SECUENCIA DIDÁCTICA BASADA EN LA TRAMPA DE IONES PARA LA ENSEÑANZA DE LA SUPERPOSICIÓN Y LA CUANTIZACIÓN

SANTIAGO CAMPOS TORRES

Línea de profundización:
La Actividad Experimental Para La Enseñanza de la Física.

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL-
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BOGOTÁ D. C.
2025

SECUENCIA DIDÁCTICA BASADA EN LA TRAMPA DE IONES PARA LA ENSEÑANZA DE LA SUPERPOSICIÓN Y LA CUANTIZACIÓN

SANTIAGO CAMPOS TORRES

Monografía presentada para optar por el título de Licenciado en Física

Asesor: Francis Moreno Otero

Línea de profundización:
La Actividad Experimental Para La Enseñanza de la Física.

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL-
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BOGOTÁ D. C.
2025

AGRADECIMIENTOS

en primer lugar, a mis padres: Su esfuerzo, apoyo incondicional y sus sueños, se reflejan hoy y siempre en cada logro que alcanzo, a mi hermano por estar siempre presente.

Gracias por brindarme la educación que ustedes soñaron tener, gracias por creer en mí.

A la profe marina, por su motivación, su conocimiento y por ser un modelo por seguir.

A mi asesor, por su guía, paciencia y enseñanza.

A mis amigos, por hacer de esta etapa algo que siempre voy a recordar con cariño.

A Alejandra, por acompañarme y apoyarme incondicionalmente.

Y finalmente a mí, por darme la oportunidad de vivir y seguir luchando cada día.

Tabla de contenidos

INTRODUCCIÓN 6
CAPÍTULO 1: UNA BRECHA EDUCATIVA EN LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA 7
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 7
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 10
1.3 JUSTIFICACIÓN 10
1.4 ANTECEDENTES 12
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA: DE LA CRISIS CLÁSICA A UNA NUEVA FÍSICA. 18
2.1 NACIMIENTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA. 18
2.2 CONCEPTOS BÁSICOS EN MECÁNICA CLÁSICA VS CUÁNTICA. 23
2.2.1 CONCEPTOS BÁSICOS: SUPERPOSICIÓN. 25
2.2.2 LA CUANTIZACIÓN DE LA ENERGÍA Y OTRAS MAGNITUDES. 26
2.3 LA TRAMPA DE IONES 28
2.3.1 LA TRAMPA DE IONES COMO PUENTE CONCEPTUAL 30
2.4 ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA: DESAFÍOS Y ENFOQUES PEDAGÓGICOS 31
2.5 EL ROL DE LA EXPERIMENTACIÓN EN LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA 32
2.6 LA INDAGACIÓN 34
2.6.1 LA ENSEÑANZA POR INDAGACIÓN 37
CAPÍTULO: 3 METODOLOGÍA 39
3.1 ENFOQUE Y DISEÑO METODOLÓGICO 39
3.2 CONCEPCIÓNES PREVIAS ANTICIPADAS Y BARRERAS COGNITIVAS ESPERADAS 42
3.3 SOBRE LA SECUENCIA DIDÁCTICA 44
3.4 ESTRUCTURA GENERAL DE LAS TRES SESIONES 45
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS 49
4.1COHERENCIA PEDAGÓGICA Y ESTRUCTURA DE LA SECUENCIA 50
4.2 RIGOR CONCEPTUAL Y TRATAMIENTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA 51
4.3 CLARIDAD DE INSTRUCCIONES Y ADECUACIÓN AL NIVEL EDUCATIVO. 53
4.4 TRATAMIENTO DEL ARTÍCULO CIENTÍFICO Y USO DE EVIDENCIAS 54
4.5 USO DE ANALOGÍAS Y SUS LIMITACIONES. 55
4.6 SECUENCIACIÓN Y COHERENCIA ENTRE ACTIVIDADES. 57
4.7 PROPÓSITOS Y OBJETIVOS: PARA EL DOCENTE O PARA LOS ESTUDIANTES. 58

4.8 SOBRE LA RÚBRICA DE EVALUACIÓN. 59
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES 62
Referencias 64
ANEXO 68
Anexo 1 68
Sesión 1: Interpretación De Fenómenos Extraños En La Física 72
Momento 1: explorando la naturaleza de la luz. 72
Momento 2: confrontación con fenómenos extraños. 72
Momento 3: Reflexión final 75
Sesión 2- Cuantización de la energía y superposición de estados 76
Momento 1: ¿Qué es un estado? 76
Momento 2: Superposición y cuantización: simulaciones virtuales. 77
Momento 3: analogías y síntesis 78
Sesión 3- Exploración del principio de la trampa de iones 79
Momento 1: visualización guiada 79
Momento 2: representación práctica 80
Momento 3: conexión conceptual 81
Anexo 2-guia para el estudiante 87
Interpretación De Fenómenos Extraños En La Física 87
Cuantización de la energía y superposición de estados 90
Exploración del principio de la trampa de iones 92

INTRODUCCIÓN

La mecánica cuántica es uno de los pilares de la física moderna y ha llevado a un sinfín de logros tecnológicos en nuestra época. Sin embargo, su enseñanza en bachillerato se enfrenta a una serie de obstáculos causados por la naturaleza altamente abstracta de los conceptos de la física cuántica y la escasez de recursos experimentales que podrían emplearse de manera significativa para que los estudiantes comprendan los fenómenos cuánticos.

En cuanto a la enseñanza de la física cuántica en Colombia, no se enseña en la gran mayoría de colegios públicos, se imparte física clásica en bachillerato y la física moderna donde se encuentra la mecánica cuántica, está programada para cursos superiores en las universidades, esto genera una desconexión entre lo que se conoce a través de las ciencias y lo que se enseña a los estudiantes en el aula, espacios donde se pierden oportunidades para entender sobre nuevas tecnologías y cómo ser competentes científicamente en una era que plantea desafíos para ellos.

Este trabajo surge de la necesidad de proponer una nueva estrategia didáctica para introducir los conceptos principales de la física cuántica en los colegios, así para dar el primer paso hacia una introducción más rigurosa en sus formaciones superiores.

En este trabajo, se presenta el diseño y la validación de una secuencia didáctica la cual presenta una representación experimental de la trampa de iones con la que se busca contribuir a la comprensión de dos conceptos principales: la superposición cuántica y la cuantización de energía.

La trampa de iones se ofrece como un dispositivo educativo atractivo ya que, mientras funciona en el ámbito clásico, se pueden hacer conexiones conceptuales sobre cómo podría desarrollarse el comportamiento cuántico.

El enfoque metodológico en el que se basa este trabajo es cualitativo, ya que se orientará en la comprensión de las percepciones, actitudes, modelizaciones y procesos de aprendizaje de los estudiantes por medio de una secuencia didáctica, dicha secuencia didáctica se diseñó bajo los principios del aprendizaje por indagación, promoviendo la exploración activa y la experimentación como medios para la construcción del conocimiento, de esta manera, se buscará generar conflictos cognitivos que propicien el cambio conceptual frente a ideas intuitivas o alternativas asociadas a la física del mundo microscópico. Se espera que este estudio pueda contribuir a facilitar propuestas contextualizadas para la enseñanza de la física cuántica en Colombia.

CAPÍTULO 1: UNA BRECHA EDUCATIVA EN LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La mecánica cuántica es una de las bases fundamentales de la física contemporánea proporcionando el marco teórico que describe el comportamiento de la materia y la energía a escalas microscópicas, su desarrollo durante el siglo XX no solo revolucionó la comprensión científica, sino que también fundamentó avances tecnológicos que hoy por hoy se encuentran desde los semiconductores y tecnología láser hasta aplicaciones emergentes como la computación cuántica, criptografía y demás (Dowling & Milburn, 2003). En este contexto, la alfabetización científica de las nuevas generaciones requiere cada vez mayor urgencia, la incorporación de nociones esenciales de la física moderna y particularmente de la mecánica cuántica en los currículos de la educación media, sin embargo, su enseñanza representa un desafío considerable, particularmente en el bachillerato, muchos estudiantes perciben los conceptos cuánticos como algo muy abstracto y contraintuitivo, lo que genera frustración y dificulta su comprensión.

Dentro de este marco la enseñanza de la mecánica cuántica es principalmente teórico y matemático esto es un obstáculo significativo, ya que no se puede conectar fácilmente con las prácticas o estudios experimentales esto es una lucha que Lederman y Lederman (2014) discuten en su artículo sobre física moderna y es que los estudiantes necesitan poder entender cómo crece el conocimiento científico y cómo difiere de lo que ya saben, una gran parte de este desafío gira en torno al cambio de la física clásica a la mecánica cuántica y aunque el electromagnetismo, la mecánica, la termodinámica y demás temas de la física nos permiten cerrar la brecha entre la experiencia cotidiana y la experimentación tangible, los fenómenos más abstractos de la mecánica cuántica contienen conceptos como la cuantización y la superposición. La cuantización carece de análogos macroscópicos directos, pues en la experiencia clásica las magnitudes físicas varían de manera continua. Por su parte, la superposición, aunque tampoco posee un equivalente directo en un sistema clásico, puede representarse mediante análogos formales, como la superposición de ondas o los modos normales de vibración, que comparten su estructura matemática pero no su significado físico.

Estas ideas se encuentran en el núcleo de casi todas las teorías de la mecánica cuántica, pero funcionan de una manera tan abstracta que enseñarlas y aprenderlas es casi imposible esto lo explica Dirac (1967), la mecánica cuántica exige un cambio de paradigma para interpretar el mundo debido a la ausencia de un análogo en la física clásica. Además, hay pocos experimentos accesibles en la enseñanza de la mecánica cuántica, y los estudiantes no pueden visualizar e integrar los principios teóricos en su propio aprendizaje experiencial dado que los experimentos disponibles no son económicos y requieren instalaciones tecnológicas avanzadas, lo que dificulta la adopción exitosa en sistemas educativos con pocos recursos.

Al mismo tiempo Walteros (2016) describe este problema con referencia a la necesidad de hacer disponibles recursos técnicos y metodológicos accesibles para una enseñanza realista de la mecánica cuántica en contraste con un enfoque teórico con el que nos explica que basar los conceptos cuánticos en analogías tomadas del mundo clásico puede generar interpretaciones erróneas, ya que se sustituyen las intuiciones propias del modelo cuántico por las ideas derivadas de la física clásica con lo que conduce a malentendidos en la comprensión de los fenómenos del mundo atómico.

En consecuencia, la enseñanza de la mecánica cuántica se ve afectada por varias limitaciones, como su complejidad conceptual y los recursos didácticos limitados para enfoques experimentales. A pesar de los descubrimientos en la ciencia y la tecnología de fenómenos cuánticos (por ejemplo, técnicas de computación cuántica, sensores de alta precisión) que llevan lo cuántico al día a día (en el mundo real), su enseñanza en la escuela no se ha conectado con la realidad diaria de la experiencia de vida de un estudiante promedio.

La OCDE (2018) informa que, para el momento de la recopilación de datos de su investigación, los estudiantes de secundaria en América Latina tienen poco o ningún conocimiento de conceptos científicos abstractos como por ejemplo la superposición y la cuantización, lo que también requiere la reevaluación de las estrategias pedagógicas y la introducción de campos de estudio como la mecánica cuántica en la educación secundaria, esto nos lleva a que en Colombia, la educación en física gira en torno a los fundamentos de la física clásica, lo que ayuda a aprender conceptos básicos para entender cosas de la vida por ejemplo, fenómenos físicos cotidianos que permiten comprender el funcionamiento del mundo que nos rodea y de muchas tecnologías esenciales para la vida moderna.

Durante más de una década, la mecánica cuántica ha ocupado el trasfondo del currículo escolar a pesar de su relevancia en la física actual (Caballero & Guerrero, 2013). Además, directrices del Ministerio Nacional de Educación enfatizan el fortalecimiento de las habilidades científicas relacionadas con ideas observables de movimiento y energía, dejando los temas de física contemporánea para la educación futura (MEN, 2022). Sin embargo, muchos autores han investigado e identificado una necesidad urgente de introducir los fundamentos de la mecánica cuántica en la escuela primaria, cualitativa y experimentalmente, como el mejor medio para poner a los estudiantes en contacto con la ciencia potencialmente más actual y los fenómenos del mundo real de la tecnología emergente (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017).

Contrariamente los métodos tradicionales de enseñanza continúan privilegiando la transmisión de contenidos teóricos, dejando en un segundo plano el desarrollo de habilidades científicas, esenciales, como la experimentación, el análisis de resultados y la resolución de problemas necesarios para una alfabetización científica significativa. Esto lentamente genera una falta de interés en la física, especialmente cuando se abordan temas tan abstractos como la dualidad onda-partícula, la superposición de estados o la cuantización. Para abordar esto, se proponen nuevos enfoques didácticos basados en el aprendizaje experimental para acercar a los estudiantes a estos fenómenos desde ángulos más reales y significativos (Acevedo-Díaz et al., 2017).

Ante este panorama, resulta necesario el diseño de enfoques educativos innovadores que integren la teoría cuántica con actividades experimentales accesibles y pedagógicamente efectivas. En este contexto, resulta pertinente considerar dispositivos experimentales que acerquen al estudiante a estos conceptos, por tal motivo una representación de una trampa de iones nace como propuesta, aunque las versiones de laboratorio escolar funcionarían en el régimen clásico. Sin embargo, una representación de esta nace como una herramienta atractiva, para permitir a los estudiantes discutir fenómenos como la superposición y la cuantización, proporcionando experiencia práctica junto con el aprendizaje teórico en donde la secuencia no busca que los estudiantes dominen el formalismo matemático de la mecánica cuántica ni observen fenómenos cuánticos directamente, sino acercar a los estudiantes a la física moderna.

A partir de esta brecha educativa identificada, surge la siguiente pregunta que emerge de este problema: **¿Cómo elaborar y validar una secuencia didáctica basada en la representación de la trampa de iones para la enseñanza de los conceptos de superposición y cuantización?**

Responder a esta pregunta implica no solo adaptar el experimento a un entorno educativo también proponer estrategias didácticas que puedan integrarse de manera efectiva en la enseñanza de la mecánica cuántica en un aula de bachillerato.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

General

Desarrollar una propuesta didáctica que incorpore la trampa de iones como recurso experimental y de modelización para la enseñanza de los conceptos de superposición y cuantización en el marco de la enseñanza de la mecánica cuántica.

Específicos

- Fundamentar epistemológica e históricamente los conceptos de superposición y cuantización, con el fin de establecer un marco conceptual que sustente el diseño de la secuencia didáctica.
- Diseñar una secuencia didáctica que integre la trampa de iones como recurso pedagógico mediante actividades experimentales y de modelización, orientadas a la comprensión de la superposición y cuantización.
- Validar la coherencia interna y la pertinencia didáctica de la secuencia mediante la revisión de pares evaluativos, con el propósito de asegurar su rigor conceptual y su calidad como propuesta didáctica.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La enseñanza de la mecánica cuántica enfrenta numerosos desafíos debido a su carácter abstracto, su desvinculación con la experiencia cotidiana y su dependencia de formalismos matemáticos avanzados. Estas dificultades han llevado a que muchos estudiantes de educación secundaria y primeros niveles universitarios experimenten barreras significativas para comprender conceptos como la superposición de estados y la cuantización. En este contexto, la investigación resulta

esencial, ya que propone una solución innovadora que combina actividades experimentales con teoría para abordar dichas barreras.

Por otro lado, en la escuela se presentan importantes desafíos tanto a nivel conceptual como metodológico de acuerdo con el artículo “Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la Física Cuántica en el bachillerato” de Sinarcas y Solbes (2013), ellos señalan que, existen múltiples problemáticas que impiden un aprendizaje significativo en los estudiantes, estas dificultades se manifiestan en la comprensión de conceptos fundamentales, en las deficiencias de los materiales didácticos y en la falta de conexión entre la ciencia, la tecnología y la sociedad.

Una de las principales barreras detectadas, es la dificultad conceptual de los estudiantes para entender la dualidad onda-partícula, las variables discretas, los estados de superposición y la naturaleza cuántica de partículas como electrones y fotones. Se han realizado varios estudios que muestran que los estudiantes de secundaria experimentan serias dificultades cuando deben lidiar con conceptos básicos de la mecánica cuántica; por ejemplo, solo menos de una quinta parte será capaz de explicar adecuadamente un espectro discontinuo mediante el modelo de Bohr, o solo aproximadamente el 6% son capaces de dar la descripción correcta de un estado del electrón usando la función de onda de Schrödinger (Sinarcas & Solbes, 2013) y ninguno concibe a las partículas cuánticas como objetos nuevos y distintos de las ondas y partículas clásicas, esta problemática también se extiende a los docentes y a los materiales educativos, conservando ideas erróneas y limitando la comprensión profunda del tema.

Asimismo, el análisis de los libros de texto muestra que estos no abordan adecuadamente los límites del modelo de Bohr ni explican la dualidad cuántica de manera precisa. Solo un libro de los evaluados presenta al menos cinco relaciones entre la mecánica cuántica y la tecnología, y ninguno aborda las implicaciones sociales de esta disciplina, esta falta de conexión entre ciencia, tecnología y sociedad no solo reduce el interés de los estudiantes, sino que también limita su comprensión del impacto real de la física cuántica en el mundo moderno, en aplicaciones como el láser, la microelectrónica, la nanotecnología y la computación cuántica.

Frente a este panorama, una propuesta didáctica basada en la experimentación para la enseñanza de la mecánica cuántica en estudiantes de bachillerato se perfila como una estrategia innovadora, el enfoque experimental permite ir más allá de las metodologías tradicionales, ofreciendo una experiencia que enriquece el interés por estudiar los fenómenos cuánticos mediante experimentos

como la trampa de iones pero en versiones mucho más avanzadas , este enfoque práctico no solo facilita la comprensión de conceptos complejos, sino que también permite a los estudiantes ver la mecánica cuántica como una evolución necesaria frente a las limitaciones de la física clásica.

Así mismo, la propuesta de esta investigación responde a una necesidad urgente de desarrollar materiales y estrategias experimentales accesibles que puedan ser implementadas en entornos educativos con recursos limitados. Como indica Walteros (2016), una de las principales limitantes en la enseñanza de la mecánica cuántica es la falta de recursos experimentales disponibles para ilustrar conceptos abstractos, con esto la "trampa de iones", por su diseño adaptable y su potencial para simular fenómenos cuánticos, ofrece una solución viable para superar esta limitación y acercar la mecánica cuántica a los estudiantes.

Por otro lado, esta investigación también contribuye al desarrollo de competencias científicas en los estudiantes, tales como el pensamiento crítico, el razonamiento lógico y la capacidad de analizar situaciones complejas. Como destaca Tovar (2021) la experimentación no solo mejora la comprensión conceptual, sino que también fomenta habilidades científicas que son esenciales en un mundo cada vez más tecnológico e interdisciplinario.

Finalmente, esta investigación tiene implicaciones que trascienden el ámbito puramente educativo, pues evidencia que la enseñanza de la mecánica cuántica no constituye únicamente una disciplina académica también es el fundamentó de avances tecnológicos contemporáneos, como la computación cuántica, la criptografía y la biología cuántica, fomentar una comprensión sólida de esta disciplina desde edades tempranas no solo prepara a los estudiantes para carreras en ciencia y tecnología, sino que también contribuye a crear una sociedad más informada y capaz de participar en debates sobre las implicaciones de estas tecnologías emergentes (Maloney, 1994).

1.4 ANTECEDENTES

La enseñanza de la mecánica cuántica ha sido un desafío constante para la educación debido a la abstracción de sus principios y la dificultad para conectarlos con experiencias cotidianas o experimentales. Diversos estudios y propuestas han buscado superar estas barreras, proporcionando una base para el desarrollo de estrategias innovadoras que faciliten la comprensión de esta área fundamental de la física moderna. Entonces, esta investigación tiene dos caminos: la enseñanza de la mecánica cuántica y la actividad experimental como herramienta didáctica.

Con estos límites, se realizó una búsqueda de artículos en bases de datos y sitios web como: Scielo, ResearchGate, Physical Review Physics Education Research, entre otros.

Por otro lado, se consultaron las bases de datos institucionales de universidades colombianas, específicamente la de la Universidad Pedagógica Nacional, para conocer sobre estudios de investigación que han abordado estas líneas. Los hallazgos de esta revisión de la literatura dan estructura a la investigación de la siguiente manera: antecedentes internacionales y de contexto local. Esta visión permitió un contacto cercano con la cuestión de la investigación sobre la enseñanza de conceptos cuánticos utilizando enfoques experimentales.

A nivel internacional, ya se ha llevado a cabo una investigación sustancial sobre la enseñanza de algunos aspectos cuánticos en la escuela secundaria. Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) presentaron una revisión exhaustiva realizada en la educación secundaria y terciaria, que debe reconocer sus fuentes. El principal objetivo era entender qué ideas de la mecánica cuántica se enseñan realmente, qué encuentran los estudiantes problemáticos con respecto a estas ideas y qué pedagogías funcionan mejor. La investigación realizada presentó un proceso de revisión de la literatura que apoyó un análisis de cuarenta y ocho estudios publicados entre 1999 y 2016. Los autores implementaron criterios estrictos de inclusión y clasificaron los resultados por nivel educativo, contenido cubierto, problemas identificados y estrategias didácticas aplicadas.

Entre sus hallazgos, los autores sostienen que existen condiciones adicionales para interpretar adecuadamente la mecánica cuántica más allá de saber qué hacen la superposición y la cuantización y saber cómo interactúan entre sí. También descubrieron las principales fuentes de dificultades de aprendizaje, como la ruptura conceptual entre la física clásica y el carácter probabilístico de las predicciones cuánticas, o la falta de análogos macroscópicos referenciales a nivel didáctico, afirmaron que enseñar un conjunto variado de experimentos o demostraciones que presenten diferentes aspectos de la mecánica cuántica es más exitoso que confiar en una sola herramienta pedagógica.

