en áreas asociadas a la segunda revolución cuántica desde los niveles de educación media.

9. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió evidenciar que la enseñanza introductoria de fundamentos de física y computación cuántica en estudiantes de educación media es posible cuando se utilizan estrategias pedagógicas apoyadas en recursos visuales e interactivos. A lo largo del desarrollo de las actividades, los estudiantes lograron aproximarse a conceptos que normalmente son considerados complejos o abstractos dentro de la enseñanza tradicional de la física moderna.

Los resultados obtenidos en el Parcial 1 mostraron un desempeño general favorable en temas relacionados con fundamentos de física cuántica. La mayoría de los estudiantes alcanzó niveles de desempeño alto y superior, evidenciando comprensión de conceptos como cuantización de la energía, efecto fotoeléctrico, dualidad onda-partícula y superposición cuántica. Esto permitió identificar que, mediante ejemplos visuales y explicaciones progresivas, es posible acercar estos contenidos a estudiantes de educación media de una manera más comprensible.

Por otra parte, los resultados del Parcial 2 evidenciaron que los contenidos asociados a computación cuántica presentan un mayor nivel de dificultad conceptual y procedimental. Aunque muchos estudiantes lograron comprender diferencias entre computación clásica y computación cuántica, así como el funcionamiento básico de compuertas fundamentales, se identificaron mayores dificultades en temas relacionados con medición cuántica, amplitudes probabilísticas y seguimiento secuencial de circuitos cuánticos.

Uno de los aspectos más importantes observados durante la implementación de la estrategia pedagógica fue el papel del simulador interactivo como herramienta de apoyo para la comprensión de los contenidos trabajados. Durante las actividades desarrolladas en clase, se observó que la posibilidad de visualizar la evolución de los estados cuánticos, ejecutar circuitos paso a paso y relacionar representaciones matemáticas con representaciones gráficas permitió que varios estudiantes comprendieran con mayor facilidad conceptos que inicialmente resultaban difíciles de interpretar únicamente desde la teoría.

Asimismo, la integración entre simulador, guía didáctica y resolución manual de ejercicios permitió complementar el aprendizaje conceptual mediante actividades de análisis y razonamiento lógico. En varios casos, los estudiantes lograron relacionar las simulaciones obtenidas con procedimientos matemáticos básicos asociados a evolución de estados y aplicación de compuertas cuánticas.

Sin embargo, los resultados también permitieron identificar que algunos contenidos asociados a computación cuántica requieren procesos de enseñanza más prolongados y un mayor fortalecimiento matemático. Particularmente, el seguimiento de circuitos cuánticos complejos y la interpretación probabilística de los estados representaron las mayores dificultades dentro de la investigación.

En términos generales, la investigación permitió evidenciar el potencial pedagógico que tienen las simulaciones interactivas para la enseñanza de tecnologías cuánticas en educación media. Además, permitió mostrar que este tipo de contenidos puede generar interés y

participación en los estudiantes cuando se trabaja mediante herramientas dinámicas y metodologías diferentes a las tradicionalmente utilizadas en el aula.

Finalmente, esta investigación representa una aproximación inicial al desarrollo de estrategias pedagógicas orientadas a la enseñanza de computación cuántica en educación media, en un contexto donde las tecnologías cuánticas adquieren cada vez mayor relevancia dentro del desarrollo científico y tecnológico actual.

10. RECOMENDACIONES.

A partir de los resultados obtenidos durante esta investigación, se recomienda continuar desarrollando estrategias pedagógicas que permitan acercar contenidos de física y computación cuántica a estudiantes de educación media mediante recursos visuales e interactivos.

Durante el desarrollo de las actividades se evidenció que el uso del simulador facilitó la comprensión de varios conceptos trabajados en clase, especialmente aquellos relacionados con superposición y funcionamiento de compuertas cuánticas. Por esta razón, sería importante continuar fortaleciendo este tipo de herramientas e integrarlas progresivamente dentro de procesos de enseñanza relacionados con tecnologías emergentes.

También se recomienda ampliar el tiempo destinado al desarrollo de actividades relacionadas con computación cuántica, ya que algunos temas como medición cuántica, amplitudes probabilísticas y seguimiento de circuitos requieren más tiempo de práctica y acompañamiento para lograr una comprensión más sólida por parte de los estudiantes.

De igual manera, podría ser útil complementar las actividades con ejercicios matemáticos más progresivos, especialmente en los temas relacionados con representación matricial y evolución de estados cuánticos, debido a que estas fueron algunas de las principales dificultades identificadas durante la implementación de la estrategia pedagógica.

En relación con el simulador interactivo, futuras mejoras podrían incluir nuevas funcionalidades como incorporación de más compuertas cuánticas, desarrollo de circuitos de mayor complejidad y actividades evaluativas integradas dentro de la herramienta. Asimismo, sería interesante incluir explicaciones guiadas o modos de aprendizaje progresivo que permitan reforzar la interpretación conceptual de los circuitos trabajados.

