

EL COMPORTAMIENTO DE LA LUZ, DE LA MECÁNICA CLÁSICA A LA CUÁNTICA: EL
EXPERIMENTO DE YOUNG EN LA ESCUELA

POR:

JUAN GABRIEL DAZA COLORADO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN FÍSICA

LÍNEA DE PROFUNDIZACIÓN 3: LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL PARA LA
ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

PROFESOR ASESOR:

FRANCIS MORENO OTERO

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

BOGOTÁ D.C 2024

Agradecimientos

Le agradezco, primeramente, a mi asesor Francis Moreno, quien me ha acompañado en el desarrollo de este trabajo con una admirable paciencia e incondicional apoyo desde el primer semestre hasta este punto.

A la universidad en general que me ha brindado un segundo hogar y en donde pase cálidos momentos durante toda mi formación docente.

A los profesores y compañeros del departamento quienes me acogieron en sus círculos sociales de forma cálida y fraternal.

A mi amigo, Yeisson Pinzón, con quien he compartido trayectoria académica desde 2ª de primaria hasta la actualidad, y quien ha sido un amigo siempre presente en mis logros, con quien me alegra compartir titulación en un futuro cercano.

Al señor Carlos Saavedra quien me ha apoyado desde el principio más que como un jefe, como un colega de trabajo y como un amigo a pesar de no compartir ninguna relación sanguínea.

Contenido

| | |
|--|--------------------------------------|
| INTRODUCCIÓN | 4 |
| CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DE LA PROPUESTA | 6 |
| Problema | 6 |
| Antecedentes | 9 |
| Objetivos | 11 |
| Objetivo general | 11 |
| Objetivos específicos | 12 |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO | 12 |
| La naturaleza de la luz previo al siglo XIX | 12 |
| Trabajo pionero de Isaac Newton | 13 |
| La teoría ondulatoria de la luz de Christiaan Huygens | 17 |
| Newton en oposición a la teoría ondulatoria | 21 |
| La naturaleza de la luz como sistema cuántico | 23 |
| El experimento de Young y su desarrollo interpretativo | 27 |
| CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA | 29 |
| Investigación acción pedagógica | 29 |
| Planeación didáctica | 33 |
| CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS | 39 |
| Taller 1: reflexión de la luz | 40 |
| Taller 2: refracción de la luz | 45 |
| Taller 3: experimento de Young | 50 |
| Conclusiones y apreciaciones finales | 55 |
| BIBLIOGRAFÍA | ¡Error! Marcador no definido. |

INTRODUCCIÓN

Al pasar los años se ha ido enseñando física con base a los estándares nacionales establecidos por el Ministerio de Educación, sin embargo, estos estándares no reglamentan rigurosamente las temáticas a enseñar en las aulas de clase, de modo que, se han enseñado los mismos temas de física que tuvieron lugar en la historia antes del siglo XIX, esto provoca que la enseñanza de la física en la actualidad sea descontextualizada y totalmente desconectada de los avances científicos que se han dado en el último siglo (1900 hasta la actualidad) , los que le han dado forma a lo que conocemos hoy en día como física moderna; como se evidenciará más adelante, esta no es una problemática aislada y es un tema de relevancia dentro del campo de la enseñanza y que se ha venido trabajando los últimos años, así **“la física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores”** escrito por Ostermann y Moreira en 1999, ***“Los estudiantes no tienen contacto con el excitante mundo de la física actual, pues la física que ven no pasa de 1900. Dicha situación es inaceptable en un siglo en el cual ideas revolucionarias han cambiado totalmente la ciencia.”*** (Ostermann, 1999).

El objetivo del desarrollo de este trabajo de investigación es precisamente llevar a las aulas de clase una propuesta de enseñanza de física moderna que ayude a las nuevas generaciones a construir modelos explicativos de fenómenos físicos acorde a la actualidad, que contribuya al desarrollo del pensamiento crítico y analítico de las nuevas generaciones en contextos modernos; todo esto con base a las ideas epistemológicas de Hacking (1996), quien otorga a la actividad experimental un papel fundamental en la construcción del conocimiento en pro del ejercicio de hacer ciencia, acompañado, por supuesto, del trabajo investigativo de Ostermann & Moreira (1999) quienes resaltan la importancia de las reflexiones acerca de la física moderna dentro de las aulas de clase de todo el mundo.