Singh (2001), en un artículo del American Journal of Physics, estudió la comprensión de los estudiantes sobre la mecánica cuántica, este tenía como propósito el estudio de encontrar los malentendidos más frecuentes y duraderos que los estudiantes generan durante el aprendizaje de la mecánica cuántica. El estudio se llevó a cabo involucrando a estudiantes universitarios inscritos en física cuántica introductoria en una universidad estadounidense, la metodología fue mixta,

incluyendo la entrevista individual y pruebas conceptuales diagnósticas escritas. Los instrumentos se administraron a 300 estudiantes durante tres años académicos consecutivos, mientras que 45 de estos estudiantes fueron entrevistados extensamente para profundizar en su pensamiento. Singh encontró que uno de los malentendidos más persistentes fue tratar la superposición cuántica como ignorancia clásica, en la que los estudiantes piensan que la superposición es similar a una partícula estando realmente en un estado o en otro, pero simplemente no lo saben aún, en lugar de reconocer que realmente existe de una manera nueva y distinta.

El autor argumenta que hay dificultades subyacentes a la superficie de los estudiantes que no conocen las matemáticas y su aplicación; están relacionados con comprensiones intuitivas de cómo funciona el mundo y el desarrollo de la intuición cuántica es un proceso que lleva tiempo con exposición repetida a los fenómenos cuánticos desde múltiples ángulos.

Sinarcas y Solbes (2013) realizaron un estudio sobre la enseñanza de la física cuántica que lleva por título "Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la Física Cuántica en la escuela secundaria", publicado en la revista Enseñanza de las Ciencias. El objetivo general era identificar y estudiar los diversos problemas que obstaculizan la comprensión significativa de la mecánica cuántica en los estudiantes de secundaria, ya sean conceptuales o metodológicos. El estudio se realizó a través de un diseño mixto que involucra análisis de libros de texto, pruebas conceptuales diagnósticas administradas en escuelas secundarias españolas y entrevistas con profesores.

Sinarcas y Solbes examinaron ocho libros de texto de física de secundaria españoles para estudiar el grado en que se representan las ideas cuánticas, qué vínculos se establecen con la tecnología y la sociedad y qué conceptos erróneos podrían derivarse. También usaron diagnósticos conceptuales en más de doscientos estudiantes para determinar dónde surgían las dificultades. Se demostró que existen varias dificultades en el proceso de aprendizaje de la física cuántica en la escuela secundaria.

En cuanto a los problemas conceptuales, descubrieron que menos de una quinta parte de los estudiantes puede percibir adecuadamente un espectro discontinuo a través del modelo de Bohr. Además, solo alrededor del seis por ciento es capaz de describir correctamente un estado de electrón mediante el uso de la función de onda de Schrödinger. ellos afirman que ningún estudiante reconoce las partículas cuánticas como entidades nuevas e independientes de las ondas y partículas

clásicas, esto también es cierto para profesores y materiales educativos, preservando conceptos erróneos que impiden una comprensión profunda del tema.

En cuanto al análisis de libros de texto, concluyeron que ninguno revela suficientemente las deficiencias del modelo de Bohr o introduce adecuadamente la dualidad cuántica, mientras que solo uno de ellos se refiere al menos a cinco relaciones entre la mecánica cuántica y la tecnología. Además, ninguno aborda los aspectos sociales de esta materia. Los autores concluyen que uno de los problemas más graves en la enseñanza de la física cuántica es la brecha entre las ideas abstractas presentadas a los estudiantes y sus aplicaciones a nuevas tecnologías que hacen que el estudio sea menos interesante.

Este fallo al no conectar la ciencia, la tecnología y la sociedad disminuye el interés de los estudiantes y tiende a restringir a los estudiantes para apreciar el impacto de la física cuántica en el mundo de hoy, donde uno puede ver láseres, microelectrónica, nanotecnología y computación cuántica como ejemplos de aplicaciones.

A nivel local, Tovar (2021) desarrolló el trabajo titulado: “Actividad experimental como estrategia didáctica para abordar la medición de conceptos de sistemas cuánticos”, publicado por la Universidad Pedagógica Nacional de Colombia. El objetivo general fue crear y aplicar una secuencia didáctica con experimentaciones sobre polarizadores para estudiantes de secundaria, con el fin de introducir el tema de la medición cuántica. La investigación se diseñó en el contexto de un enfoque de paradigma cualitativo de investigación-acción, e involucró a estudiantes de undécimo grado de una escuela pública en Bogotá. Como intervención didáctica, realizó una serie de experimentos con polarizadores lineales, láminas y fuentes de luz, asociados con discusiones conceptuales y actividades de modelado. Se emplearon instrumentos como diarios de campo, grabaciones de audio, textos escritos por los estudiantes, y pruebas previas y posteriores para evaluar el cambio conceptual. Uno de los puntos clave es que, cuando se trata de enseñar física cuántica, los aparatos experimentales no necesitan exhibir un comportamiento cuántico genuino para ser útiles; el equipo puede funcionar como sistemas análogos que comparten características estructuralmente importantes con aquellos que aparecen en contextos cuánticos del mundo real.

Tovar concluye que el trabajo experimental puede generar conflictos cognitivos provechosos que conduzcan al cambio conceptual, y que la experimentación indirecta puede ser efectiva si se combina con una discusión sobre las limitaciones de las analogías utilizadas. Además, argumenta

que puede ser factible aprender sobre cuestiones cuánticas complejas a nivel de secundaria si se construyen puentes conceptuales clásico-cuánticos adecuados y que, con experimentos simples y económicos, no se está necesariamente limitado en el desarrollo de una concepción profunda.

Walteros Rodríguez (2016) elaboró un trabajo de grado en la Universidad Pedagógica Nacional titulado: "actividades experimentales para la construcción de explicaciones alrededor de los fundamentos básicos de la mecánica cuántica". El objetivo era formular y justificar teóricamente una serie de experimentos sencillos y prácticos que introdujeran las nociones de estado cuántico, superposición y cuantización en la escuela secundaria colombiana. La metodología utilizada fue de tipo documental y proposicional, mediante una revisión de la literatura sobre la enseñanza didáctica de la física cuántica, puntos históricos, experiencias fundamentales y propuestas pedagógicas a nivel mundial. Según este análisis, Walteros planificó una serie de actividades experimentales que involucraban el experimento simulado de Stern-Gerlach con polarizadores, espectros simples, y experimentos de interferencia basados en simulaciones.

El trabajo se basó en la enseñanza basada en la indagación y la teoría del cambio conceptual. Aunque no hubo una implementación directa con los estudiantes, en la didáctica de la física en la Universidad Pedagógica Nacional se evaluó la coherencia conceptual, la relevancia pedagógica y la viabilidad en el contexto colombiano. Walteros eventualmente asume que es factible crear experimentos con los requisitos mencionados a un nivel educativo inferior, logrando obtener conceptos de mecánica cuántica de una manera más profunda, sin necesidad de equipos costosos. También llama la atención sobre la importancia de compartir con los estudiantes qué es realmente lo que se está observando y qué es una supuesta analogía: esto señalaría la necesidad de honestidad intelectual al usar analogías y experimentos (y simulaciones).

Walteros argumenta que un buen trabajo experimental basado en experimentos bien construidos, apoyado por una discusión reflexiva, puede ser muy efectivo para promover la construcción de un entendimiento más profundo de la física cuántica por parte de los estudiantes, y uno de los principales desafíos es hacer disponibles las herramientas y métodos necesarios para un tratamiento realista de la física cuántica incluso con recursos limitados.

Alfonso (2022) desarrolló un proyecto de investigación en la Universidad Pedagógica Nacional, enfocándose en la creación de micromundos digitales para enseñar algunos conceptos básicos de la mecánica cuántica a estudiantes de octavo grado. Con este fin, el objetivo principal de este

trabajo fue diseñar, implementar y evaluar un entorno virtual interactivo para que los estudiantes pudieran investigar conceptos relacionados con el sistema cuántico, estado y superposición, con una clara distinción de la física clásica. El método fue cualitativo, con un enfoque de investigación-acción realizado con un grupo de treinta estudiantes de octavo grado de una escuela pública en Bogotá. El micromundo se implementó con herramientas de programación disponibles y se organizó en varios niveles de complejidad, en los cuales los estudiantes podían jugar con representaciones virtuales de sistemas cuánticos elementales. Las herramientas de recolección de datos utilizadas fueron: observaciones de clase, productos digitales de los estudiantes, cuestionarios antes y después de la entrada y entrevistas semiestructuradas.

Alfonso descubrió que la dimensión del mundo virtual ayudó a los estudiantes a comprender objetos abstractos como representaciones concretas y les permitió construir significados sobre cosas o eventos que no podemos observar directamente. La capacidad de los estudiantes para distinguir el comportamiento clásico del cuántico aumentó, así como su motivación e interés por aprender física moderna después de la interacción con el micromundo. Alfonso Katherine cree que los recursos tecnológicos pueden contribuir a compensar el déficit de aparatos experimentales en las instituciones educativas, siempre que se planifique con propósitos pedagógicos definidos y se incluya adecuadamente en secuencias didácticas organizadas.

También argumenta que las ideas cuánticas se pueden introducir desde octavo grado en adelante si se utilizan métodos de visualización adecuados y se construyen sobre los conocimientos existentes de los estudiantes.

En este contexto, parece que la enseñanza de la física cuántica en las escuelas está plagada de obstáculos conceptuales, metodológicos y de recursos. Sin embargo, podemos crear estrategias didácticas efectivas a partir de experimentos simples, dispositivos tecnológicos y la indagación guiada.

Los estudios revisados muestran que, a través de reflexiones conceptuales explícitas, los enfoques experimentales indirectos pueden efectivamente apoyar la comprensión de fenómenos cuánticos abstractos como la superposición y la cuantización. También verifica la necesidad de construir propuestas didácticas contextualizadas, teniendo en cuenta las restricciones de recursos de las instituciones educativas colombianas y latinoamericanas.

El presente trabajo está en esta línea, proponiendo adoptar la trampa de iones como un método conceptual-experimental para apoyar el aprendizaje de conceptos básicos de cuántica entre los estudiantes de décimo grado.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA: DE LA CRISIS CLÁSICA A UNA NUEVA FÍSICA.

2.1 NACIMIENTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA.

A finales del siglo XIX, la física clásica parecía haber alcanzado su culminación. Las ecuaciones de Newton describían el movimiento de los cuerpos con precisión, las leyes de Maxwell unificaban la electricidad y el magnetismo en una teoría coherente del electromagnetismo, y la termodinámica explicaba el comportamiento de la materia y la energía en sistemas macroscópicos. Sin embargo, esta aparente completud comenzó a agrietarse cuando una serie de fenómenos experimentales revelaron inconsistencias esenciales que no podían resolverse dentro del marco teórico clásico. Estos problemas no eran simples detalles técnicos pendientes de ajuste, sino grietas profundas que evidenciaban los límites de validez de las teorías que habían dominado la física durante más de dos siglos.

El primero de estos problemas fue la radiación del cuerpo negro. Un cuerpo negro es un objeto idealizado que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre él y, al calentarse, emite radiación con un espectro característico que depende únicamente de su temperatura. Cuando los físicos intentaron calcular teóricamente este espectro usando las leyes clásicas del electromagnetismo y la termodinámica, obtuvieron un resultado absurdo conocido como la catástrofe ultravioleta: las predicciones indicaban que la intensidad de radiación crecería sin límite hacia las altas frecuencias, lo que implicaba que cualquier cuerpo caliente emitiría cantidades infinitas de energía en forma de luz ultravioleta y rayos X, algo evidentemente contrario a la experiencia. Como señalan Eisberg y Resnick (1985), este problema representaba una contradicción fundamental entre teoría y observación que no podía ignorarse.

En 1900, Max Planck abordó este problema proponiendo una solución revolucionaria: la energía electromagnética no se emitía de forma continua, como predecía la física clásica, sino en paquetes discretos o cuantos, como él los llamó, cada uno con una energía proporcional a su frecuencia

según la relación E =h*ν, donde h es una nueva constante fundamental de la naturaleza. Esta suposición permitió reproducir perfectamente el espectro observado del cuerpo negro, pero al precio de introducir una discontinuidad radical en la naturaleza misma de la energía. Planck mismo era consciente de que esta idea contradecía todo lo que se había comprendido hasta ese momento sobre el comportamiento continuo de las ondas electromagnéticas, y durante años intentó sin éxito reconciliar su fórmula con la física clásica. Sin embargo, la evidencia experimental era ineludible: la naturaleza parecía comportarse de forma discontinua a escalas muy pequeñas.

Para comprender la diferencia entre la continuidad y la discontinuidad, resulta útil ver lo de la siguiente forma: una rampa versus una escalera en la física clásica, la energía se comporta como una rampa o sea un objeto puede detenerse a cualquier altura intermedia, su energía puede tomar cualquier valor dentro de un rango continuo, sin restricciones sobre los valores permitidos. Sin embargo, en un sistema cuántico confinado, como un electrón en un átomo, la energía se comporta como una escalera: solo puede ocupar escalones específicos, niveles discretos de energía, y no puede existir en valores intermedios entre dos escalones. Así como una persona subiendo escaleras no puede detenerse flotando entre dos escalones, un electrón no puede tener una energía arbitraria entre dos niveles cuánticos permitidos. Esta cuantización no es una limitación arbitraria impuesta externamente, sino una consecuencia inevitable del confinamiento espacial del sistema. Como explica Griffiths (2005), siempre que una partícula está confinada en una región del espacio, sus niveles de energía están cuantizados, resultado que emerge naturalmente de las condiciones de contorno aplicadas a la ecuación de Schrödinger. La evidencia experimental más directa de esta cuantización son los espectros atómicos, es decir, cuando los átomos emiten luz, no producen todos los colores posibles en un espectro continuo (como una rampa de colores), sino únicamente líneas de colores específicos y discretos (como escalones de color), cada línea corresponde a la transición del electrón entre dos niveles cuantizados de energía.

El siguiente golpe a la visión clásica vino del efecto fotoeléctrico, fenómeno en el cual la luz incidente sobre una superficie metálica puede expulsar electrones de ella la teoría ondulatoria clásica de la luz predecía que la energía de los electrones expulsados debería depender de la intensidad de la luz, no de su frecuencia, y que incluso la luz de baja frecuencia, pero muy intensa eventualmente lograría expulsar electrones. Los experimentos mostraban exactamente lo contrario

la energía de los electrones dependía únicamente de la frecuencia de la luz, y existía una frecuencia por debajo de la cual ningún electrón era expulsado, sin importar cuán intensa fuera la iluminación.

En 1905, Einstein resolvió esta paradoja extendiendo la idea de Planck: propuso que la luz misma estaba compuesta de cuantos de energía o fotones, cada uno transportando energía h*ν. Como explican Eisberg y Resnick (1985), esta propuesta mostraba que la luz tenía propiedades corpusculares además de ondulatorias, desafiando la clasificación tradicional de los fenómenos físicos en ondas o partículas, pero nunca ambas simultáneamente.

Paralelamente, el estudio de los espectros atómicos revelaba otro fenómeno inexplicable desde la física clásica cuando los gases calientes o excitados emitían luz, no producían un espectro continuo de todos los colores, sino líneas espectrales discretas y características de cada elemento químico. El modelo atómico de Rutherford, que concebía el átomo como un núcleo diminuto rodeado de electrones orbitando como planetas, enfrentaba un problema fatal: según el electromagnetismo clásico, una carga eléctrica en movimiento acelerado debe emitir radiación continuamente, perdiendo energía hasta colapsar en espiral hacia el núcleo en una fracción de segundo. Evidentemente, esto no ocurría, los átomos eran estables. En 1913, Niels Bohr propuso que los electrones solo podían ocupar ciertas órbitas permitidas con energías específicas, y que la radiación solo se emitía o absorbía cuando un electrón saltaba entre estos niveles discretos. Como señala Griffiths (2005), el modelo de Bohr era una mezcla incómoda de física clásica y postulados cuánticos introducidos de manera ad hoc, funcionaba para el átomo de hidrógeno, pero carecía de una fundamentación teórica coherente. Sin embargo, explicaba exitosamente las líneas espectrales observadas y establecía que la cuantización no era un fenómeno exclusivo de la radiación electromagnética, sino también de los sistemas atómicos.

La dualidad entre ondas y partículas dio un giro aún más sorprendente en 1924, cuando Louis de Broglie propuso que si la luz, tradicionalmente entendida como onda, mostraba propiedades de partícula, entonces la materia, tradicionalmente entendida como partículas, debería mostrar propiedades ondulatorias. Según de Broglie, toda partícula con momento **p** debería tener asociada una longitud de onda $\lambda = \mathbf{h/p}$**.** Esta predicción, aparentemente especulativa, fue confirmada experimentalmente en 1927 por Davisson y Germer, quienes demostraron que un haz de electrones producía patrones de interferencia característicos de las ondas al atravesar un cristal. Esta confirmación planteaba una pregunta ontológica profunda: si tanto la luz como la materia exhiben

comportamientos duales, ¿qué son realmente? ¿Son ondas, partículas, o algo completamente nuevo que no tiene análogo en nuestra experiencia macroscópica?

Estas crisis experimentales y conceptuales dieron origen a dos formulaciones matemáticas aparentemente distintas de una nueva física. En 1925, Werner Heisenberg desarrolló la mecánica matricial, un formalismo que abandonaba completamente la idea de trayectorias definidas para las partículas y se centraba exclusivamente en magnitudes observables representadas mediante matrices. Casi simultáneamente, en 1926, Erwin Schrödinger presentó la mecánica ondulatoria, basada en una ecuación de onda que describía la evolución temporal de una función de onda ψ asociada al sistema cuántico. Esta función de onda no representaba una onda material en el sentido clásico, sino que su interpretación física, propuesta por Max Born, era probabilística: el cuadrado de su magnitud $|\psi|^2$ indicaba la probabilidad de encontrar la partícula en cada posición al realizar una medición. En 1930, Paul Dirac demostró que ambos formalismos, el de Heisenberg y el de Schrödinger, eran matemáticamente equivalentes, dos representaciones diferentes de una misma teoría subyacente. Como señala Dirac (1967), la mecánica cuántica requería un cambio fundamental en la interpretación de la realidad física, precisamente debido a la ausencia de análogos clásicos para los fenómenos observados.

La construcción de la mecánica cuántica no fue simplemente una extensión o refinamiento de la física clásica, sino una ruptura epistemológica radical que transformó la manera de entender la realidad física, el conocimiento científico y el papel del observador. En la física clásica, el universo era determinista, conociendo con precisión el estado presente de un sistema, sus posiciones y velocidades, las leyes de Newton permitían calcular su evolución futura con certeza absoluta. El universo era como un mecanismo de relojería perfectamente predecible. La incertidumbre en las predicciones clásicas era meramente práctica, resultado de mediciones imperfectas o condiciones iniciales incompletas, pero en principio podría eliminarse con instrumentos suficientemente precisos. La mecánica cuántica destruyó esta visión determinista de forma fundamental. Como explica Griffiths (2005), las predicciones cuánticas son inherentemente probabilísticas, no por deficiencias de la teoría o de nuestros instrumentos, sino porque la naturaleza misma es indeterminista a nivel microscópico. Dado el estado cuántico de un sistema, la teoría permite calcular las probabilidades de diferentes resultados posibles al realizar una medición, pero no puede predecir con certeza cuál resultado específico se obtendrá.

Esta indeterminación no es ignorancia sobre un estado real preexistente, como en el caso clásico de no saber si una moneda lanzada caerá cara o sello, aunque ya tenga un resultado definido en el aire. En la mecánica cuántica, antes de la medición el sistema existe genuinamente en una superposición de múltiples estados simultáneamente, y solo al medir colapsa a uno de ellos. Este colapso de la función de onda es instantáneo y no está descrito por la ecuación de Schrödinger, planteando el llamado problema de la medición: ¿qué constituye exactamente una medición? ¿Por qué el acto de observar cambia el sistema?

El papel del observador en la mecánica cuántica representa otro cambio epistemológico profundo. En física clásica, medir es simplemente revelar propiedades que ya existen independientemente de nosotros, la Luna está en su órbita tengamos o no un telescopio apuntando hacia ella. En mecánica cuántica, como señala Griffiths (2005), la medición no revela una propiedad preexistente, sino que en cierto sentido crea esa propiedad. El observador juega un papel esencial en determinar lo que se observa, algo completamente ajeno al pensamiento clásico. Esto no significa que la realidad cuántica sea subjetiva o que dependa de la conciencia humana, pero sí indica que el proceso de medición es inseparable del fenómeno medido.

La noción misma de trayectoria, central en la física clásica, pierde sentido en el mundo cuántico. Una partícula clásica tiene posición y velocidad definidas en cada instante, trazando una trayectoria continua a través del espacio. Un electrón no tiene posición definida hasta que se mide, su función de onda describe una distribución de probabilidad extendida en el espacio. Como explican Müller y Wiesner (2002), la noción de trayectoria se vuelve absurda en mecánica cuántica, el electrón no se mueve de un lugar a otro de una manera que podamos visualizar en términos clásicos. Esta imposibilidad de definir simultáneamente posición y momento está formalizada en el principio de incertidumbre de Heisenberg, que establece límites fundamentales, no tecnológicos, sobre lo que podemos conocer acerca de un sistema cuántico.

La discontinuidad introducida por la cuantización de magnitudes físicas representa otra ruptura conceptual. En física clásica, magnitudes como la energía, el momento angular o la posición varían de forma continua, pueden tomar cualquier valor dentro de un rango. En sistemas cuánticos confinados, estas magnitudes solo pueden adoptar valores discretos específicos. Un electrón en un átomo no puede tener cualquier energía, sino únicamente ciertos valores permitidos determinados por las condiciones de contorno del sistema. Como señalan Eisberg y Resnick (1985), la

espectroscopía atómica proporciona evidencia experimental directa e inequívoca de esta cuantización, las líneas discretas observadas son manifestaciones visibles de transiciones entre niveles de energía cuantizados. Esta cuantización no es un postulado arbitrario, sino una consecuencia matemática de aplicar la ecuación de Schrödinger con condiciones de contorno apropiadas, como explica Griffiths (2005), siempre que tenemos confinamiento espacial, obtenemos cuantización de la energía.

