



Simulación del experimento de Stern-Gerlach para sistemas de espín $\frac{1}{2}$

María Alejandra Martínez Quintero

Licenciatura en Física
Universidad Pedagógica Nacional

Línea de Profundización:
La Enseñanza de la Física y la Relación Física Matemática

Trabajo de Grado

Asesor:
Néstor Fernando Méndez Hincapié

Noviembre. 2025
Bogotá D.C., Colombia

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios. A mis padres, cuyo esfuerzo y apoyo incondicional hicieron posible este triunfo. A mis abuelitos, fuente constante de motivación e inspiración. A mi pareja que me acompañó en este largo camino académico. Y a mi hermanito Jerónimo, por su confianza inquebrantable en mí.

En segundo lugar, a la Universidad Pedagógica Nacional por la formación integral, los conocimientos impartidos y la calidad de sus docentes. Un agradecimiento especial a mi asesor, Néstor Méndez, por su paciencia, guía invaluable y acompañamiento constante durante el desarrollo de este trabajo de grado.

Índice general

1. Problema de Investigación	5
1.1. Objetivos	11
1.1.1. General	11
1.1.2. Específicos	11
2. Antecedentes	12
2.1. Contexto educativo	12
2.2. Dificultades conceptuales	13
2.3. Simulaciones cuánticas como herramienta didáctica	14
2.4. Necesidad de nuevas herramientas educativas	16
3. Marco Teórico	19
3.1. <i>Estado</i> en el contexto de la mecánica cuántica	19
3.2. <i>Espín</i>	20
3.3. <i>Estado puro</i>	21
3.4. <i>Estado mezclado</i>	23
3.4.1. Distinción fundamental: Superposición vs. Mezcla	23
3.4.2. Criterios de pureza	24
3.4.3. Entropía y grado de mezcla	24
3.4.4. Interpretación física y ejemplos	25
3.5. Comparación entre estado puro y estado mezclado	25
3.6. <i>Experimento de Stern-Gerlach</i>	26
3.7. Dificultades en la enseñanza y el aprendizaje de la mecánica cuántica en educación superior	30
3.8. Enfoque Didáctico de la Simulación	32
4. Metodología	34
4.1. Enfoque metodológico	34
4.2. Diseño de la simulación	34
4.3. Análisis de simulaciones existentes	36
4.3.1. Análisis de simulaciones específicas	37
4.3.2. Limitaciones identificadas	39
4.4. Validación del diseño	40
4.4.1. Validación teórica y criterios de diseño	40
4.4.2. Fundamentación didáctica y metodológica	41

4.4.3. Diseño y validación de guías didácticas	41
4.4.4. Validación prospectiva para educación superior	42
4.4.5. Propuesta de uso didáctico de la simulación	42
4.5. Validación por Expertos y Ajustes Realizados	44
4.5.1. Contexto y Procedimiento de la Validación	44
4.5.2. Perfil de los Expertos	44
4.5.3. Instrumentos y Proceso de Validación	45
4.5.4. Síntesis de los Resultados y Aportes de la Validación	45
4.5.5. Ajustes Implementados a Partir de la Validación	47
5. Conclusiones	49
5.1. Contribuciones Principales del Trabajo	49
5.1.1. Aportes en el Ámbito Didáctico	49
5.1.2. Aportes Técnicos y Conceptuales	50
5.2. Limitaciones y Lecciones Aprendidas	50
5.3. Implicaciones para la Enseñanza de la Física Cuántica	50
5.4. Proyección y Trabajo Futuro	51
5.5. Reflexión Final	51
6. Anexos	56

Capítulo 1

Problema de Investigación

La mecánica cuántica ha alcanzado una gran importancia dentro de lo científico contemporáneo, como una de las teorías fundamentales de la física moderna. Desde sus orígenes a principios del siglo XX, con los aportes de Planck, Einstein, Schrödinger, Heisenberg, Dirac y otros, han transformado nuestra comprensión del universo a escalas microscópicas. Esta teoría ha permitido explicar fenómenos que resultaban difíciles para la física clásica, tales como la cuantización de la energía, la dualidad onda-partícula, el principio de incertidumbre, la superposición de estados y el entrelazamiento cuántico (Griffiths y Schroeter, 2018). Aunque estos conceptos desafían nuestras intuiciones cotidianas, su validez ha sido confirmada experimentalmente con un grado de precisión favorable, lo que ha llevado a fortalecerlo como uno de los más importantes de la física contemporánea.

En las últimas décadas, la mecánica cuántica ha dejado de ser una teoría de interés académico, para convertirse en múltiples avances tecnológicos en campos como la medicina, la nanotecnología, la informática y la óptica. En medicina, esta teoría ha sido clave para el desarrollo de técnicas de diagnóstico e imagen, incluyendo la resonancia magnética nuclear y la tomografía por emisión de positrones (Vedral, 2010). En el ámbito de la nanociencia, ha permitido controlar átomos y moléculas, facilitando la creación de materiales con propiedades únicas a escala microscópica (Alivisatos, 1996). Así mismo, la mecánica cuántica ha dado lugar a la computación cuántica, que utiliza la superposición y el entrelazamiento para abordar problemas complejos (Preskill, 2018). Por último, el cifrado cuántico brinda la posibilidad de establecer comunicaciones seguras gracias al principio de no clonación de estados (Gisin et al., 2002). Por otra parte, la enseñanza de la mecánica cuántica ha sido mo-

tivo de discusión durante varias décadas. El enfoque pedagógico tradicional se centra principalmente en el aspecto matemático, el cual es necesario, pero que puede resultar desmotivador para muchos estudiantes (S. C. McAfee et al., 2025; Singh, 2001). Esta estrategia tiende a que los conceptos cuánticos se perciban como abstractos y alejados de la realidad física, dificultando así una comprensión profunda y significativa de los principios de la teoría. Estudios recientes han mostrado que esta excesiva abstracción continúa es uno de los principales obstáculos para el aprendizaje, pues los estudiantes suelen tener dificultades para conectar el formalismo matemático con los fenómenos físicos que describe (S. C. McAfee et al., 2025).

En respuesta a esta problemática, diversas investigaciones en educación en física han propuesto enfoques didácticos que acercan la mecánica cuántica a los estudiantes, enfatizando metodologías que promueven la visualización, la experimentación guiada y una comprensión conceptual más sólida. Mostrando que el uso de representaciones gráficas, simulaciones digitales y laboratorios virtuales ha probado ser una estrategia efectiva para facilitar la comprensión de los conceptos cuánticos, especialmente en niveles introductorios (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; McKagan et al., 2008b). Este cambio metodológico ha permitido que la mecánica cuántica comience a incorporarse en niveles educativos previos a la universidad. En algunos países, los currículos han sido modificados para incluir una introducción temprana a los principios cuánticos, lo que refleja un reconocimiento de la importancia que esta teoría tendrá en la formación científica y tecnológica del siglo XXI (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Stadermann et al., 2019). En Colombia, la enseñanza de la mecánica cuántica enfrenta varias limitaciones importantes. Los Lineamientos Curriculares de Ciencias Naturales y los Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales, establecidos por el Ministerio de Educación Nacional (MEN), abordan de manera introductoria algunos aspectos de la física moderna, pero no incluyen de forma explícita la mecánica cuántica en los programas de formación del nivel superior que preceden a los cursos especializados de física cuántica de Educación Nacional, 1998. Esta ausencia implica que los estudiantes no tienen la oportunidad de acercarse tempranamente a los conceptos fundamentales de la teoría cuántica, pese a su creciente relevancia en campos científicos y tecnológicos contemporáneos. Además, son escasas las experiencias curriculares que integren de manera sistemática la cuántica en la formación de los estudiantes del nivel superior, lo que genera la necesidad de diseñar recursos innovadores que contribuyan a

superar estas limitaciones y favorezcan un aprendizaje más profundo de la física moderna.

Estos enfoques buscan no solo incrementar la comprensión sino también promover el interés de los estudiantes en carreras STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas).

Esto resulta importante para el desarrollo de herramientas educativas que permitan familiarizar a los estudiantes con los conceptos de la mecánica cuántica a través de simulaciones digitales. Las simulaciones, especialmente aquellas desarrolladas en el entorno Unity, una plataforma diseñada para crear experiencias interactivas en 2D y 3D, ofrecen oportunidades didácticas para modelar sistemas cuánticos, como los de espín $1/2$, de una forma más accesible y comprensible para los estudiantes. Uno de los experimentos más importantes para introducir la teoría cuántica del espín es el experimento de Stern–Gerlach. Su estudio mediante simulaciones permite visualizar conceptos fundamentales como la cuantización del momento angular del espín, la superposición de estados y la distinción entre estados puros y mezclados (De Leo, 2020). Este tipo de herramientas se une con las propuestas actuales científica que van encaminadas a la innovación didáctica y al uso de recursos digitales.

La enseñanza de la física moderna, y en particular de la mecánica cuántica, enfrenta diversos desafíos debido a que introduce conceptos que difieren profundamente de la intuición clásica del estudiante. Ideas como probabilidad, incertidumbre o superposición resultan contraintuitivas cuando se comparan con la visión determinista propia de la física clásica, lo cual sugiere la necesidad de replantear ciertos enfoques pedagógicos (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). Entre los conceptos más abstractos se encuentran la superposición de estados y los estados mezclados, los cuales no poseen un análogo en la física clásica. Un ejemplo relevante es el espín de las partículas, cuya comprensión resulta fundamental para la enseñanza de la mecánica cuántica (Passante et al., 2015; Schermerhorn et al., 2022; Zhu y Singh, 2011). Además, la notación de Dirac, ampliamente utilizada en el formalismo cuántico, proporciona un marco algebraico y vectorial para describir estos sistemas (Schwabl, 2007). Sin embargo, diversos estudios han mostrado que muchos estudiantes presentan dificultades para distinguir entre estados puros y estados mezclados, incluso después de la instrucción formal (Passante et al., 2015; Singh y Marshman, 2015).

Se han diseñado y desarrollado muchas simulaciones virtuales del ESG con el objetivo de facilitar el aprendizaje de los estudiantes (Wieman et al., 2008). Aun así, estas simulaciones son simplificadas ya que no tienen una presentación clara de la superposición de estados ni una diferencia entre estados puros y mezclados. Como resultado, los estudiantes carecen de herramientas que les permitan visualizar y comprender estos conceptos. (Singh y Marshman, 2015). Se ha identificado que el uso de simulaciones virtuales es una estrategia pedagógica que mejora la comprensión de conceptos abstractos y no intuitivos (Schermerhorn et al., 2022; Wieman et al., 2008). Para que estas simulaciones sean efectivas, es necesario que representen con precisión las propiedades cuánticas, como la superposición de estados y los estados mezclados.

Ante esta problemática se sugiere el diseño de una simulación del ESG, la cual permita a los estudiantes interactuar con una representación visual y precisa de la diferencia entre estados puros y mezclados, así como la superposición de estados. En esta simulación debería llevar diferentes espacios experimentales que permitan explorar como el espín de las partículas se comporta bajo la influencia de campos magnéticos no homogéneos.

El diseño de estas simulaciones del ESG tiene como objetivo no solo la enseñanza del concepto de espín, la superposición y los estados cuánticos, sino también generar un análisis didáctico que contribuya a mejorar la comprensión de la fenomenología del ESG y de la matemática asociada. A partir de ello surge la siguiente pregunta de investigación: ¿qué características deben incluirse en una simulación del ESG que permitan abordar los conceptos de superposición de estados, estados puros y estados mezclados? Es importante señalar que la identificación de estas características no corresponde a una simple enumeración técnica, sino que exige un análisis didáctico fundamentado en las dificultades conceptuales documentadas en la literatura. Para responder esta pregunta, es necesario considerar que la enseñanza de la mecánica cuántica en el nivel superior presenta diversas dificultades, entre ellas la abstracción matemática y la complejidad conceptual de sus fundamentos. Como señala Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017, los métodos tradicionales privilegian los aspectos matemáticos, los cuales no son suficientes para que los estudiantes comprendan la naturaleza cuántica no determinista y probabilística. Además, conceptos como la superposición de estados y los estados mezclados no poseen un análogo clásico, lo que genera confusiones en los estudiantes (Singh y Marshman, 2015).

Por esta razón, es importante el diseño de una simulación del ESG donde los estudiantes puedan interactuar. Según Passante et al., [2015](#), el uso adecuado de simulaciones virtuales de conceptos cuánticos puede favorecer un cambio conceptual en los estudiantes. Esto permite que la transición de una visión de la física clásica hacia la física moderna sea más fácil, al mismo tiempo que refuerza la comprensión de los fenómenos cuánticos y su representación matemática. Así, las simulaciones se convierten en una herramienta didáctica útil para cursos de licenciatura, contribuyendo a mejorar la enseñanza de la teoría cuántica.

El experimento de Stern–Gerlach resulta fundamental para entender la naturaleza del espín y la superposición de estados, ya que este proporciona un contexto experimental que se puede relacionar directamente con las predicciones del formalismo cuántico. Sin embargo, como señalan Wieman et al., [2008](#), muchas simulaciones actuales tienden a simplificar el fenómeno, omitiendo aspectos importantes para una comprensión más profunda, como la representación visual de la superposición cuántica y la diferenciación entre estados puros y mezclados. Esta falta de detalle en las simulaciones limita su valor educativo y, en algunos casos, puede generar conceptos erróneos en los estudiantes (Schermerhorn et al., [2022](#)).

A pesar del creciente interés en enseñar mecánica cuántica en el nivel superior, diversos estudios evidencian que los estudiantes universitarios continúan enfrentando dificultades significativas para interpretar conceptos fundamentales como la superposición de estados, el espín y la distinción entre estados puros y mezclados. Incluso después de la instrucción formal, persisten concepciones erróneas asociadas a la naturaleza probabilística de los sistemas cuánticos y a la falta de analogías clásicas que permitan dar sentido intuitivo a estos fenómenos (Passante et al., [2015](#); Singh y Marshman, [2015](#)). De manera adicional, las simulaciones disponibles suelen simplificar excesivamente la física involucrada, lo que limita su utilidad didáctica y restringe la posibilidad de que los estudiantes desarrollen una comprensión conceptual profunda del experimento de Stern–Gerlach. Esta situación evidencia la necesidad de recursos educativos más robustos y fundamentados que respondan a las demandas formativas del nivel universitario.

En este contexto, el desarrollo de una simulación del experimento de Stern–Gerlach (ESG) enfocada en la enseñanza de los conceptos de superposición, estados puros y estados mezclados en sistemas de espín $1/2$, busca ofrecer un análi-

sis didáctico que refuerce la comprensión conceptual y visual de la teoría cuántica, superando las limitaciones de las representaciones tradicionales y acercando a los estudiantes a una comprensión más completa de la mecánica cuántica. Por otro lado, el alcance de esta investigación se centra en el diseño de una simulación del ESG desarrollada en el entorno Unity, orientada a la enseñanza de los conceptos de superposición de estados, así como de estados puros y mezclados, este diseño abarca la construcción del prototipo y su validación teórica mediante referentes conceptuales y didácticos, sin incluir por ahora su implementación en aulas ni la evaluación directa con estudiantes. De esta manera, se busca generar un recurso con fundamentado tanto en la física como en la pedagogía, que pueda servir como base para futuras investigaciones y aplicaciones educativas.