Para futuras investigaciones, se recomienda realizar estudios comparativos entre grupos que utilicen simulaciones interactivas y grupos que trabajen mediante metodologías tradicionales, con el fin de analizar con mayor profundidad el impacto pedagógico de este tipo de herramientas en procesos de enseñanza de computación cuántica.

Finalmente, se considera importante continuar promoviendo espacios educativos relacionados con tecnologías cuánticas desde etapas tempranas de formación académica, ya que este tipo de contenidos no solo fortalecen competencias científicas y tecnológicas, sino que también permiten despertar interés por áreas emergentes de la ciencia y la ingeniería.

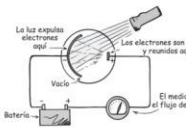
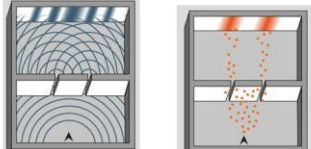
REFERENCIAS

- Cuéllar García, A. (2023). Formación de profesores para la enseñanza de la física cuántica en la secundaria: necesidad de la democratización del conocimiento científico. *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, 18 (Extra 2), 260-274. doi:<https://doi.org/10.14483/23464712.21372>
- Cuesta-Beltrán, Y. J. (2018). Estado del arte: Tendencias en la enseñanza de la física cuántica entre 1986 y 2016 . *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, 44, 147-166. doi:<https://doi.org/10.17227/ted.num44-8995>
- Devece, E. (2019). *Propuesta de un curso básico de introducción a la física cuántica en colegios de enseñanza media*[Tesis de Maestría, Universidad Nacional de La Plata]. doi:<https://doi.org/10.35537/10915/78535>
- González, S. B. (2015). *La enseñanza de conceptos básicos de física cuántica para un aprendizaje significativo del modelo atómico actual*. [Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires]. Obtenido de <https://www.ridaa.unicen.edu.ar/items/e3e157bb-0b22-42be-bb76-062c13e3f6a7>
- Haron, S. H. (2023). Teaching quantum physics at secondary schools: A systematic literature review. *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, 1976-1995.
- Intriago-Álava, C. I.-S. (2023). Alternativas didácticas en el aprendizaje de la física con simuladores virtuales para el Bachillerato General Unificado. *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada YACHASUN*, 7(13), 12–15. Obtenido de <https://editorialibkn.com/index.php/Yachasun/article/view/409>
- Martínez Torregrosa, J. S. (2016). La enseñanza problematizada de la física cuántica en el nivel introductorio: Una propuesta fundamentada. *REVISTA DE ENSEÑANZA DE LA FÍSICA*, 28(2), 77-100. doi:<https://doi.org/10.55767/2451.6007.V28.N2.15813>
- Méndez Andrade, J. V. (2025). Física cuántica en el aula: Desmitificando conceptos complejos. *South Florida Journal of Development*, 6(4), 1-15. doi:<https://doi.org/10.46932/sfjdv6n4-028>
- Mendoza-Hernández, L. E.-C. (2023). El uso de simuladores como estrategia de enseñanza-aprendizaje en el bachillerato. *UNO Sapiens Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 1*, 6(11), 12-15. doi:<https://doi.org/10.29057/prepa1.v6i11.10949>
- Michael A. Nielsen, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Moraga-Calderón, T. S. (2020). The relevance of learning quantum physics from the perspective of the secondary school student: A case study. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 8(1), 32-50. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.10840>
- Muñoz Burbano, Z. E. (2021). La Teoría Cuántica en la educación Secundaria Colombiana: diseño de una propuesta. *Bio-grafía*. Obtenido de <https://revistas.upn.edu.co/index.php/bio-grafia/article/view/14783>