Para desarrollar todo lo que implica lo anterior, se ha propuesto elaborar una secuencia didáctica enfocada en el experimento de Young, más conocido como el experimento de la doble rendija, todo esto desde una metodología de investigación de carácter cualitativo bajo un enfoque pedagógico propio de una Investigación Acción Pedagógica (IAP) bajo la luz de las bases de este enfoque propuesto por Stephen Kemmis en 2014.

Se elige este experimento dada su relevancia histórica y simbólica dentro del contexto de la estructuración teórica de la mecánica cuántica, por un lado, el experimento tiene bases precedentes a la física moderna, a comienzos del siglo XIX, un momento histórico en el cual las ideas más revolucionarias que darían pie a la mecánica cuántica apenas estaban a la espera de ser reveladas, es decir, en un principio el experimento está planteado desde una perspectiva clásica de la física, por otro lado tenemos al experimento como un referente claro para explicar los primeros fenómenos cuánticos que aparecen históricamente desde una nueva interpretación, cómo lo son la superposición de los sistemas cuánticos y la dualidad onda partícula, estos dos aspectos dejan evidenciar claramente el cambio conceptual que se tuvo que dar en las teorías físicas para darle continuidad y acogida a los diferentes fenómenos que eran imposibles de explicar por medios clásicos.

El trabajo investigativo se encuentra organizado en 4 capítulos que cumplen con un objetivo en específico dentro del desarrollo del mismo; el capítulo 1 da la justificación de la propuesta y como se plantea en un principio el proyecto, se da a entender la problemática particular y la pertinencia de la investigación con base a autores que han abordado temas y problemáticas afines con los intereses y objetivos planteados en esta misma. Este capítulo consta de tres apartados que abarcan en su totalidad las bases del trabajo, los cuales son problemas, antecedentes y objetivos.

El capítulo 2 abarca los referentes teóricos presentes para el desarrollo de la investigación, consta de tres partes las cuales desempeñan cada una un papel fundamental dentro del desarrollo de la misma, comenzando por el desarrollo de la óptica previo al siglo XIX y describiendo la cúspide de su proceso en el siglo XVII con el desarrollo en oposición de Newton y Huygens, seguido de un salto temporal hasta Louis De Broglie en lo que llamamos la física moderna y su interpretación más actual por medio de la mecánica cuántica, finalmente tenemos el experimento de Young a través de la historia, desde sus interpretaciones dadas desde un enfoque clásico hasta la relevancia que tiene dentro de la interpretación de la mecánica cuántica en la actualidad.

El capítulo 3 está orientado a la descripción de la metodología usada en este trabajo, la investigación acción pedagógica (IAP), y su influencia en el actuar y diseño del trabajo. Se describe el método dentro del paradigma cualitativo por medio del cual se va a orientar el análisis y recolección de datos a lo largo de la investigación, así como los parámetros y criterios del investigador en la totalidad del procedimiento. Este apartado se divide en 2 fases primeramente la

descripción de la metodología y las bases pedagógicas e investigativas que orientan el desarrollo del trabajo, y la secuencia didáctica que se da como propuesta para dar alcance a los objetivos de la investigación.