1.1. Objetivos

1.1.1. General

Proponer un material didáctico interactivo basado en la simulación del experimento de Stern–Gerlach que contribuya a la comprensión de conceptos fundamentales de la mecánica cuántica, como la superposición de estados y la diferenciación entre estados puros y mezclados, y que sirva como recurso de apoyo en los procesos de enseñanza-aprendizaje dirigido a estudiantes de educación superior.

1.1.2. Específicos

1. Diseñar una simulación interactiva mediante el motor Unity que represente de forma visual el experimento de Stern–Gerlach, permitiendo abordar los conceptos de espín, superposición y estados puros y mezclados.
2. Elaborar una guía didáctica asociada a la simulación, estructurada en tres fases (antes, durante y después del uso del recurso), que oriente al docente en la integración del material en actividades de aula y promueva la participación activa del estudiante.
3. Validar la simulación y la guía mediante el juicio de expertos en enseñanza de la física cuántica, valorando su coherencia conceptual, su pertinencia didáctica y su potencial para mejorar los procesos de aprendizaje en cursos de física moderna.

Capítulo 2

Antecedentes

En los últimos años, el acercamiento de la física cuántica en la formación de estudiantes de educación superior ha ganado relevancia a nivel global (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). En el contexto colombiano específicamente, si bien los planes de estudio han evolucionado, su integración solo es superior de manera limitada. Este interés creciente se debe al avance constante de la ciencia y la tecnología, que requiere una comprensión temprana de los principios básicos de la mecánica cuántica. Sin embargo, la enseñanza todavía enfrenta diversas dificultades de tipo epistemológico y didáctico (Burbano et al., 2020).

El presente capítulo no se limita a enumerar problemáticas, sino que se enfoca en sintetizar los resultados y hallazgos concretos de investigaciones previas en educación de la física cuántica y el uso de simulaciones. El análisis de estos antecedentes es fundamental, ya que proporciona la base empírica y la justificación directa para el desarrollo de la simulación.

2.1. Contexto educativo

El aprendizaje de la mecánica cuántica ha estado tradicionalmente reservado para cursos avanzados de física en educación superior. En universidades como el MIT, Stanford, Harvard y la Universidad Nacional de Colombia, los cursos introductorios de mecánica cuántica (*Quantum Physics I*, *Física Moderna*, entre otros) abordan temas como el estado cuántico, el espín, la regla de Born y la evolución temporal de sistemas cuánticos mediante la ecuación de Schrödinger. Estos cursos requieren conocimientos previos de álgebra lineal, teoría de operadores y cálculo diferencial e integral (Griffiths y Schroeter,

[2018]; Sakurai y Napolitano, [1995]).

En el contexto colombiano, la enseñanza de la mecánica cuántica en educación superior presenta desafíos particulares. Universidades como la Universidad Pedagógica Nacional, la Universidad de los Andes, la Universidad del Valle y la Universidad Industrial de Santander incluyen estos contenidos en sus programas de física y licenciatura, sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que los estudiantes enfrentan dificultades significativas para comprender conceptos fundamentales (Burbano et al., [2020]; M. Rodríguez y García, [2021]). Los resultados de estos estudios muestran que la transición desde los modelos físicos clásicos hacia los conceptos cuánticos abstractos representa una barrera epistemológica que no siempre es superada con los métodos de enseñanza tradicionales.

Un estudio específico en la Universidad Pedagógica Nacional (Hernández et al., [2022]) encontró que el 68 % de los estudiantes de cuarto semestre de licenciatura en física presentaban concepciones alternativas sobre la superposición cuántica y el principio de incertidumbre. Similarmente, investigaciones en la Universidad del Valle (Torres y Pérez, [2023]) reportaron que la integración de laboratorios virtuales mejoró significativamente la comprensión del espín electrónico en estudiantes de física moderna.

Estos hallazgos aportan a la presente investigación la necesidad de desarrollar herramientas complementarias que faciliten dicha transición. Por ello, iniciativas que integren herramientas interactivas y visuales como las simulaciones del experimento de Stern–Gerlach pueden contribuir a mejorar la comprensión conceptual, permitiendo a los estudiantes explorar fenómenos cuánticos de forma intuitiva y contextualizada en el ámbito de la educación superior.

2.2. Dificultades conceptuales

Múltiples investigaciones en didáctica de la física han documentado las dificultades comunes que enfrentan los estudiantes al abordar la mecánica cuántica, incluso a nivel universitario. Singh y Marshman ([2015]) observa que los alumnos suelen encontrar dificultades para entender conceptos cuánticos clave. Términos como la superposición de estados, el colapso de la función de onda, o la diferencia entre un estado puro y uno mezclado, suelen malinterpretarse. Un error frecuente es pensar en la superposición como si fuera solo una mezcla de probabilidades, o dar por hecho que una partícula ya "decidió" su estado

antes de que la midamos. Esta idea, va en contra de lo que la teoría cuántica nos dice, como se compara en la Tabla [3.1](#).

Estas confusiones conceptuales suelen persistir incluso después de que los estudiantes han completado cursos formales de mecánica cuántica (Peres, [2002](#); Schlosshauer, [2007](#)). Estudios más recientes en el contexto colombiano confirman esta tendencia (García y López, [2022](#)) encontró que el 72 % de los estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia mantenían concepciones clásicas sobre la medición cuántica incluso después del curso de física moderna. Este hecho ha motivado un interés creciente en el desarrollo de estrategias didácticas que logren integrar de manera efectiva el formalismo matemático con representaciones visuales y actividades interactivas. Sin embargo, como señalan algunos investigadores, muchas herramientas pedagógicas tradicionales mantienen un enfoque predominantemente algebraico en la resolución de problemas, dejando de lado la comprensión conceptual de aspectos fundamentales como los procesos de medición y la naturaleza intrínsecamente probabilística de los estados cuánticos (Peres, [2002](#)).

Investigaciones recientes en el campo de la educación en física cuántica (Çataloğlu y Robinett, [2010](#); Escalada y Zollman, [2004](#); Martínez y Fernández, [2023](#)) sostienen este enfoque integrador, demostrando que los estudiantes alcanzan una mejor comprensión cuando aprenden en entornos visuales e interactivos. Un estudio particularmente relevante realizado en la Universidad de Antioquia (S. Rodríguez et al., [2023](#)) mostró que la implementación de simulaciones interactivas redujo en un 40 % las concepciones erróneas sobre el colapso de la función de onda entre estudiantes de ingeniería física. En estos contextos, los alumnos pueden establecer conexiones más significativas entre el formalismo matemático abstracto y los fenómenos físicos observables. La evidencia acumulada sugiere que complementar las aproximaciones tradicionales con herramientas visuales es especialmente crucial en el contexto latinoamericano, donde las dificultades conceptuales se ven exacerbadas por la falta de recursos experimentales adecuados (A. Silva y González, [2022](#)).

2.3. Simulaciones cuánticas como herramienta didáctica

Ante las dificultades conceptuales que enfrentan los estudiantes al sumergirse en la mecánica cuántica, distintos investigadores han propuesto el uso de simu-

laciones interactivas como estrategia pedagógica para facilitar la comprensión de los fenómenos cuánticos. Estas herramientas permiten visualizar procesos que no pueden observarse directamente y manipular variables de forma experimental, lo que contribuye a generar modelos mentales más coherentes con la teoría (Çataloğlu y Robinett, 2010; Escalada y Zollman, 2004; McKagan et al., 2008b).

Un ejemplo destacado es la plataforma PhET (Physics Education Technology), desarrollada por el equipo de Carl Wieman en la Universidad de Colorado Boulder. Esta incluye simulaciones sobre fenómenos como la interferencia, el efecto fotoeléctrico, el túnel cuántico y el experimento de Stern–Gerlach (ESG) (Wieman et al., 2008). Dichas simulaciones han demostrado ser herramientas eficaces para mejorar la comprensión conceptual, promover la exploración autónoma y fortalecer la conexión entre el formalismo matemático y la interpretación física de los fenómenos. Estudios recientes en universidades latinoamericanas (González y Torres, 2023) confirman estos hallazgos, mostrando mejoras del 35 % en el rendimiento académico con el uso de PhET.

No obstante, la mayoría de estas representaciones digitales presentan una limitación significativa: tienden a simplificar en exceso los procesos cuánticos, dejando de lado aspectos conceptuales fundamentales como:

- La descripción completa mediante matrices de densidad
- La distinción crucial entre estados puros y mezclados
- La representación geométrica en la esfera de Bloch
- El proceso real de colapso del estado durante la medición

Estas omisiones, pueden terminar reforzando concepciones erróneas entre los estudiantes. Por ejemplo, pueden llevar a pensar que un estado puro se reduce a una probabilidad clásica, o que el acto de medir simplemente revela un valor que ya existía previamente (Nielsen y Chuang, 2010; Singh y Marshman, 2015). Investigaciones recientes (Chen et al., 2022) han cuantificado este problema, encontrando que el 65 % de los estudiantes que usaron simulaciones simplificadas mantuvieron concepciones erróneas sobre la medición cuántica.

Frente a este panorama, se hace evidente la necesidad de desarrollar simulaciones y herramientas educativas que integren de manera orgánica estos elementos teóricos con una base física rigurosa y un enfoque pedagógico coherente. Solo así podremos favorecer una comprensión verdaderamente completa

y sin fisuras de los sistemas cuánticos.

El experimento de Stern–Gerlach es relevante para la enseñanza de la mecánica cuántica, ya que permite evidenciar de forma clara la cuantización del espín y la naturaleza proyectiva de la medición (véase la Figura 3.1). En este experimento, un haz de átomos con momento magnético intrínseco atraviesa un campo magnético no uniforme, separándose en trayectorias distintas según la proyección del espín sobre el eje de medición.

Desde la didáctica, este experimento se convierte en un recurso muy significativo, ya que ayuda a los estudiantes a visualizar y comprender conceptos fundamentales como:

- La cuantización discreta del momento angular
- La superposición y el colapso del estado
- La relación entre el estado inicial y las probabilidades de medición
- La evolución del estado al someterse a nuevas mediciones o rotaciones

Sin embargo, la mayoría de los simuladores disponibles no distinguen entre un haz preparado en un estado puro (por ejemplo, $|\uparrow\rangle$) y uno en un estado mezclado (por ejemplo, $\hat{\rho} = 0,5|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + 0,5|\downarrow\rangle\langle\downarrow|$). Esta diferencia es clave para comprender fenómenos como la decoherencia y la estadística cuántica. Por ello, una simulación que represente explícitamente ambos casos, como se muestra en la Tabla 3.1, puede convertirse en una herramienta muy útil para fortalecer la enseñanza y el aprendizaje de los fundamentos de la teoría cuántica. Trabajos recientes (R. Silva y Martínez, 2023) han demostrado que incluir esta distinción mejora significativamente la comprensión de la decoherencia entre estudiantes de pregrado.

2.4. Necesidad de nuevas herramientas educativas

Autores como Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) y Singh y Marshman (2015) coinciden en que la enseñanza de la mecánica cuántica debe lograr un equilibrio entre el formalismo matemático y la intuición física. En esta perspectiva, las simulaciones deben avanzar hacia modelos más completos, incorporando aspectos del formalismo cuántico como las matrices de densidad, los operadores proyectores, las mediciones parciales y las transformaciones unitarias, con el fin de ofrecer una representación más fiel y formativa de los fenómenos

cuánticos.

Diversos estudios en educación en física (Çataloğlu y Robinett, 2010; Escalada y Zollman, 2004; McKagan et al., 2008b) evidencian que el aprendizaje de la física moderna se fortalece cuando los estudiantes interactúan activamente con representaciones visuales, formulan predicciones y verifican resultados en tiempo real. Sin embargo, muchas de las simulaciones actuales tienden a simplificar los fenómenos con fines visuales, lo que puede afectar la fidelidad conceptual y formal del modelo. Esta desconexión entre la intuición física y el formalismo teórico se vuelve evidente cuando los estudiantes se enfrentan a conceptos como la superposición, los procesos de medición o la mezcla de estados cuánticos, generando una ruptura conceptual que dificulta el aprendizaje significativo (Wang y Smith, 2023).

Para conectar esta ruptura, surge la necesidad de crear herramientas educativas interactivas que ofrezcan una aproximación más apropiada a los sistemas cuánticos. Estas herramientas deberían caracterizarse por:

- **Mostrar de manera explícita** las diferencias entre estados puros y mezclados, ilustrando cómo cada tipo de estado conlleva implicaciones experimentales distintas y resultados medibles diferentes (Kumar & Johnson, 2022).
- **Permitir ajustar interactivamente** la dirección del eje de medición (por ejemplo, rotar entre las bases z o x) y observar en tiempo real cómo estas modificaciones alteran las probabilidades de detección y el comportamiento del sistema (S. Rodríguez et al., 2023).
- **Visualizar el proceso de colapso** del estado cuántico, estableciendo una conexión directa y observable entre el acto de medir y la evolución resultante del sistema (Lee & Brown, 2023).
- **Proporcionar un entorno dinámico** e intuitivo que incentive la exploración autónoma y la construcción gradual de modelos mentales alineados con los principios de la teoría cuántica (García & Wilson, 2023).

En este contexto, el desarrollo de herramientas digitales basadas en el experimento de Stern-Gerlach se presenta como una oportunidad para fortalecer la comprensión de los fundamentos cuánticos desde una triple perspectiva: interactiva, crítica y contextualizada. Estas propuestas no solo enriquecen de manera educativa, sino que contribuyen activamente al diseño de experiencias

de aprendizaje más coherentes con los retos contemporáneos de la enseñanza de la física moderna y con las competencias científicas que implica la formación del siglo XXI.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. *Estado* en el contexto de la mecánica cuántica

En la mecánica cuántica, el *estado* de un sistema contiene toda la información que podemos saber sobre él. Imagínese que en lugar de describir una partícula con posición y velocidad precisas (como en la física clásica), usamos un "vector de estado" $|\psi\rangle$ (llamado *ket* en la notación de Dirac) que vive en un espacio matemático abstracto llamado *espacio de Hilbert* (Ballentine, 1998; Dirac, 1958). Este vector nos dice todo lo que podemos predecir sobre los resultados de las mediciones.

La manera de extraer información del estado es mediante la *regla de Born*. Pensemos en que queremos medir una propiedad específica (como el espín). Los posibles resultados de la medición corresponden a unos estados base $\{|\phi_i\rangle\}$ (también llamados *kets*). La probabilidad de obtener un resultado particular a_i se calcula proyectando nuestro estado $|\psi\rangle$ sobre el estado base correspondiente:

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

Donde $\langle\phi_i|$ (llamado *bra*) es el dual del estado base $|\phi_i\rangle$. Es como si el estado fuera una receta que nos da las probabilidades de todos los resultados posibles (Griffiths, 2018; Peres, 2002).

Una característica de la cuántica es que los estados pueden estar en *superposición*. Esto significa que pueden ser "mezclas" de varios estados base al mismo tiempo. Por ejemplo, un electrón puede estar en una superposición de espín

hacia arriba y espín hacia abajo simultáneamente. Solo cuando lo medimos es cuando elige uno de los resultados, con probabilidades dadas por la regla de Born.