- Nielsen, M. A. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, New York.
- Nikolaus, P. D. (2024). Investigating students' conceptual knowledge of quantum physics to improve the teaching and learning process. *Education Sciences*, 1113 . doi:<https://doi.org/10.3390/educsci14101113>
- Otero, M. R. (2009). Investigación y desarrollo de propuestas didácticas para la enseñanza de la física en la escuela secundaria: Nociones cuánticas. *Revista electrónica de investigación en educación en ciencias*, 4(1), 58-74. doi:<https://doi.org/10.54343/reiec.v4i1.33>
- Pauletich, M. F. (2025). *Secuencia didáctica para la incorporación de la mecánica cuántica en la enseñanza media*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de la Plata]. Obtenido de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/180513>
- Rozo Clavijo, M. (2025). Una propuesta de enseñanza-aprendizaje para la computación cuántica: Emulación de una compuerta cuántica tipo CNOT y TOFOLI por un circuito clásico. *Revista Ciencia en Desarrollo*, 16(1), 62-70. doi:<https://doi.org/10.19053/uptc.01217488.v16.n1.2025.18371>
- Salas, J. P. (2022). *Proyecto pedagógico para el aprendizaje de la computación cuántica a nivel de bachillerato*. [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/1992/58107>
- Savall Alemany, F. D. (2017). La enseñanza problematizada de la física cuántica en el bachillerato y en los cursos introductorios de física. *Modelling in Science Education and Learning*, 10(1), 199-220. doi:<https://doi.org/10.4995/msel.2017.6675>
- Sinarcas, V. &. (2013). Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física. *Enseñanza de las Ciencias*, 31(3), 9-25. doi:<https://doi.org/10.5565/rev/enscien/v31n3.768>
- Solbes, J. &. (2010). Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias. *Revista de enseñanza de la física*, 23(1-2), 57-84. doi:<https://doi.org/10.55767/2451.6007.v23.n1-2.7995>
- Torres Arango, G. A. (2018). *Diseño de una unidad de enseñanza potencialmente significativa para introducir la mecánica cuántica en la educación básica secundaria*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68621>
- Vega Vega, Á. (2018). *Las TIC en la actividad docente: aplicaciones web en mecánica cuántica para ESO y Bachillerato*. [Tesis de maestría, Universidad de Valladolid]. Obtenido de <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/31253>
- Weissman, E. Y. (2021). Teaching quantum physics as a structured physics theory in high school. *Journal of Physics: Conference Series*, 1929, 012051. doi:<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1929/1/012051>
- Weissman, E. Y. (2022). Phenomena and principles: Presenting quantum physics in a high school curriculum. *Physics*, 4(4), 1299-1317. doi:<https://doi.org/10.3390/physics4040083>

ANEXOS

ANEXO 1. Fragmentos representativos del material didáctico de física cuántica.

EFFECTO FOTOELÉCTRICO El efecto fotoeléctrico es la emisión de electrones por parte de un material, generalmente un metal, cuando incide sobre él una radiación electromagnética de suficiente frecuencia. Este fenómeno es clave para la física cuántica, ya que demostró que la luz puede comportarse como partículas (fotones), donde cada fotón transfiere su energía a un electrón para liberarlo.  El efecto fotoeléctrico fue primero observado y descrito por el físico alemán Heinrich Hertz en 1887 durante sus experimentos con ondas electromagnéticas. Sin embargo, fue Albert Einstein quien proporcionó la explicación teórica en 1905, proponiendo que la luz se compone de paquetes discretos de energía llamados fotones, lo que le valió el Premio Nobel.	EXPERIMENTO DE LA DOBLE RENDIJA El experimento de la doble rendija es una demostración de la dualidad onda-partícula de la materia, un concepto central de la mecánica cuántica. Demuestra que las partículas subatómicas, como los fotones y electrones, pueden comportarse como ondas o como partículas, dependiendo de si son observadas o no. 
FUNDAMENTOS DE LA MECANICA CUÁNTICA La física cuántica es la rama de la ciencia que estudia el comportamiento de la materia y la energía a escalas muy pequeñas, como átomos, electrones y fotones. A diferencia de la física clásica, el mundo cuántico no es determinista, sino probabilístico: solo podemos conocer la probabilidad de que ocurra un evento, no el resultado exacto. Cuantización de la energía: La energía no se intercambia de manera continua, sino en pequeños paquetes llamados cuantos. Esto explica fenómenos como la emisión de luz por los átomos y el efecto fotoeléctrico. $E_{\text{cuanto}} = h \cdot f \quad 6,62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$	FUNDAMENTOS DE LA MECANICA CUÁNTICA Dualidad Onda- Partícula: Louis de Broglie propuso que toda partícula también puede comportarse como una onda, con una longitud de onda asociada: $\lambda = \frac{h}{mv}$ Principio de incertidumbre (Heisenberg): No es posible conocer al mismo tiempo con precisión la posición y el momento de una partícula: $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2}$ Mientras más exactamente sepamos "dónde está", menos sabremos "cómo se mueve".
FUNDAMENTOS DE LA MECANICA CUÁNTICA Entrelazamiento cuántico: Dos partículas pueden quedar conectadas de tal forma que lo que le ocurra a una afecta instantáneamente a la otra, sin importar la distancia. Este fenómeno es clave para la computación cuántica y la teletransportación cuántica. 	FUNDAMENTOS DE LA MECANICA CUÁNTICA Superposición cuántica: Una partícula puede encontrarse en varios estados a la vez hasta que se mide. Ejemplo: un electrón puede estar en varias posiciones posibles en su órbita hasta que se observa.  Superposición cuántica de estado "vivo" y "muerto" Figura 1. En el experimento mental del gato de Schrödinger, un gato es encerrado en una caja junto a un tubo de radio que se libera por un evento aleatorio. Mientras la caja permanece cerrada, el gato se encuentra en una superposición de estados, tanto vivo como muerto, hasta que se realiza una observación. Fuente: tamaño de www.fisicadefundamental.com

ANEXO 2. Fragmentos representativos del material didáctico de computación clásica.

BIT

En computación, un bit es la **unidad más pequeña de información**. Un bit puede tener uno de dos valores posibles: 0 o 1. Estos dos valores representan los dos estados fundamentales en los que funciona una computadora, **similar a un interruptor que puede estar encendido (1) o apagado (0)**. Toda la información digital, como textos, imágenes, videos y sonidos, se almacena y procesa utilizando estas combinaciones de ceros y unos.