Todas estas rupturas conceptuales plantearon profundas cuestiones filosóficas sobre la naturaleza de la realidad y los límites del conocimiento científico. ¿Qué significa que un sistema esté en superposición de estados? ¿Existe una realidad objetiva independiente de la observación? ¿Qué es realmente una partícula cuántica si no tiene trayectoria ni posición definida? Estas preguntas dieron origen a diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica. La interpretación de Copenhague, desarrollada principalmente por Niels Bohr y Werner Heisenberg, se convirtió en la más aceptada pedagógicamente. Según esta interpretación, la función de onda representa todo lo que podemos saber sobre el sistema, y colapsa al realizar una medición. No tiene sentido hablar de lo que el sistema está haciendo realmente cuando no se observa, solo podemos discutir los resultados de mediciones. Existen otras interpretaciones, como la de muchos mundos propuesta por Hugh Everett, que evita el colapso postulando que todas las posibilidades se realizan en universos paralelos, o la teoría de variables ocultas de David Bohm, que intenta restaurar el determinismo mediante parámetros no observables. Sin embargo, todas estas interpretaciones producen las mismas predicciones experimentales verificables, el debate permanece abierto porque la mecánica cuántica funciona perfectamente como teoría predictiva sin necesidad de resolver estas cuestiones filosóficas fundamentales.

2.2 CONCEPTOS BÁSICOS EN MECÁNICA CLÁSICA VS CUÁNTICA.

No fue simplemente que la transición de la física clásica a la cuántica fuera una etapa más en teorías anteriores, sino que resultó en concepciones filosóficas completamente nuevas de la realidad, que cambiaron por completo nuestra comprensión.

En la física clásica, los sistemas poseen ciertas propiedades, de modo que una partícula tiene una posición y velocidad ideales en todo momento, ya sea que la midamos o no. La comprensión completa del estado presente nos permite estimar el estado futuro con absoluta perfección mediante

leyes de movimiento deterministas y estas suposiciones del mundo físico son cuestionadas por la mecánica cuántica, propuesta por Feynman et al. (1965) de la siguiente manera: “Las cosas a una escala muy pequeña se comportan como nada con lo que tengamos experiencia directa. No actúan como lo hacen las ondas, ni como lo hacen las partículas, no actúan como nubes, ni como bolas de billar, ni como pesos en resortes, y no actúan como nada con lo que te hayas encontrado” (Vol. III, p.1-1) esta declaración resume los desafíos conceptuales: la mecánica cuántica es un mundo inherentemente diferente a cualquier cosa con la que realmente tengamos experiencia en el mundo real.

La principal diferencia es que las predicciones cuánticas son probabilísticas, pero desde una postura de la física clásica se puede predecir el resultado de un experimento con un grado de certeza (dadas las condiciones iniciales), mientras que la mecánica cuántica solo puede predecir probabilidades de diferentes resultados posibles. No es un defecto de nuestra teoría, ni de nuestros instrumentos, sino una característica fundamental de la naturaleza, Además, la medición de un sistema cuántico lo perturba a su nivel básico, y su simulación apenas tenía un análogo clásico. Como nos recuerda Griffiths (2005), “En la mecánica cuántica, el observador juega un papel esencial en la determinación de lo que se observa, algo completamente ajeno al pensamiento clásico” (p.4). Estas diferencias tienen profundas implicaciones para la enseñanza hoy en día, pues se exige una ruptura con las intuiciones que los estudiantes han construido a partir de su experiencia cotidiana y del aprendizaje previo de la física clásica. En primer lugar, la naturaleza probabilística de la mecánica cuántica demanda que el estudiante abandone la idea de causalidad determinista y aprenda a interpretar los fenómenos en términos de distribuciones de probabilidad, lo cual representa un desafío. En segundo lugar, el papel activo del observador en la determinación del estado del sistema introduce una complejidad epistemológica que obliga a repensar que significa “medir” o “conocer” en la física, algo que no tiene equivalente en la enseñanza clásica.

Por otro lado dado que una vida de exploración de objetos macroscópicos sobre su centralidad, los estudiantes están inmersos en una comprensión de la mecánica cuántica que no solo está profundamente arraigada en la física clásica, sino que también crece a partir de intuiciones como las descritas anteriormente. Como Singh (2001) ha señalado, “Actualmente, uno de los mayores desafíos pedagógicos en la enseñanza de la mecánica cuántica es ayudar a los estudiantes a reconocer cuándo sus intuiciones clásicas son aplicables y cuándo deben ser abandonadas” (p.885).

Y no se trata solo de agregar ideas a un marco existente de ideas, se trata de construir un modelo completamente nuevo de la realidad física.

2.2.1 CONCEPTOS BÁSICOS: SUPERPOSICIÓN.

La superposición es la más contraintuitiva y fundamental de todas las ideas en la mecánica cuántica. Este principio establece que si un sistema puede estar en el estado Ψ (1) y también en el estado Ψ (2), entonces puede estar en cualquier combinación lineal de estos dos estados:

$$\Psi = A\Psi(1) + B\Psi(2)$$

donde A y B son números complejos.

Es importante destacar que esto no significa que el sistema esté en uno u otro y simplemente no sepamos cuál esto significa que el sistema está genuinamente en ambos estados simultáneamente. Veámoslo con el siguiente ejemplo: podemos imaginar la superposición como un color blanco que contiene la posibilidad de todos los colores, antes de medir, el sistema estará en un estado "blanco", que representa la coexistencia de todos los posibles colores (resultados) pero en el momento que midamos, el blanco "colapsa" y se manifiesta como uno de esos colores en particular. También, una demostración experimental de la superposición es el muy conocido experimento de la doble rendija.

En este experimento se envían electrones individuales a través de dos rendijas, un electrón produce un punto único en la pantalla de detección (el tipo de objeto que se esperaría dada la presencia de la partícula o corpúsculos) pero se desarrolla un patrón de interferencia que es típico de las ondas si tenemos muchos electrones. Feynman et al. (1965) afirmaron: "cada electrón pasa por ambas rendijas simultáneamente, interfiriendo consigo mismo" (Vol. III, p.1-8). No es el caso de que algunos electrones pasen por una rendija mientras otros lo hagan por la otra; cada electrón individual está en una superposición de pasar por cada rendija también, este comportamiento ha sido verificado experimentalmente no solo con electrones per se, sino también con átomos, moléculas e incluso grandes moléculas de 60 átomos de carbono (fullerenos) que son lo suficientemente grandes como para ser sustancias atómicas.

La superposición no es una rareza de algunas partículas, sino una teoría universal en el campo de la mecánica cuántica pero cuando medimos por cuál rendija pasa el electrón, el patrón de interferencia parece desaparecer, con esto se puede decir que medir colapsa la superposición a un estado conocido.

La medición en la mecánica cuántica es un asunto completamente diferente en comparación con su contraparte clásica (Griffiths, 2005) "la medición no se trata de introducir una propiedad previamente existente, sino de crear una cierta propiedad de alguna forma" (p.4). Desde un punto de vista pedagógico, la superposición es una tarea desafiante. Como Singh (2001) describe en su investigación sobre conceptos erróneos de los estudiantes, "muchos estudiantes hoy en día malinterpretan la superposición como ignorancia clásica, es decir, creyendo que la partícula está realmente en un estado u otro (aunque en realidad no lo sabemos) en lugar de que está de hecho en un estado nuevo y diferente" (p.887).

Esta confusión es lógica dado a que nada en nuestra experiencia cotidiana se comporta como una superposición cuántica por ejemplo las monedas lanzadas al aire son caras o sellos (nunca sabemos cuál sale hasta que miramos) y nunca están verdaderamente en ambos estados a la vez.

2.2.2 LA CUANTIZACIÓN DE LA ENERGÍA Y OTRAS MAGNITUDES.

Mientras que la superposición podemos definirla como aquello que constituyen, en términos cuantitativos, los estados que componen el fenómeno conocido como "estados a ser", la cuantización es un proceso natural por el cuál algunas magnitudes físicas solo pueden asumir valores discretos con lo cuál la energía fue la primera en ser reconocida como cuantizada, fue la teoría de los cuantos de luz de Planck, pero más tarde se reveló que muchas otras magnitudes, como el momento angular y la carga eléctrica, también tienen cuantización y esto nos lleva a que la energía tiene un efecto observable directo.

Los átomos solo pueden generar y absorber luz en estas frecuencias y, como resultado, dan las líneas espectrales características ahora observadas en espectroscopía. Estas líneas espectrales forman una huella digital para cada elemento, ya que todo en la naturaleza tiene su propio nivel de energía discreto y cuantizado (medido en el espectro atómico).

Según Eisberg & Resnick (1985), “La espectroscopía atómica proporciona evidencia experimental directa e inequívoca de la cuantización de la energía; las líneas discretas que observamos son manifestaciones visibles de transiciones entre niveles de energía cuantizados” (p.156) entonces ¿Por qué ocurre la cuantización? La respuesta surge de la naturaleza ondulatoria de la materia, que De Broglie sugirió en 1924, una partícula que está encerrada en una región del espacio, un electrón en un átomo, una partícula en una caja, por ejemplo, debe cumplir ciertas condiciones de contorno, al igual que una cuerda de guitarra solo puede vibrar en ciertos modos en ambos extremos. “Siempre que tenemos confinamiento, obtenemos cuantización” explica Griffiths (2005). Las condiciones de contorno limitan las posibles soluciones de la ecuación de Schrödinger a conjuntos discretos “(p.33) con esto no se necesita postular la cuantización artificialmente: es inevitable en matemáticas, cuando se aplica con condiciones físicas apropiadas.

Por otro lado, la cuantización tiene una ventaja educativa sobre la superposición: es más fácil de ver, y hay más evidencia y ayudas visuales accesibles para el experimento. La cuantización puede presentarse de manera efectiva en analogías entre pasos discretos y rampas continuas, y utilizando espectroscopía básica, en un entorno experimentalmente apropiado que puede ilustrarse en el aula (Müller, 2002) (p.202). Se muestra a los estudiantes las líneas de color exactas en un espectro de emisión y, por lo tanto, pueden ver de primera mano que la energía atómica está cuantizada.

La accesibilidad de la cuantización representaría un gran paso para enseñar un concepto cuántico. La superposición y la cuantización no son conceptos de entidades diferentes, sino que están estrechamente relacionados entre sí en la estructura de la mecánica cuántica. La cuantización especifica qué tipos de estados son posibles (por ejemplo, el estado de la energía, como estados con distintos E_1, E_2, E_3, E_4, etc.) y la superposición permite que el sistema exista en combinación lineales de estos estados con esto un sistema puede encontrarse en un estado de energía definida, entonces sí se hace una medición de la energía, el resultado será siempre el mismo con certeza. O puede encontrarse en una superposición de varios estados propios de la energía con energías distintas, entonces si se realiza la medida de energía aparecerán uno de los valores permitidos con probabilidades definidas por los coeficientes de la superposición.

Esta combinación de conceptos ofrece explicaciones sobre fenómenos que serían absolutamente incomprensibles si únicamente se contempla uno de estos principios. Para ilustrarlo, es suficiente con pensar en el fenómeno del efecto túnel cuántico, en el cual una partícula es capaz de atravesar

una barrera de potencial pese a que clásicamente no tendría energía suficiente para hacerlo. Si se da una fórmula de este tipo es porque en la función de onda de todo el sistema hay una superposición en la que aparecen ambas partes del sistema barrera; es decir, hay amplitudes en ambos lados de la barrera, si bien con amplitudes diferentes. La probabilidad de atravesar la barrera depende de la cuantización de la energía de la partícula: si la partícula está en un estado de energía diferente, aparecerá en el otro lado de la barrera con una probabilidad distinta. Tal y como argumentan Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017), en su revisión que aborda sobre la enseñanza de la mecánica cuántica, "una interpretación correcta de la mecánica cuántica requiere de entender tanto la superposición como la cuantización, así como también la forma en que interactúan" (p. 5).

Por lo tanto, no es suficiente con enseñar la superposición y la cuantización; lo que se requiere es que los alumnos sean capaces de ver cómo estos conceptos van de la mano y cómo juntos alimentan el comportamiento cuántico que se encuentra presente. Este es precisamente uno de los objetivos que tiene el uso de herramientas experimentales como la trampa de iones: crear un contexto real a partir del cual se pueda discutir cómo ambas ideas pueden ser abordadas desde una sola perspectiva.

2.3 LA TRAMPA DE IONES

Una trampa de iones, un dispositivo que emplea campos electromagnéticos para aprisionar las partículas cargadas en determinada zona del espacio. Las trampas de iones fueron desarrolladas Wolfgang Paul, Hans Dehmelt y Norman Ramsey durante la década de 1950, siendo reconocidos con el Premio Nobel de Física en el 1989 por dicho trabajo. El principio básico consiste en crear un pozo de potencial electromagnético que mantenga a los iones cerca del centro de la trampa. Sin embargo, esto tiene una limitación muy importante y conocida como teorema de Earnshaw: no es posible generar un pozo de potencial tridimensional estable utilizando simplemente campos eléctricos o magnéticos estáticos.

Las trampas de Paul, el tipo de trampa de iones más utilizado para demostraciones o con fines didácticos, evitan esta limitación mediante el uso de campos eléctricos de radiofrecuencia que cambian con el tiempo. Tal y como apunta Ghosh (1995) "a pesar de que el campo cambia rápidamente de dirección el efecto neto promediado en el tiempo es el de un potencial de

confinamiento efectivo que mantiene los iones cerca del centro" (p. 45). La configuración habitual tiene un electrodo en forma de anillo al que se le aplica un voltaje en frecuencia de radio (que varía normalmente entre 1-10 MHz), y dos electrodos de tapa en forma hiperbólica ubicados por encima y por debajo del anillo, normalmente conectados a tierra.

para emplear la trampa de iones como recurso pedagógico de manera efectiva coma es necesario distinguir dos regímenes físicos de funcionamiento: el régimen clásico y el régimen cuántico. Esta distinción no es meramente técnica cómo, sino que determina qué fenómenos pueden ser observados y, en consecuencia, qué contenidos pueden enseñarse de manera rigurosa y coherente según el tipo de trampa utilizada.

En el caso del funcionamiento habitual en laboratorios escolares (temperatura ambiente, sin ningún tipo de enfriamiento adicional), los iones de una trampa de Paul funcionan como un sistema de partículas clásicas, y su movimiento es completamente correcto describirlo a partir de las ecuaciones de Newton aplicadas al potencial electromagnético. Los iones oscilan alrededor del punto central de la trampa con unas amplitudes que dependen de su energía térmica. En este régimen clásico, fenómenos cuánticos como la superposición de estados de movimiento o el entrelazamiento entre iones no pueden ser observados. Como explican Leibfried et al. (2003), "para observar comportamiento genuinamente cuántico en una trampa de iones, el ion debe enfriarse hasta el nivel fundamental de movimiento, lo cual requiere técnicas sofisticadas de enfriamiento láser" (p. 239).

El régimen cuántico es aquel que se da cuando la energía térmica del ion, expresión que podemos denotar como $k_\beta T$, es comparable o incluso menor que el espaciamiento entre niveles de energía cuánticos que equivale a $\hbar\omega$, con ω como la frecuencia de oscilación existente en el pozo de potencial. Para trampas que sean típicas es necesario que las temperaturas sean del orden de micro-Kelvins, lo cual solo puede ser alcanzado mediante técnicas de enfriamiento láser Doppler seguidas de enfriamiento de bandas laterales resueltas y todo ello en condiciones de ultra-alto vacío. Como apuntan Wineland et al. (1998), "solamente en este régimen cuántico el ion puede ser preparado en superposiciones de distintos estados de movimiento, además de que múltiples iones pueden entrelazarse cuánticamente" (p. 1639). Todas estas capacidades han convertido a las trampas de iones cuánticos en una de las plataformas más prometedoras para computación cuántica.

Dicha diferencia tiene consecuencias directas y muy significativas para el uso educativo. Para una trampa de iones que sea construida en el aula, necesariamente funcionará en el régimen clásico. Por tanto, no puede tener la posibilidad de demostrar fenómenos cuánticos como superposición o entrelazamiento. Walteros (2016) en su propuesta pedagógica que "al respecto, es necesario ser transparentes con los alumnos sobre qué es lo que se observa realmente versus qué es lo que se está usando como analogía" (p. 85). La trampa clásica puede demostrar confinamiento, movimiento oscilatorio, y frecuencias características, pero no es posible que muestre superposición cuántica real en absoluto.

2.3.1 LA TRAMPA DE IONES COMO PUENTE CONCEPTUAL

Si no es posible observar la superposición cuántica en una trampa de iones clásica y no se puede mostrar cómo se produce dicho fenómeno, ¿Qué valor pedagógico tiene trabajar con representaciones del dispositivo para conectar conceptos cuánticos? Esta pregunta puede explicarse desde el punto de vista de usarla como un puente conceptual cuidadosamente construido que permita al alumnado ir desarrollando intuitivamente ideas relacionadas con o sobre ideas cuánticas y no como evidencia clara de fenómenos cuánticos. Como lo menciona Tovar (2021) en su trabajo sobre las actividades experimentales para la mecánica cuántica "las herramientas experimentales en la enseñanza de conceptos cuánticos no tienen que mostrar fenómenos cuánticos para ser valiosas; pueden trabajar como sistemas análogos que comparten propiedades estructurales importantes con sistemas cuánticos" (p.56). En el caso de la trampa de iones, las propiedades estructurales en común son:

Confinamiento observable: El alumnado puede observar cómo el confinamiento electromagnético mantendrá al ion en una región del espacio. Esto permite desarrollar intuitivamente cómo el confinamiento en mecánica cuántica da lugar a la cuantización de la energía. Ya comentaba Griffiths (2005), "siempre que una partícula esté confinada, sus niveles de energía son cuantizados" (p. 33). La trampa hace evidente el concepto abstracto de "confinamiento".

Frecuencias características: Las frecuencias en las que las oscilaciones del ion en la trampa se llevan a cabo están determinadas por las distintas propiedades de la trampa (masa del ion, intensidad de campo, geometría de la trampa). La postura del ion, aunque clásica, no impide utilizar la existencia de las frecuencias características para presentar la idea de que los sistemas confinados presentan propiedades discretas. Esto es lo que, precisamente, señala Müller y Wiesner

(2002) cuando dicen que “las analogías resultan útiles si se discute explícitamente en qué caso las analogías sirven y cuando no” (p. 205).

Pozo de potencial: Los alumnos pueden entender el pozo de potencial electromagnético que tiene atrapado el ion, permitiendo tener una referencia para poder discutir después pozos de potencial cuánticos donde los niveles de energía están cuantizados. El ion “atrapado” en el centro puede ser visualizado de forma natural, facilitando así que el concepto abstracto de “pozo de potencial” sea más amigable.

Este es un punto de partida para la discusión de la mecánica cuántica, esta progresión desde lo observable hacia lo teórico refleja auténticamente cómo los científicos construyen conocimiento.

La clave del éxito pedagógico, como enfatiza Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017), es “combinar la trampa de iones con otros experimentos o demostraciones que ilustren aspectos complementarios de la mecánica cuántica” (p.12). Por ejemplo, usar espectroscopía simple para demostrar cuantización de energía atómica, experimentos con polarizadores para ilustrar aspectos de superposición, y la trampa de iones para visualizar confinamiento. Esta aproximación multifacética permite a los estudiantes construir una comprensión más robusta desde múltiples perspectivas.

2.4 ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA: DESAFÍOS Y ENFOQUES PEDAGÓGICOS

La Mecánica Cuántica presenta desafíos únicos en la enseñanza que la distinguen de la mayoría de los campos de la física, Según Singh (2001) en su descripción detallada de su investigación sobre la adquisición de la mecánica cuántica por parte de los estudiantes, “en este contexto, los estudiantes enfrentan problemas conceptuales desafiantes más allá de simplemente no conocer las matemáticas; tienen que ver con intuiciones muy arraigadas sobre el funcionamiento del mundo” (p. 886). La pregunta original a esta cuestión es la autocontradicción de las ideas cuánticas.

Como observan Feynman et al. (1965) que “nadie realmente entiende la mecánica cuántica” en el sentido de que tenemos una “imagen intuitiva directa” de los fenómenos cuánticos que, si se entendieran, serían el movimiento de bolas de billar (Vol. III, p. 1-1).

Durante toda su vida, los estudiantes han formulado intuiciones basadas en la física clásica del mundo macroscópico estas intuiciones, cuando se encuentran con la mecánica cuántica, no solo son insuficientes sino engañosas. Por ejemplo, por intuición de que algo necesita estar “aquí” o “allí” (pero no debe haber un “allí más”) nos enfrentamos al principio de superposición.

El segundo obstáculo es la falta de accesibilidad a los fenómenos cuánticos, la mayoría ocurren a escalas (nanómetros, picosegundos) o condiciones (ultra alto vacío, temperaturas cercanas al cero absoluto) que no pueden ser vistas o replicadas directamente en un aula promedio. Esto lo afirman Müller y Wiesner (2002), “limita nuestras posibilidades de involucrarnos directamente con los fenómenos cuánticos y nos obligará a una forma de experimentos indirectos, analogías, simulaciones y discusiones conceptuales” (p. 200) esto nos lleva a que los estudiantes no tienen experiencia directa, lo que dificulta que desarrollen intuiciones sobre la mecánica cuántica.

El tercer desafío es la dialéctica entre el rigor matemático y la accesibilidad conceptual, una descripción objetiva de la mecánica cuántica requeriría álgebra lineal avanzada, espacios de Hilbert y formalismos matemáticos que no suelen encontrarse en un estudiante de secundaria. Aunque eso probablemente produzca malentendidos continuos, quieres simplificar: Si no lo simplificas lo suficiente, deja todo completamente fuera de alcance, esto lo menciona Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017): “el dilema de encontrar el equilibrio adecuado entre el rigor y la accesibilidad es uno de los problemas pedagógicos centrales encontrados en la enseñanza de la mecánica cuántica a nivel secundario” (p.3).