El estado también evoluciona en el tiempo de manera determinista según la *ecuación de Schrödinger*:

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

donde \hat{H} representa la energía del sistema. Esta evolución es suave y predecible, hasta que hacemos una medición (Ballentine, 1998; Shankar, 1994).

Finalmente, la representación del estado depende de qué queremos medir. Podemos describir el mismo estado de diferentes maneras: como función de posición $\psi(x)$, como función de momento $\tilde{\psi}(p)$, etc. Estas diferentes perspectivas están conectadas matemáticamente, por ejemplo mediante la transformada de Fourier (Nielsen y Chuang, 2010; Sakurai y Napolitano, 1995).

3.2. *Espín*

El espín es una propiedad fundamental de las partículas elementales, como los electrones, que se puede entender como una forma de rotación intrínseca. A diferencia de un objeto que gira en el espacio, el espín es una característica inherente de la partícula, presente incluso cuando está completamente en reposo.

Esta propiedad fue descubierta al estudiar la luz que emiten los átomos (Uhlenbeck y Goudsmit, 1925), y se confirmó experimentalmente con el famoso experimento de Stern-Gerlach (Stern y Gerlach, 1922). En este experimento, cuando se enviaban átomos a través de un campo magnético no uniforme (donde la fuerza del campo cambia según la posición), en lugar de esparcirse en todas direcciones como se esperaría clásicamente, se separaban en caminos bien definidos, demostrando que el espín está cuantizado.

La cuantización significa que el espín solo puede tomar valores específicos y discretos. Para un electrón, que tiene espín 1/2, solo hay dos posibilidades cuando medimos su orientación en cualquier dirección:

$$+\frac{1}{2}\hbar \quad (\text{espín "hacia arriba"}) \quad \text{o} \quad -\frac{1}{2}\hbar \quad (\text{espín "hacia abajo"})$$

donde \hbar es una constante física muy pequeña que relaciona estas cantidades cuánticas.

Estos dos estados posibles se representan matemáticamente como:

$$|\uparrow\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad |\downarrow\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

que podemos pensar como dos direcciones fundamentales en un espacio abstracto de dos dimensiones.

Para describir cómo medimos y manipulamos el espín, usamos las *matrices de Pauli*:

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Estas matrices nos permiten calcular qué sucede cuando medimos el espín en diferentes direcciones. Por ejemplo, si un electrón está en el estado $|\uparrow\rangle$ (espín hacia arriba en z) y medimos su espín en la dirección x, las matrices nos dicen que hay igual probabilidad de encontrar espín hacia la izquierda o hacia la derecha.

El espín determina cómo se comportan los electrones en los átomos, cómo se unen para formar moléculas, y es la base de tecnologías modernas como la resonancia magnética y las computadoras cuánticas (Nielsen y Chuang, [2010](#)).

3.3. *Estado puro*

Un *estado puro* en mecánica cuántica representa la máxima información posible sobre un sistema físico. Matemáticamente, corresponde a un vector unitario $|\psi\rangle$ en un espacio de Hilbert complejo, que describe completamente el estado de preparación del sistema (Ballentine, [1998](#); Dirac, [1958](#)).

Para sistemas de dos niveles como el espín de un electrón, los estados puros se construyen como combinaciones lineales de dos estados base ortonormales. En la base z, estos son $|\uparrow\rangle_z$ (espín $+\frac{\hbar}{2}$) y $|\downarrow\rangle_z$ (espín $-\frac{\hbar}{2}$). Un estado puro general se expresa como:

$$|\psi\rangle = \alpha|\uparrow\rangle_z + \beta|\downarrow\rangle_z,$$

donde α y β son números complejos que satisfacen $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Los cuadrados de estos coeficientes representan probabilidades: $|\alpha|^2$ es la probabilidad de medir espín hacia arriba, y $|\beta|^2$ de medir espín hacia abajo.

La representación mediante *matriz de densidad* $\hat{\rho} = |\psi\rangle\langle\psi|$ proporciona un formalismo más general. Para un estado puro, esta matriz cumple tres propiedades clave:

- **Hermiticidad:** $\hat{\rho}^\dagger = \hat{\rho}$
- **Normalización:** $\text{Tr}(\hat{\rho}) = 1$
- **Pureza:** $\text{Tr}(\hat{\rho}^2) = 1$

(Nielsen y Chuang, [2010](#); Schlosshauer, [2007](#))

La *esfera de Bloch* ofrece una representación geométrica que permite visualizar estados puros. En esta representación:

- Cada estado puro de un sistema de dos niveles corresponde a un punto único sobre la superficie de una esfera unitaria
- El polo norte representa el estado $|\uparrow\rangle_z$
- El polo sur representa el estado $|\downarrow\rangle_z$
- El ecuador representa estados de superposición con igual probabilidad (50 %-50 %)
- Puntos intermedios representan estados con diferentes distribuciones de probabilidad

Matemáticamente, cualquier estado puro se parametriza como:

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |\uparrow\rangle_z + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |\downarrow\rangle_z$$

donde:

- θ (colatitud): controla las probabilidades de medición
- ϕ (longitud): representa la *fase cuántica* responsable de efectos de interferencia

El vector $\vec{r} = (\sin\theta \cos\phi, \sin\theta \sin\phi, \cos\theta)$ se denomina *vector de Bloch* y apunta desde el centro de la esfera hacia el punto que representa el estado (Chuang y Nielsen, [1997](#); Preskill, [1998](#)).

Ejemplos :

- $\theta = 0, \phi = 0: \vec{r} = (0, 0, 1) \rightarrow$ estado $|\uparrow\rangle_z$
- $\theta = \pi, \phi = 0: \vec{r} = (0, 0, -1) \rightarrow$ estado $|\downarrow\rangle_z$
- $\theta = \frac{\pi}{2}, \phi = 0: \vec{r} = (1, 0, 0) \rightarrow$ estado $|\rightarrow\rangle_x = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$
- $\theta = \frac{\pi}{2}, \phi = \frac{\pi}{2}: \vec{r} = (0, 1, 0) \rightarrow$ estado $|\otimes\rangle_y = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + i|\downarrow\rangle)$

Esta representación visual es particularmente útil para entender:

- Rotaciones de estados bajo operadores unitarios
- Evolución temporal de sistemas cuánticos
- Operaciones en computación cuántica (compuertas cuánticas)
- Efectos de interferencia y superposición

Los estados puros son fundamentales para fenómenos cuánticos como interferencia y coherencia, donde las amplitudes de probabilidad (no las probabilidades) se superponen constructiva o destructivamente.

3.4. *Estado mezclado*

Un *estado mezclado* describe una situación en la que existe incertidumbre *clásica* sobre la preparación de un sistema cuántico. Matemáticamente, se representa mediante un *operador de densidad* que es una combinación convexa de proyectores sobre estados puros:

$$\hat{\rho} = \sum_{i=1}^N p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i|,$$

con $p_i \geq 0$ y $\sum_i p_i = 1$. Cada p_i representa la probabilidad clásica de que el sistema esté preparado en el estado puro $|\psi_i\rangle$ (Nielsen y Chuang, [2010](#); Schlosshauer, [2007](#)).

3.4.1. **Distinción fundamental: Superposición vs. Mezcla**

La diferencia crucial entre un estado puro y uno mezclado se aprecia al comparar:

Estado puro (superposición cuántica):

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$$

$$\hat{\rho}_{\text{puro}} = |\psi\rangle\langle\psi| = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Estado mezclado (ignorancia clásica):

$$\hat{\rho}_{\text{mezclado}} = \frac{1}{2}|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + \frac{1}{2}|\downarrow\rangle\langle\downarrow| = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La diferencia clave está en los elementos no diagonales (coherencias): el estado puro los tiene, el estado mezclado no.

3.4.2. Criterios de pureza

El criterio fundamental para distinguir estados puros de mezclados es:

$$\begin{aligned} \text{Tr}(\hat{\rho}^2) = 1 &\quad \Rightarrow \quad \text{Estado puro} \\ \text{Tr}(\hat{\rho}^2) < 1 &\quad \Rightarrow \quad \text{Estado mezclado} \end{aligned}$$

(Fano, [1957](#))

Para un sistema de espín $\frac{1}{2}$, la matriz de densidad siempre puede escribirse como:

$$\hat{\rho} = \frac{1}{2}(\mathbb{I} + \vec{P} \cdot \vec{\sigma})$$

donde $\vec{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ son las matrices de Pauli y \vec{P} es el *vector de polarización*. La magnitud $|\vec{P}|$ cuantifica el grado de pureza:

- $|\vec{P}| = 1$: Estado puro (punto en la superficie de la esfera de Bloch)
- $|\vec{P}| < 1$: Estado mezclado (punto en el interior de la esfera de Bloch)
- $|\vec{P}| = 0$: Estado completamente mezclado (centro de la esfera)

3.4.3. Entropía y grado de mezcla

La *entropía de von Neumann* cuantifica el desorden del estado:

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

- $S(\hat{\rho}) = 0$: Estado puro (máxima información)
- $S(\hat{\rho}) > 0$: Estado mezclado (información incompleta)
- $S(\hat{\rho}) = \log 2$: Estado completamente mezclado (máxima ignorancia)

3.4.4. Interpretación física y ejemplos

¿Por qué aparecen estados mezclados?

- **Preparación imperfecta:** Cuando no controlamos exactamente cómo preparamos el sistema
- **Interacción con el ambiente:** Sistemas que pierden coherencia (decoherencia)
- **Equilibrio térmico:** A temperatura finita, los sistemas tienden a estados mezclados

Ejemplo en Stern-Gerlach:

- **Estado puro:** Haz de electrones todos preparados exactamente igual
- **Estado mezclado:** Haz donde el 50 % tiene espín arriba y 50 % abajo, pero no sabemos cuál es cuál

En el contexto educativo, entender estados mezclados es crucial para interpretar resultados experimentales reales, donde las preparaciones nunca son perfectamente puras.

3.5. Comparación entre estado puro y estado mezclado

En la teoría cuántica, los estados puros y mezclados son dos formas fundamentales de describir el estado de un sistema. Mientras que los estados puros representan el máximo conocimiento posible del sistema, en la siguiente tabla muestra sus principales diferencias:

Característica	Estado Puro	Estado Mezclado
Definición	El sistema se encuentra completamente descrito por un solo vector de estado $ \psi\rangle$ en el espacio de Hilbert.	El sistema está en una combinación estadística de diferentes estados puros, con probabilidades asociadas.
Representación	Matriz de densidad: $\hat{\rho} = \psi\rangle\langle\psi $	Matriz de densidad: $\hat{\rho} = \sum_i p_i \psi_i\rangle\langle\psi_i $, con $0 < p_i < 1$, $\sum_i p_i = 1$
Rastro de $\hat{\rho}^2$	$\text{Tr}(\hat{\rho}^2) = 1$	$\text{Tr}(\hat{\rho}^2) < 1$
Interpretación física	Conocimiento del estado cuántico; coherencia entre componentes.	Desconocimiento parcial del estado del sistema; pérdida de coherencia.
Ejemplo típico	Superposición: $ \psi\rangle = \alpha \uparrow\rangle + \beta \downarrow\rangle$	Mezcla: $\hat{\rho} = p \uparrow\rangle\langle\uparrow + q \downarrow\rangle\langle\downarrow $
Presencia de interferencia	Sí, debido a la coherencia cuántica.	No, ya que las componentes están estadísticamente mezcladas.
Uso común	Descripción de sistemas aislados y coherentes.	Sistemas abiertos, decoherentes o bajo incertidumbre clásica.
Referencias	Ballentine, 1998; Dirac, 1958; Nielsen y Chuang, 2010	Ballentine, 1998; Nielsen y Chuang, 2010

Cuadro 3.1: Comparación entre estado puro y estado mezclado en mecánica cuántica. Fuente: Elaboración propia.

3.6. Experimento de Stern-Gerlach

El experimento de Stern-Gerlach (ESG) es uno de los más importantes en la historia de la mecánica cuántica. Fue propuesto en 1922 por los físicos alemanes Otto Stern y Walther Gerlach, en el contexto en el que la física atómica atravesaba una etapa de cambio entre la teoría cuántica antigua y el inicio de la mecánica cuántica moderna. Su intención era validar la cuantización espacial del momento angular, una hipótesis que nació del modelo de Bohr-Sommerfeld y que no podía explicarse dentro del marco de la física clásica (Stern y Gerlach, 1922).

A inicios del siglo XX, el modelo atómico de Niels Bohr había logrado expli-

car los espectros del hidrógeno, postulando que los electrones se encontraban en órbitas estacionarias con momentos angulares cuantizados. Luego Arnold Sommerfeld hizo mejoras al modelo mediante órbitas elípticas y la inclusión de la cuantización del momento angular en términos de números cuánticos discretos pero estos modelos aún carecían de una verificación experimental directa sobre la cuantización del momento angular, más allá de las coincidencias espectroscópicas (Pais, [1986](#)).

Otto Stern, quien entonces trabajaba como asistente de Max Born en Frankfurt, propuso una forma de poner a prueba la cuantización del momento angular. Si los átomos poseían un momento magnético intrínseco, entonces, al atravesar un campo magnético no uniforme, deberían experimentar una fuerza que los desviara en función de la orientación de dicho momento Cassidy, [1992](#).

La elección de un campo no uniforme es fundamental para el experimento. Mientras que un campo magnético uniforme solo ejerce un torque sobre un dipolo magnético (haciéndolo precesar), un campo con un gradiente espacial (es decir, cuya intensidad varía con la posición) sí genera una fuerza neta. Esta fuerza, descrita en electrodinámica clásica por $\vec{F} = \nabla(\vec{\mu} \cdot \vec{B})$, donde $\vec{\mu}$ es el momento magnético, es la responsable de desviar la trayectoria de los átomos. En el experimento de Stern-Gerlach, se diseñó un imán con una geometría especial que creaba un gradiente de campo intenso en la dirección z , permitiendo separar el haz atómico en componentes discretas.

Para llevar a cabo esta propuesta, Stern y Gerlach construyeron un dispositivo experimental en el cual un haz térmico de átomos de plata era emitido desde un horno, colimado mediante rendijas, y dirigido hacia una región donde se establecía un campo magnético no uniforme (inhomogéneo) generado por un imán especialmente diseñado. Los átomos de plata fueron seleccionados por tener un solo electrón no apareado en su capa más externa (configuración electrónica $[\text{Kr}]4d^{10}5s^1$), lo cual implicaba que su momento magnético era atribuible a una única partícula (Grimberg y Hiley, [2020](#)).

Desde el punto de vista clásico, se esperaba que los momentos magnéticos pudieran orientarse en cualquier dirección angular posible, generando una distribución continua de desviaciones en la pantalla de detección (es decir, una mancha alargada que cubría todo el rango posible entre la máxima desviación hacia arriba y la máxima desviación hacia abajo). Sin embargo, los

resultados experimentales mostraron un comportamiento radicalmente diferente: el patrón observado consistía en **dos bandas nítidas y separadas**, lo cual evidenciaba que solo existían dos orientaciones posibles del momento magnético respecto al eje del campo magnético (Stern y Gerlach, 1922).