TRANSISTOR

Un transistor actúa como un interruptor o una válvula controlada por una pequeña señal eléctrica. La estructura básica de un transistor tiene tres terminales:

- ✓ Emisor: Libera los portadores de carga (electrones o huecos).
- ✓ Colector/Drenador: Recibe los portadores de carga.
- ✓ Base/Compuerta: Controla el flujo de corriente entre el emisor y el colector.

EJERCICIOS DE CIRCUITOS LOGICOS

PUERTA AND (A y B)

ENTRADA A	ENTRADA B	SALIDA C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

$C = A \cdot B$

PUERTA NAND (no A y B)

ENTRADA A	ENTRADA B	SALIDA C
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

$C = \overline{A \cdot B}$

PUERTA OR (A o B, si ambos)

ENTRADA A	ENTRADA B	SALIDA C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

$C = A + B$

PUERTA NOR (no A o B, ni ambos)

ENTRADA A	ENTRADA B	SALIDA C
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

$C = \overline{A + B}$

PUERTA NOT (no C)

ENTRADA A	SALIDA B
0	1
1	0

$C = \overline{A}$

PUERTA XOR (A o B, pero no ambos)

ENTRADA A	ENTRADA B	SALIDA C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

$C = A \oplus B$

REPRESENTACIÓN DE UN QUBIT

Un qubit se puede representar matemáticamente como una superposición lineal de dos estados base:

$$|\Psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

$$\alpha^2 + \beta^2 = 1$$

Qubits Estados Básicos

$|0\rangle$

$|1\rangle$

Qubit Estado en Superposición

$|\Psi\rangle = \frac{\sqrt{3}}{2} |0\rangle + \frac{1}{2} |1\rangle$

Representación Vectorial

$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$

$|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

CUBIT

Un Cubit, o bit cuántico, es la unidad básica de información en la computación cuántica, que puede ser un 0, un 1 o ambos a la vez gracias a la superposición cuántica. A diferencia de un bit clásico, que solo puede representar un estado a la vez, el qubit puede existir en una combinación de estados, lo que permite procesar información de forma mucho más rápida.

REPRESENTACIÓN DE UN QUBIT

Un qubit se puede representar matemáticamente como una superposición lineal de dos estados base:

$$|\Psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

$$\alpha^2 + \beta^2 = 1$$

Qubits Estados Básicos

$|0\rangle$

$|1\rangle$

Qubit Estado en Superposición

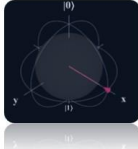
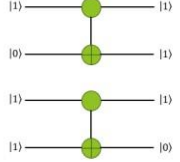
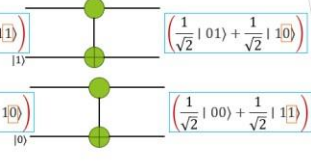
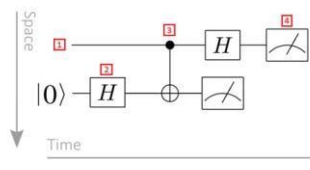
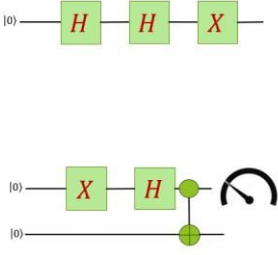
$|\Psi\rangle = \frac{\sqrt{3}}{2} |0\rangle + \frac{1}{2} |1\rangle$

Representación Vectorial

$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$

$|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

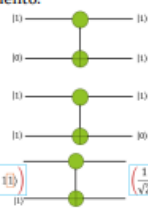
ANEXO 3. Material didáctico de Computación Cuántica.

PUERTAS LOGICAS CUANTICAS - UN CUBIT Compuerta de Hadamard (H): La puerta de Hadamard, denotada por (H), es una de las puertas cuánticas más fundamentales y se utiliza para crear superposiciones equiprobables en un cúbit. $H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ $H 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad H 1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$ $ 0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \quad 1\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle$ 	PUERTAS LOGICAS CUANTICAS - UN CUBIT $\frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle$ 
PUERTAS LOGICAS CUANTICAS - UN CUBIT Compuerta de Pauli-Z (Z): La puerta Z, o puerta Pauli-Z, es una operación fundamental en la computación cuántica que actúa sobre un solo cúbit para cambiar su fase, pero no su probabilidad. Es el equivalente cuántico de la negación (NOT) en la base de Hadamard. $Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ $Z\left(\frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle\right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$ $\frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{Z} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle$ 	PUERTAS LOGICAS CUANTICAS - UN CUBIT $\frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{Z} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle$ 
PUERTAS LOGICAS CUANTICAS - DOS CUBITS 	ENTRELAZAMIENTO CUANTICO $\left(\frac{1}{\sqrt{2}} 01\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 11\rangle\right) \xrightarrow{\text{CNOT}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} 01\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 10\rangle\right)$ $\left(\frac{1}{\sqrt{2}} 10\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 11\rangle\right) \xrightarrow{\text{CNOT}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} 10\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 01\rangle\right)$ 
MEDICIÓN Es una operación fundamentalmente no reversible que obliga al estado del cúbit a colapsar a un valor clásico (0 o 1) de manera probabilística. Este proceso aleatorio y colapsante no puede ser deshecho. 	CIRCUITOS LOGICOS- EJERCICIOS 