2.5 EL ROL DE LA EXPERIMENTACIÓN EN LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

En cuanto a la enseñanza de la mecánica cuántica, se ha encontrado que, aunque muchos fenómenos cuánticos básicos no pueden observarse en aulas ordinarias, eso no hace que la experimentación sea inviable o inútil, Como han señalado Müller y Wiesner (2002), “es posible diseñar experiencias experimentales accesibles, aunque no demuestren directamente todos los fenómenos cuánticos, y que también proporcionen una fuerte evidencia empírica para ayudar a los estudiantes a comprender conceptos abstractos” (p. 202).

La experimentación en la enseñanza de la mecánica cuántica puede verse diferente por diversas razones por un lado el fenómeno del mundo real de interés también es observable con experimentos directos (es decir, líneas espectrales discretas con un espectroscopio simple proporcionan evidencia directa de la cuantización). Los experimentos análogos emplean sistemas más simples para demostrar conceptos análogos, como ondas en una cuerda que indican diferentes modos de vibración. Los experimentos indirectos ven los efectos de los fenómenos cuánticos (polarizadores para estudiar las acciones de los fotones sin ver cada fotón por separado).

Como afirma Tovar (2021) para que los experimentos sean pedagógicamente útiles, no tienen que explicar directamente los fenómenos cuánticos; pueden ser sistemas análogos con similitudes estructurales con los sistemas cuánticos (p. 48).

El truco es la transparencia: ser claro con los estudiantes sobre lo que están viendo directamente versus lo que están usando como analogía o inferencia dada esa honestidad intelectual no diluye sus méritos pedagógicos, sino que permite a los estudiantes adquirir una apreciación más compleja de la lógica operativa del conocimiento científico.

Este es el caso con la trampa de iones, aunque funciona solo en el paradigma clásico y en particular dentro del aula, es una herramienta muy útil cuando se aplica con un nivel adecuado de comprensión conceptual. Los estudiantes observan el confinamiento para ver cómo se restringe, y luego experimentan con variables que influyen en cómo reaccionaría el sistema, permitiéndoles usar estas observaciones para guiar sus conversaciones sobre lo que sucedería en el límite cuántico.

En palabras de Walteros (2016), “Las actividades experimentales bien diseñadas, aumentadas con discusión reflexiva, pueden ser altamente efectivas en el desarrollo de la comprensión conceptual de la mecánica cuántica” (p. 92)

Por otro lado, existen mecanismos pedagógicos que la investigación ha documentado como particularmente efectivos para enseñar la cuantización, la espectroscopía ofrece evidencia experimental directa y visualmente atractiva. (Müller & Wiesner 2002) observan líneas de colores definidos y no un espectro continuo que proporciona evidencia de que una energía atómica está cuantizada visualmente (p. 205).

Esto se complementa con analogías entre pasos discretos versus rampas continuas, y la idea de cómo el confinamiento crea cuantización, hay una mayor complejidad cuando se trata de

superposición, ya que no hay analogías clásicas ideales disponibles. Sin embargo, el experimento de la doble rendija (incluso en simulación o a través de ver videos de experimentos reales) puede ser muy exitoso como nos lo menciona Krijtenburg-Lewerissa et al. “cuando el encuentro de los estudiantes es forzado por este modelo de interferencia, desarrollan el tipo de conflicto cognitivo productivo que impulsa un cambio conceptual al obligarlos a considerar el patrón que emerge 'partícula por partícula' e 'interferencia' con el tiempo” (2017).

Los polarizadores son similares a la superposición en términos de cómo se emplean los materiales experimentales, durante la polarización de la luz a través de un polarizador, cada fotón pasa completamente o es completamente bloqueado (comportamiento cuántico), pero la cantidad de luz que pasa depende de su ángulo (comportamiento probabilístico). Este tipo de experimentación, aunque exige una interpretación cuidadosa, comienza a desarrollar intuiciones cuánticas en los estudiantes. Como Singh (2001) ha señalado, “el desarrollo de la intuición cuántica es un proceso gradual que requiere exposición repetida a fenómenos cuánticos desde múltiples perspectivas” (p. 890).

Por último, pero no menos importante, la educación debería transmitirse de manera más explícita. Tal como Lederman y Lederman (2014) han sugerido, “la mecánica cuántica proporciona excelentes ejemplos de cómo la ciencia desarrolla modelos para fenómenos que desafían la intuición, cómo los científicos manejan la incertidumbre y cómo las teorías evolucionan con el tiempo” (p. 608) esto nos sirve para discutir el desarrollo histórico de la teoría cuántica, las controversias sobre su interpretación y cómo los científicos crean conocimiento sobre lo no observable puede permitir que los estudiantes desarrollen una comprensión más profunda de la ciencia en sí misma que simplemente la comprensión cuántica, la cual inevitablemente usarán a lo largo de sus vidas.

2.6 LA INDAGACIÓN

La investigación en educación en física ha informado sistemáticamente algunos conceptos erróneos comunes que los estudiantes construyen al explorar la mecánica cuántica. Singh (2001) registra que uno de los más comunes es tratar la superposición cuántica como ignorancia clásica. Así que los estudiantes asumen que al decir que una partícula está en una superposición de dos estados, esa es exactamente la posición en la que deberíamos estar, pero no logramos identificar

cuál de ellos, esta interpretación malinterpreta completamente el aspecto central de lo cuántico: el sistema literalmente nunca tiene un valor hasta que lo medimos.

Un concepto erróneo común es que la incertidumbre en la mecánica cuántica es similar a la de los experimentos clásicos, solo un artefacto de malas mediciones que finalmente se superaron usando una mejor tecnología lo cual no es así. El principio de incertidumbre de Heisenberg como escribió Griffiths (2005), "no es un problema de nuestros instrumentos, sino un carácter de la naturaleza porque ciertos pares de propiedades simplemente no pueden tener valores definidos simultáneamente" (p. 109) con esto los estudiantes también confunden frecuentemente conceptos clásicos como "trayectoria" con partículas cuánticas. Por ejemplo, muchos imaginan al electrón del átomo siguiendo alguna orientación (aunque tal vez borrosa o probabilística) en la órbita.

Como explican Müller y Wiesner (2002), "la noción misma de trayectoria se vuelve absurda en la mecánica cuántica; el electrón no se mueve 'de un lugar a otro' de una manera que podamos visualizar en términos clásicos" (p. 203). La función de onda no se refiere a una partícula moviéndose en un camino esta representa una distribución de probabilidad que varía con el tiempo.

Sin embargo, estos conceptos erróneos no son 'malentendidos' elementales del tipo que se pueden rectificar con razonamiento explícito. Como sugieren Posner et al. (1982) en su influyente teoría sobre la transformación conceptual, "las concepciones previas son generalmente pegadizas, útiles en la vida cotidiana y resistentes al cambio" (p. 212) es necesario que ocurra un cambio conceptual: los estudiantes deben estar insatisfechos con sus concepciones anteriores, la nueva concepción también debe ser comprensible, plausible y, por lo tanto, más interesante o fructífera.

Pero esto implica que la educación y el aprendizaje efectivos de la mecánica cuántica deben abarcar no solo la provisión de conceptos correctos, sino también la confrontación explícita de conceptos erróneos mediante un conflicto cognitivo cuidadosamente diseñado.

A la luz de estos desafíos, ¿qué enfoque pedagógico es más eficiente para enseñar mecánica cuántica? la investigación sobre la indagación sugiere que la enseñanza basada en la indagación es particularmente adecuada para este campo.

La indagación es un enfoque impulsado por los estudiantes que se centra en explorar a través de preguntas y descubrimientos sistemáticos, así como en crear y compartir ideas en lugar de recibir información pasivamente. La indagación científica se define por el Consejo Nacional de

Investigación (2000) como las "diversas formas en que los científicos estudian el mundo natural y proponen explicaciones utilizando evidencia de su trabajo y las actividades de los estudiantes en las que desarrollan conocimiento y comprensión de ideas científicas" (p. 23) por eso este enfoque proviene del constructivismo, la creencia de que los estudiantes crean activamente su propio entendimiento y conocimiento, en lugar de simplemente consumirlo de fuentes externas. Por varias razones, la indagación es especialmente útil en la enseñanza de la mecánica cuántica.

En primer lugar, permite generar un conflicto cognitivo productivo, como sostienen Posner et al. (1982), la transformación conceptual significativa exige que los estudiantes experimenten insatisfacción con sus concepciones previas sobre la naturaleza de estas ideas. La mecánica cuántica no deja duda de que esto se convierte en una oportunidad natural: cuando los estudiantes hacen predicciones sobre futuros resultados potenciales basados en intuiciones tradicionales y luego ven que la experiencia de la realidad experimental no está en sintonía con sus predicciones, surge un conflicto cognitivo y se disparan pensamientos profundos. En segundo lugar, la investigación se basa en evidencia y no en intuición. En la mecánica cuántica, las intuiciones basadas en la experiencia macroscópica a menudo son engañosas. Como comentan Feynman et al. (1965), "en la mecánica cuántica, la naturaleza se comporta de una manera que no coincide con nuestra experiencia directa" (Vol. III, p.1-1). La indagación, que enfatiza las conclusiones extraídas de la evidencia observacional en lugar de suposiciones previas, brinda a los estudiantes la oportunidad de desarrollar el hábito de ser más orientados a los datos que de confiar en intuiciones previas. Ese es el tipo exacto de pensamiento científico que necesitan para comprender el mundo contraintuitivo de la teoría cuántica. En tercer lugar, la indagación ofrece un modelado progresivo. De la misma manera que la mecánica cuántica ha evolucionado, los estudiantes pueden construir y revisar modelos poco a poco. Pueden aprender un modelo de partículas, entender sus limitaciones después de experimentos de interferencia, construir un modelo de ondas, avanzar hacia un modelo dual de onda-partícula y, finalmente, trabajar hacia un modelo más avanzado derivado de funciones de onda. Como escriben Windschitl et al. (2008), "el modelado científico—construir, evaluar y revisar modelos basados en evidencia—es una práctica central de la ciencia que también debería ser central en la educación científica" (p. 941). Pero es importante entender que no todas las formas de indagación funcionan. Como advierten Kirschner et al. (2006), "la indagación mínimamente guiada puede ser contraproducente, especialmente para principiantes con poco conocimiento previo" (p. 75). Para los conceptos más complejos, como la cuántica, cierto

nivel de dirección y estructura es crítico. La indagación estructurada o guiada en la que se permite a los estudiantes de secundaria navegar a través de diversas avenidas de investigación, pero es un equilibrio que cae dentro del marco proporcionado por el maestro.

2.6.1 LA ENSEÑANZA POR INDAGACIÓN

La secuencia didáctica que se propone se basa en la enseñanza por indagación, un modelo pedagógico con amplio respaldo disponible de la investigación en el campo de la educación científica.

Un punto clave de la indagación es el liderazgo activo del estudiante en su búsqueda de aprendizaje, siendo cuestionado sobre fenómenos interesantes en un entorno controlado mientras se le pide que formule preguntas, desarrolle explicaciones tentativas, busque evidencia y construya concepciones más complicadas. Esto contrasta marcadamente con el proceso de enseñanza expositiva que requiere que el maestro transmita información en forma memorizada o simplemente memorice la información y la replique.

Como se refiere el Consejo Nacional de Investigación (2000), “la indagación científica significa las múltiples maneras en que los científicos estudian el entorno natural y hacen explicaciones basadas en evidencia, así como las tareas que los estudiantes realizan para construir conocimiento y comprensión de las ideas científicas” (p. 23).

En el mundo de la mecánica cuántica, el cuestionamiento es un dispositivo especialmente valorado para provocar las tensiones cognitivas necesarias para que los estudiantes cuestionen las suposiciones clásicas arraigadas Como postulan Posner et al. (1982) en su influyente teoría sobre el cambio conceptual, “para que ocurra un cambio conceptual significativo, los estudiantes deben estar insatisfechos con sus concepciones existentes, encontrar la nueva concepción inteligible, verla como plausible y darse cuenta de que es más fructífera” (p. 214).

La indagación ayuda a este proceso al desafiar sistemáticamente las expectativas de pensamiento convencional de una manera que expone a los estudiantes a datos experimentales que demuestran la necesidad de una explicación cuántica.

La secuencia está organizada y estructurada alrededor del modelo 5E (Engage, Explore, Explain, Elaborate, Evaluate) implementado por el proyecto BSCS (Biological Sciences Curriculum Study) y ampliamente utilizado en la educación científica (Bybee et al., 2006) para facilitar este procedimiento. Las cinco fases clave son, (1) Engage (un fenómeno/pregunta provocativa presentada que crea interés); (2) Explore (los estudiantes interactúan directamente con las herramientas/simulaciones/experimentos), luego reciben una elaboración formal; (3) Explain (términos y conceptos científicos presentados con correlación directa), (4) Elaborate (aplicado) y luego aplicado a nuevas situaciones (expuestas) mientras (5) Evaluate (formativa y sumativa) el proceso de aprendizaje esto lo explica Bybee (2006), "este marco no es inflexible sino maleable, por lo que se puede mover cíclicamente entre etapas a medida que surgen nuevas necesidades en el curso del desarrollo del sistema" (p. 3).

Un principio pedagógico clave en el modelo es que reconocemos imágenes previas y las formas en que lidiamos activamente con esas ideas o sea los estudiantes no llegan como tabulas rasas sino con intuiciones clásicas formadas a partir de la experiencia de toda una vida procesando objetos macroscópicos.

Aunque estas intuiciones son efectivas en escenarios cotidianos, son barreras epistemológicas para descubrir fenómenos cuánticos, en palabras de Singh (2001), "muchos estudiantes piensan erróneamente en la superposición como ignorancia clásica que la partícula está realmente en un estado u otro, pero simplemente no lo sabemos en lugar de darse cuenta de que está realmente en una forma nueva y diferente" (p. 887). Aquí la secuencia contiene una serie de momentos concebidos explícitamente para llevar estas concepciones anteriores a un enfoque más claro con preguntas clave, crear conflicto cognitivo mostrando evidencia que no puede entenderse a través del lente del pensamiento clásico, y finalmente permitir que se creen nuevas concepciones cuánticas a través de la discusión, el modelado y la síntesis colectiva.

Esta propuesta asume una postura didáctica basada en el cambio conceptual, en la que se reconoce que la mecánica cuántica no puede enseñarse como una extensión de la física, sino como una reconstrucción conceptual.

CAPÍTULO: 3 METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE Y DISEÑO METODOLÓGICO

Este estudio se sitúa en el paradigma de la investigación-acción educativa, un método que permite al docente-investigador evaluar críticamente su enseñanza para refinar su práctica docente de manera organizada, Villalobos Galvis, F. H. (2014). , sostienen que "el objetivo de estos proyectos de investigación es abordar problemas cotidianos y mejorar prácticas. Existen, sobre todo, para proporcionar información que sirva de guía para programas, procesos y cambios estructurales" (p. 72).

La investigación-acción es el proceso cíclico e iterativo que consta de fases que consisten en planificación, acción, observación y reflexión que interactúan mutuamente (Elliott, 1993) dado este enfoque, es especialmente adecuado para la investigación actual ya que investiga procesos educativos relacionados con la enseñanza de la mecánica cuántica y busca cambiarlos a través de la estructuración y ejecución de una nueva propuesta didáctica radical. Como afirma Villalobos Galvis, F. H. (2014). , "pretende transformar realidades, de modo que los participantes tomen conciencia de su papel en este proceso. Se puede decir que investiga e interviene al mismo tiempo" (p. 72).

Se construye sobre tres principios básicos: el problema tiene los encuestados adecuados, el problema importa porque es una cuestión personal, su naturaleza puede influir en gran medida en el comportamiento de los encuestados, así como en el enfoque cualitativo según los ecosistemas naturales (McKernan, 2001; citado por Hernández et al., 2010).

La investigación-acción surge de un proceso pragmático que está ligado a un entorno, y que se caracteriza por la constante interacción de reflexión y acción, identificando necesidades, haciendo un diagnóstico y presentando posibles soluciones al problema. Como argumentó Villalobos Galvis, F. H. (2014). "en general, el diseño incluye tres fases: observar (la construcción de un esquema del problema, la recopilación de datos), pensar (analizar e interpretar el problema) y actuar (resolver el problema, implementar mejoras)" (Hernández et al., 2010, p. 72).

Este ciclo ayuda a dar forma a la investigación actual, el enfoque adoptado es mayormente cualitativo, valorando una comprensión profunda de los procesos de aprendizaje y cómo los

estudiantes conceptualizan los fenómenos cuánticos sobre la evaluación estadística de los resultados.

Esto refleja la intención original del problema de investigación: cómo los estudiantes crean significados alrededor de ideas abstractas y contraintuitivas como la superposición y la cuantización, el método cualitativo permite extraer toda la profundidad y sutilezas de estas funciones cognitivas a partir de trabajos escritos, charlas en el aula, interpretaciones simbólicas y observaciones de interacción durante los procesos. Stake (1998) afirma que "el investigador cualitativo" tiene experiencia y valora cómo las personas entienden y dan sentido a su experiencia como conocimiento;" (p. 42) subrayando así la noción de que el conocimiento se funda en la experiencia y los procesos de comprensión.

La elección de utilizar la investigación-acción con un enfoque cualitativo también reconoce las propiedades específicas de la enseñanza de la mecánica cuántica para la enseñanza en la escuela secundaria. Dado que se trata de enseñar a introducir conceptos que son diferentes de lo que se espera de los estudiantes a través de un currículo normal y que requiere estrategias pedagógicas innovadoras, documentar no solo si los estudiantes aprenden sino cómo aprenden (si aprenden), qué desafíos experimentan, qué conceptos erróneos desarrollan y las formas en que las actividades diseñadas ayudan a superar barreras es una necesidad. Como Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017), mencionan que investigación sobre la enseñanza de la mecánica cuántica en niveles introductorios dirigidos para estudiantes necesita metodologías que reflejen la complejidad del cambio conceptual y los problemas particulares que enfrentan los estudiantes (p.2).

Una comprensión profunda no puede ocurrir hasta que el investigador se involucre en el proceso con investigación cualitativa, participando en el proceso educativo, observando y documentando y reflexionando críticamente sobre sus muchas etapas de ejecución e implementación. Además, dado que la investigación-acción se trata de la acción en sí misma, el diseño debe ser flexible y adaptable. Aunque comienza con una secuencia didáctica planificada, el investigador está dispuesto a modificarla tan pronto como se realicen observaciones sobre la implementación. Esta flexibilidad no es un defecto metodológico, sino todo lo contrario, como dice McKernan (1999), "es una fortaleza que hace posible responder a las verdaderas necesidades de los estudiantes y a las condiciones concretas del contexto educativo" (p. 25). La aprobación de pares (que se

describirá en unas pocas líneas a continuación) aporta un nuevo rigor a este proceso, exponiendo la propuesta a la evaluación crítica de aquellos en los mundos de la educación en física.

Población proyectada para futura implementación: la secuencia está diseñada para una población de entre 15 y 16 años. Este grupo de edad es especialmente adecuado para introducir conceptos de mecánica cuántica, como encontraron Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) nos dice que la capacidad cognitiva que los estudiantes de secundaria son capaces de entender fenómenos cuánticos a través de las estrategias pedagógicas adecuadas, construyendo puentes conceptuales desde su conocimiento previo con esto, se reconocen las siguientes habilidades científicas esperadas en la población objetivo: la secuencia didáctica asume que los estudiantes de grado decimo han desarrollado habilidades científicas básicas durante su educación secundaria, incluyendo.

Habilidades procedimentales:se espera que los estudiantes sean capaces de seguir procedimientos experimentales, realizar observaciones sistemáticas, organizar datos y utilizar instrumentos de medición básicos. Como argumentaron Lederman y Lederman (2014), estas habilidades se basan y facilitan el desarrollo del pensamiento científico de novato a avanzado.

Habilidades comunicativas: Verbalización y escritura. Discusión grupal y el razonamiento para apoyar lo que dijeron. Estas habilidades, sin embargo, son especialmente importantes en el enfoque de indagación guiada de esta investigación en la que la co-construcción de significado es central (Posner et al., 1982).

Habilidades tecnológicas: Algunos conocimientos para acceder a herramientas digitales (computadora, navegador web) para usar simuladores virtuales, pero con algunas limitaciones basadas en el contexto institucional. Esta competencia es crucial ya que la secuencia del curso contiene simulaciones PhET (Physics Education Technology es un proyecto de simulaciones interactivas desarrollado por la Universidad de Colorado Boulder, orientada a la enseñanza de las ciencias mediante entornos digitales que promueven la exploración activa y la visualización de fenómenos abstractos).

3.2 CONCEPCIÓNES PREVIAS ANTICIPADAS Y BARRERAS COGNITIVAS ESPERADAS

La literatura en la enseñanza de la física ha documentado extensamente las concepciones previas que los estudiantes de educación media típicamente traen al abordar conceptos sobre mecánica cuántica. Esas concepciones, aunque funcionales en contextos cotidianos donde la física clásica es suficiente, constituyen barreras epistemológicas significativas para la comprensión de fenómenos cuánticos. Identificar esas concepciones previas reportadas en investigaciones anteriores resulta fundamental para el diseño de la secuencia didáctica propuesta ya que permite anticipar los obstáculos conceptuales que los estudiantes se enfrentarían y estructurar actividades específicamente orientadas a generar el conflicto cognitivo necesario para el cambio conceptual

Según Müller y Wiesner (2002), menos del 20% de los estudiantes de secundaria son capaces de explicar adecuadamente el comportamiento dual onda partícula de la luz. La investigación muestra que la mayoría de los estudiantes conceptualizan la luz exclusivamente como una onda que se propaga continuamente, sin reconocer su naturaleza dual. Esta Concepción clásica arraigada constituye la primera barrera conceptual que la secuencia didáctica busca confrontar mediante la presentación de evidencia experimental (fotografía sobre la dualidad onda partícula. Que se encuentra en el anexo 1) que no puede explicarse completamente desde el modelo ondulatorio clásico.