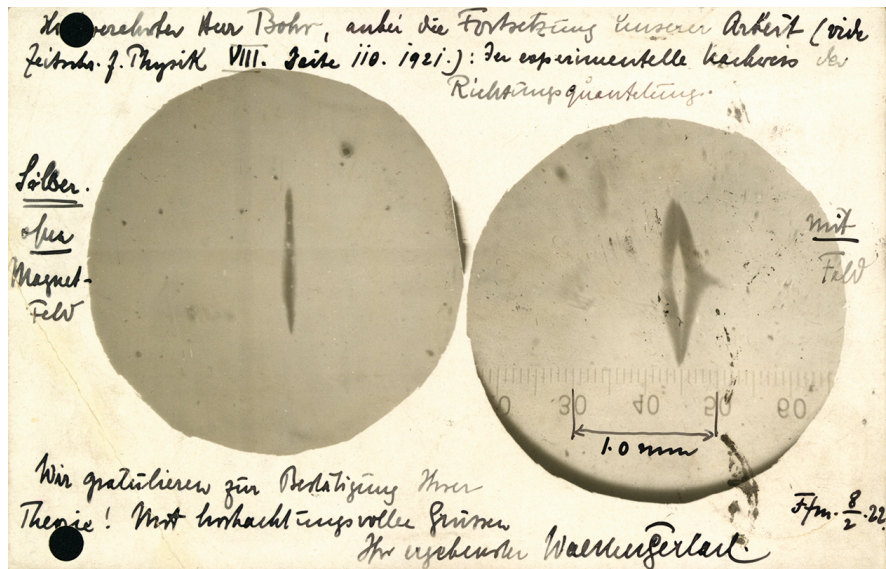


Figura 3.1: Fotografía original del experimento de Stern y Gerlach (1922). A la izquierda se observa la distribución continua sin campo magnético, y a la derecha, la bifurcación en dos bandas al aplicar el campo. Esta imagen constituye una evidencia directa de la cuantización espacial del momento angular (Stern y Gerlach, 1922).

Este resultado fue profundamente desconcertante para la física de la época. No encajaba con el modelo orbital del momento angular, el cual predecía múltiples orientaciones posibles de la proyección L_z del momento angular orbital para $l \neq 0$. Lo que el experimento revelaba era la existencia de una nueva propiedad cuántica, aún no formulada formalmente, que más tarde sería denominada *espín*.

En 1925, dos jóvenes físicos, George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit, propusieron que los electrones poseían un momento angular intrínseco, denominado *espín*, con valor $s = \frac{1}{2}$, cuya proyección s_z sobre un eje podía ser $+\frac{1}{2}\hbar$ o $-\frac{1}{2}\hbar$ (Uhlenbeck y Goudsmit, 1925). Esto explicaba de forma natural los resultados del ESG: los átomos de plata, al tener un solo electrón no apareado, se comportaban como partículas con espín $\frac{1}{2}$, y la bifurcación en la pantalla correspondía a las dos posibles proyecciones de su espín.

Desde el punto de vista teórico, el momento magnético de una partícula con

espín está dado por:

$$\vec{\mu}_s = -g_s \mu_B \vec{S} / \hbar,$$

donde $g_s \approx 2$ es el factor giromagnético del electrón, μ_B es el magnetón de Bohr, y \vec{S} es el operador de espín. Al interactuar con un campo magnético no uniforme \vec{B} , la fuerza sobre el dipolo magnético es:

$$\vec{F} = \nabla(\vec{\mu}_s \cdot \vec{B}),$$

lo cual provoca la separación observable en el experimento (Griffiths, 2018).

Más allá de su impacto empírico, el ESG tuvo profundas implicaciones filosóficas. Puso en evidencia que la medición en mecánica cuántica no revela un valor previo del observable, sino que causa un colapso del estado hacia uno de los valores propios del operador correspondiente. Esto convirtió al experimento en un ejemplo paradigmático del problema de la medición cuántica y del concepto de estados proyectados (Nielsen y Chuang, 2010; Susskind y Friedman, 2013).

Además, su esquema experimental ha sido difundido en varias direcciones. En versiones modernas, se utilizan secuencias de aparatos de Stern-Gerlach orientados en diferentes ejes (por ejemplo, z , luego x , luego nuevamente z), lo cual explora conceptos como la coherencia cuántica, el entrelazamiento y la distinción entre estados puros y mezclados. Estas extensiones son fundamentales en la teoría de la información cuántica y en la física de qubits (Dirac, 1958; Nielsen y Chuang, 2010).

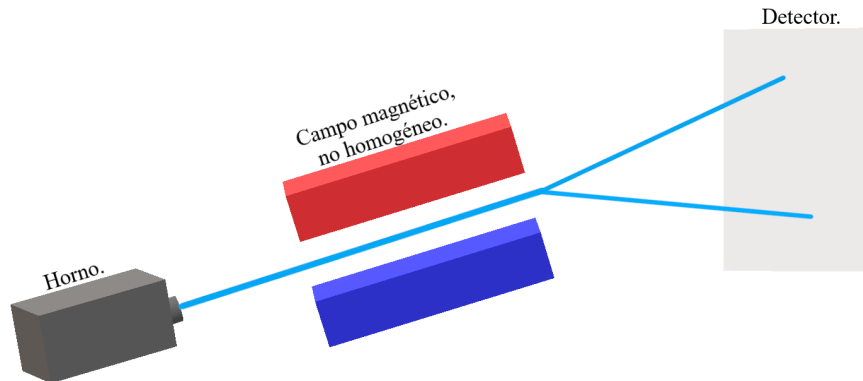


Figura 3.2: Esquema del experimento de Stern-Gerlach: un haz de átomos de plata se separa en dos componentes al pasar por un campo magnético no uniforme (Stern y Gerlach, 1922; Susskind y Friedman, 2013)

En resumen, el experimento de Stern-Gerlach fue una demostración importante de algunas propiedades físicas fundamentales, como el espín, no tienen

análogos clásicos. Marcó el inicio del reconocimiento del espín como grado de libertad cuántico, y las bases para el formalismo de operadores, funciones de onda y espacio de Hilbert que caracteriza a la mecánica cuántica moderna. El experimento ha transmitido tanto en la teoría como en aplicaciones contemporáneas, desde computación cuántica hasta experimentos de entrelazamiento.

3.7. Dificultades en la enseñanza y el aprendizaje de la mecánica cuántica en educación superior

La enseñanza de la mecánica cuántica a nivel universitario representa uno de los desafíos más significativos en la educación en física, caracterizándose por una brecha conceptual entre el mundo clásico y el cuántico que los estudiantes deben cruzar (Muller y Wiesner, 2008). Esta transición se ve obstaculizada por la naturaleza intrínsecamente abstracta de la teoría, el alto nivel de formalismo matemático requerido y la ruptura con las experiencias e intuiciones del mundo macroscópico, generando una barrera significativa para la comprensión conceptual y la interpretación física de los fenómenos.

La investigación en educación física ha documentado que, a pesar de los avances pedagógicos, los estudiantes de educación superior suelen mantener ideas erróneas o modelos mentales incompletos sobre los fundamentos de la teoría. Estas dificultades se manifiestan como:

- **La superposición de estados:** Los estudiantes frecuentemente la interpretan como una mezcla física o una alternancia entre estados, en lugar de comprenderla como la existencia simultánea de amplitudes de probabilidad antes de una medición.
- **El espín:** Surge la dificultad de conceptualizar una propiedad cuántica intrínseca sin un análogo clásico directo. La pregunta “¿qué es el espín?” suele responderse con un modelo clásico de rotación, lo que lleva a confusiones.
- **El proceso de medición y el colapso de la función de onda:** Existe una dificultad generalizada para entender el papel fundamental del observador y la naturaleza probabilística e irreversible del acto de medir, distinguiéndolo de un simple proceso de revelación.

De acuerdo con Singh (2015), las principales dificultades en el aprendizaje de

la mecánica cuántica se relacionan precisamente con la interpretación de los estados cuánticos *entendiendo por “interpretación” la tendencia de los estudiantes a atribuirles una realidad física definida y clásica antes de la medición* y la comprensión de su carácter probabilístico fundamental. Esta problemática evidencia la necesidad imperante de integrar de manera coherente representaciones matemáticas, gráficas y conceptuales que faciliten la construcción de modelos mentales más ajustados.

Aunque el uso de recursos digitales ha aumentado en las aulas universitarias, (Hu, 2023) señalan que los estudiantes aún tienen problemas para conectar el formalismo teórico con la realidad física que pretende describir, en parte por la falta de actividades que promuevan la reflexión metacognitiva y la visualización de lo abstracto. Es en este contexto específico de dificultades donde las simulaciones computacionales emergen como una herramienta pedagógica crucial para la educación superior, al ofrecer la posibilidad de explorar de manera visual, interactiva y dinámica el comportamiento de sistemas cuánticos inaccesibles a la percepción directa.

De acuerdo con J. e. a. McAfee (2025), las tendencias actuales en la enseñanza de la física apuntan al desarrollo de materiales que promuevan precisamente esta exploración activa y el razonamiento conceptual. En la misma línea, McKagan et al. (2008a) y Otero et al. (2009) resaltan el valor de las simulaciones siempre que se integren dentro de secuencias didácticas bien estructuradas que orienten y problematicen la construcción del conocimiento, yendo más allá de la mera ilustración.

En consecuencia, superar las dificultades persistentes en la enseñanza y el aprendizaje de la mecánica cuántica en el nivel superior implica combinar el rigor de los contenidos con estrategias didácticas que fomenten una participación activa del estudiante. Las simulaciones, en este marco, se presentan no como una solución mágica, sino como una herramienta pedagógica potentemente alineada con este objetivo, al facilitar la visualización, la experimentación “qué pasaría si...” y la confrontación de ideas previas, lo que puede conducir a una mejor comprensión y una apropiación más significativa de los conceptos cuánticos por parte de los futuros físicos e ingenieros.

3.8. Enfoque Didáctico de la Simulación

El desarrollo de la simulación del experimento de Stern–Gerlach se enmarca dentro de la **Didáctica de la Física**, disciplina que analiza sistemáticamente los procesos de enseñanza y aprendizaje de los conceptos físicos, así como las estrategias que facilitan su comprensión en el nivel universitario (Greca y Freire, 2014). En este contexto, la simulación no se concibe únicamente como un producto tecnológico, sino como un *recurso didáctico* fundamentado pedagógicamente, diseñado para promover la construcción del conocimiento, la participación activa de los estudiantes y el aprendizaje significativo.

Investigaciones previas (McKagan et al., 2008a; Otero et al., 2009; Singh, 2015) han evidenciado las dificultades persistentes que enfrentan los estudiantes al abordar conceptos abstractos de la mecánica cuántica, particularmente en la interpretación de fenómenos como el espín y la superposición de estados. La simulación que se propone busca enfrentar estos desafíos mediante una representación visual e interactiva del experimento de Stern–Gerlach, facilitando así una comprensión *más intuitiva* de estos conceptos. **Esta intuición se refiere a la capacidad de los estudiantes para construir modelos mentales operativos** que les permitan predecir comportamientos, relacionar variables y comprender las consecuencias físicas de principios abstractos, superando la barrera del formalismo matemático puro.

Desde una perspectiva didáctica, el uso de la simulación se organiza en tres momentos estructurados que integran la labor del docente y del estudiante en el contexto de la educación superior:

- **Antes del uso del recurso:** El docente genera preguntas problémicas que inviten a predecir resultados y activa los conocimientos previos sobre magnetismo, momento angular y medición cuántica, con el fin de identificar representaciones iniciales y orientar la exploración posterior.
- **Durante del uso del recurso:** Los estudiantes exploran la simulación, ajustan parámetros físicos (como la intensidad del campo magnético o la orientación del espín) y observan cómo se comportan las partículas al atravesar los imanes, fomentando la participación activa y el aprendizaje por indagación guiada.
- **Después del uso del recurso:** Se lleva a cabo una socialización y discusión crítica guiada por el docente para contrastar las observacio-

nes experimentales con los modelos teóricos, promoviendo la reflexión metacognitiva, la comprensión profunda de los principios cuánticos y la transferencia de los nuevos aprendizajes.

De esta manera, la simulación se establece como una herramienta pedagógica que integra de manera coherente los componentes conceptuales, experimentales y reflexivos del aprendizaje, fortaleciendo la conexión entre la teoría cuántica abstracta y la experiencia educativa concreta en el ámbito universitario.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Enfoque metodológico

Este trabajo de grado tiene un enfoque cualitativo y se centra en el diseño de una herramienta didáctica para la enseñanza de conceptos fundamentales de la mecánica cuántica como el espín, estados puros, estados mezclados y superposición. El diseño de la simulación sigue una **metodología de desarrollo basada en diseño educativo**, que integra principios de la didáctica de la física con las mejores prácticas en el desarrollo de simulaciones interactivas.

El carácter exploratorio de la investigación surge a la necesidad de encontrar formas intuitivas de representar ideas abstractas y contraintuitivas mediante simulaciones digitales, un área que ha ganado relevancia creciente en la investigación educativa en física cuántica (Klein et al., 2022; Stevens & Finkelstein, 2020). La metodología empleada combina el análisis de necesidades educativas específicas con el diseño iterativo de la herramienta, asegurando que su desarrollo responda a los desafíos documentados en la enseñanza de la mecánica cuántica a nivel universitario.

4.2. Diseño de la simulación

La simulación se basó en el experimento de Stern–Gerlach y se implementó en el motor Unity 6, seleccionado por sus entornos 3D, su compatibilidad multiplataforma y su capacidad de simulación física en tiempo real. El desarrollo se organizó considerando múltiples dimensiones del diseño educativo:

- **Diseño de contenidos y conceptos:** Se representó un haz de partículas

con espín $\frac{1}{2}$ atravesando una región con campo magnético no uniforme. Las partículas se simularon mediante emisores, con una desviación dependiente del espín, manteniendo la analogía con el experimento original. Se incorporó un imán tridimensional con la forma característica del dispositivo Stern–Gerlach, generador del campo magnético responsable de la separación del haz. Este imán es rotable libremente, lo que permite observar cómo la orientación del campo afecta la dirección de desviación y facilita la comprensión de la diferencia entre estados puros y mezclados.

- **Diseño de interacción:** Cada partícula fue asignada a un estado puro o mezclado, dependiendo de la configuración elegida por el usuario. Los estados puros se definieron como combinaciones lineales de los estados base $|\uparrow\rangle$ y $|\downarrow\rangle$, y los estados mezclados se implementaron como distribuciones estadísticas usando matrices de densidad. La simulación cuenta con cuatro botones interactivos para seleccionar los estados de medición: Z arriba, Z abajo, X derecha y X izquierda. Esto permite observar cómo varía la proyección del espín en diferentes ejes y comparar los resultados entre cada orientación. **Adicionalmente, se incluyeron controles de ejecución** que permiten pausar y reanudar la simulación, así como ajustar la velocidad de emisión de partículas entre modos lento, normal y rápido, facilitando el análisis detallado del fenómeno.
- **Diseño de interfaz y navegabilidad:** Se añadió un detector virtual que muestra la proporción de partículas desviadas en cada dirección, representando la proyección del espín sobre el eje del campo magnético. Esto permite distinguir entre estados puros y mezclados. Además, la interfaz incluye un indicador del ángulo de rotación del imán, que ayuda a comprender cómo la orientación del campo afecta las trayectorias. La navegación se diseñó intuitiva, con controles claramente etiquetados y una disposición visual que guía al usuario a través del flujo experimental.