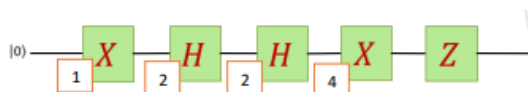
ANEXO 4. Guía didáctica para el desarrollo de actividades con el simulador interactivo.

	COLEGIO ADVENTISTA LIBERTAD "Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia". Proverbios 2:6 FORMATO DE EVALUACIÓN ESTUDIANTES				
	Apellidos			Fecha	/ /
	Nombres			Porcentaje	10%
	Tema	FUNDAMENTOS DE COMPUTACIÓN CUÁNTICA			
	Indicador			Cognitivo	
Asignatura	CIENCIAS NATURALES - FÍSICA	Grado	11_	Nota	

COMPUERTAS CUÁNTICAS PRINCIPALES

Nombre de la compuerta	Concepto	Justificación matemática (Matriz unitaria)
Pauli-X (NOT cuántica)	Invierte el estado: $\begin{array}{c} 0\rangle \xrightarrow{X} 1\rangle \\ 1\rangle \xrightarrow{X} 0\rangle \end{array}$	$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
Hadamard (H)	Crea superposición: $\begin{array}{c} 0\rangle \xrightarrow{H} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle\right) \\ 1\rangle \xrightarrow{H} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle\right) \end{array}$	$H = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$
Pauli-Z	Cambia el signo de la amplitud del estado $ 1\rangle$, invierte su fase. $\frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle \xrightarrow{Z} \frac{1}{\sqrt{2}} 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} 1\rangle$	$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
Control-NOT (CNOT)	Compuerta de 2 qubits: el segundo qubit (objetivo) se invierte solo si el primero (control) está en $ 1\rangle$. Es la base para el entrelazamiento. 	$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Ejemplo de solución de circuito:



ESTADO INICIAL	OPERACIÓN	VISUALIZACIÓN
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{X} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{H} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$

$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \xrightarrow{H} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{X} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{Z} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$

Resultado Final:

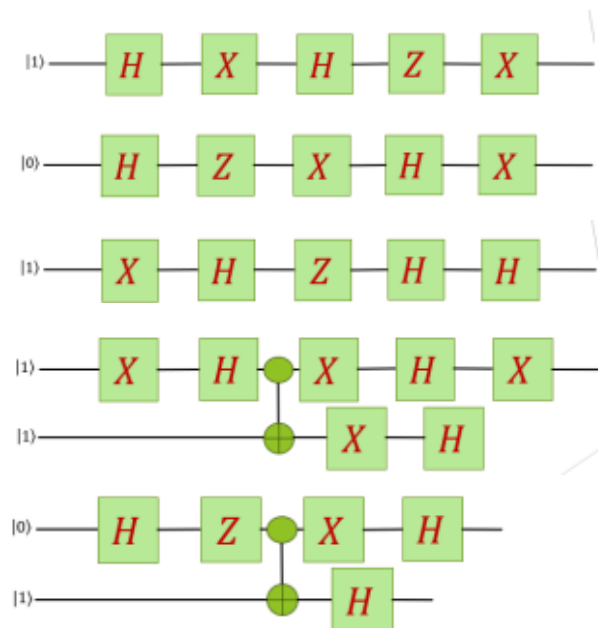
$$\psi = 1 | 0 \rangle + 0 | 1 \rangle$$

Interpretación final:

100% probable que se encuentre en el estado $| 0 \rangle$.

ACTIVIDAD

Calcula paso a paso el resultado teórico del circuito, mostrando el **estado final** $|\psi\rangle$ mediante operaciones matriciales. Explica su **significado físico** (superposición, inversión, entrelazamiento, etc.) y **verifica si coincide** con lo mostrado por el simulador.