Singh (2001), documento que esta dificultad no es meramente superficial, sino que refleja una comprensión intuitiva profundamente arraigada sobre cómo funciona el mundo físico. Los estudiantes tienden a clasificar los fenómenos físicos en categorías mutuamente excluyentes heredadas de la física clásica (onda O partícula, nunca ambas) y la evidencia de comportamiento dual genera genuinamente un desacuerdo cognitivo que debe ser abordado explícitamente en el proceso de enseñanza.

Por otro lado, la investigación de Singh (2001) revela que los estudiantes interpretan habitualmente la energía como una variable continua que puede tomar cualquier valor arbitrario dentro de un rango. Esta Concepción está directamente en conflicto con la cuantización de la energía característica de los sistemas cuánticos confinados. Como señalan Sinarcas y Solbes (2013), estos malentendidos son particularmente obstinados y resistentes al cambio, requiriendo intervenciones

didácticas específicamente diseñadas para evidenciar la naturaleza discreta de los niveles de energía.

La secuencia didáctica propuesta aborda esta concepción mediante analogías explícitas (escaleras vs. rampas) y evidencia experimental directa (espectros atómicos discretos), buscando que los estudiantes confronten la inadecuación de su modelo continuo de la energía para explicar fenómenos observables como las líneas espectrales características de cada elemento químico.

Además, Posner et al. (1982) identificaron que los estudiantes mantienen típicamente una visión determinista de la realidad física, asumiendo que todos los eventos están completamente determinados por las condiciones iniciales del sistema o que hay algo que nos predice que sucederá con certeza. Esta concepción está profundamente arraigada en la experiencia cotidiana con objetos macroscópicos, donde la física clásica newtoniana proporciona predicciones deterministas precisas.

La idea de superposición cuántica contradice fundamentalmente este determinismo intuitivo. Como documenta Singh (2001), los estudiantes tienden a malinterpretar la superposición como "ignorancia clásica" sobre un estado ya definido. Sin embargo, la mecánica cuántica establece que el sistema no se encuentra en uno u otro estado de manera oculta, sino que existe en un único estado de superposición, descrito matemáticamente como una combinación lineal de estados base, cuya naturaleza solo se define probabilísticamente en el momento de la medición. Esta distinción es precisamente uno de los focos centrales de la secuencia didáctica, particularmente en la sesión dos, donde se confronta explícitamente mediante la analogía de la moneda clásica vs cuántica.

El reconocimiento de estas concepciones previas documentadas en la literatura informó directamente el diseño de las actividades de la secuencia. Siguiendo a Posner et al. (1982), para que ocurra un cambio conceptual significativo, los estudiantes deben: (1) experimentar insatisfacción con sus concepciones previas, (2) encontrar la nueva concepción inteligible, (3) considerarla plausible, y (4) reconocer que es más fructífera para explicar los fenómenos observados.

La estructura de la secuencia responde a este marco teórico del cambio conceptual:

- **Sesión 1** fue diseñada para generar insatisfacción mediante la presentación de evidencia (dualidad onda-partícula) que no puede explicarse con modelos clásicos.

- **Sesión 2** introduce los conceptos de superposición y cuantización de manera inteligible mediante analogías cuidadosamente estructuradas (moneda, escaleras/rampas).
- **Sesión 3** busca que estos conceptos se vuelvan plausibles y fructíferos al conectarlos con aplicaciones tecnológicas reales.

Esta estructura fundamentada en concepciones previas documentadas en investigaciones anteriores las constituye la base para anticipar cómo los estudiantes construirían significado durante una eventual implementación de la secuencia

3.3 SOBRE LA SECUENCIA DIDÁCTICA

El diseño de la secuencia didáctica propuesta se fundamentó en los criterios metodológicos establecidos por Díaz Barriga (2013) en su "Guía para la elaboración de una secuencia didáctica". Esta elección responde al objetivo específico de diseñar una propuesta pedagógicamente coherente.

La secuencia didáctica se define "como un conjunto de actividades de aprendizaje estructuradas de manera clara, que están organizadas de una manera muy específica para lograr un objetivo educativo" (Díaz Barriga, 2013, p. 1). Este autor enfatiza que la mejor secuencia de aprendizaje debe ser internamente comprensible: debe haber objetivos de aprendizaje explícitos, actividades significativas que respondan a dichos objetivos, recursos contextualmente apropiados y una evaluación que coincida con lo que realmente se espera que aprenda un estudiante.

Díaz Barriga (2013) dice que todo trabajo didáctico debe tener apertura, desarrollo y cierre. Para la apertura, "el objetivo es recuperar el conocimiento previo de los estudiantes, movilizar su interés en el tema y hacer explícitos los objetivos de aprendizaje" (p. 4). En el elemento de desarrollo, "se introducen las actividades clave en las que los estudiantes interactúan con el material para construir y desarrollar competencias" (p. 5). Al final, el momento final "se consolida la síntesis de lo aprendido, se evalúa el logro de los objetivos y se establecen los vínculos con futuros aprendizajes" (p. 6).

La secuencia de este estudio presenta explícitamente estos tres momentos en cada sesión, sirviendo para generar un marco pedagógico consistente y bien justificado, otro punto clave señalado por Díaz Barriga (2013) es que las actividades de diseño deben buscar involucrar activa y significativamente a los estudiantes en el proceso de aprendizaje. Este autor sostiene que "las

actividades (deberían) ser más que simples ejercicios reproductivos, sino que también deberían involucrar a los estudiantes en tareas cognitivas de orden superior, como análisis, síntesis, evaluación y creación" (p. 8).

Por lo tanto, las secuencias incluyen actividades que involucran a los estudiantes no solo en el aprendizaje sobre superposición y cuantización, sino también en la interpretación de fenómenos: construcción de explicaciones colectivas, diseño de sus propias analogías, debate de ideas y formación de representaciones que reflejen su apropiación conceptual. Como explica Díaz Barriga (2013), "cuando los estudiantes hacen cosas propias a partir de los conceptos estudiados, demuestran un nivel más profundo de comprensión que cuando repiten definiciones" (p. 9).

Díaz Barriga (2013) propone que la evaluación no debe realizarse únicamente al final de la secuencia. "Al principio, se debe considerar la evaluación diagnóstica para recopilar ideas previas; después de eso, la evaluación formativa durante el proceso con retroalimentación junto con ajustes para mejorar los resultados; y al final, la evaluación sumativa para evaluar el logro de los objetivos" (p. 11). La secuencia diseñada combina estos tres tipos de evaluación: la prueba previa actúa como un diagnóstico inicial; las producciones y discusiones durante las sesiones continúan siendo una evaluación formativa, y la prueba posterior, junto con las producciones finales, comprenden la evaluación sumativa del rendimiento. Tal correlación con los principios de Díaz Barriga promueve aún más la coherencia pedagógica del diseño.

3.4 ESTRUCTURA GENERAL DE LAS TRES SESIONES

La secuencia didáctica propuesta consta de tres sesiones articuladas que van desde la exploración de fenómenos contraintuitivos hasta la construcción de un campo conceptual sobre superposición y cuantización, tal como se expresa en su comprensión sobre la trampa de iones. Cada sesión cumple con la estructura propuesta por Díaz Barriga (2013): apertura, desarrollo y cierre, para garantizar la coherencia pedagógica y la continuidad conceptual.

La Tabla 1 proporciona un resumen de las tres sesiones, su objetivo principal y duración, y los conceptos centrales cubiertos.

Sesión	Titulo	Duración total	Objetivo general	Conceptos clave

1	Interpretación de fenómenos extraños en la física	70-80 min	Reconocer que algunos fenómenos relacionados con la luz no se pueden explicar completamente con la física clásica.	Dualidad onda-partícula, límites de la física clásica, papel del observador.
2	Cuantización de la energía y superposición de estados	60-80 min	Comprender los conceptos de superposición cuántica y cuantización de la energía mediante analogías y simulaciones.	Superposición de estados, cuantización diferencias clásico-cuántico.
3	exploración del principio de la trampa de iones	65-70 min	Integrar los conceptos de superposición y cuantización mediante la representación de una trampa de iones	Confinamiento, niveles discretos de energía, aplicaciones tecnológicas.

Tabla 1- Resumen de las 3 sesiones.

La duración total de la secuencia: aproximadamente 3 horas de clase (195-215 minutos)

Ahora bien, cada sesión se organiza siguiendo el modelo de apertura-desarrollo-cierre, con momentos específicos que responden a intenciones pedagógicas diferenciada, la tabla 2 desglosa esta estructura.

Sesión	**momento**	**Nombre del momento**	**Duración**	**Propósito pedagógico**	**Tipo de actividad**
1	Apertura	Explorando la naturaleza de la luz	15-20 min	Activar conocimientos previos y generar interés sobre el comportamiento de la luz	diagnóstica-individual
1	Desarrollo	Confrontación con fenómenos extraños	25-40 min	presentar evidencia científica que desafía concepciones previas	Colaborativa-interpretativa

1	Cierre	Reflexión final	10 min	estimular reflexión crítica sobre límites de la física clásica y papel del observador	discusión guiada
2	Apertura	¿Qué es un estado?	15-20 min	diferenciar entre estado clásico y estado cuántico	Diagnóstica-comparativa
2	Desarrollo	Superposición y cuantización: simulaciones virtuales	30 min	explorar experimentalmente mediante simulación de los conceptos abstractos	experimental-digital
2	Cierre	Analogías y síntesis	15 min	integral aprendió mediante metáforas y representaciones propias	Creativa-integradora
3	Apertura	Visualización guiada	20 min	comprender el funcionamiento de la trampa de iones y su relevancia	Expositiva-contextual
3	Desarrollo	Representación práctica	25 min	experimentar analíticamente el confinamiento mediante materiales sencillos	Experimental-analógica
3	Cierre	Conexión conceptual	20 min	Articular todos los aprendizajes de las 3 sesiones	Integradora-reflexiva

Tabla 2- momentos de cada sesión

La elección de organizar la secuencia en tres sesiones presentando este esquema particular se puede justificar a partir de criterios pedagógicos y didácticos, con esto decimos lo siguiente:

1**. De lo fenomenológico a lo conceptual**: La sesión inicial se centra en fenómenos contraintuitivos (propiedades de la luz) sin la distracción del formalismo como Feynman et al. (1965) destacaron, “no hay nada que puedas imaginar que sea probable que esté en el mar.” (III, p.1-1), esto hace necesario pasar de la observación empírica para construir gradualmente modelos teóricos.

2. Desarrollo de la disonancia cognitiva requerida: Siguiendo a Posner et al. (1982), la insatisfacción con concepciones anteriores es necesaria para el cambio conceptual. Este conflicto entre el mundo vivido, considerándolo de abajo hacia arriba e inocentemente causal, a partir del cual buscamos significado añadiendo conceptos de reducción, es precisamente lo que la primera sesión prepara a los estudiantes para afrontar utilizando un enfoque de enseñanza diseñado para permitir elementos de teoría clásica que se encuentran en serios aprietos como evidencia verdadera.

3**. Equilibrio entre abstracto y concreto**: La mecánica cuántica es en este sentido la bestia negra de la educación científica, simplemente porque involucra nociones extremadamente abstractas como la superposición y la función de onda, que no tienen un equivalente macroscópico tangible. Es aquí donde la secuencia sigue saltando hacia adelante y hacia atrás entre:

- Prototipos tangibles (monedas, piquis, simulaciones visuales)
- Conceptos abstractos (superposición, cuantización)
- Aplicaciones (trampa de iones, computación cuántica)

Este equilibrio corresponde a una sugerencia de Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) de que la enseñanza de la mecánica cuántica debería incorporar dos representaciones de conceptos y perspectivas (p.12).

4. Respeto al tiempo cognitivo: El curso toma un estimado de 60-80 minutos por sesión (más o menos):

- Activación de conocimientos previos (15-20 minutos)
- Exploración en profundidad (25-40 min)
- Síntesis y reflexión (10-20 min)

Este patrón temporal de visitas concuerda con la necesidad de leer lo contraintuitivo y que requiere tiempo y/o exposiciones para explorar desde diferentes direcciones.

5. Integración progresiva de complejidad: La sesión 3 no abarca nuevos conceptos, sino que los aplica en un contexto tecnológico coherente y relevante. Esto permite:

- Consolidación conceptual a través de la aplicación
- Apreciación de la relevancia científico-tecnológica
- Cierre significativo de la secuencia

Como Tovar (2021) ha observado en su investigación, "las tareas experimentales bien concebidas... acompañadas de una discusión reflexiva, pueden impactar profundamente el desarrollo conceptual de la mecánica cuántica" (p. 92), justificando así el clímax representacional de una trampa de iones como un punto final adecuado para la secuencia.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

Este capítulo presenta los resultados del proceso de validación teórica-didáctica de la secuencia didáctica mediante la revisión por pares académicos. Es importante señalar que esta validación constituye una evaluación de la coherencia interna, pertinencia didáctica y viabilidad del diseño propuesto, mas no una medición de su efectividad pedagógica real, la cual solo podría obtenerse mediante la implementación con población estudiantil. Como señala Van den Akker (1999), la evaluación de expertos sirve como un primer nivel importante de validación que permite identificar fortalezas y debilidades del diseño antes de proceder a pruebas empíricas en contextos reales de aula. Los resultados aquí presentados se organizan en torno a las categorías emergentes identificadas durante el análisis de los comentarios de los nueve evaluadores participantes: coherencia pedagógica, rigor conceptual, claridad de instrucciones, viabilidad práctica, y aspectos a mejorar.

La validación de la secuencia didáctica se llevó a cabo mediante un proceso de revisión por pares académicos, involucrando a nueve profesores licenciados en física, distribuidos en tres grupos en donde el perfil de los evaluadores fue intencionalmente heterogéneo para asegurar una diversidad de perspectivas: cinco futuros profesores vinculados a la línea de profundización "La Actividad Experimental para la Enseñanza de la Física" de la Universidad Pedagógica Nacional, y cuatro

profesores con amplia experiencia docente en educación secundaria y superior. Esta composición permitió que la validación considerara tanto visiones actualizadas sobre didáctica experimental como la experiencia práctica acumulada en contextos reales de aula.

El proceso de evaluación se estructuró en sesiones de revisión grupal con una duración aproximada de dos horas, durante las cuales los evaluadores analizaron la secuencia didáctica completa (tanto las actividades para estudiantes como la guía docente). Se les solicitó examinar la propuesta desde múltiples dimensiones: coherencia interna entre objetivos y actividades, adecuación al nivel educativo, claridad de las instrucciones, solidez conceptual en mecánica cuántica, viabilidad práctica en contextos escolares reales, pertinencia de los recursos sugeridos, y correspondencia entre los criterios de evaluación y los objetivos planteados.

Los evaluadores realizaron anotaciones directas sobre el documento, señalando aspectos específicos que requerían mejora o que consideraban particularmente acertados. Posteriormente, se desarrolló una socialización común donde cada grupo compartió sus hallazgos principales, críticas constructivas y sugerencias de mejora.

Estas intervenciones fueron documentadas mediante notas de campo del investigador, registrando no solo el contenido de los comentarios sino también el énfasis y la recurrencia de ciertos temas en la discusión. El análisis de los comentarios de los evaluadores permitió identificar patrones temáticos que se organizaron en los siguientes criterios:

4.1COHERENCIA PEDAGÓGICA Y ESTRUCTURA DE LA SECUENCIA

Los tres grupos de evaluadores coincidieron en valorar positivamente la estructura general de la secuencia, reconociendo una progresión lógica que parte de la problematización (Sesión 1), avanza hacia la conceptualización (Sesión 2) y culmina con la integración mediante una aplicación tecnológica concreta (Sesión 3). Uno de los evaluadores del primer grupo señaló explícitamente: “La secuencia presenta una clara articulación entre las tres sesiones, donde cada momento prepara conceptualmente al siguiente. El uso del conflicto cognitivo en la primera sesión es particularmente acertado como estrategia para desestabilizar las concepciones clásicas de los estudiantes”.

Los evaluadores destacaron que la estructura de apertura-desarrollo-cierre propuesta por Díaz Barriga (2013) se implementa de manera consistente en cada sesión, lo que facilita tanto la implementación por parte del docente como el seguimiento por parte de los estudiantes. Sin embargo, un comentario recurrente en los tres grupos fue la necesidad de hacer más explícita para el docente la transición entre la Sesión 1 y la Sesión 2. Específicamente, los evaluadores sugirieron agregar una breve actividad de conexión al inicio de la Sesión 2 que retomara explícitamente los fenómenos observados en la primera sesión (dualidad onda-partícula) y los vinculara con la pregunta sobre la moneda que introduce el concepto de superposición.

Respecto al modelo pedagógico basado en la indagación y el ciclo 5E de Bybee, los evaluadores reconocieron su presencia implícita, pero sugirieron hacerlo más explícito en la guía docente. Un evaluador del segundo grupo comentó: “Sería valioso incluir en la guía una tabla que muestre cómo cada actividad específica corresponde a una fase del modelo 5E. Esto ayudaría a docentes menos familiarizados con este enfoque a comprender la lógica pedagógica subyacente”. Esta sugerencia fue incorporada posteriormente en la sección 2.6.1 del presente trabajo.

4.2 RIGOR CONCEPTUAL Y TRATAMIENTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Uno de los aspectos más cuidadosamente evaluados fue la solidez conceptual del tratamiento de la mecánica cuántica, dado que se trata de un tema complejo que frecuentemente genera malentendidos tanto en estudiantes como en materiales educativos. Los evaluadores vinculados a la línea de Actividad Experimental, con formación específica en física moderna, prestaron particular atención a este aspecto.

En términos generales, los tres grupos coincidieron en que la secuencia mantiene un equilibrio adecuado entre accesibilidad y rigor conceptual. El primer grupo de evaluadores señaló específicamente: “La propuesta logra introducir los conceptos de superposición y cuantización sin simplificaciones excesivas que puedan generar concepciones erróneas. La distinción explícita entre estados clásicos y cuánticos en la Sesión 2 es particularmente valiosa”. Sin embargo, identificaron un punto crítico que requería fortalecimiento: la explicación del concepto de superposición en el Momento 1 de la Sesión 2.

El comentario textual de uno de los evaluadores fue especialmente detallado y fundamentado:

"*Cuando los estudiantes discutan el concepto de 'estado', profundice en la diferencia entre el estado de un sistema en la física clásica (por ejemplo, la posición y velocidad de una pelota) y en la cuántica. Explique que, en la física cuántica, el estado no se describe con valores definidos, sino con una función de onda que contiene la 'probabilidad' de que la partícula se encuentre en distintos lugares o tenga distintos valores de energía. El ejemplo de la moneda es perfecto para ilustrar la superposición de estados: en la física clásica, la moneda siempre está en un estado definido (cara o sello) aunque no lo sepamos. En la física cuántica, es como si la moneda existiera en un estado superpuesto de 'cara Y sello' al mismo tiempo, y solo 'escogiera' uno de esos estados cuando la miramos (cuando la medimos).*"

Este comentario reveló que, aunque la analogía de la moneda estaba presente en la secuencia, no se había desarrollado suficientemente la diferencia fundamental entre ignorancia clásica (no saber en qué estado está) y superposición cuántica (estar genuinamente en ambos estados). Como señala Singh (2001) en su investigación sobre concepciones erróneas, esta es precisamente una de las confusiones más persistentes en estudiantes: "muchos estudiantes malinterpretan la superposición como ignorancia clásica, es decir, creyendo que la partícula está realmente en un estado u otro (aunque en realidad no lo sabemos) en lugar de que está de hecho en un estado nuevo y diferente" (p.887).

En respuesta a esta retroalimentación, se modificó esencialmente el Momento 1 de la Sesión 2, agregando una sección explícita donde el docente debe contrastar claramente:

- En física clásica: La moneda girando en el aire YA está en un estado definido (cara o sello), simplemente no lo sabemos. Nuestra ignorancia no cambia la realidad física.
- En física cuántica: La moneda cuántica NO está en un estado definido. Existe literalmente en una superposición de ambos estados, y solo al medir "colapsa" a uno de ellos.

Esta modificación fue validada posteriormente con el mismo grupo de evaluadores, quienes confirmaron que la nueva versión abordaba adecuadamente la problemática identificada.

4.3 CLARIDAD DE INSTRUCCIONES Y ADECUACIÓN AL NIVEL EDUCATIVO.

Los comentarios sobre claridad de instrucciones y adecuación al nivel educativo fueron particularmente abundantes, reflejando la experiencia práctica de los evaluadores con docencia en secundaria. Estos comentarios se concentraron principalmente en la Sesión 1, específicamente en las actividades iniciales de exploración sobre la luz.

Uno de los evaluadores señaló múltiples aspectos de redacción y secuenciación que requerían ajustes. Sus comentarios fueron especialmente valiosos por su orientación práctica. Por ejemplo, sobre la actividad inicial de ideas previas, comentó: “Si es para niños se me ocurre ¿Cómo te imaginas la luz?” y sobre otra pregunta: “¿Qué características tiene la luz?”

Estos comentarios, aunque breves, señalaban una problemática real: el lenguaje utilizado en algunas preguntas era excesivamente formal o abstracto para estudiantes de 14-16 años. La pregunta original “¿Crees que la luz se comporta de alguna forma en especial?” podía resultar ambigua o poco motivadora. En respuesta, se reformuló esta sección, agregando tres preguntas más específicas y concretas:

1. Dibuja cómo te imaginas la luz (actividad visual más accesible)
2. ¿La luz se comporta como corpúsculo (partícula) o como onda? Justifica
3. ¿Qué experimentos conoces que muestren el comportamiento de la luz?

Otro evaluador cuestionó la pertinencia de algunas preguntas para el nivel escolar: “¿es apropiada la pregunta para el nivel escolar? tal vez el estudiante al leerla y ser muy compleja se puede aburrir”

Este comentario se refería específicamente a la pregunta “¿Cómo explicarían el fenómeno de dualidad de la luz con su conocimiento en física?” Los evaluadores señalaron que el término “dualidad” podía resultar intimidante y que la pregunta requería una contextualización más clara. Como resultado, se reformuló esta actividad, agregando un escenario guiado que el evaluador había sugerido:

“En lugar de solo pedirles que expliquen el fenómeno con su conocimiento, puede proponerles un escenario: 'Si la luz fuese solo una onda, ¿qué esperaríamos ver? ¿Y si fuese solo una partícula?