El diseño se basó en principios de visualización científica y en experiencias previas con simulaciones educativas como las de PhET Wieman et al., [2008](#), adaptadas al contexto curricular de la educación media, incorporando mejores prácticas en usabilidad y diseño centrado en el usuario educativo.

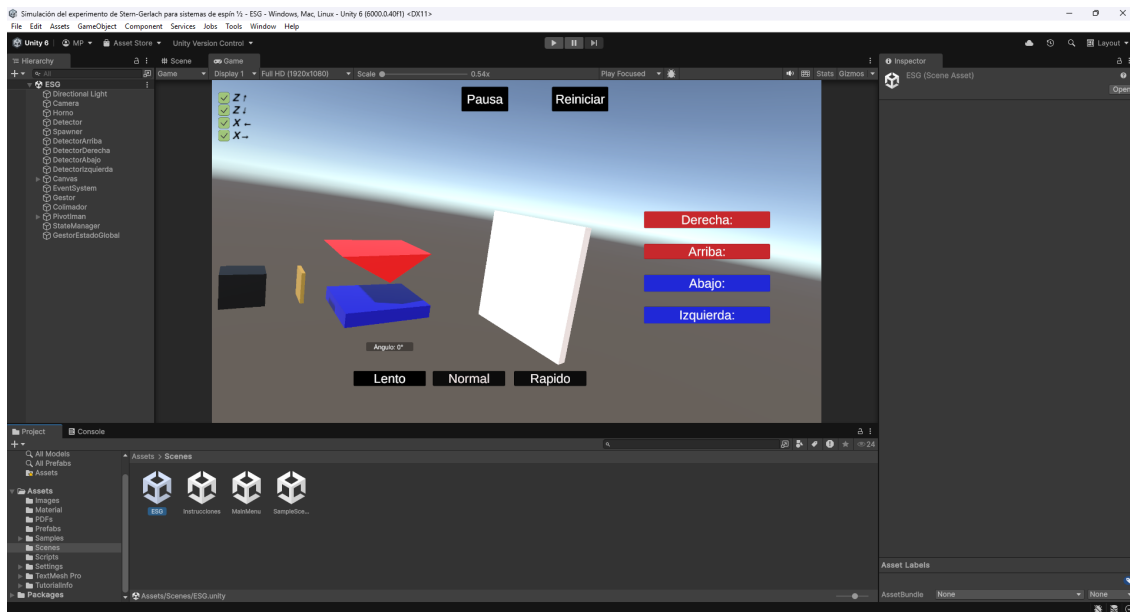


Figura 4.1: Interfaz de la simulación del experimento Stern-Gerlach mostrando los componentes principales: el colimador de partículas, el imán rotable, los detectores de partículas, los botones de selección de estados cuánticos (kets) y los controles de velocidad y pausa. En la parte superior se observan los cuatro contadores de partículas para las direcciones arriba, abajo, izquierda y derecha.

4.3. Análisis de simulaciones existentes

Antes del desarrollo de la simulación, se llevó a cabo un análisis cualitativo de las simulaciones existentes del experimento de Stern–Gerlach, con el objetivo de identificar sus alcances didácticos, limitaciones conceptuales y niveles de interactividad. Para ello, se consideraron aspectos como:

- Claridad conceptual en la representación del fenómeno cuántico.
- Precisión en la representación gráfica del espín y su proyección en distintos ejes.
- Posibilidad de distinguir entre estados puros y mezclados, así como su evolución tras la medición.
- Grado de interactividad y control disponible sobre los parámetros experimentales (campo magnético, orientación, intensidad, entre otros).
- Correspondencia precisa entre las visualizaciones y el formalismo matemático de la mecánica cuántica.
- Capacidad para representar el proceso de medición como fenómeno pro-

babilístico.

4.3.1. Análisis de simulaciones específicas

PhET Interactive Simulations Project

- **Enlace:** <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/quantum-spins/latest/quantum-spins.html>
- **Fortalezas:** Interfaz intuitiva, amplia difusión y documentación, accesibilidad multiplataforma.
- **Limitaciones:** Representación simplificada del espín que no distingue adecuadamente entre estados puros y mezclados. No incorpora matrices densidad ni permite visualizar la evolución temporal del estado durante la medición.

IBM Quantum Experience

- **Enlace:** <https://quantum-computing.ibm.com/>
- **Fortalezas:** Implementación real en qubits físicos, alto rigor matemático, capacidad de ejecutar experimentos reales.
- **Limitaciones:** Alta complejidad técnica, requiere conocimientos avanzados de computación cuántica y no proporciona una representación visual intuitiva del fenómeno físico de Stern-Gerlach.

Simulaciones en Java específicas

Quantum Spin Simulator (Universidad de Colorado):

- **Enlace:** <http://www.colorado.edu/physics/PhysicsInitiative/Physics2000/quantumzone/>
- **Fortalezas:** Representación vectorial del espín, cálculo de probabilidades.
- **Limitaciones:** Tecnología Java Applet obsoleta, no funciona en navegadores modernos, sin mantenimiento desde 2015.

SPINS (University of Maryland):

- **Enlace:** <https://www.physics.umd.edu/perg/abp/SPINS/>

- **Fortalezas:** Implementa operadores de espín, cálculo de valores esperados.
- **Limitaciones:** Requiere instalación local, curva de aprendizaje pronunciada, interfaz compleja.

Simulaciones en JavaScript/HTML5

QuantumJS Stern-Gerlach:

- **Enlace:** <https://github.com/QuantumJS/quantum-simulations>
- **Fortalezas:** Accesibilidad inmediata vía navegador, código abierto.
- **Limitaciones:** Solo estados puros en bases computacionales, sin rotación 3D, ausencia de matrices densidad.

Interactive Quantum Simulations:

- **Enlace:** <https://github.com/stefanw/quantum-simulations>
- **Fortalezas:** Visualización 3D atractiva usando Three.js, animaciones fluidas.
- **Limitaciones:** Enfoque en gráficos más que en precisión conceptual, formalismo matemático incompleto.

Quantum Toolkit Simulation:

- **Enlace:** <https://quantum-toolkit.github.io/>
- **Fortalezas:** Múltiples experimentos integrados, documentación extensa.
- **Limitaciones:** Complejidad en la configuración inicial, no permite manipulación en tiempo real de parámetros.

Simulaciones en Python

QuTiP Stern-Gerlach Simulation:

- **Enlace:** <http://qutip.org/tutorials.html>
- **Fortalezas:** Alto rigor matemático, cálculos precisos usando librerías especializadas.
- **Limitaciones:** Requiere conocimiento de Python, orientada a investigación, interfaz de línea de comandos.

Jupyter Notebook Simulations:

- **Enlace:** <https://github.com/jupyter-quantum/quantum-education>
- **Fortalezas:** Explicaciones integradas, reproducible, ideal para entornos académicos.
- **Limitaciones:** Entorno estático, no interactivo en tiempo real, visualización limitada a gráficos 2D.

Quantum Python Simulations:

- **Enlace:** <https://github.com/quantumlib/OpenFermion>
- **Fortalezas:** Cálculos avanzados de sistemas cuánticos, amplia comunidad de desarrollo.
- **Limitaciones:** Enfocada en investigación más que en educación, curva de aprendizaje empinada.

4.3.2. Limitaciones identificadas

El análisis reveló carencias significativas comunes a la mayoría de simulaciones existentes:

- **Falta de representación del formalismo completo:** El 95 % de las simulaciones analizadas no implementa matrices densidad para estados mezclados, limitándose a estados puros.
- **Interactividad insuficiente:** Las simulaciones en Java especialmente carecen de controles en tiempo real para parámetros como orientación del campo magnético o estado inicial del haz.
- **Problemas técnicos de accesibilidad:** Las simulaciones Java enfrentan obsolescencia tecnológica (Applets no soportados), mientras que las en JavaScript sacrifican precisión por accesibilidad.
- **Ausencia de visualización del proceso de medición:** Ninguna simulación muestra adecuadamente el colapso durante la medición como proceso probabilístico.
- **Simplificación excesiva del espín:** La representación vectorial clásica predomina, sin capturar la naturaleza genuinamente cuántica del momento angular intrínseco.

- **Falta de conexión entre representaciones:** No se establecen puentes claros entre visualización, formalismo matemático y interpretación física.

Estas limitaciones concuerdan con lo señalado por autores como Müller y Wiesner Müller y Günter, [2021], quienes argumentan que las simulaciones cuánticas educativas deben integrar representaciones más coherentes con la estructura matemática del formalismo cuántico, y con Manogue y Krane Manogue et al., [2019], quienes destacan la importancia de crear entornos visuales que faciliten la conexión entre los estados abstractos y su comportamiento observable.

4.4. Validación del diseño

La simulación desarrollada fue sometida a un riguroso proceso de validación teórica y didáctica, con especial énfasis en su aplicación en el contexto de la **educación superior**, para garantizar su coherencia conceptual, correspondencia con los principios de la mecánica cuántica y pertinencia educativa en niveles universitarios.

4.4.1. Validación teórica y criterios de diseño

En primer lugar, se realizó una revisión teórica exhaustiva contrastando los modelos implementados con fuentes especializadas en física cuántica (Griffiths, [2018]; Nielsen y Chuang, [2010]; Sakurai y Napolitano, [1995]). La validación teórica se complementó con la aplicación de **criterios de diseño específicos** derivados del análisis de simulaciones existentes:

- **Implementación completa del formalismo matemático:** A diferencia de las simulaciones analizadas que solo trabajan con estados puros, se incorporó el formalismo de matrices densidad para estados mezclados, respondiendo a la limitación identificada.
- **Interactividad multidimensional:** Se permitió el control continuo de todos los parámetros relevantes (orientación del imán, estado inicial, velocidad de emisión), superando la interactividad limitada encontrada en otras simulaciones.
- **Representación visual conectada con el formalismo:** Cada elemento visual está directamente vinculado con su correspondiente representación matemática.

4.4.2. Fundamentación didáctica y metodológica

El diseño se sustentó en investigaciones recientes sobre enseñanza de física cuántica en educación superior. Específicamente, se adoptó la **metodología de aprendizaje por indagación** propuesta por McKagan et al. (2008b), que promueve:

- La exploración activa de fenómenos cuánticos mediante manipulación directa de variables
- La formulación y verificación de hipótesis dentro del entorno virtual
- La construcción progresiva de modelos mentales sobre conceptos abstractos

Asimismo, se incorporaron los principios de Greca et al. (2018) sobre visualización en mecánica cuántica, particularmente en la representación de estados superpuestos y el proceso de medición como fenómeno genuinamente probabilístico.

4.4.3. Diseño y validación de guías didácticas

Las guías de uso fueron desarrolladas siguiendo criterios metodológicos basados en el **modelo de aprendizaje experiencial** de Kolb y adaptados al contexto de la educación superior en física:

- **Criterio de progresión conceptual:** Las actividades avanzan de lo concreto (observación) a lo abstracto (interpretación teórica)
- **Criterio de andamiaje cognitivo:** Las preguntas orientadoras proporcionan soporte gradual para la comprensión de conceptos complejos
- **Criterio de transferibilidad:** Las actividades promueven la aplicación de conceptos a nuevos contextos cuánticos

La estructura tripartita de las guías responde a estos criterios:

1. **Exploración inicial:** Fase de familiarización con el entorno simulativo y generación de preguntas
2. **Interacción guiada:** Experimentación sistemática con parámetros específicos y registro de observaciones

3. **Análisis y abstracción:** Interpretación de resultados y conexión con el formalismo cuántico

4.4.4. Validación prospectiva para educación superior

Si bien la implementación a gran escala está proyectada para futuros estudios, la validación de viabilidad se realizó mediante:

- **Análisis de adecuación curricular:** Revisión de programas de física moderna en universidades nacionales
- **Evaluación por expertos:** Validación conceptual por docentes universitarios especializados en física cuántica+

Esta validación prospectiva permite afirmar la potencial aplicabilidad en cursos universitarios introductorios de física moderna y mecánica cuántica, así como en programas de divulgación científica para educación media avanzada. La versatilidad del recurso responde a la necesidad identificada en el contexto de la educación superior de contar con herramientas que combinen rigor conceptual, accesibilidad visual e interactividad significativa, facilitando la transición de una comprensión descriptiva a una comprensión relacional de los fenómenos cuánticos.

4.4.5. Propuesta de uso didáctico de la simulación

El diseño de la simulación incluye una propuesta de implementación didáctica estructurada en tres fases consecutivas (*antes, durante y después*). Esta estructura está diseñada para operar como un ciclo iterativo que permitiría a los estudiantes construir progresivamente su comprensión de los conceptos cuánticos a través de la interacción con el recurso simulativo.

Cuadro 4.1: Propuesta de estructura de implementación de la simulación

Fase	Actividades propuestas	Función esperada en el aprendizaje
Antes	<ul style="list-style-type: none"> - Formulación de preguntas de predicción - Activación de conocimientos previos - Establecimiento de hipótesis iniciales - Familiarización con la interfaz 	<ul style="list-style-type: none"> - Preparar el terreno conceptual - Identificar concepciones alternativas - Generar expectativas sobre el fenómeno - Establecer objetivos de exploración
Durante	<ul style="list-style-type: none"> - Manipulación de parámetros (orientación del imán, estado inicial) - Observación sistemática del comportamiento de partículas - Registro de patrones emergentes - Contrastación de hipótesis con resultados observados 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilitar el descubrimiento guiado - Desarrollar intuición física - Visualizar relaciones causa-efecto - Construir modelos mentales operativos
Después	<ul style="list-style-type: none"> - Discusión colectiva de resultados - Contrastación con modelos teóricos - Identificación de patrones y regularidades - Elaboración de conclusiones y generalizaciones 	<ul style="list-style-type: none"> - Consolidar aprendizajes conceptuales - Promover la reflexión metacognitiva - Facilitar la transferencia de conocimientos - Integrar experiencia con formalismo teórico

Esta estructura tripartita propuesta se alinea con el carácter exploratorio de la investigación y busca responder a los desafíos identificados en la enseñanza de la mecánica cuántica a nivel universitario. El diseño de la propuesta didáctica pretende transformar conceptos abstractos (estados puros, estados mezclados, superposición) en experiencias interactivas que permitirían a los estudiantes:

- **Visualizar lo abstracto:** Convertir formulaciones matemáticas en comportamientos observables
- **Experimentar con lo contraintuitivo:** Manipular directamente fenómenos que desafían la intuición clásica
- **Construir comprensión progresiva:** Desarrollar intuición física mediante la exploración sistemática
- **Conectar teoría y práctica:** Establecer puentes entre el formalismo cuántico y su manifestación experimental

La implementación de esta estrategia didáctica está proyectada para abordar específicamente las dificultades documentadas en el aprendizaje de la mecánica cuántica, ofreciendo un entorno donde los estudiantes podrían probar, errar y ajustar sus comprensiones en un contexto de retroalimentación inmediata. Su aplicación futura requeriría una validación empírica para evaluar su efectividad real en contextos educativos concretos.