ANEXO 5. EVALUACIÓN PARCIAL 1

1. Una empresa diseña paneles solares y busca materiales que respondan mejor a la luz ultravioleta que a la luz visible. Esto se debe a que los fotones de luz ultravioleta:
A. Tienen mayor frecuencia y por tanto más energía.
B. Tienen menor frecuencia y energía.
C. Son absorbidos igual que la luz visible.
D. No afectan a los electrones del material.
2. Si un láser emite luz de una sola frecuencia, pero al incidir sobre distintos metales solo algunos liberan electrones, se concluye que:
A. Solo los metales con menor densidad emiten electrones.
B. La energía de los fotones depende de su frecuencia, no de su intensidad.
C. Los electrones se liberan de forma aleatoria.
D. La intensidad del rayo láser determina la emisión de electrones.
3. En el experimento de la doble rendija, si se coloca un detector que indica por qué rendija pasa el electrón, el patrón de interferencia desaparece. Esto demuestra que:
A. La observación altera el estado cuántico del sistema.
B. Los electrones son demasiado grandes para interferir.
C. El detector cambia la velocidad de la luz.
D. La energía del electrón aumenta al ser medido.
4. Un científico afirma que la luz “elige” el camino más rápido entre dos puntos. ¿Qué interpretación moderna corrige esta idea según la mecánica cuántica?
A. La luz calcula el tiempo antes de moverse.
B. La luz no elige; explora todos los caminos posibles, pero solo se refuerzan los de menor acción.
C. La luz se curva porque es una onda estacionaria.
D. La luz se mueve solo en línea recta.
5. Una persona intenta medir con precisión la posición y la velocidad de un electrón al mismo tiempo. Según Heisenberg, el resultado será:
A. Cuanto más precisa sea una, menos precisa será la otra.
B. Ambas magnitudes se conocerán con exactitud.
C. La medición no afectará al sistema.
D. El electrón dejará de existir al medirlo.
6. Cuando un electrón en un átomo desciende a una órbita de menor energía, se emite un fotón. Esto evidencia que:
A. Los niveles de energía son discretos.
B. El núcleo cambia su carga.
C. La energía se transfiere de manera continua.
D. El electrón pierde masa.
7. Si una partícula puede estar en varios estados a la vez, pero al medirla adopta solo uno, se está evidenciando el principio de:
A. Dualidad onda-partícula.
B. Cuantización de la energía.
C. Entrelazamiento.
D. Superposición.
8. Dos fotones generados a partir del mismo proceso cuántico reaccionan instantáneamente uno con otro, aunque estén separados por kilómetros. Este fenómeno demuestra:
A. El entrelazamiento cuántico.
B. Que la luz puede superar la velocidad de la luz.
C. La refracción de la luz.
D. El principio de superposición.
9. Si un electrón puede comportarse como onda, ¿qué ocurre cuando su longitud de onda no encaja exactamente con la órbita del átomo?
A. La órbita se expande para ajustarse.
B. El electrón se destruye.
C. El electrón no puede mantenerse

estable y cambia de nivel.

D. El electrón se detiene.

- 10.** Se afirma que “lo que vemos como trayectorias definidas es una ilusión”. Esto significa que:
- A.** Las trayectorias dependen del observador.
 - B.** A nivel cuántico, todas las trayectorias posibles existen, pero se cancelan entre sí excepto las de menor acción.
 - C.** Los objetos realmente siguen un solo camino.
 - D.** El movimiento no existe realmente.
- 11.** La ecuación $\lambda = h/mv$ indica que:
- A.** Las partículas más masivas tienen menor longitud de onda.
 - B.** La longitud de onda aumenta con el momento.
 - C.** Las partículas con mayor velocidad tienen mayor longitud de onda.
 - D.** La masa no influye en el comportamiento ondulatorio.
- 12.** Un físico dice que la teoría clásica es un caso límite de la mecánica cuántica. ¿Qué justifica esta afirmación?
- A.** La teoría cuántica no aplica a los cuerpos grandes.
 - B.** Los átomos no siguen leyes cuánticas.
 - C.** En los objetos grandes, la acción es enorme comparada con h , y las trayectorias se vuelven casi únicas.
 - D.** En los objetos grandes, la acción es tan pequeña que los efectos cuánticos desaparecen.
- 13.** En un computador clásico, la información se almacena en bits (0 o 1). En cambio, en un computador cuántico, un cúbit puede estar en 0 y 1 al mismo tiempo gracias a:
- A.** La velocidad de la luz en el vacío.
 - B.** La carga eléctrica del electrón.
 - C.** La superposición cuántica de estados.
 - D.** El principio de incertidumbre de Heisenberg.
- 14.** La constante de Planck (h) es tan pequeña que:
- A.** Explica por qué los objetos grandes tienen comportamientos ondulatorios visibles.
 - B.** No afecta la energía de los sistemas

macroscópicos.