¿Cómo podría la física clásica explicar un comportamiento dual?'. Esto les obligará a usar su conocimiento de la física clásica para tratar de resolver un problema que esta teoría no puede explicar.”

Esta modificación transformó una pregunta abierta potencialmente abrumadora en un andamiaje estructurado que guía el razonamiento de los estudiantes paso a paso, coherente con los principios de la indagación guiada.

4.4 TRATAMIENTO DEL ARTÍCULO CIENTÍFICO Y USO DE EVIDENCIAS.

Varios comentarios convergieron en la necesidad de ampliar y contextualizar mejor el artículo científico sobre la dualidad onda-partícula presentado en la Sesión 1. Un evaluador señaló:

“El párrafo ¿es un resumen, una declaración? Creo que hace falta explicar qué es y de dónde viene. La interpretación que se pide es en base solo al párrafo de la guía o del artículo. Es muy corto, siento que falta información y la interpretación se puede dar bajo afirmaciones explícitas del artículo.”

Y posteriormente agregó: “Debería haber una pregunta específica sobre el artículo, Que colime la información que se quiere analizar.”

Estos comentarios evidenciaron una debilidad en el diseño original: el artículo presentaba información muy condensada sin suficiente contexto científico, y las preguntas asociadas eran demasiado generales. En respuesta, se realizaron dos modificaciones sustanciales:

Primero, se amplió significativamente el contenido del artículo científico, agregando:

- Contexto del experimento (Instituto Federal Suizo de Tecnología, Lausana)
- Explicación de qué es el comportamiento ondulatorio (patrones de interferencia)
- Explicación de qué es el comportamiento corpuscular (fotones)
- Implicaciones teóricas (confirmación de dualidad onda-partícula propuesta por Einstein y De Broglie)
- Referencias históricas (efecto fotoeléctrico, teoría de De Broglie)

Segundo, se restructuraron las preguntas asociadas, haciéndolas más específicas y progresivas:

1. Describe lo que entiendes de la imagen que los científicos capturaron
2. ¿En qué dirección crees que viaja la luz en este experimento?
3. Según lo que has aprendido hasta ahora en física, ¿puede un objeto ser dos cosas diferentes al mismo tiempo?
4. ¿Qué fenómenos conoces donde la luz se descomponga o forme patrones? (arcoíris, prismas, burbujas)
5. Escribe tu interpretación completa del artículo

Esta progresión guía a los estudiantes desde la descripción simple hasta la interpretación compleja, coherente con el modelo de indagación guiada.

4.5 USO DE ANALOGÍAS Y SUS LIMITACIONES.

Un aspecto que recibió comentarios particularmente detallados fue el uso de analogías, específicamente la representación de la trampa de iones con el piquis (bolita) y el recipiente elástico en la Sesión 3. Los evaluadores reconocieron el valor pedagógico de esta representación analógica, pero enfatizaron la necesidad crítica de discutir explícitamente sus limitaciones. Un evaluador fue especialmente claro al respecto:

“La analogía con la piquis y el recipiente elástico es excelente para ilustrar la idea de un potencial de confinamiento. Sin embargo, es crucial que el docente guíe una reflexión profunda sobre las limitaciones de esta analogía. Pida a los estudiantes que piensen en las diferencias: la piquis tiene una posición definida y una energía continua, mientras que el ion cuántico no. El ion en su estado fundamental tiene una energía mínima (energía de punto cero) que la piquis no posee, y además puede estar en una superposición de posiciones dentro de la trampa.”

Este comentario conecta directamente con las advertencias de investigadores como Walteros (2016), quien en su trabajo sobre actividades experimentales para mecánica cuántica enfatiza: “es necesario ser transparentes con los alumnos sobre qué es lo que se observa realmente versus qué es lo que se está usando como analogía” (p. 85). La analogía clásica puede ser pedagógicamente

útil como punto de partida, pero puede generar malentendidos profundos si no se discuten explícitamente sus límites.

En respuesta a esta retroalimentación, se agregó una sección completa titulada “Reflexión crítica importante (para el docente)” en el Momento 2 de la Sesión 3, que incluye:

1. Una tabla comparativa explícita entre la piquis clásico y el ion cuántico:
    - Posición: definida vs. indefinida hasta la medición
    - Energía: continua vs. discreta (cuantizada)
    - Trayectoria: observable vs. no tiene trayectoria clásica
    - Energía mínima: puede ser cero vs. energía de punto cero
    - Superposición: imposible vs. posible
2. Tres preguntas de reflexión guiada para que el docente las plantee a los estudiantes:
    - ¿La piquis puede estar en dos lugares al mismo tiempo?
    - ¿La piquis puede tener cualquier energía?
    - La el piquis está quieto en el centro, ¿tiene energía?
3. Una nota explícita señalando: “Esta reflexión es fundamental para que los estudiantes no piensen que el comportamiento cuántico es 'igual' al clásico, solo más pequeño.”

Esta modificación transforma la actividad de una simple demostración analógica a un ejercicio metacognitivo donde los estudiantes deben confrontar los límites de las analogías clásicas para comprender fenómenos cuánticos. Como señalan Müller y Wiesner (2002), “las analogías resultan útiles si se discute explícitamente en qué caso las analogías sirven y cuándo no” (p. 205).

4.6 SECUENCIACIÓN Y COHERENCIA ENTRE ACTIVIDADES.

Varios comentarios apuntaron a problemas de secuenciación que afectaban la coherencia interna de algunas sesiones un evaluador realizó múltiples observaciones sobre el orden de las actividades, particularmente en la Sesión 1:

“antes de entrar al momento 2 pasar al experimento de Young, para discutir alrededor” “Representación de código de barras (centrar todo en la superposición de estados)”

Estos comentarios señalaban que el experimento de la doble rendija (experimento de Young) debía introducirse más temprano en la secuencia, antes del Momento 2, para que sirviera como evidencia empírica que contextualice las discusiones posteriores. El evaluador sugirió específicamente usar otro video y agregó: “cómo hacer uso de este tipo de videos para acercar a los estudiantes a estos conceptos” “generar alfabetización científica”

Estas observaciones reflejan una preocupación pedagógica importante: la secuencia original presentaba conceptos abstractos antes de proporcionar experiencias observacionales que les dieran sentido. Como señala el modelo de indagación, los estudiantes deben tener oportunidades de explorar fenómenos antes de que se introduzcan explicaciones formales (fase Explore antes que Explain en el modelo 5E).

En respuesta, se reestructuró el Momento 2 de la Sesión 1, agregando una nueva “Actividad 3: Experimento de Young y el código de barras cuántico” que incluye:

- Estrategia de uso del video (antes, durante, después)
- Preguntas específicas para observación
- Discusión sobre el “código de barras” (patrón de interferencia)
- Conexión explícita con la idea de superposición

Esta modificación mejoró sustancialmente la coherencia de la sesión, proporcionando evidencia empírica antes de pedir interpretaciones abstractas.

4.7 PROPÓSITOS Y OBJETIVOS: PARA EL DOCENTE O PARA LOS ESTUDIANTES.

Un comentario particularmente interesante de un evaluador cuestionó la decisión de hacer explícitos los propósitos y objetivos en el material para estudiantes:

"¿Los estudiantes deberían saber explícitamente el propósito y el objetivo? El propósito y el objetivo está más ligado a la planeación de la secuencia que de la propia actividad. Puede que el objetivo condicione a los estudiantes a llegar solo al objetivo y no dejar que el libre albedrío"

Este comentario plantea una cuestión pedagógica profunda sobre transparencia vs. apertura en el proceso de aprendizaje. Por un lado, la literatura sobre metacognición sugiere que hacer explícitos los objetivos de aprendizaje ayuda a los estudiantes a autorregular su proceso. Por otro lado, en un enfoque de indagación genuina, revelar los objetivos podría "contaminar" el proceso de descubrimiento.

Tras discutir este punto con los evaluadores, se tomó la decisión de crear dos versiones del material: una guía completa para el docente (con propósitos, objetivos, fundamentos teóricos y orientaciones didácticas) y un material simplificado para estudiantes (con solo las actividades, preguntas y recursos necesarios). Esta solución permite al docente decidir cuánta información metodológica compartir según su contexto específico y filosofía pedagógica.

Aspectos de lenguaje y terminología local

Un comentario breve pero significativo de un evaluador señaló: "En Colombia no decimos piquis."

Aunque parezca menor, este tipo de observaciones son cruciales para la viabilidad de implementación de la secuencia en contextos colombianos. El término "piquis" es utilizado en España y algunos países latinoamericanos, pero en Colombia se usa "piquis", "bolita" o "piquis de vidrio" según la región. Usar terminología no familiar puede generar confusión innecesaria o distracción del objetivo conceptual de la actividad.

Este comentario se atendió en toda la secuencia, reemplazando sistemáticamente términos no locales por "piquis" y agregando explicaciones alternativas ("bolita pequeña") para asegurar comprensión en diferentes regiones del país.

Viabilidad práctica y recursos

Los evaluadores con experiencia en docencia secundaria prestaron particular atención a la viabilidad práctica de implementación. Reconocieron como fortaleza que todos los recursos digitales utilizados (simulaciones PhET, videos) son de acceso libre y gratuito, y que los materiales físicos requeridos (piquis, recipientes, globos, monedas) son económicos y fácilmente disponibles en contextos colombianos.

Un evaluador del tercer grupo señaló: "La propuesta es realista en términos de recursos. A diferencia de otras secuencias sobre mecánica cuántica que he revisado, esta no requiere equipamiento especializado costoso. La recomendación de realizar el experimento de doble rendija con láser verde es opcional pero no indispensable, ya que la secuencia puede implementarse completamente con las simulaciones digitales."

Sin embargo, señalaron que sería valioso incluir en la guía docente estimaciones más precisas de tiempo por actividad y sugerencias de cómo adaptar la secuencia si no hay acceso a computadores o internet estable. Esta sugerencia llevó a agregar en la sección final de la secuencia una subsección de "Adaptabilidad y contextos de implementación" que contempla escenarios con y sin recursos tecnológicos.

4.8 SOBRE LA RÚBRICA DE EVALUACIÓN.

La rúbrica de evaluación incluida al final de la secuencia fue valorada positivamente por su claridad y por contemplar múltiples dimensiones del aprendizaje (comprensión conceptual, aplicación de analogías, trabajo colaborativo, uso de recursos, producción integradora). Los evaluadores no sugirieron modificaciones sustanciales a la rúbrica, aunque uno comentó: "Sería útil agregar algunos ejemplos concretos de qué constituye un 'nivel alto' vs. 'nivel medio' en cada criterio, especialmente para docentes que no están familiarizados con evaluación por rúbricas."

Esta sugerencia no fue incorporada directamente en la rúbrica para mantenerla concisa, pero se agregó una nota en la guía docente señalando que los descriptores deben interpretarse contextualmente según las características específicas del grupo de estudiantes.

Con esto el proceso de validación por pares resultó ser significativamente más valioso que una simple verificación de corrección. Como señala Van den Akker (1999), "la evaluación de expertos

sirve como un primer nivel importante de validación con respecto a pruebas reales" (p.8), y efectivamente, los comentarios recibidos permitieron identificar y corregir debilidades que no eran evidentes.

Los evaluadores coincidieron en que la secuencia presenta coherencia interna entre objetivos, actividades y evaluación, donde se mantiene un equilibrio adecuado entre rigor conceptual y accesibilidad pedagógica y se incorpora estrategias variadas que atienden a diferentes estilos de aprendizaje y resulta viable para implementación en contextos educativos con recursos limitados. Estas valoraciones sugieren que la propuesta cumple con los estándares de calidad esperados para una secuencia didáctica fundamentada.

El valor más importante del proceso no fue la confirmación de fortalezas sino la identificación de debilidades específicas que pudieron ser atendidas antes de cualquier implementación con estudiantes. Como señala Stake (1998), "en la investigación cualitativa debemos considerar no solo lo que se dijo, sino cómo se dijo" (p. 42), y efectivamente, la recurrencia de ciertos temas (necesidad de explicar mejor la superposición, importancia de discutir limitaciones de analogías, problemas de secuenciación) en los tres grupos de evaluadores independientes indicó que no eran observaciones superficiales sino aspectos que requerían atención prioritaria.

El hecho de que no hubiera diferencias sustanciales entre los comentarios de los tres grupos (a pesar de sus perfiles diferentes) fortalece la validez de las observaciones. Cuando evaluadores con formación en didáctica experimental y evaluadores con experiencia práctica en aula coinciden en señalar las mismas fortalezas y debilidades, esto sugiere que estos aspectos son inherentes al diseño de la propuesta y no artefactos de sesgos individuales.

Finalmente, el proceso de validación confirmó que la secuencia didáctica basada en la representación de la trampa de iones constituye una propuesta pedagógicamente coherente, conceptualmente sólida y viable para introducir los conceptos de superposición y cuantización en estudiantes de grado décimo. Las modificaciones implementadas a partir de la retroalimentación fortalecieron significativamente la propuesta, preparándola para una eventual implementación y evaluación con población estudiantil real, lo cual constituye el siguiente paso en el desarrollo de esta línea de investigación.

Es fundamental reiterar que los resultados de esta validación por pares, aunque altamente valiosos para mejorar el diseño, no constituyen evidencia sobre la efectividad real de la secuencia para promover el aprendizaje de los conceptos de superposición y cuantización. Dicha evidencia solo podría obtenerse mediante la implementación controlada de la secuencia con estudiantes de bachillerato, acompañada de instrumentos de recolección de datos (pretest, postest, grabaciones de audio, producciones estudiantiles, entrevistas) que permitan documentar los procesos de construcción conceptual, identificar dificultades emergentes y evaluar el cambio conceptual logrado. El presente trabajo cumplió con su objetivo de desarrollar una propuesta didáctica que incorpore la trampa de iones como recurso experimental y de modelización para la enseñanza de los conceptos de superposición y cuantización en el marco de la enseñanza de la mecánica cuántica.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

-La física cuántica no puede enseñarse como una extensión o profundización de la física clásica, esta es quizás el aprendizaje más contundente que deja el proceso del diseño de la secuencia, la superposición y la cuantización no son conceptos difíciles en el sentido de que se requiera más matemática o más experiencia previa, sino que exigen una ruptura epistemológica genuina. Intentar enséñalos desde la continuidad conceptual de la física clásica produce necesariamente concepciones erróneas, por qué la intuición clásica no es un punto de partida incompleto, si no activamente obstructiva, reconocer esto obligó a replantear el diseño en su núcleo, no se trata de simplificar la cuántica, sino de crear las condiciones para que el estudiante experimente y acepte su incompatibilidad con el mundo macroscópico.

-La trampa de iones demostró ser un eje articular efectivo por razones válidas por los evaluadores: visualiza el concepto abstracto de confinamiento electromagnético mediante la modelización experimental análoga accesible, establece un puente conceptual entre regímenes clásicos y cuánticos permitiendo la discusión explícita de diferencias fundamentales y conectar conceptos teóricos con aplicaciones tecnológicas reales.

-El proceso de validación por pares dejó una enseñanza que va más allá de las modificaciones específicas que produjo: evidenció que las debilidades iniciales del diseño no eran errores de detalle sino síntomas de suposiciones implícitas sobre lo que los estudiantes ya saben. En particular, se asumía que el contraste clásico-cuántico emergería naturalmente de las actividades, cuando en realidad requiere ser construido de manera explícita y reiterada. Esto sugiere que en la didáctica de la física, la claridad conceptual del diseñador no garantiza la claridad conceptual del estudiante, y que someter la propuesta a la examinación no es un paso de legitimación formal sino un mecanismo para hacer visible los puntos ciegos que se pudieron haber tenido en el diseño de la secuencia didáctica.

-Una de las ideas que fue tomando forma a lo largo del proceso del diseño y validación es que los estudiantes de educación media probablemente tienen más capacidad de aproximación a conceptos cuánticos de lo que sugiere una gran parte de la literatura especializada. la revisión teórica y las decisiones pedagógicas tomadas durante el diseño llevan a pensar que el obstáculo principal no es la complejidad matemática sino la dimensión filosófica: las preguntas sobre qué es real, qué papel tiene el observador y si algo puede existir sin tener un estado definido, son precisamente el tipo de

interrogantes que despiertan curiosidad en los jóvenes. Esto sugiere que el punto de entrada más productivo no es el formalismo sino la perturbación filosófica, una hipótesis que el diseño propuesto deja planteada y que sólo la implementación en aula podrá confirmar o refutar.

finalmente, ese trabajo permite concluir que es posible diseñar propuestas rigurosas y pedagógicamente fundamentadas sobre mecánica cuántica para la educación media colombiana sin depender de equipamiento costoso ni prerrequisitos matemáticos avanzados, sin embargo, esta posibilidad tiene condiciones y es que se requiere una fundamentación epistemológica sólida, una selección cuidadosa de analogías que no reduzcan lo cuántico a lo clásico.

Referencias

Acevedo-Díaz, J. A., García-Carmona, A., Aragón-Méndez, M. M., & Oliva-Martínez, J. M. (2017).
Modelos científicos: Significado y papel en la práctica científica. *Revista Científica, 30*(3), 155–166. https://doi.org/10.14483/23448350.12288

Ayala Manrique, M. M., Garzón Barrios, M., & Malagón Sánchez, J. F. (2008).
Consideraciones sobre la formalización y matematización de los fenómenos físicos. En M. M. Ayala Manrique et al. (Eds.), *Los procesos de formalización y el papel de la experiencia en la construcción del conocimiento sobre los fenómenos físicos* (pp. 17–32). Universidad de Antioquia & Universidad Pedagógica Nacional.

Barinas, J. (2016).
Estimación y expresión de la incertidumbre en las medidas experimentales [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia]. http://bdigital.unal.edu.co/56648/7/jaimeorlandobarinasolaya.2016.pdf

Bybee, R. W., Taylor, J. A., Gardner, A., Van Scotter, P., Powell, J. C., Westbrook, A., & Landes, N. (2006).
The BSCS 5E instructional model: Origins and effectiveness. BSCS Science Learning.

Caballero Sahelices, M. C., & Guerrero Pino, L. E. (2013).
Principios de Mecánica Cuántica en la resolución de problemas de estructuras atómicas en estudiantes de Química. *Experiências em Ensino de Ciências, 8*(1), 1–15.

Cala Vitery, F., & Eslava, E. (2011).
Mecánica cuántica: Sobre su interpretación, historia y filosofía. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Campos, J. A. (2013).
Sistemas cuánticos individuales. *Educación Química, 24*(1), 1–14. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2013000100014

Castrillón, J. F. (2014).
Mecánica cuántica fundamental: Una propuesta didáctica. *Revista Brasileira de Ensino de Física, 36*(1), 1–12. https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000100023

Cuesta Beltrán, Y. J., & Mosquera Suárez, C. J. (2017).
Algunas reflexiones en torno a las implicaciones de la NdC en educación en ciencias: El caso de la enseñanza de la mecánica cuántica. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (43), 1–15. https://revistas.pedagogica.edu.co/index.php/TED/article/view/4834

Díaz Barriga, Á. (2013).
Guía para la elaboración de una secuencia didáctica. UNAM.

Dirac, P. A. M. (1967).
Principios de la mecánica cuántica (A. Montes, Trad.). Ariel.

Eisberg, R., & Resnick, R. (2006).
Física cuántica: Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas (2.ª ed.). Limusa.

Fanaro, M. A. (2007).
El método de caminos múltiples de Feynman como referencia para introducir los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica en la escuela secundaria. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física, 24*(1), 1–15.

Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1989).
Física, Vol. III: Mecánica cuántica. Addison-Wesley Iberoamericana.

Villalobos Galvis, F. H. (2014).
Competencias para la formulación de un proyecto de investigación Guía metodológica del Proyecto INVESTIC para docentes investigadores. Competencies for the formulation of a research project Methodological guide of the INVESTIC Project for research teachers.

Ghosh, P. K. (1995).
Ion traps. Oxford University Press.

Griffiths, D. J. (2005).
Introduction to quantum mechanics (2.ª ed.). Pearson Prentice Hall.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010).
Metodología de la investigación (5.ª ed.). McGraw-Hill.

Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006).
Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. *Educational Psychologist, 41*(2), 75–86. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_1

Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., & van Joolingen, W. R. (2017).
Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical Review Physics Education Research, 13*(1), 010109. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109

Lederman, N. G., & Lederman, J. S. (2014). *Research on teaching and learning of nature of science*. En N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of research on science education* (Vol. 2, pp. 600–620). Routledge.
https://www.researchgate.net/publication/263580033_Lederman_NG_Lederman_JS_2014_Research_on_Teaching_and_Learning_of_Nature_of_Science_In_N_G_Lederman_S_K_Abell_Eds_Handbook_of_Research_on_Science_Education_Volume_II_pp_600-620_New_York_NY_Routledge

Leibfried, D., Blatt, R., Monroe, C., & Wineland, D. (2003).
Quantum dynamics of single trapped ions. *Reviews of Modern Physics, 75*(1), 281–324. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.281

Malagón, F., Sandoval, S., & Ayala, M. (2013).
La actividad experimental: Construcción de fenomenologías y procesos de formalización. *Praxis Filosófica (nueva serie), 1*(36), 119–138. http://www.scielo.org.co/pdf/pafi/n36/n36a06.pdf

Maloney, D. P. (1994).
Research in problem solving: Physics. En D. Gabel (Ed.), *Handbook of research on the teaching and learning of science* (pp. 327–354). MacMillan.

McKernan, J. (1999).
Investigación-acción y currículum: Métodos y recursos para profesionales reflexivos (T. del Amo Martín, Trad.). Ediciones Morata.

Ministerio de Educación Nacional [MEN]. (2022).
Lineamientos curriculares y estándares básicos de competencias en ciencias naturales. MEN Colombia.