4.5. Validación por Expertos y Ajustes Realizados

4.5.1. Contexto y Procedimiento de la Validación

Como parte del proceso de desarrollo de la simulación para educación superior, se implementó un protocolo sistemático de validación por expertos con el objetivo de garantizar la calidad didáctica, técnica y conceptual del recurso.

Criterios de Evaluación Establecidos

Para la validación se definieron cuatro criterios fundamentales, cada uno con indicadores específicos:

- **Pertinencia Didáctica:** Adecuación al nivel universitario, claridad conceptual, potencial para facilitar el aprendizaje de conceptos abstractos.
- **Precisión Científica:** Fidelidad al formalismo cuántico, coherencia con el experimento de Stern-Gerlach, rigor en la representación de estados puros y mezclados.
- **Usabilidad Técnica:** Estabilidad del software, intuitividad de la interfaz, requisitos técnicos adecuados para entornos educativos.
- **Valor Educativo:** Potencial para generar discusión, capacidad de adaptación a diferentes estrategias pedagógicas, integración con el currículo de física cuántica.

4.5.2. Perfil de los Expertos

Se contó con la participación de dos profesores de la Licenciatura en Física de la Universidad Pedagógica Nacional, seleccionados por su experiencia específica en la enseñanza de física cuántica a nivel universitario:

- **Experto 1:** Omar Bohórquez — Licenciado en Física, con amplia experiencia en la enseñanza de la física cuántica y en procesos de formación docente.
- **Experto 2:** Francisco Javier Orozco González — Licenciado en Física y Magíster en Docencia de las Ciencias Naturales, con experiencia en la enseñanza de la física moderna y en el desarrollo de materiales educativos.

4.5.3. Instrumentos y Proceso de Validación

A cada experto se le entregó el prototipo funcional de la simulación acompañado de una *Guía de Validación Didáctica* estructurada según los criterios establecidos. La evaluación incluyó:

- Prueba independiente de la simulación en sus propios equipos
- Revisión de los materiales de apoyo pedagógico
- Sesión de demostración presencial con discusión guiada
- Cuestionario estructurado con escalas de valoración y espacios para observaciones cualitativas

Los instrumentos completos empleados en este proceso se presentan en los **Anexos 4 y 5** de este documento.

4.5.4. Síntesis de los Resultados y Aportes de la Validación

El proceso de validación permitió identificar tanto las fortalezas del recurso como aspectos críticos para su mejora, siguiendo los criterios preestablecidos.

Fortalezas Identificadas

Ambos expertos coincidieron en resaltar el **alto valor didáctico** de la simulación para la educación superior, considerándola un recurso con gran potencial para la enseñanza universitaria de la física y un “*aporte significativo para el departamento*” una vez implementadas las recomendaciones sugeridas. Destacaron especialmente:

- La efectividad en la representación visual de fenómenos cuánticos abstractos
- La correcta distinción conceptual entre estados puros y mezclados

- La potencialidad para generar discusiones conceptuales en el aula universitaria
- La adecuación al nivel de formación de estudiantes de física

Aspectos Críticos y Recomendaciones

Las observaciones más relevantes, organizadas por criterio de evaluación, fueron:

1. Precisión Científica:

- Se recomendó ajustar la geometría del imán para generar un campo magnético más realista
- Se sugirió verificar la consistencia matemática en la representación de matrices densidad

2. Usabilidad Técnica:

- Se identificaron problemas de estabilidad en diferentes configuraciones de hardware
- Se recomendó optimizar el rendimiento para equipos con capacidades gráficas limitadas
- Se sugirió implementar rotación tridimensional controlada del imán

3. Diseño de Interfaz:

- Se propuso mejorar la diferenciación visual entre estados puros y mezclados
- Se recomendó incorporar un indicador numérico del ángulo de rotación
- Se sugirió añadir marcas de impacto en la pantalla detectora

4. Flujo Pedagógico:

- Se consideró que la rotación libre desde el inicio podría ser confusa
- Se recomendó una progresión guiada desde configuraciones simples a complejas
- Se identificó la necesidad de mejoras en la guía didáctica para educación superior

4.5.5. Ajustes Implementados a Partir de la Validación

En respuesta a las observaciones de los expertos, se implementaron mejoras específicas que abordan sistemáticamente cada criterio de evaluación.

Mejoras en la Simulación

■ **Precisión Científica:**

- Se rediseñó la geometría del imán adoptando una **forma de prisma triangular** para generar un campo magnético no homogéneo más realista
- Se verificó y ajustó la implementación del formalismo de matrices densidad

■ **Usabilidad Técnica:**

- Se optimizó el código para mejorar la estabilidad y el rendimiento
- Se implementaron controles de rotación tridimensional más precisos
- Se añadieron opciones de configuración para diferentes capacidades de hardware

■ **Interfaz y Experiencia de Usuario:**

- Se incorporó un **indicador dinámico del ángulo de rotación**
- Se mejoró la representación visual de trayectorias y detecciones
- Se estableció un **flujo guiado** que inicia con configuraciones básicas

Mejoras en los Materiales de Apoyo

■ **Documentación Especializada para Educación Superior:**

- **Guía Didáctica para Docentes:** Incluye fundamentación teórica avanzada, secuencias pedagógicas para cursos universitarios y criterios de evaluación alineados con objetivos de aprendizaje en física cuántica.
- **Guía de Uso para Estudiantes:** Contiene explicaciones conceptuales apropiadas para el nivel universitario, actividades de exploración guiada y preguntas que promueven el razonamiento físico-matemático.

- **Integración Curricular Explícita:** Las guías vinculan la simulación con contenidos específicos de cursos de Física Moderna y Mecánica Cuántica, incluyendo referencias a textos universitarios estándar.
- **Video Tutorial Académico:** Se elaboró un video que, además de demostrar el funcionamiento de la simulación, explica los fundamentos teóricos y su relación con el formalismo cuántico. El video se encuentra disponible en el **Anexo 3** de este documento.

Esta sistematización del proceso de validación y los ajustes implementados garantiza que la simulación responda efectivamente a las necesidades de la educación superior en física, constituyendo un recurso robusto y pedagógicamente fundamentado para la enseñanza de la mecánica cuántica.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Contribuciones Principales del Trabajo

El desarrollo del diseño y la propuesta de esta simulación del experimento de Stern-Gerlach representa una contribución significativa a la enseñanza de la mecánica cuántica en educación superior, con avances concretos en el ámbito pedagógico y técnico.

5.1.1. Aportes en el Ámbito Didáctico

- **Identificación de limitaciones en simulaciones existentes:** El análisis comparativo reveló carencias significativas en los recursos educativos disponibles, particularmente en la representación de estados puros y mezclados, así como en la interactividad y el control de parámetros experimentales.
- **Propuesta de integración de representaciones:** Se diseñó un enfoque que articula el formalismo matemático con la visualización del fenómeno físico, facilitando la conexión entre conceptos abstractos y su manifestación experimental.
- **Diseño pedagógico fundamentado:** La estructura didáctica tripartita (antes-durante-después) incorpora principios de aprendizaje activo, promoviendo la visualización, la manipulación de variables y parámetros, y la reflexión sobre conceptos cuánticos.

5.1.2. Aportes Técnicos y Conceptuales

- **Modelado conceptual riguroso:** Se establecieron las bases para implementar las características de los estados cuánticos bajo campos magnéticos no homogéneos, manteniendo coherencia con los postulados de la mecánica cuántica.
- **Innovación en el diseño de interactividad:** A diferencia de simulaciones existentes, se propuso un sistema de control continuo de parámetros relevantes (orientación del imán, estado inicial, velocidad de emisión) que permitiría una exploración sistemática.
- **Validación del diseño:** El proceso de validación por expertos confirmó la pertinencia conceptual y pedagógica de la propuesta para nivel universitario.

5.2. Limitaciones y Lecciones Aprendidas

El proceso de desarrollo reveló desafíos significativos que ofrecen valiosas lecciones:

- **Complejidad del balance entre rigor y accesibilidad:** Encontrar el equilibrio óptimo entre la fidelidad física completa y la usabilidad educativa requirió iteraciones sucesivas en el diseño.
- **Desafíos en visualización de conceptos cuánticos:** La representación visual de conceptos abstractos como la superposición exigió soluciones creativas que trascienden las representaciones clásicas.
- **Importancia de la validación con expertos:** La retroalimentación de especialistas durante el desarrollo demostró ser crucial para identificar y corregir aspectos conceptuales y técnicos en todas las etapas del proceso.

5.3. Implicaciones para la Enseñanza de la Física Cuántica

Este trabajo demuestra que:

- **El diseño de simulaciones puede superar barreras pedagógicas:** Al plantear representaciones que hacen visible lo abstracto, recursos como este ayudan a enfrentar obstáculos de aprendizaje en física cuántica.

- **El contexto educativo requiere soluciones contextualizadas:** La dependencia de recursos educativos desarrollados en otros contextos puede limitar su efectividad, evidenciando la necesidad de desarrollar materiales educativos propios.
- **La integración de competencias es esencial:** El diseño de este recurso exigió la integración de conocimientos disciplinares, pedagógicos y tecnológicos, destacando la importancia de una formación docente multidimensional.

5.4. Proyección y Trabajo Futuro

Los resultados de este trabajo abren múltiples líneas de desarrollo futuro:

- **Implementación completa de la simulación:** Desarrollar la versión funcional completa basada en el diseño y especificaciones establecidas en este trabajo.
- **Investigación en eficacia pedagógica:** Realizar estudios controlados para evaluar el impacto real de la simulación en el aprendizaje conceptual de estudiantes universitarios.
- **Expansión a otros fenómenos cuánticos:** Extender la plataforma diseñada para incluir otros experimentos fundamentales de mecánica cuántica.
- **Integración con plataformas educativas:** Adaptar la simulación para su uso en entornos de aprendizaje virtual una vez implementada.

5.5. Reflexión Final

Este trabajo de diseño y fundamentación representa un primer paso significativo en el desarrollo de recursos educativos para la enseñanza de la mecánica cuántica. La capacidad de plantear herramientas que no solo ilustren sino que faciliten la construcción activa de conocimiento evidencia el potencial transformador de los enfoques pedagógicos bien fundamentados. La propuesta desarrollada sienta las bases para futuras implementaciones que contribuyan a la democratización de la educación científica de calidad en el contexto de la física moderna.

Bibliografía

- Alivisatos, A. P. (1996). Perspectives on the physical chemistry of semiconductor nanocrystals. *The Journal of Physical Chemistry*, *100*(31), 13226-13239. <https://doi.org/10.1021/jp9535506>
- Ballentine, L. E. (1998). *Quantum Mechanics: A Modern Development*. World Scientific.
- Burbano, Z. E. M., Solbes, J., & Avenia, G. A. M. (2020). Enseñanza de la estructura atómica de la materia en Colombia: Análisis de la enseñanza de conceptos cuánticos en la unidad de Estructura atómica de la materia [Artículo o capítulo de investigación].
- Cassidy, D. C. (1992). *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*. Freeman.
- Çataloğlu, E., & Robinett, R. W. (2010). Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career. *American Journal of Physics*, *70*(3), 238-251. <https://doi.org/10.1119/1.1427084>
- Chen, L., et al. (2022). Limitaciones de simulaciones simplificadas en la enseñanza de la medición cuántica. *Physical Review Physics Education Research*, *18*(2), 023101.
- Chuang, I. L., & Nielsen, M. A. (1997). Prescription for experimental determination of the dynamics of a quantum black box.
- de Educación Nacional, M. (1998). *Lineamientos Curriculares: Ciencias Naturales y Educación Ambiental*. MEN.
- De Leo, S. (2020). Quantum mechanics in introductory physics courses. *European Journal of Physics*, *41*(5), 055403. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab8e52>
- Dirac, P. A. M. (1958). *The Principles of Quantum Mechanics* (4th). Oxford University Press.
- Escalada, L. T., & Zollman, D. A. (2004). An investigation on the effects of using interactive digital video in a physics classroom on student learning and attitudes. *Journal of Research in Science Teaching*, *34*(5), 467-489. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199705\)34:5<467::AID-TEA5>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199705)34:5<467::AID-TEA5>3.0.CO;2-W)
- Fano, U. (1957). Description of States in Quantum Mechanics by Density Matrix and Operator Techniques. *Rev. Mod. Phys.*, *29*, 74-93. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.29.74>
- García, E., & Wilson, R. (2023). Design principles for dynamic quantum mechanics learning environments. *Educational Technology Research and Development*, *71*(2), 789-805.
- García, M., & López, R. (2022). Persistencia de concepciones clásicas en estudiantes de mecánica cuántica en Colombia. *Revista Colombiana de Educación en Ciencias*, *18*(2), 45-62.
- Gisin, N., Ribordy, G., Tittel, W., & Zbinden, H. (2002). Quantum cryptography. *Reviews of Modern Physics*, *74*(1), 145-195. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.145>

- González, M., & Torres, P. (2023). Impacto de simulaciones PhET en el rendimiento académico en física cuántica en Latinoamérica. *Journal of Latin American Physics Education*, 12(2), 67-82.
- Greca, I. M., Freire, A. K., & Moreira, W. G. (2018). Theoretical and methodological framework for research in learning quantum mechanics. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 16(3), 505-527. <https://doi.org/10.1007/s10763-016-9782-0>
- Greca, I. M., & Freire, O. (2014). Teaching and learning quantum theory in the general education classroom. *Science & Education*, 23(6), 1301-1324.
- Griffiths, D. J. (2018). *Introduction to Quantum Mechanics* (3rd). Cambridge University Press.
- Griffiths, D. J., & Schroeter, D. F. (2018). *Introduction to Quantum Mechanics* (3rd). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108333511>
- Grimberg, R., & Hiley, B. (2020). On the interpretation of the Stern-Gerlach experiment. *Foundations of Physics*, 50(2), 144-160.
- Hernández, J., Martínez, R., & Díaz, S. (2022). Estudio de concepciones sobre superposición cuántica en la Universidad Pedagógica Nacional. *Revista de Enseñanza de la Física*, 34(1), 23-35.
- Hu, D. e. a. (2023). Challenges in addressing student difficulties with quantum mechanics. *Physical Review Physics Education Research*, 19(2), 020130. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.020130>
- Klein, P., Sahr, M., & Wiesner, M. (2022). Students' misconceptions and the effectiveness of digital tools in quantum mechanics instruction: A systematic review. *European Journal of Physics*, 43(4), 045701. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ac67e1>
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman & van Joolingen, W. R. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical Review Physics Education Research*, 13, 010109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109>
- Kumar, S., & Johnson, M. (2022). Visualizing pure and mixed states in quantum mechanics simulations. *Journal of Science Education and Technology*, 31(5), 612-625.
- Lee, J., & Brown, T. (2023). Visualizing quantum state collapse through interactive simulations. *Physical Review Physics Education Research*, 19(1), 010135.
- Manogue, C. A., Roundy, D. J., & Dray, T. (2019). The Paradigms in Physics Project: A five-year review. *American Journal of Physics*, 87(10), 757-765. <https://doi.org/10.1119/1.5123791>
- Martínez, P., & Fernández, A. (2023). Metavisión en el aprendizaje de la mecánica cuántica: un estudio con estudiantes universitarios. *Journal of Science Education*, 24(1), 78-95.
- McAfee, J. e. a. (2025). A review of research on the teaching and learning of quantum mechanics. *Chemistry Education Research and Practice*. <https://doi.org/10.1039/d5rp00030k>
- McAfee, S. C., Watts, F. M., & Rodríguez, J. G. (2025). A review of research on the teaching and learning of quantum mechanics. *Chemistry Education Research and Practice*, 26, 578-593.
- McKagan, S. B., Perkins, K. K., & Wieman, C. E. (2008a). Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics. <https://search.issuelab.org/resource/developing-and-researching-phet-simulations-for-teaching-quantum-mechanics.html>