C. Provoca que las ondas de luz se detengan.

D. Impide que se midan trayectorias.

- 15.** ¿Qué relación conceptual existe entre el principio de mínima acción y la interferencia cuántica?
- A.** Ambos describen que solo los caminos de menor acción se refuerzan por interferencia constructiva.
 - B.** No existe relación entre ellos.
 - C.** Ambos suponen que la energía siempre se conserva.
 - D.** El primero se aplica a la luz, el segundo solo a la materia.
- 16.** Si en un laboratorio se aumenta la frecuencia de una fuente de luz pero se mantiene su intensidad, ¿qué cambio se observa en el efecto fotoeléctrico?
- A.** No se emite ningún electrón.
 - B.** Se emiten electrones con mayor energía cinética.
 - C.** Se emiten más electrones, pero con menor energía.
 - D.** Se reduce la frecuencia de emisión.
- 17.** Cuando la luz atraviesa una red de difracción y produce múltiples puntos luminosos, se evidencia:
- A.** Que la luz está compuesta por ondas que interfieren entre sí.
 - B.** Que los fotones viajan en líneas paralelas.
 - C.** Que la luz se comporta como partícula sólida.
 - D.** Que la energía luminosa se pierde al reflejarse.
- 18.** El trabajo de Planck, Einstein y Bohr transformó la física clásica porque:
- A.** Mostraron que la materia es continua.
 - B.** Negaron la existencia de la acción mínima.
 - C.** Sustituyeron las leyes de Newton por la relatividad.
 - D.** Demostraron que la energía y la luz son discretas y probabilísticas.
- 19.** En el modelo atómico de Bohr, el electrón no irradia energía mientras permanece en su órbita porque:
- A.** Se mueve a la velocidad de la luz.
 - B.** Solo puede existir en niveles energéticos cuantizados y estables.
 - C.** El electrón no tiene masa.

D. Su carga es compensada por el núcleo.

- 20.** En la búsqueda de una “teoría del todo”, los físicos intentan hallar:
- A.** Una ecuación que sustituya a la de Planck.
 - B.** Un modelo atómico universal.
 - C.** El lagrangiano que contenga todas las leyes de la naturaleza.
 - D.** Una fórmula para medir trayectorias invisibles.

	A	B	C	D
1				
2				
3				
4				

5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

ANEXO 6. EVALIACIÓN PARCIAL 2

1. (VALOR :1.0 PUNTOS) Durante una actividad, se compararon dos tipos de operaciones sobre información:
 - ✓ En la computación clásica, una compuerta NOT siempre convierte un bit 0 en 1 y 1 en 0, produciendo un único resultado determinista.

- ✓ En la computación cuántica, la compuerta H aplicada sobre $|0\rangle$ produce un estado donde el cúbit puede colapsar en $|0\rangle$ o $|1\rangle$ con igual probabilidad al medir.

Con base en esta comparación, ¿cuál diferencia fundamental entre compuertas clásicas y compuertas cuánticas se pone en evidencia?

- A. Las compuertas clásicas pueden producir superposición si se usan varias veces seguidas.
- B. Las compuertas cuánticas reemplazan por completo las compuertas clásicas en todas las aplicaciones actuales.
- C. Las compuertas clásicas solo trabajan con valores fijos, mientras las compuertas cuánticas pueden generar superposición, permitiendo múltiples posibilidades antes de la medición.
- D. Las compuertas cuánticas funcionan de manera completamente aleatoria y no pueden controlar sus resultados.

2. (VALOR :1.0 PUNTOS) En computación cuántica, responde a dos aspectos:

(i) ¿Qué compuerta invierte el estado del cúbit, equivalente a NOT en computación clásica?

(ii) Para generar entrelazamiento en un sistema de dos cúbits, ¿cuál es la secuencia mínima correcta de compuertas?

- A. Pauli-X (X) es equivalente a NOT; para entrelazar se aplica CNOT primero y luego Hadamard en cualquier cúbit.
- B. Pauli-Z (Z) es equivalente a NOT; para entrelazar se aplican dos CNOT consecutivos.
- C. Pauli-X (X) es equivalente a NOT; para entrelazar se aplica Hadamard al cúbit de control y luego CNOT entre ambos cúbits.
- D. Hadamard es equivalente a NOT; para entrelazar basta aplicar solo CNOT.

3. (VALOR :1.0 PUNTOS) En un sistema de dos cúbits se desea generar un estado entrelazado. Para lograrlo se aplica una compuerta H al primer cúbit y luego una compuerta CNOT entre ambos cúbits.

¿Cuál es el papel de la compuerta H en este proceso?

- A.. La compuerta H asegura que ambos cúbits tengan el mismo valor.
- B. La compuerta H solo sirve para medir el cúbit.
- C. La compuerta H prepara al primer cúbit en superposición, lo que permite que la compuerta CNOT genere entrelazamiento.
- D. La compuerta H es la que genera directamente el entrelazamiento entre los dos cúbits

4. (VALOR :1.0 PUNTOS) Un cúbit se encuentra en el siguiente estado expresado como vector columna:

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

donde α y β que cumplen:

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

Si se realiza una medición en la base computacional $\{|0\rangle, |1\rangle\}$, ¿cuál afirmación describe correctamente el resultado?

- A. La medición nunca depende de α ni β , porque el estado colapsa de manera aleatoria.
- B. La probabilidad de obtener $|0\rangle$ es $|\alpha|^2$ y la probabilidad de obtener $|1\rangle$ es $|\beta|^2$.
- C. El resultado de la medición será siempre $|0\rangle$, ya que α está en la primera posición del vector.
- D. La probabilidad de obtener $|0\rangle$ es $|\beta|^2$ y la probabilidad de obtener $|1\rangle$ es $|\alpha|^2$.