Müller, R., & Wiesner, H. (2002).
Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics, 70*(3), 200–209. https://doi.org/10.1119/1.1435346

Paul, W. (1990).
Electromagnetic traps for charged and neutral particles (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie International Edition in English, 29*(7), 739–748. https://doi.org/10.1002/anie.199007391

Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982).
Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education, 66*(2), 211–227. https://doi.org/10.1002/sce.3730660207

Rozo, M., Walteros, A., & Cortés, C. (2019).
La actividad experimental como una parte fundamental para la enseñanza de la física moderna: El caso de la mecánica cuántica. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (45), 191–206.

Alfonso, K. (2022). Micromundo para la enseñanza del concepto de sistema, estado y superposición desde la mecánica clásica y cuántica en estudiantes de grado octavo.. Recuperado de: http://hdl.handle.net/20.500.12209/18007

Sinarcas, V., & Solbes, J. (2013).
Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias, 31*(3), 9–25. https://doi.org/10.5565/rev/ec/v31n3.768

Singh, C. (2001).
Student understanding of quantum mechanics. *American Journal of Physics, 69*(8), 885–895. https://doi.org/10.1119/1.1365404

Stake, R. E. (1998).
Investigación con estudio de casos (R. Filella, Trad.). Ediciones Morata. (Obra original publicada en 1995 como *The art of case study research*).

Tovar, J. F. (2021).
La actividad experimental como estrategia para el acercamiento al concepto de medición de un sistema cuántico [Trabajo de grado, Universidad Pedagógica Nacional]. Facultad de Ciencia y Tecnología, Licenciatura en Física.

Van den Akker, J. (1999).
Principles and methods of development research. En J. van den Akker, R. M. Branch, K. Gustafson, N. Nieveen, & T. Plomp (Eds.), *Design approaches and tools in education and training* (pp. 1–14). Springer.

Walteros Rodríguez, L. A. (2016).
Actividades experimentales para la construcción de explicaciones alrededor de los fundamentos básicos de la mecánica cuántica [Monografía de grado, Universidad Pedagógica Nacional]. Facultad de Ciencia y Tecnología, Departamento de Física.

Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008).
Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education, 92*(5), 941–967. https://doi.org/10.1002/sce.20259

Wineland, D. J., Monroe, C., Itano, W. M., Leibfried, D., King, B. E., & Meekhof, D. M. (1998). Experimental issues in coherent quantum-state manipulation of trapped atomic ions. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, *103*(3), 259.

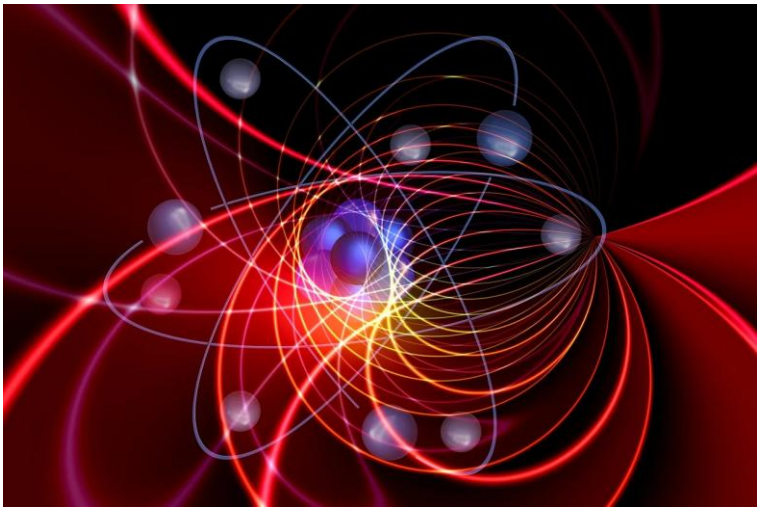
https://journals.aps.org/prper/abstract/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109

ANEXO

Anexo 1

Secuencia didáctica- CUANTIZACIÓN Y SUPERPOSICIÓN: UNA EXPERIENCIA EN EL AULA.

Esta la utilizara el docente encargado de llevar la sesión



Nota. Ilustración artística de átomo. Fuente: Geralt (s.f.). Pixabay.

CUANTIZACIÓN Y SUPERPOSICIÓN: UNA EXPERIENCIA EN EL AULA.

Una propuesta didáctica para acercar a los estudiantes a la mecánica cuántica.

DESCRIPCIÓN

En esta secuencia de actividades, se explorarán algunos de los fenómenos de la mecánica cuántica: la superposición y la cuantización de la energía. Por medio de noticias, simulaciones, experimentos virtuales y la representación de una trampa de iones, los estudiantes podrán cuestionar sus ideas previas, comparar la física clásica con la cuántica, y, eventualmente, construir una nueva forma de apreciar la realidad, y comprender que el futuro de muchas tecnologías yace en la mecánica cuántica.

SANTIAGO CAMPOS TORRRES

Línea de profundización:
La Actividad Experimental Para La Enseñanza de la Física.

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

BOGOTÁ D. C.

Introducción

La física cuántica puede parecer lejana o incluso misteriosa, pero en realidad está mucho más cerca de nuestra vida de lo que imaginamos cada vez que usamos un computador, un celular o escuchamos hablar de la computación cuántica, estamos frente a aplicaciones que nacen de ideas como la superposición y la cuantización de la energía, con esto estos conceptos rompen con la forma clásica de entender el mundo y nos invitan a mirar la realidad desde nuevas perspectivas.

En esta secuencia de actividades queremos que te acerques a la mecánica cuántica de manera sencilla, explorando fenómenos curiosos, analizando noticias, probando simulaciones y creando representaciones propias. La idea no es memorizar fórmulas, sino **preguntarse, discutir, imaginar y experimentar** cómo funciona este mundo microscópico

Por tal motivo el **Objetivo que tiene esta secuencia** es que intérpretes y comprendas a través de una representación de trampa de iones cómo los fenómenos de la superposición y la cuantización de la energía se manifiestan en la mecánica cuántica, reconociendo su diferencia con la visión clásica de la física y valorando su importancia en la explicación de fenómenos y aplicaciones científicas actuales.

Guía para el docente: fundamentos de mecánica cuántica

¿Por qué enseñar mecánica cuántica? La mecánica cuántica es la teoría física que describe el comportamiento de la materia y la energía a escalar microscópicas, estamos hablando de átomos, electrones, fotones, etc. A diferencia de la física clásica, donde los objetos tienen posiciones y velocidades definidas en todo momento, en el mundo cuántico las cosas funcionan de madera radicalmente diferente a nuestro día a día. Por tal motivo es necesario enseñarla dado que fundamenta muchas de las tecnologías actuales como los transistores, láseres, resonancias magnéticas, por otro lado, desarrolla el pensamiento critico al confrontar esa intuición cotidiana que hemos obtenido a lo largo de nuestra vida y finalmente enseñarla prepara para comprender innovaciones futuras como la computación y la criptografía cuánticas.

Conceptos fundamentales que debes conocer

1. Superposición cuántica
   En la física clásica, un objeto esta siempre en UN estado definido, por ejemplo, una moneda está en cara o sello, nunca ambas simultáneamente
   En la mecánica o física cuántica, un sistema puede existir en una superposición de MULTIPLES ESTADOS al mismo tiempo, hasta que se realiza una medición. En ese momento el sistema (un fotón, electrón) “colapsa” a UNO de los estados posibles.

   Veámoslo con un ejemplo de una moneda:

- En la clásica: cuando lanzamos una moneda, no sabemos el resultado, pero la moneda siempre está en un estado definido (cara o sello) aunque no lo veamos
- En la cuántica: un sistema cuántico (como un electrón) realmente existe en ambos estados simultáneamente hasta que lo observamos.

Importante: la superposición NO se trata de desconocimiento de nuestra parte sobre el estado real; es una propiedad fundamental de la naturaleza a escala cuántica.

2. Cuantización de la energía: En física clásica, la energía puede tomar cualquier valor (es continua). Por ejemplo, al subir una rampa puedes detenerte a cualquier altura.
   En física cuántica, ciertas propiedades (como la energía de un electrón en un átomo) solo pueden tomar valores específicos, discretos. Es como una escalera: solo puedes estar en un escalón específico, no entre dos escalones.
   Analogía:
   Rampa = energía clásica (continua)
   Escalera = energía cuántica (discreta, cuantizada)
   Evidencia experimental: Los espectros atómicos. Cuando un elemento caliente emite luz, no emite todos los colores, sino solo líneas de colores específicos. Esto ocurre porque los electrones saltan entre niveles discretos de energía.
3. Dualidad onda-partícula: La luz y la materia exhiben propiedades tanto de ondas como de partículas, dependiendo del experimento:
   Como onda: genera patrones de interferencia (experimento de Young)
   Como partícula: transfiere energía en “paquetes” discretos llamados fotones (efecto fotoeléctrico)

Importante: No es que a veces sea onda y a veces partícula. Es un comportamiento cuántico que no tiene equivalente clásico directo.

Sesión 1: Interpretación De Fenómenos Extraños En La Física

Momento 1: explorando la naturaleza de la luz.

Propósito: despertar el interés, la curiosidad y reconocer las ideas previas de los estudiantes sobre el comportamiento de la luz a partir de una discrepancia entre su conocimiento cotidiano y nueva información que entra en conflicto con sus concepciones previas.

Objetivo estudiantes: Reconocer que algunos fenómenos relacionados con la luz no pueden explicarse completamente con la física clásica y requiere nuevas teorías para su comprensión.

Duración: 15-20 min.

Actividad 1: Ideas previas sobre la luz.

Instrucciones para el docente:

1. Indique a los estudiantes que respondan de forma individual y sincera, sin preocuparse por si está "bien" o "mal"
2. Enfatice que todas las ideas son válidas en este momento exploratorio.

Preguntas para los estudiantes:

a. **Dibuja como te imaginas la luz.** no importa si no sabes dibujar bien, solo representa lo que crees que es la luz y cómo se comporta.
b. **¿la luz se comporta como corpúsculo (partícula) o como onda?** Justifica tu respuesta.
c. ¿Crees que la luz se comporta de alguna forma en especial? ¿Por qué?

Nota para el docente: observe las representaciones iniciales. Es probable que algunos estudiantes dibujen rayos, otras ondas, algunas partículas, esta diversidad será útil para la posterior.

Momento 2: confrontación con fenómenos extraños.

Propósito: presentar información científica que desafié las concepciones previas y generé curiosidad sobre la naturaleza dual de la luz.

Objetivo para estudiantes: contrastar sus ideas iniciales sobre el comportamiento de la luz con evidencias experimentales que muestran comportamientos simultáneos de onda y partícula.

Duración:25-40 minutos.

Instrucciones para el docente: presente el siguiente titular y amplie la información del experimento realizado en Suiza.

TITULAR DE REVISTA CIENTIFICA:

”CIENTÍFICOS FOTOGRAFÍAN POR PRIMERA VEZ LA LUZ COMPORTÁNDOSE COMO PARTÍCULA Y ONDA AL MISMO TIEMPO”

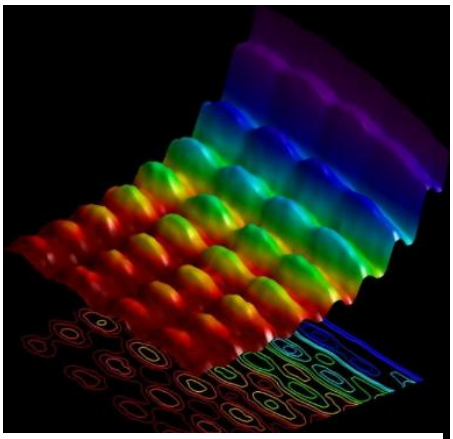


Foto tomada de la noticia en EarthSky.2015

Un grupo de investigadores en Suiza capturó una imagen que muestra simultáneamente dos formas distintas en que se comporta la luz: como onda (generando patrones vibratorios) y como partícula (intercambiando energía en paquetes diminutos), todo en una sola fotografía. Este experimento abre una ventana directa al mundo cuántico, donde las reglas habituales de la física clásica dejan de aplicar.

- **El comportamiento ondulatorio**: La luz genera patrones de interferencia, similar a las ondas que se forman cuando una piedra cae al agua, creando crestas y valles que se superponen.
- **El comportamiento corpuscular:** La luz intercambia energía en paquetes diminutos llamados “fotones”, comportándose como partículas que chocan con los electrones del material.

Lo extraordinario es que ambos comportamientos fueron capturados **simultáneamente** en una sola fotografía. Este experimento abre una ventana directa al mundo cuántico, donde las reglas habituales de la física clásica dejan de aplicar. En la física clásica, un objeto es O una onda O una partícula, pero nunca ambas cosas al mismo tiempo.

Implicaciones: Este descubrimiento confirma experimentalmente uno de los principios más extraños de la mecánica cuántica: la dualidad onda-partícula, propuesta por primera vez por Einstein (efecto fotoeléctrico) y desarrollada posteriormente por De Broglie y otros físicos cuánticos.

Preguntas para los estudiantes- individual, luego en grupos de 3;

1. Escribe tu interpretación del texto anterior.
   _____
   _____
   _____
   _____
2. Describe lo que entiendes de la imagen que los científicos capturaron ¿Qué crees que se ve en esa fotografía?

_____
_____
____

3. ¿En qué dirección crees que viaja la luz en este experimento? ¿Cómo imaginas que se propaga?_____
_____
_____
_____

Actividad 2:

En grupos, elaboran una nueva interpretación colectiva a partir de las reflexiones individuales realizadas en el momento 2. Para presentarla, podrán apoyare en diferentes formas de representación como, por ejemplo:

- una representación gráfica (dibujo)
- un texto explicativo
- otros que consideren adecuados

Cada grupo socializa su propuesta en la clase

Actividad 3:

En esta actividad necesitaran observar las siguientes imágenes, de las cuales se invita a escribir una interpretación o lo que se logre observar de estas.



Imagen 1.

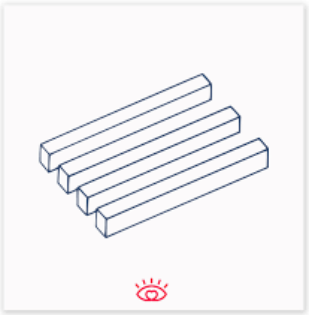


Imagen 2.



Imagen 3.

_____
_____
_____
_____
_____

- El docente orientará la discusión hacia la relevancia de la **interpretación en la mecánica cuántica**, subrayando que no basta con describir matemáticamente los fenómenos, sino que es necesario reflexionar sobre lo que esas descripciones significan acerca de la naturaleza de la realidad. La interpretación permite dar sentido a conceptos como la **superposición** y la **cuantización**, que desafían la intuición y las ideas de la física clásica. Sin esta dimensión interpretativa, muchos de los fenómenos cuánticos quedarían reducidos a meras observaciones experimentales, sin una comprensión más profunda de su alcance y de las implicaciones que tienen tanto en la ciencia como en la vida cotidiana.

Momento 3: Reflexión final

Propósito: Estimular la reflexión crítica sobre los límites del conocimiento de la física clásica.

Objetivos estudiantes: cuestionar críticamente los límites de la física clásica y reflexionar sobre la importancia del observador en la construcción de la realidad, estableciendo conexiones entre la naturaleza de la mecánica cuántica.

Duración: 10 min.

Actividad 4:

Realizar la siguiente lectura sobre la paradoja del sueño de Zhuangzi.

> *El filósofo chino Zhuangzi, soñó que era una mariposa volando libremente, sin saber que era Zhuangzi. Al despertar se preguntó: ¿soy Zhuangzi que soñó ser una mariposa, o soy una mariposa que ahora sueña ser Zhuangzi?*

Esta paradoja nos obliga a cuestionar si la realidad que percibimos es objetiva o simplemente una experiencia subjetiva, además, se relaciona con la noción que se tiene en la mecánica cuántica y la filosofía moderna.

Se hará una discusión guiada con las siguientes preguntas considerando la lectura anterior:

- ¿Si un árbol cayera en un bosque haría ruido?
- ¿La luz se comporta como una onda, como una partícula o de las dos formas al mismo tiempo?
- ¿Qué es lo real? ¿cómo sabemos que es la realidad? ¿Qué importancia tiene el observador en la realidad?
- ¿la realidad es una construcción de la mente, o existe de manera independiente?

Evidencias de la sesión 1.

- Interpretaciones iniciales escritas
- Representaciones
- Participación en la socialización y reflexión

Sesión 2- Cuantización de la energía y superposición de estados

Momento 1: ¿Qué es un estado?

Propósito: reconocer la diferencia ente un estado clásico y un estado cuántico, identificando cómo en la física clásica un estado describe condiciones definidas y deterministas una noción de la física clásica, mientras que en la cuántica los estados pueden encontrarse en superposición y solo se definen en el momento de la medición. A través de analogías, experimentos virtuales y discusiones en grupo, los estudiantes desarrollaran, la capacidad de interpretar estos fenómenos desde una perspectiva crítica y comparativa, distinguiendo claramente los límites y alcances de cada modelo físico.

Objetivo del estudiante: Comprender el concepto de superposición cuántica como característica fundamental de la mecánica cuántica, teniendo presente que este fenómeno rompe la idea de determinismo en la física clásica, conectando así la idea de "estar en dos estados a la vez" y "energía en niveles discretos"

Duración: 15-20min

Actividad 1:

1. El docente empezara con unas preguntas rompe hielo.
    - ¿Qué comprendes por estado?
    - ¿Qué es un estado en física?
    - ¿Qué entiendes por estado en física?

      Da 2 (dos) ejemplos de estados en la visión clásica de la física.

_____
_____
_____
_____

Se discuten ejemplos clásicos: el estado de un péndulo (posición y velocidad), el estado de una pelota (posición y energía) etc.

Se introduce la idea de que en cuántica un "estado" es más abstracto. En la mecánica cuántica, un estado no se reduce a valores definidos de las variables, sino que se describe como una **FUNCION DE ONDA** o un **VECTOR** en un espacio abstracto (espacio de Hilbert), que significa que, antes de medir, el sistema se encuentra en una superposición de **estados posibles, y solo cuando se realiza la observación** uno de esos resultados se manifiesta. Al decir que es más abstracto no se refiere a una condición concreta y observable, si no a una **estructura matemática de posibilidades.**

2. Ponte a pensar
   ¿puede una moneda estar al mismo tiempo en cara y sello antes de caer al suelo? Justifica

   _____
   _____
   _____
   _____
   _____



3. Escanear el Qr, este los enviara a un video del experimento de la doble rendija y de espectros atómicos para contrastar con sus respuestas iniciales.

- Para esto deberán escribir las preguntas que les surja a raíz de este video para luego discutirla en la sesión y contrastar a sus respuestas iniciales.
- En los mismos grupos. Los estudiantes deberán discutir ¿Qué tienen en común estos fenómenos con la idea de la moneda?

_____
_____
_____

Momento 2: Superposición y cuantización: simulaciones virtuales.

Propósito: explorar de manera practica los conceptos de superposición y cuantización.

Objetivo estudiante: Explorar de manera practica los fenómenos de superposición y cuantización mediante simulaciones interactivas, identificando sus diferencias con los modelos clásicos y analizando como se manifiestas en experimentos como la doble rendija y los espectros atómicos.

(se recomienda al docente realizar el experimento de la doble rendija. Para ello se necesita un láser con una longitud de onda entre **500 y 559 nanómetros** y una lámina delgada que pueda dividirse en dos. Con esta lámina se pueden crear rendijas lo suficientemente estrechas para observar el fenómeno de **interferencia de la luz**, lo que permitirá a los estudiantes visualizar de manera práctica uno de los principios fundamentales de la mecánica cuántica.)

Duración: 30 minutos

Actividad 2:

1. En los mismos grupos de tres (3), deberán discutir.
   ¿Qué tienen en común los fenómenos de la doble rendija y los espectros atómicos con la idea de la moneda?
2. Lanza la moneda 10 veces y registra los resultados en la hoja

3. Uso de simulaciones virtuales: en grupos de tres, los estudiantes usan la simulación virtual: Quantum coin toss- Phet

https://phet.colorado.edu/sims/html/quantum-coin-toss/latest/quantum-coin-toss_all.html

Configura la simulación en modo MONEDA CLASICA la **probabilidad se debe dejar 0.50 para ambas caras y** Lanza la moneda ahora 10,000

Responde: **¿la moneda tiene un resultado definido antes de caer?**

1. ahora cambia a la **moneda cuántica** observa la moneda
   ¿Qué notas de diferente a cuando está en la moneda clásica?
   configura la simulación de la moneda cuántica en la posibilidad 0.50 lánzala 10,000 mil veces, que **OBSERVAS EN TODO** el proceso de la moneda cuántica.
   ¿encuentras alguna diferencia entre estas dos monedas?

_____
_____
_____
_____

Actividad 3: - escaleras vs rampas

- ¿Qué diferencias hay entre una escalera y rampa?
- ¿Cuál representa mejor la energía clásica (continua)?
- ¿Cuál representa la energía cuántica (cuantizada en niveles discretos)?
- ¿Por qué no podemos pararnos entre los escalones?

Abre el siguiente simulador en phet; ***modelos del átomo de hidrogeno*.**

-Activa las transiciones

-activa el espectro

-Observa con atención qué sucede con los electrones cuando se enciende la lámpara.

¿Qué notas en las transiciones y en el espectro?

_____
_____
_____

Momento 3: analogías y síntesis

Propósito: integrar lo aprendido mediante metáforas/analogías que traduzcan lo cuántico a lo cotidiano, pero sin dejar a un lado la idea de que los fenómenos de superposición cuántico y cuantización de la energía son a niveles microscópicos.

Objetivo estudiante: Elaborar analogías, metáforas y representaciones que traduzcan los fenómenos de superposición y cuantización a situaciones cotidianas, reconociendo que estos procesos ocurren a nivel microscópico y diferenciándolos de la visión clásica de la física.

Duración: 15 min.