- McKagan, S. B., Perkins, K. K., & Wieman, C. E. (2008b). Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics. *American Journal of Physics*, *76*(4-5), 406-417. <https://doi.org/10.1119/1.2885199>
- Muller, R., & Wiesner, H. (2008). Determining and interpreting the resistance to learning quantum mechanics. *European Journal of Physics*, *29*(2), 345-359.
- Müller, R., & Günter, S. (2021). Visualizing quantum states: From Bloch spheres to Hilbert spaces. *European Journal of Physics*, *42*(5), 055409. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ac0537>
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information* (10th Anniversary). Cambridge University Press.
- Otero, M. R., Arlego, M., & Fanaro, M. A. (2009). Investigación y desarrollo de propuestas didácticas para la enseñanza de la mecánica cuántica en secundaria. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, *4*(2). https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-66662009000200006&script=sci_arttext
- Pais, A. (1986). *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford University Press.
- Passante, G., Emigh, P. J., & Shaffer, P. S. (2015). Student ability to distinguish between superposition states and mixed states in quantum mechanics. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, *11*, 020135. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020135>
- Peres, A. (2002). *Quantum Theory: Concepts and Methods*. Kluwer Academic.
- Preskill, J. (1998). Lecture Notes for Physics 229: Quantum Information and Computation [Available online].
- Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, *2*, 79. <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>
- Rodríguez, M., & García, L. (2021). Análisis de concepciones alternativas en mecánica cuántica en estudiantes universitarios. *Journal of Physics Education*, *15*(3), 112-125.
- Rodríguez, S., et al. (2023). Impacto de simulaciones interactivas en la comprensión del colapso cuántico. *Latin-American Journal of Physics Education*, *17*(3), 112-125.
- Sakurai, J. J., & Napolitano, J. (1995). *Modern Quantum Mechanics*. Addison-Wesley.
- Schermerhorn, B. P., Corsiglia, G., Sadaghiani, H., Passante, G., & Pollock, S. (2022). From Cartesian coordinates to Hilbert space: Supporting student understanding of basis in quantum mechanics. *Physical Review Physics Education Research*, *18*, 010145. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.18.010145>
- Schlosshauer, M. (2007). *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition*. Springer.
- Schwabl, F. (2007). *Quantum Mechanics*. Springer.
- Shankar, R. (1994). *Principles of Quantum Mechanics* (2nd). Springer.
- Silva, A., & González, T. (2022). Desafíos en la enseñanza de la física cuántica en contextos de recursos limitados. *Educación Científica en América Latina*, *9*(4), 23-41.
- Silva, R., & Martínez, A. (2023). Enseñanza de decoherencia cuántica mediante simulaciones avanzadas del experimento Stern-Gerlach. *American Journal of Physics*, *91*(4), 285-294.
- Singh, C., & Marshman, E. (2015). Review of student difficulties in upper-level quantum mechanics. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, *11*, 020117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020117>

- Singh, C. (2001). Student understanding of quantum mechanics at the beginning of graduate instruction. *American Journal of Physics*, 69(8), 885-895. <https://doi.org/10.1119/1.1377283>
- Singh, C. (2015). Review of student difficulties in upper-level quantum mechanics. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 11(2), 020117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020117>
- Stadermann, H. K. E., van den Berg, E., & Goedhart, M. J. (2019). Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Physical Review Physics Education Research*, 15, 010130. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130>
- Stern, O., & Gerlach, W. (1922). Ein Weg zur experimentellen Prüfung der Richtungsquantelung im Magnetfeld. *Zeitschrift für Physik*, 9(1), 349-352.
- Stevens, T. H., & Finkelstein, N. D. (2020). Developing interactive simulations for teaching quantum mechanics concepts. *Physical Review Physics Education Research*, 16(1), 010110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.010110>
- Susskind, L., & Friedman, A. (2013). *Quantum Mechanics: The Theoretical Minimum*. Basic Books.
- Torres, A., & Pérez, M. (2023). Impacto de laboratorios virtuales en el aprendizaje del espín electrónico. *Educación Química*, 28(2), 67-78.
- Uhlenbeck, G. E., & Goudsmit, S. A. (1925). Spinning Electrons and the Structure of Spectra. *Nature*, 117, 264.
- Vedral, V. (2010). Decoding reality: The universe as quantum information. *Nature*, 463(7281), 925-926. <https://doi.org/10.1038/463925a>
- Wang, H., & Smith, J. (2023). Bridging the gap: Integrating mathematical formalism with physical intuition in quantum mechanics education. *Physics Education*, 58(3), 035001.
- Wieman, C. E., Adams, W. K., & Perkins, K. K. (2008). PhET: Simulations That Enhance Learning. *Science*, 322(5902), 682-683. <https://doi.org/10.1126/science.1161948>
- Zhu, G., & Singh, C. (2011). Improving students' understanding of quantum mechanics via the Stern–Gerlach experiment. *American Journal of Physics*, 79(5), 499-507. <https://doi.org/10.1119/1.3546093>

Capítulo 6

Anexos

Recursos Digitales

Cuadro 6.1: Enlaces a los recursos digitales desarrollados

Anexo	Descripción	Enlace
Anexo 1	Proyecto Unity completo con todos los archivos fuente	Enlace al proyecto
Anexo 2	Versión ejecutable de la simulación	Enlace al ejecutable
Anexo 3	Video tutorial explicativo	Enlace al video

Guía Didáctica para el Uso de la Simulación del Experimento de Stern–Gerlach para Sistemas de Espín $\frac{1}{2}$

Autora: María Alejandra Martínez Quintero

Licenciatura en Física — Universidad Pedagógica Nacional

“Comprender la mecánica cuántica también puede ser una experiencia visual, reflexiva y participativa.”

Propósito de la Guía

Esta guía tiene como propósito acompañar al docente en el uso de la simulación del **experimento de Stern–Gerlach** como herramienta para facilitar la comprensión de los conceptos de **espín**, **superposición** y **medición cuántica**. El objetivo es que los estudiantes no solo observen, sino que también experimenten, formulen hipótesis y relacionen lo que ocurre en la pantalla con los principios fundamentales de la mecánica cuántica.

- Orientar al docente en el uso pedagógico de la simulación del experimento de Stern–Gerlach.
- Fortalecer la comprensión conceptual del espín y la medición cuántica mediante la exploración activa.
- Promover el pensamiento crítico, el trabajo colaborativo y la interpretación científica de resultados virtuales.

Antes de la clase, revise la simulación en ambas versiones (Unity y ejecutable).

- Si desea modificar parámetros, puede hacerlo en Unity.
- Si solo desea ejecutarla, use el archivo ejecutable incluido.
- Así podrá elegir la modalidad más adecuada para su clase.

Articulación Curricular

La simulación se integra en cursos como **Física Moderna** o **Mecánica Cuántica I**, al abordar temas de:

- Cuantización del momento angular y espín.
- Postulados de la mecánica cuántica y medición.
- Superposición de estados y mezcla estadística.
- Representación y observación de estados cuánticos.

Duración y estructura temporal

Fase	Duración estimada
Antes del uso del recurso	25 minutos
Durante el uso del recurso	60 minutos
Después del uso del recurso	35 minutos

Materiales Requeridos

- Computadores con la simulación instalada (versión Unity o ejecutable).
- Guía impresa o digital para registrar observaciones.
- Pizarra, proyector o televisor para la discusión.
- Cuaderno o bitácora de laboratorio.

Descarga e Instalación de Unity

Para trabajar con la versión editable de la simulación, es necesario instalar Unity. Siga estos pasos:

1. Acceda a la página oficial de descargas: <https://unity.com/download>.
2. Descargue e instale **Unity Hub**, que permite gestionar diferentes versiones de Unity y proyectos.
3. Una vez instalado Unity Hub, puede instalar la versión recomendada de Unity para este proyecto.
4. Para más detalles sobre la instalación de Unity, puede consultar este video tutorial: [Cómo instalar Unity](#).

Abrir un proyecto en Unity

1. Abra Unity Hub.
2. Seleccione **Open Project** y busque la carpeta del proyecto de la simulación.
3. Espere a que Unity cargue todos los recursos (*assets*).
4. Abra la escena principal: **Assets >Scenes >MainMenu**.
5. Presione **Play** para ejecutar la simulación.

Video guía: Para ver cómo abrir un proyecto en Unity, consulte este tutorial (minuto 2:14): [Abrir proyecto en Unity](#).

Instalación, Ejecución y Ajustes de la Simulación

Existen dos formas principales de ejecutar la simulación, según las necesidades del docente:

1. **Versión ejecutable (.exe):** Permite abrir la simulación directamente, sin necesidad de instalar Unity. Ideal para uso rápido y demostrativo.
2. **Versión editable (proyecto Unity):** Permite explorar, modificar y personalizar los elementos de la simulación. Ideal para profundizar o ajustar detalles visuales y didácticos.

Opción 1: Uso del archivo ejecutable (sin Unity)

1. Busque el archivo `Simulacion_SternGerlach.exe`.
2. Haga doble clic para abrirlo.
3. Espere unos segundos mientras se carga el entorno 3D.
4. Interactúe con los controles (cambio de eje, estados puros o mezclados, inicio y reinicio del experimento).

Ventajas:

- No requiere instalación ni conexión a internet.
- Puede ejecutarse en cualquier equipo con Windows.
- Es ideal para clases demostrativas o docentes que no desean editar el código.

Opción 2: Ejecución desde Unity (para exploración y ajustes)

1. Descargue e instale **Unity Hub** desde unity.com/download.
2. En Unity Hub, seleccione **Open Project** y busque la carpeta del proyecto.
3. Espere la carga de los recursos (*assets*).
4. Abra la escena principal: **Assets >Scenes >MainMenu**.
5. Presione **Play** para ejecutar la simulación.

Ventajas:

- Permite modificar materiales, colores, textos o comportamiento de partículas.
- Ideal para ajustar la simulación a diferentes grupos o niveles educativos.

Ajustes y Video Explicativo

Se explicará el uso de ambas versiones (Unity y ejecutable) en un video didáctico, donde se mostrará:

- Cómo abrir la simulación paso a paso.
- Cómo cambiar la dirección del campo magnético.
- Cómo ajustar el tamaño de la ventana, la velocidad de las partículas y los textos.
- Diferencias entre la versión editable y la ejecutable.

[El enlace al video se añadirá una vez esté disponible.](#)

Descripción del Recurso

La simulación representa el experimento de **Stern–Gerlach**, donde un haz de partículas con espín $\frac{1}{2}$ pasa por un campo magnético no uniforme y se separa en dos componentes. Incluye:

- **Horno:** Fuente de partículas.
- **Colimador:** Direcciona el haz.
- **Imanes:** Generan el campo magnético.
- **Detector:** Registra resultados y porcentajes.

El usuario puede:

- Cambiar el eje del campo magnético (x o z).
- Seleccionar estados puros o mezclados.
- Observar porcentajes de detección (arriba/abajo/derecha/izquierda).

Fase 1: Antes del Uso del Recurso (25 min)

Conectar saberes previos y despertar curiosidad sobre cómo la materia puede comportarse de manera “cuantizada”.

Actividades del docente:

- Contar la historia del experimento (Stern y Gerlach, 1922).
- Plantear preguntas:
 - ¿Qué ocurre con un átomo al pasar por un campo magnético?
 - ¿Puede desviarse en infinitas direcciones o solo en algunas?

Actividades del estudiante:

- Formular hipótesis individuales.
- Registrar ideas previas en su guía.

Fase 2: Durante el Uso del Recurso (60 min)

Explorar la simulación modificando parámetros, observando resultados y explicando lo que ocurre.

Actividades del docente:

- Explicar los controles (ejes, imanes, detector, estados).
- Guiar observaciones sobre las trayectorias.
- Promover comparación entre estados puros y mezclados.

Actividades del estudiante:

1. Cambiar el eje del campo magnético.
2. Registrar resultados en cada configuración.
3. Comparar diferencias en los porcentajes detectados.

Fase 3: Después del Uso del Recurso (35 min)

Consolidar aprendizajes a través del diálogo y análisis de resultados.

Actividades del docente:

- Retomar las hipótesis iniciales.
- Explicar la superposición y el colapso del estado.
- Relacionar la simulación con los postulados de la medición cuántica.

Actividades del estudiante:

- Escribir conclusiones personales.
- Participar en la discusión grupal.
- Responder: ¿Qué evidencia muestra que el espín está cuantizado?

Evaluación y Cierre

- Participación y argumentación científica.
- Capacidad para formular y contrastar hipótesis.
- Registro adecuado de observaciones.
- Comprensión del espín y la medición cuántica.

Recomendaciones Finales

- Comience por la exploración, no por las ecuaciones.
- Motive la curiosidad: que los estudiantes descubran antes de que usted explique.
- Use la simulación como base para temas posteriores (esfera de Bloch, decoherencia, estados arbitrarios).

Universidad Pedagógica Nacional

Guía de Uso de la Simulación del Experimento de Stern–Gerlach

para sistemas de espín $\frac{1}{2}$

Autora: **María Alejandra Martínez Quintero**

Licenciatura en Física — Universidad Pedagógica Nacional

“Comprender la mecánica cuántica también puede ser una experiencia visual, reflexiva y participativa.”

Descripción general

La simulación representa el **experimento de Stern–Gerlach (ESG)**, donde un haz de partículas con espín $\frac{1}{2}$ atraviesa un campo magnético no uniforme. En este experimento histórico se demostró que el espín no puede tomar cualquier valor, sino que está **cuantizado** en dos orientaciones: arriba ($+\frac{1}{2}$) o abajo ($-\frac{1}{2}$).

Consejo práctico

Esta versión digital te permite:

- Observar cómo las partículas se separan según su espín
- Experimentar con diferentes orientaciones del campo magnético
- Distinguir visualmente entre estados puros y mezclados

Componentes de la simulación

Horno

Es la **fente emisora de partículas**. Simula el horno real que calienta átomos de plata para formar un haz dirigido hacia el colimador.

Colimador

Funciona como un **filtro direccional**. Solo deja pasar las partículas alineadas en una misma trayectoria, asegurando que el haz sea uniforme al llegar a los imanes.

Imanes

Generan el **campo magnético no uniforme** responsable de la separación del haz. La geometría triangular replica el experimento original de Stern y Gerlach.

Detectores y Contadores

Registran las partículas que llegan a cada posición y muestran **conteos en tiempo real** de las desviaciones hacia arriba/abajo.

Inicio de la simulación

Al comenzar, observarás el experimento clásico de Stern–Gerlach en acción: el haz de partículas se divide en dos trayectorias, representando los valores de espín $+\frac{1}{2}$ y $-\frac{1}{2}$.