5. (VALOR :1.0 PUNTOS) Un cúbit se encuentra en el siguiente estado:

$$\psi = \frac{\sqrt{3}}{2} |0\rangle + \frac{1}{2} |1\rangle$$

Luego pasa por la compuerta X,

Cuál de las siguientes opciones es la correcta:

- A. Hay 0% de probabilidad de obtener $|1\rangle$.
- B. Hay aproximadamente 75% de probabilidad de obtener $|1\rangle$.
- C. Hay aproximadamente 50% de probabilidad de obtener $|1\rangle$.
- D. Hay aproximadamente 25% de probabilidad de obtener $|1\rangle$.

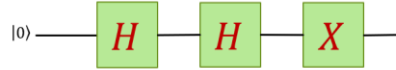
6. (VALOR :1.0 PUNTOS) Dos cúbits están en el siguiente estado:

$$\psi = \frac{1}{2} |00\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2} |11\rangle$$

Se realiza una medición únicamente sobre el primer cúbit.

- A. El primer cúbit colapsará a $|1\rangle$ con 75% de probabilidad y a $|0\rangle$ con 25%, y aunque la medición ocurre, el segundo cúbit no se ve afectado porque sus valores son independientes.
- B. El primer cúbit colapsará a $|0\rangle$ o $|1\rangle$ con probabilidades distintas, pero el segundo cúbit conservará siempre su probabilidad original, por lo que el estado no cambia después de medir.
- C. El primer cúbit colapsará a $|0\rangle$ con 25% de probabilidad, y si esto ocurre el estado completo colapsa a $|00\rangle$; o colapsará a $|1\rangle$ con 75% de probabilidad, y si esto ocurre el estado completo colapsa a $|11\rangle$.
- D. El primer cúbit tiene aproximadamente 50% de probabilidad de colapsar en $|0\rangle$ o $|1\rangle$, y si se mide, el segundo cúbit no cambia porque cada cúbit mantiene su propio estado.

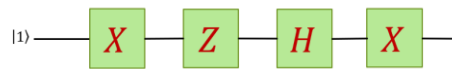
7. (VALOR :1.0 PUNTOS) Observa el siguiente circuito cuántico:



Seleccione la opción que describe correctamente la evolución del estado en cada paso y el estado final.

- A. $|0\rangle \xrightarrow{H} |1\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \xrightarrow{X} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$
- B. $|0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \xrightarrow{H} |0\rangle \xrightarrow{X} |1\rangle$
- C. $|0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \xrightarrow{H} |0\rangle \xrightarrow{X} |1\rangle$
- D. $|0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \xrightarrow{H} |1\rangle \xrightarrow{X} |0\rangle$

8. (VALOR :1.0 PUNTOS) Observa el siguiente circuito cuántico:

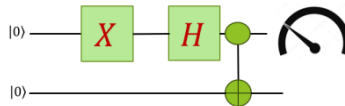


Elige la opción que describe correctamente la evolución del estado en cada compuerta y el estado final.

- A. $|1\rangle \xrightarrow{X} |0\rangle \xrightarrow{Z} |1\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \xrightarrow{X} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$
- B. $|1\rangle \xrightarrow{X} |0\rangle \xrightarrow{Z} -|0\rangle \xrightarrow{H} -\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \xrightarrow{X} -|1\rangle$
- C. $|1\rangle \xrightarrow{X} |0\rangle \xrightarrow{Z} |0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \xrightarrow{X} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$
- D. $|1\rangle \xrightarrow{X} |0\rangle \xrightarrow{Z} |0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \xrightarrow{X} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$

Responda las preguntas 9 y 10 con el siguiente Enunciado.

Observa el siguiente circuito cuántico:



9. (VALOR :1.0 PUNTOS) Selecciona la opción que describe correctamente la evolución del estado en cada paso y el estado antes de medir.

- A. $|0\rangle|0\rangle \xrightarrow{X} |1\rangle|0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle|1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle|1\rangle \xrightarrow{\text{CNOT}} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle|1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle|0\rangle$
- B. $|0\rangle|0\rangle \xrightarrow{X} |1\rangle|0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle|0\rangle \xrightarrow{\text{CNOT}} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle|1\rangle$
- C. $|0\rangle|0\rangle \xrightarrow{X} |1\rangle|1\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle|1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle|1\rangle \xrightarrow{\text{CNOT}} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle|1\rangle$
- D. $|0\rangle|0\rangle \xrightarrow{X} |1\rangle|0\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle|0\rangle \xrightarrow{\text{CNOT}} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle|1\rangle$

10. (VALOR :1.0 PUNTOS) Después de ejecutar el circuito, se mide el cúbit 1.

¿Qué sucede con el cúbit 2?

- A. El cúbit 2 queda en superposición, incluso después de medir el cúbit 1.
- B. El cúbit 2 queda en un estado sin relación con el cúbit 1.
- C. El cúbit 2 queda con el resultado contrario al cúbit 1.
- D. El cúbit 2 queda con el mismo resultado que el cúbit 1.