Actividad 1:

1. cada grupo representara los conceptos con una metáfora o analogía de la vida diaria donde se vea reflejada la superposición y cuantización.
2. Los estudiantes elaborarán un mapa mental, conceptual o una representación donde los tres deberán decir que entendieron por superposición, cuantización y sus diferencias con la visión de la física clásica.
3. El docente cierra reforzando que estos conceptos fundamentan fenómenos como la interferencia, el efecto túnel y la computación cuántica etc.

_____
_____
_____
_____

Evidencias

- Participación en preguntas iniciales
- Discusión y uso de simuladores
- Analogías y metáforas escritas
- Mapas grupales

Sesión 3- Exploración del principio de la trampa de iones

Momento 1: visualización guiada

Propósito: Comprender cómo funciona la trampa de Paul (trampa de iones) y relacionarla con los conceptos de superposición y cuantización trabajados en la sesión anterior.

Objetivo del estudiante: reconocer que a través de una representación de la trampa de Paul permite estudiar fenómenos cuánticos en sistemas controlados.

Duración: 20 minutos

Actividad 1: Se les mostrar un video corto de cómo funciona una **trampa de iones**

Enlace del video: https://youtube.com/shorts/vskiK1fZmiM?si=D9mWGGsokkyw0xDk

- Se explica que consiste en usar **campos eléctricos alternos** que hacen que el ion “oscile” sin escapar.

Conceptos clave para explicar:

1. **¿Qué es un ion?**

- -Un átomo que ha perdido o ganado electrones

- -Por tanto, tiene carga eléctrica
- -Puede ser manipulado con campos eléctricos

2. **¿Cómo funciona la trampa?**
- Usa campos eléctricos que cambian rápidamente
- El ion intenta "escapar" pero el campo lo devuelve al centro
- Es como una pelota en el fondo de un cuenco

3. **¿Por qué es importante?**
- Permite estudiar un sistema cuántico individual
- El ion puede estar en superposición de estados
- Se usa en relojes atómicos y computación cuántica

Pregunta detonante para los estudiantes: ¿Por qué será útil atrapar un ion en lugar de dejarlo libre?

Momento 2: representación práctica

Propósito: experimentar de forma analógica cómo funciona una trampa de iones.

Objetivo: Experimentar de manera analógica el funcionamiento de una trampa de iones, reconociendo cómo este tipo de dispositivos permiten estudiar fenómenos cuánticos en condiciones controladas.

Duración: 25 minutos

Actividad 1: representación con materiales sencillos:

Materiales por grupo:

- 1 piquis (bolita pequeña) → representa el ion
- 1 recipiente con bordes elásticos → representa el potencial de confinamiento
  -Opciones: vaso con membrana de globo estirada, bowl flexible, base vibrante

Instrucciones para los estudiantes:

1. **Colocar el piquis** en el centro del recipiente o sobre la membrana
2. **Inclinar suavemente** o mover la base
   -Observar cómo el piquis oscila, pero vuelve al centro
   -Esto simula cómo el campo eléctrico "empuja" al ion de regreso
3. **Experimentar con diferentes fuerzas:**
   -Movimiento suave → ion estable en el centro
   -Movimiento fuerte → ion puede escapar (trampa falla)
4. **Registrar observaciones:**
   - ¿Qué hace que el piquis se mantenga en el centro?
   - ¿En qué condiciones se escapa?

- ¿Qué representa esto en la trampa de iones real?

REFLEXIÓN CRÍTICA IMPORTANTE (para el docente):

La analogía con el piquis y el recipiente elástico es excelente para ilustrar la idea de un **potencial de confinamiento**. Sin embargo, es crucial guiar una reflexión profunda sobre las **limitaciones de esta analogía**.

Pida a los estudiantes que piensen en las diferencias:

Piquis clásico	**Ion cuántico**
Tiene una posición definida en todo momento	No tiene posición definida hasta que se mide
Puede tener cualquier energía continua	Solo puede tener energías discretas (cuantizadas)
Podemos ver su trayectoria completa	No tiene "trayectoria" clásica
Energía mínima puede ser cero (reposo)	Tiene energía de punto cero (nunca en reposo absoluto)
No puede estar en superposición	Puede estar en superposición de estados de energía.

Preguntas para la reflexión guiada:

1. **¿El piquis puede estar en dos lugares al mismo tiempo?**

   No, pero el ion cuántico puede estar en superposición de posiciones

2. **¿El piquis puede tener cualquier energía?**

   Sí, pero el ion cuántico solo puede tener niveles discretos de energía

3. **Si el piquis está quieto en el centro, ¿tiene energía?**

   No (clásicamente), pero el ion cuántico siempre tiene energía mínima (energía de punto cero)

Esta reflexión es fundamental para que los estudiantes no piensen que el comportamiento cuántico es "igual" al clásico, solo más pequeño.

Momento 3: conexión conceptual

Propósito: relacionar la experiencia de la trampa con los conceptos de superposición y cuantización trabajados en toda la secuencia.

Objetivo del estudiante: Relacionar la representación de la trampa de iones con los conceptos de superposición y cuantización trabajados previamente, construyendo una explicación propia que articule los aprendizajes de toda la secuencia.

Duración: 20 min.

Actividad 1:

Instrucciones para los estudiantes (grupos de 3): Discutan y respondan las siguientes preguntas integrando todo lo aprendido en durante las tres sesiones:

Pregunta 1: ¿Qué relación ven entre la trampa de iones y la cuantización de la energía?

Elementos que deben incluir:

- *El ion atrapado no puede tener cualquier energía*
- *Solo ciertos niveles de energía están permitidos (como los escalones)*
- *Similar a los electrones en el átomo de hidrógeno que vimos en la simulación*
- *Los niveles de energía en la trampa son discretos, no continuos*

Pregunta 2: ¿Cómo podría un ion atrapado estar en estados de superposición?

Elementos que deben incluir:

- El ion puede estar en superposición de diferentes niveles de energía
- Similar a la moneda cuántica que estaba en "cara Y sello"
- El ion puede estar oscilando en dos niveles de energía simultáneamente
- Solo al medir, el ion "colapsa" a un nivel específico
- Esto es lo que hace útil la trampa para computación cuántica

Evidencias

- Participación en preguntas iniciales
- Mapas grupales
- Escritos

Puntos clave para la conclusión:

Sesión 1: Descubrimos que la luz tiene comportamiento dual (onda y partícula), algo que la física clásica no puede explicar completamente

Sesión 2: Comprendimos dos conceptos fundamentales:

- Superposición: sistemas cuánticos pueden estar en múltiples estados simultáneamente
- Cuantización: la energía no es continua, sino que viene en paquetes discretos

Sesión 3: Vimos cómo estos conceptos se aplican en dispositivos reales (trampa de iones) que:

- Mantienen iones en estados cuánticos controlados
- Permiten manipular superposiciones de estados
- Son la base de tecnologías como relojes atómicos y computación cuántica

Reflexión final: La mecánica cuántica no es solo una teoría abstracta, sino que:

- Explica el funcionamiento de la naturaleza a nivel microscópico
- Abre posibilidades tecnológicas revolucionarias (computación cuántica, criptografía cuántica)
- Nos invita a repensar conceptos fundamentales como realidad, determinismo y observación

Criterios de evaluación

La evaluación de esta secuencia de actividades se centrará en valorar la comprensión conceptual de los fenómenos de superposición y cuantización, diferenciándolos de la física clásica; la capacidad de aplicación y uso de analogías, en tanto los estudiantes logren establecer representaciones creativas y pertinentes que conecten los conceptos cuánticos con situaciones cotidianas; la participación y el trabajo colaborativo, reflejado en la construcción conjunta de ideas, el respeto por las opiniones y la contribución activa durante las actividades grupales; el manejo de recursos y simuladores, evaluando el uso adecuado de herramientas digitales y experimentales para generar conclusiones significativas y, finalmente, la producción integradora, que consistirá en una síntesis coherente de lo aprendido a lo largo de la secuencia, expresada mediante mapas, explicaciones escritas o presentaciones orales**.**

Criterio	**Indicador**	**Nivel alto (4)**	**Nivel medio (3)**	**Nivel básico (2)**	**Nivel bajo (1)**
Comprensión conceptual	Explica los fenómenos de superposición y cuantización diferenciándolos de la física clásica.	Explicación clara, completa y con ejemplos.	Explicación comprensible, pero con algunas imprecisiones.	Explicación parcial, confusa o con errores frecuentes.	No logra diferenciar los conceptos ni dar ejemplos.
Aplicación y analogías	Relaciona los conceptos cuánticos con ejemplos, analogías o	Usa analogías creativas, pertinentes y bien fundamentadas.	Usa analogías correctas, pero poco profundas.	Analogías poco claras o forzadas.	No propone analogías o son incorrectas.

Criterio	Indicador	Nivel alto (4)	Nivel medio (3)	Nivel básico (2)	Nivel bajo (1)
	representaciones.				
Participación y trabajo colaborativo	Contribuye activamente en discusiones y producciones grupales.	Participa de manera constante, argumenta y respeta turnos.	Participa ocasionalmente y aporta ideas básicas.	Participa poco y con escasa colaboración.	No participa o interrumpe el trabajo grupal.
Uso de recursos y simulaciones	Maneja los simuladores y materiales propuestos para construir conclusiones.	Usa correctamente los recursos y obtiene conclusiones significativas.	Usa los recursos de forma básica, con conclusiones simples.	Manejo limitado de los recursos, sin reflexión.	No utiliza los recursos o no genera conclusiones.
Producción final integradora	Elabora una síntesis (mapa conceptual, explicación escrita o exposición) sobre la secuencia.	Síntesis completa, clara y bien organizada, con conexiones entre sesiones.	Síntesis clara, pero con conexiones limitadas.	Síntesis incompleta o desorganizada.	No presenta síntesis o es irrelevante.

LECTURAS DE PROFUNDIZACIÓN PARA EL DOCENTE:

1. Griffiths, D. J., & Schroeter, D. F. (2018). *Introduction to quantum mechanics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
2. Heisenberg, W. (1949). *The physical principles of the quantum theory*. Dover Publications.
3. Dirac, P. A. M. (1981). *The principles of quantum mechanics* (4th ed.). Oxford University Press.
4. Calderón Gómez, Á. (1999). *Física: conceptos y operaciones*. Addison Wesley Longman de México.

BIBLIOGRAFÍA

Díaz-Barriga, Á. (2013). *Guía para la elaboración de una secuencia didáctica*. Comunidad de conocimiento.

Calderón Gómez, Á. (1999). *Física: conceptos y operaciones*. Addison Wesley Longman de México.

Griffiths, D. J., & Schroeter, D. F. (2018). *Introduction to quantum mechanics* (3rd ed.). Cambridge University Press.

Heisenberg, W. (1949). *The physical principles of the quantum theory*. Dover Publications.

Dirac, P. A. M. (1981). *The principles of quantum mechanics* (4th ed.). Oxford University Press.

https://earthsky.org/human-world/first-photo-of-light-as-both-particle-and-wave/?utm_source=chatgpt.com

CRÉDITOS DE IMÁGENES Y RECURSOS

- Imagen introductoria: https://pixabay.com/es/users/geralt-9301/
- Artículo científico:https://earthsky.org/human-world/first-photo-of-light-as-both-particle-and-wave/
- Simulaciones PhET: Universidad de Colorado Boulder
- Video trampa de iones: https://youtube.com/shorts/vskiK1fZmiM
- Figura 2. Ocampo, O. (s.f.). Músicos y copa [Pintura]. Reproducida con fines educativos sin ánimo de lucro.
- Figura 3. Adaptación de Jastrow, J. (1899). Ilusión pato-conejo [Ilustración]. Dominio público.
- Figura 4. Ilusión de perspectiva con barras paralelas [Ilustración]. Autor desconocido. Dominio público.

NOTAS FINALES PARA LA IMPLEMENTACIÓN

Esta secuencia está diseñada para ser flexible. Dependiendo del nivel de los estudiantes y el tiempo disponible, el docente puede:

- Extender las discusiones filosóficas
- Agregar más experimentos demostrativos
- Profundizar en las matemáticas (funciones de onda, probabilidades)
- Conectar con otras áreas (química cuántica, biología cuántica)

- Invitar expertos o mostrar documentales

Lo fundamental es mantener el espíritu de **indagación, asombro y construcción colectiva** del conocimiento.

Anexo 2-guia para el estudiante

Interpretación De Fenómenos Extraños En La Física

Actividad 1: Ideas previas sobre la luz.

Preguntas para los estudiantes:

a. **Dibuja como te imaginas la luz.** no importa si no sabes dibujar bien, solo representa lo que crees que es la luz y cómo se comporta.
b. **¿la luz se comporta como corpúsculo (partícula) o como onda?** Justifica tu respuesta.
c. ¿Crees que la luz se comporta de alguna forma en especial? ¿Por qué?

TITULAR DE REVISTA CIENTIFICA:

"CIENTÍFICOS FOTOGRAFÍAN POR PRIMERA VEZ LA LUZ COMPORTÁNDOSE COMO PARTÍCULA Y ONDA AL MISMO TIEMPO"

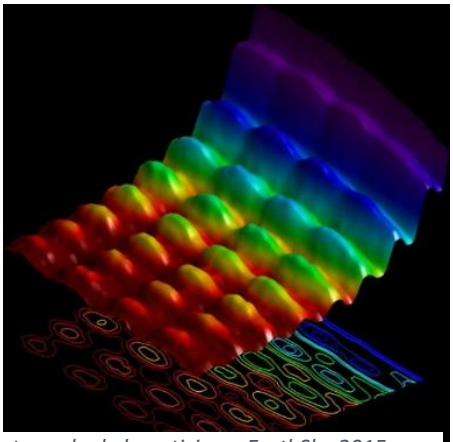


Foto tomada de la noticia en EarthSky.2015

Un grupo de investigadores en Suiza capturó una imagen que muestra simultáneamente dos formas distintas en que se comporta la luz: como onda (generando patrones vibratorios) y como partícula (intercambiando energía en paquetes diminutos), todo en una sola fotografía. Este experimento abre una ventana directa al mundo cuántico, donde las reglas habituales de la física clásica dejan de aplicar.

- **El comportamiento ondulatorio**: La luz genera patrones de interferencia, similar a las ondas que se forman cuando una piedra cae al agua, creando crestas y valles que se superponen.
- **El comportamiento corpuscular:** La luz intercambia energía en paquetes diminutos llamados "fotones", comportándose como partículas que chocan con los electrones del material.

Lo extraordinario es que ambos comportamientos fueron capturados **simultáneamente** en una sola fotografía. Este experimento abre una ventana directa al mundo cuántico, donde las reglas habituales de la física clásica dejan de aplicar. En la física clásica, un objeto es O una onda O una partícula, pero nunca ambas cosas al mismo tiempo.

Implicaciones: Este descubrimiento confirma experimentalmente uno de los principios más extraños de la mecánica cuántica: la dualidad onda-partícula, propuesta por primera vez por

Einstein (efecto fotoeléctrico) y desarrollada posteriormente por De Broglie y otros físicos cuánticos.

Preguntas para los estudiantes- individual, luego en grupos de 3

4. Escribe tu interpretación del texto anterior.

   _____
   _____
   _____
   _____

5. Describe lo que entiendes de la imagen que los científicos capturaron ¿Qué crees que se ve en esa fotografía?

   _____
   _____
   ____

6. ¿En qué dirección crees que viaja la luz en este experimento? ¿Cómo imaginas que se propaga?_____
   _____
   _____
   _____

Actividad 2:

En grupos, elaboran una nueva interpretación colectiva a partir de las reflexiones individuales realizadas en el momento 2. Para presentarla, podrán apoyare en diferentes formas de representación como, por ejemplo:

- una representación gráfica (dibujo)
- un texto explicativo
- otros que consideren adecuados

Cada grupo socializa su propuesta en la clase

Actividad 3:

En esta actividad necesitaran observar las siguientes imágenes, de las cuales se invita a escribir una interpretación o lo que se logre observar de estas.



Imagen 1.

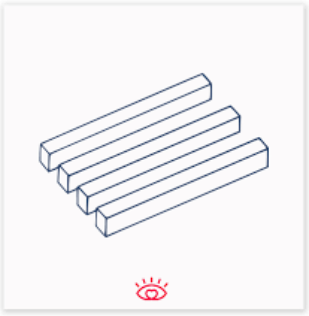


Imagen 2.



Imagen 3.

_____
_____
_____
_____
_____
_____

Actividad 4:

Realizar la siguiente lectura sobre la paradoja del sueño de Zhuangzi.

> *El filósofo chino Zhuangzi, soñó que era una mariposa volando libremente, sin saber que era Zhuangzi. Al despertar se preguntó: ¿soy Zhuangzi que soñó ser una mariposa, o soy una mariposa que ahora sueña ser Zhuangzi?*

Lea las siguientes preguntas y discútalas con sus compañeros de grupo, para luego socializarlas con el docente

- qué piensas de la paradoja de Zhuangzi.
- ¿Si un árbol cayera en un bosque haría ruido?
- ¿La luz se comporta como una onda, como una partícula o de las dos formas al mismo tiempo?
- ¿Qué es lo real? ¿cómo sabemos que es la realidad? ¿Qué importancia tiene el observador en la realidad?
- ¿la realidad es una construcción de la mente, o existe de manera independiente?

Cuantización de la energía y superposición de estados

Actividad 1:

1. Lea las siguientes preguntas y trate de respondérselas al profesor

- ¿Qué comprendes por estado?
- ¿Qué es un estado en física?
- ¿Qué entiendes por estado en física?

Da 2 (dos) ejemplos de estados en la visión clásica de la física.

2. Ponte a pensar

¿puede una moneda estar al mismo tiempo en cara y sello antes de caer al suelo? Justifica

_____
_____
_____
_____

3. Escanear el Qr, este los enviara a un video del experimento de la doble rendija y de espectros atómicos para contrastar con sus respuestas iniciales.

- Para esto deberán escribir las preguntas que les surja a raíz de este video para luego discutirla en la sesión y contrastar a sus respuestas iniciales.
- En los mismos grupos. Los estudiantes deberán discutir ¿Qué tienen en común estos fenómenos con la idea de la moneda?

Actividad 2:

1. En los mismos grupos de tres (3), deberán discutir.
   ¿Qué tienen en común los fenómenos de la doble rendija y los espectros atómicos con la idea de la moneda?
2. Lanza la moneda 10 veces y registra los resultados en la hoja
3. Uso de simulaciones virtuales: en grupos de tres, los estudiantes usan la simulación virtual: Quantum coin toss- Phet

https://phet.colorado.edu/sims/html/quantum-coin-toss/latest/quantum-coin-toss_all.html

Configura la simulación en modo MONEDA CLASICA la **probabilidad se debe dejar 0.50 para ambas caras y** Lanza la moneda ahora 10,000

Responde: **¿la moneda tiene un resultado definido antes de caer?**

1. ahora cambia a la **moneda cuántica** observa la moneda
   ¿Qué notas de diferente a cuando está en la moneda clásica?
   configura la simulación de la moneda cuántica en la posibilidad 0.50 lánzala 10,000 mil veces, que **OBSERVAS EN TODO** el proceso de la moneda cuántica.
   ¿encuentras alguna diferencia entre estas dos monedas?

_____
_____
_____
_____

Actividad 3: - escaleras vs rampas

- ¿Qué diferencias hay entre una escalera y rampa?
- ¿Cuál representa mejor la energía clásica (continua)?
- ¿Cuál representa la energía cuántica (cuantizada en niveles discretos)?
- ¿Por qué no podemos pararnos entre los escalones?

Abre el siguiente simulador en phet; ***modelos del átomo de hidrogeno*.**

-Activa las transiciones

-activa el espectro

-Observa con atención qué sucede con los electrones cuando se enciende la lámpara.

¿Qué notas en las transiciones y en el espectro?

_____
_____

Momento 3

Actividad 1:

1. cada grupo representara los conceptos con una metáfora o analogía de la vida diaria donde se vea reflejada la superposición y cuantización.
2. Los estudiantes elaborarán un mapa mental, conceptual o una representación donde los tres deberán decir que entendieron por superposición, cuantización y sus diferencias con la visión de la física clásica.
3. El docente cierra reforzando que estos conceptos fundamentan fenómenos como la interferencia, el efecto túnel y la computación cuántica etc.

_____
_____
_____

Exploración del principio de la trampa de iones

Actividad 1: Se les mostrar un video corto de cómo funciona una **trampa de iones**

Enlace del video: https://youtube.com/shorts/vskiK1fZmiM?si=D9mWGGsokkyw0xDK

- Se explica que consiste en usar **campos eléctricos alternos** que hacen que el ion "oscile" sin escapar.

1. **¿Qué es un ion?**
2. **¿Cómo funciona la trampa?**
3. **¿Por qué es importante?**

Pregunta detonante para los estudiantes: ¿Por qué será útil atrapar un ion en lugar de dejarlo libre?

Momento 2

Actividad 1: representación con materiales sencillos:

Materiales por grupo:

- 1 piquis (bolita pequeña) → representa el ion
- 1 recipiente con bordes elásticos → representa el potencial de confinamiento
  -Opciones: vaso con membrana de globo estirada, bowl flexible, base vibrante

Instrucciones para los estudiantes:

5. **Colocar el piquis** en el centro del recipiente o sobre la membrana
6. **Inclinar suavemente** o mover la base
   -Observar cómo el piquis oscila, pero vuelve al centro
   -Esto simula cómo el campo eléctrico "empuja" al ion de regreso
7. **Experimentar con diferentes fuerzas:**
   -Movimiento suave → ion estable en el centro
   -Movimiento fuerte → ion puede escapar (trampa falla)
8. **Registrar observaciones:**
   -¿Qué hace que el piquis se mantenga en el centro?
   - ¿En qué condiciones se escapa?
   - ¿Qué representa esto en la trampa de iones real?

Preguntas para la reflexión guiada final:

1. **¿la piquis puede estar en dos lugares al mismo tiempo?**
2. **¿la piquis puede tener cualquier energía?**
3. **Si la piquis está quieto en el centro, ¿tiene energía?**