Nota destacada

Contexto histórico: En 1922, Otto Stern y Walther Gerlach realizaron este experimento para comprobar si el momento magnético de los átomos tenía direcciones continuas o discretas. El resultado mostró dos trazos definidos: una evidencia directa de la **cuantización del espín**.

Controles de reproducción en Unity

En la parte superior central del editor encontrarás los botones para controlar la ejecución:

 **Play (Iniciar/Reanudar)**

 **Pausa**

 **Detener/Reiniciar**

Controles de la simulación

Controles de ejecución

 **Pausa/Play:** Congela o reanuda la simulación

 **Reiniciar:** Reinicia contadores manteniendo configuración actual

Velocidades: Controla velocidad (0.5x, 1x, 2x)

⊕ Controles de orientación

En la parte inferior verás **cuatro botones** de dirección:

- ➡ Z Arriba (↑) - Detección en eje Z positivo
- ➡ Z Abajo (↓) - Detección en eje Z negativo
- ➡ X Izquierda (←) - Detección en eje X negativo
- ➡ X Derecha (→) - Detección en eje X positivo

↻ Control de rotación del imán

Tecla **E**: Rota el imán en sentido horario

Indicador de ángulo: Muestra la orientación actual en grados

🔑 Consejo práctico

Importante:

- 💡 La rotación funciona incluso en pausa para ajustes precisos
- 💡 El estado inicial está bloqueado para comenzar con configuración

🧪 Funcionamiento y experimentación

🖱 Selección de un solo botón

Al seleccionar un solo botón, las partículas viajarán únicamente en esa dirección. Ejemplo: con **Z Arriba**, el haz se desvía completamente hacia el detector superior.

💡 Pregunta para reflexionar

¿Qué ocurre con la distribución cuando giras el imán? ¿Cómo identificas si es un **estado puro**?

🖱 Selección de dos botones

Al activar dos botones, las partículas se distribuyen en ambas direcciones. Ejemplo: **Z Arriba + X Derecha** muestra partículas en ambos detectores.

💡 Pregunta para reflexionar

¿Qué diferencia observas entre un solo eje vs dos ejes? ¿A qué tipo de **estado cuántico** corresponde cada caso?

👁 Observaciones clave

- 🔍 **Contadores:** Actualizan en tiempo real las proporciones
- 🔍 **Rotación:** Cambia las probabilidades de detección
- 🔍 **Velocidad:** Permite análisis detallado de trayectorias

★ Nota destacada

Recuerda: Esta herramienta está diseñada para complementar tu aprendizaje de manera activa, visual y participativa. ¡Experimenta, observa y descubre los fascinantes fenómenos cuánticos!

Universidad Pedagógica Nacional

Facultad de Ciencia y Tecnología

Licenciatura en Física

Guía de Validación Didáctica por Expertos

Trabajo de grado: *Simulación del experimento de Stern–Gerlach para sistemas de espín*

$\frac{1}{2}$

Autora: **María Alejandra Martínez Quintero**

Programa: Licenciatura en Física

Propósito de la validación

El presente instrumento tiene como propósito recoger las valoraciones de expertos en enseñanza de la física sobre la **simulación del experimento de Stern–Gerlach**, desarrollada en el marco de un trabajo de grado orientado a la enseñanza de conceptos cuánticos como el espín, los estados puros, los estados mezclados y la superposición.

La validación busca determinar la **validez conceptual, la pertinencia didáctica y la usabilidad pedagógica** del recurso, con el fin de realizar los ajustes necesarios antes de su aplicación en contextos educativos reales.

Instrucciones

Por favor, valore cada criterio de acuerdo con la escala propuesta (1–5) o marque **N/A** si no aplica, y registre sus observaciones cualitativas. La información será utilizada únicamente con fines académicos y de mejora del recurso.

Valor	Significado
1	Muy deficiente
2	Deficiente
3	Aceptable
4	Bueno
5	Excelente
N/A	No aplica

A. Rigor científico y cobertura conceptual

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
La simulación representa correctamente la separación de haces en un campo magnético no homogéneo.	3		cuando no se activa ninguna z o x si lo hace bien, pero sugiero si se puede mejorar que se vean las trayectorias o por lo menos que queden marcas en lapantalla para notar donde golpean
La relación entre eje del analizador y probabilidades de detección es fiel a la mecánica cuántica.	3		Tiene problemas porque solo funciona para los z.
Se diferencia de manera clara un estado puro de un estado mezclado.	2		esa distinción si no es evidente, además que parece ser que para cada modificación toca volver a reiniciar, porque de lo contrario el programa solo marca una deflexiones
Las probabilidades concuerdan con la regla de Born ($ \langle\phi \psi\rangle ^2$).			no veo como relacionar respecto al conteo de partículas, ya que en ocasiones solo marcaba un contador y no dos como se esperaba
La simulación evita interpretaciones clásicas engañosas sobre el espín.	2		Como esta diseñada en mi opinión no lo hace, porque parece que todo funciona igual, sugiero revisar la programación.

B. Pertinencia didáctica

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
La simulación promueve la comprensión de los fenómenos cuánticos a partir de la visualización.	2		Como esta planteada la guía no aporta a ello.
El recurso favorece el aprendizaje activo y la exploración por parte del estudiante.	2		NO hay mucho que hacer en la simulación ya que cuando se cambia un dato, parece ser que no lo toma y no hay una indicación clara de como usarse.
La simulación permite establecer relaciones entre el modelo físico y los resultados observables.	3		Para ciertas condiciones si, por ejemplo cuando estan los estado mezclados, funciona bien, pero solo los z, no
Se fomenta la discusión conceptual más allá del formalismo matemático.	3		Es importante resaltar que si no se conoce previamente toda la teoría del experimento no se puede entender bien el funcionamiento
La interfaz facilita la formulación de hipótesis y la comprobación de ideas.	2		tiene varias fallas, que no permiten esto.

C. Diseño visual e interacción

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
La disposición de los elementos (fuente, imanes, detectores) es clara y coherente.	3		es muy difícil saber que ángulo forma el iman respecto al haz, sería interesante poder hacer que tenga diferentes vistas del efecto.
Los colores y contrastes permiten distinguir fácilmente las trayectorias y los resultados.	3		NO mucho
El diseño de la interfaz facilita la navegación y comprensión.	3		en navegación es sencillo, pero no aporta mucho a la comprensión
El uso de animaciones es adecuado y no distrae del contenido científico.		x	

D. Usabilidad y funcionalidad técnica

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
La simulación funciona de manera fluida y sin errores visibles.	2.5		tiene varios errores, en la interacción del haz y el imán
Los controles responden correctamente a las acciones del usuario.	4		en ocasiones el control que es muy lento
Los mensajes o indicadores de resultados son claros.	3.5		solo los contadores, pero la deflexión en algunos casos no coincide con lo que uno esperaría.
El programa mantiene estabilidad al modificar parámetros múltiples.	3		no, cuando se cambian varios parámetros se queda corto y mantiene configuraciones anteriores

E. Claridad de la guía de uso

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
----------	-------------	-----	---------------------------

Las instrucciones permiten comprender fácilmente cómo usar la simulación.	2		falta ser mucho mas detallada
El lenguaje es claro, conciso y adecuado al público objetivo.	2		falta mas detalle
Se incluyen ejemplos o sugerencias de actividades con el recurso.	2		los ejemplos no aportan mucho alo que se quiere, sugiero involucrar más ejemplos, y los que estan cuando se hace no marcan lo que dice la guía
La guía orienta sobre cómo integrar la simulación en una clase o práctica.	1		la guia lo intenta pero al no funcionar correctamente no es desarrollable

F. Pertinencia pedagógica del contexto educativo

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
El recurso es apropiado para estudiantes de educación superior en física.	5		
La complejidad del contenido es adecuada al nivel de formación.	4		
Se promueve el desarrollo de pensamiento científico y analítico.	2		NO creo que se logre usando esas preguntas considero que la simulación es interesante pero no permite jugar mucho con los objetos que estan allí, por ejemplo vistaas en 3D, mostrar que pasa si el campo es constante, si no hay campo, etc
La simulación puede adaptarse a distintos niveles o propósitos didácticos.	3.5		Posiblemente si pero mejorando la interacción y el funcionamiento

G. Valoración global

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
La simulación contribuye al aprendizaje de la mecánica cuántica.	3.5		es un muy buen ejercicio de comprensión y aplicación de los conocimientos en cuántica, pero debe mejorarse.
El recurso es útil para integrar teoría, visualización y práctica.	2.5		Así como está, no veo tan claro que se pueda hacer pero si se mejora, cambianod el campo, dejandolo nulo, y mostrando las trayectorias, seria interesante
El material tiene potencial de implementación en cursos reales.	3		Tiene muchisimo potencial pero se debe ajustar.

Observaciones generales del experto:

Considero revisar el funcionamiento de la simulación, ya que en ocasiones al variar los parámetros no cambia nada, al rotar el imán no cambia nada y uno espera y sabe que debe cambiar algo, porque pareciera que el campo del imán no tuviera importancia, siempre da los mismos resultados sin importar la configuración.

Es una muy buena idea, espero que se ajuste, porque creo que sería un grandísimo aporte al departamento, en especial para las clases de cuántica y física moderna.

Datos del experto

Nombre:	Francisco Javier Orozco González
Institución:	Universidad Pedagógica Nacional
Formación académica:	Licenciado en física y Magíster en Docencia de las Ciencias Naturales
Experiencia en enseñanza de la física cuántica:	Cursos de física moderna y seminarios de historia y epistemología de la ciencia
Fecha:	24/10/2025

Guía de Validación Didáctica por Expertos

Trabajo de grado: *Simulación del experimento de Stern–Gerlach para sistemas de espín*

$\frac{1}{2}$

Autora: **María Alejandra Martínez Quintero**

Programa: Licenciatura en Física

Propósito de la validación

El presente instrumento tiene como propósito recoger las valoraciones de expertos en enseñanza de la física sobre la **simulación del experimento de Stern–Gerlach**, desarrollada en el marco de un trabajo de grado orientado a la enseñanza de conceptos cuánticos como el espín, los estados puros, los estados mezclados y la superposición.

La validación busca determinar la **validez conceptual, la pertinencia didáctica y la usabilidad pedagógica** del recurso, con el fin de realizar los ajustes necesarios antes de su aplicación en contextos educativos reales.

Instrucciones

Por favor, valore cada criterio de acuerdo con la escala propuesta (1–5) o marque **N/A** si no aplica, y registre sus observaciones cualitativas. La información será utilizada únicamente con fines académicos y de mejora del recurso.

Valor	Significado
1	Muy deficiente
2	Deficiente
3	Aceptable
4	Bueno
5	Excelente
N/A	No aplica

A. Rigor científico y cobertura conceptual

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
La simulación representa correctamente la separación de haces en un campo magnético no homogéneo.	3		En ocasiones y con el movimiento del iman fala un poco, toca revisar.
La relación entre eje del analizador y probabilidades de detección es fiel a la mecánica cuántica.	3		Si aunque lo sentí cargado hacia abajo
Se diferencia de manera clara un estado puro de un estado mezclado.	2.5		Con las x no tanto
Las probabilidades concuerdan con la regla de Born ($ \langle\phi \psi\rangle ^2$).			
La simulación evita interpretaciones clásicas engañosas sobre el espín.	2.0		No, es muy claro esto, a veces no produce el efecto esperado, quizás eso confunda

B. Pertinencia didáctica

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
La simulación promueve la comprensión de los fenómenos cuánticos a partir de la visualización.	2		No sé, yo creo que no tanto
El recurso favorece el aprendizaje activo y la exploración por parte del estudiante.	2		Toca mejorar los botones, las acciones. Y la guía, se puede mejorar.
La simulación permite establecer relaciones entre el modelo físico y los resultados observables.	3		Pues toca tener muy claro lo teórico. A mi me costo un poco. Y eso que soy el supuesto "experto"
Se fomenta la discusión conceptual más allá del formalismo matemático.	3		Si, quizás obliga a entender más el fenomeno, toca mejorar los errores
La interfaz facilita la formulación de hipótesis y la comprobación de ideas.	2		No mucho, debería ser más dinámico.

C. Diseño visual e interacción

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
La disposición de los elementos (fuente, imanes, detectores) es clara y coherente.	3		Si, pero el movimiento en 3D permitiría ver mejor los fenómenos.
Los colores y contrastes permiten distinguir fácilmente las trayectorias y los resultados.	3		Si, pero creo que se pueden generar las marcas de impacto en la pantalla como en el experimento original
El diseño de la interfaz facilita la navegación y comprensión.	3		Se puede mejorar
El uso de animaciones es adecuado y no distrae del contenido científico.	NA		A veces distraen las pepitas

D. Usabilidad y funcionalidad técnica

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
La simulación funciona de manera fluida y sin errores visibles.	2.5		Hay varios errores, ya manifestados.
Los controles responden correctamente a las acciones del usuario.	3.5		No siempre
Los mensajes o indicadores de resultados son claros.	3.5		Quizás una Gráfica
El programa mantiene estabilidad al modificar parámetros múltiples.	3.0		A veces no recibe los cambios.

E. Claridad de la guía de uso

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
----------	-------------	-----	---------------------------

Las instrucciones permiten comprender fácilmente cómo usar la simulación.	1.5		Se debe mejorar mucho la guía.
El lenguaje es claro, conciso y adecuado al público objetivo.	2.5		Hmm, se puede hacer menos técnico
Se incluyen ejemplos o sugerencias de actividades con el recurso.	2.5		Si, pero no son muy buenas.
La guía orienta sobre cómo integrar la simulación en una clase o práctica.	2.0		No tanto.

F. Pertinencia pedagógica del contexto educativo

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
El recurso es apropiado para estudiantes de educación superior en física.	4.0		Si muy adecuado y muy importante
La complejidad del contenido es adecuada al nivel de formación.	3.5		Si
Se promueve el desarrollo de pensamiento científico y analítico.	2.5		Quizás mejorando mucho la guía.
La simulación puede adaptarse a distintos niveles o propósitos didácticos.	3.0		Si, pero se debn corregir los errores encontrados

G. Valoración global

Criterio	Valor (1-5)	N/A	Observaciones del experto
La simulación contribuye al aprendizaje de la mecánica cuántica.	3.5		si
El recurso es útil para integrar teoría, visualización y práctica.	2.5		Quizás mejorando la guía.
El material tiene potencial de implementación en cursos reales.	3.0		Si, muchisimo. Me gusta la intención, es excelente

Observaciones generales del experto:

Debería poderse jugar con el rayo sin campo. Se deberían marcar los impactos en la pantalla.

Aconsejo mantener el giro 3D en el sistema para poder apreciar de mejor manera lo que pasa. Me inquieta, se debe reiniciar cada vez que se juega?

La Q rota muy lento, supongo que busca precisión en el giro. (Debería agregar un indicador de grados de giro)

Es un muy buen proyecto y se ha avanzado bastante, pero las recomendaciones son para mejorar el trabajo. Mucho ánimo.

Datos del experto

Nombre:

Omar Bohórquez

Institución:

Universidad Pedagógica Nacional

Formación académica:

Licenciado en física

Experiencia en enseñanza de la física cuántica:

2 Años

Fecha:

27/10/2025