El capítulo 4 abarca los resultados obtenidos por medio de la implementación propuesta en el capítulo anterior, se dan los análisis respectivos y las conclusiones finales referentes a la culminación del trabajo,

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DE LA PROPUESTA

Problema

Hoy en día en la gran mayoría de colegios se enseñan una diversidad de temas relacionados con la física clásica que, por supuesto, son fundamentales en la enseñanza de las ciencias, ya que forman las bases de lo que se conoce hoy en día como física moderna, sin embargo, a estas temáticas contemporáneas no se le da ningún espacio curricular relevante, como se pueden apreciar en las mallas curriculares de los colegios públicos que, en teoría, están regidos por la ley 115 de febrero 8 de 1994, artículo 22, en donde se señala claramente los objetivos específicos de la educación básica secundaria y uno de ellos es: **“El avance en el conocimiento científico de los fenómenos físicos, químicos y biológicos, mediante la comprensión de las leyes, el planteamiento de problemas y la observación experimental”**, objetivo al que no se apunta en los planes de estudio de los colegios, pues ni se enseña de los avances científicos más recientes, ni se le da el papel que merece a la actividad experimental, así lo expresa Henry Grajales en su trabajo de investigación sobre la enseñanza de la física moderna en la educación básica: *“Vale la pena destacar que, con contadas excepciones, los contenidos propios de la física moderna no suelen ser objeto de interés, para profesores, directivos y miembros de la comunidad académica de las instituciones educativas, encargados de establecer las temáticas y mallas curriculares en los diferentes grados de la básica y media en Colombia.”* (Grajales, 2017); hay múltiples trabajos en los que se evidencia esta problemática, se abordan varios de estos en la sección de antecedentes más adelante.

Es importante ir articulando desde ahora este tipo de problemáticas de la física, ya que, en la modernidad se pide tener ciertas nociones básicas de física moderna, tal como lo señala nuevamente Grajales:

“No se consideran estas temáticas dentro de los estándares para la excelencia en Colombia, pero que sí se evidencia en las pruebas de estado, donde algunas preguntas hacen alusión a la física moderna sin una previa enseñanza” (Grajales, 2017), así, surge una pregunta frecuente en el que hacer docente ¿se está preparando a los estudiantes para el futuro?, pues parece que ni siquiera para la modernidad. Una problemática que podrían recalcar algunos, es que los temas son muy avanzados para la educación básica, y el problema en realidad es que la información que se encuentra no es accesible, ni está adaptada para los estudiantes en este nivel educativo, Erik Ortiz en su trabajo donde lleva el principio de equivalencia de la relatividad general a las aulas de clase por medio del juguete de Einstein señala, *“Pero la explicación que se expone en esas páginas requiere un nivel de conocimiento y comprensión en la parte conceptual matemática y física que en la educación básica secundaria no se presenta”* (Ortiz, 2013), suena un problema intrínseco de estas temáticas, pero, hoy en día en las aulas de clase se enseñan temas que fueron revolucionarios en su época sin la necesidad de entrar en el formalismo matemático que se dio en su momento, el ejemplo más cercano que se puede evidenciar es la dinámica que se enseña en los colegios, se puede apreciar que se trabajan los avances hechos por Newton sin necesidad de entrar en el uso de su formalismo infinitesimal.

Durante mucho tiempo, estuvo en discusión si la luz tenía comportamiento ondulatorio o corpuscular; a finales del siglo XVII Newton defendía fervientemente el modelo corpuscular mientras que otros físicos de gran renombre como Hooke y Huygens defendían las explicaciones ondulatorias (Duran, 2012), el mismo debate se abrió entre Hertz y Thomson para los rayos catódicos en su momento, solo hasta la llegada de la mecánica cuántica se puede dar cabida al comportamiento dual en un mismo sistema, es en este punto donde el experimento de Young juega un papel fundamental en la construcción de modelos explicativos para ciertos fenómenos que no tienen cabida en las teorías clásicas, a pesar de que este experimento surgió en 1801, un siglo antes de las teorías de la mecánica cuántica, para mostrar el comportamiento ondulatorio de la luz en contraposición de lo que proponía Newton (Sabadel, 2012), este experimento ha sido inmensamente relevante para este nuevo campo de la física; Feynman en algún momento se refirió a este experimento como **“Un fenómeno que es imposible, absolutamente imposible, de explicar por medios clásicos y que contiene en sí el alma de la mecánica cuántica. Contiene, en realidad, el único misterio.”**, pues en 1927 Davisson lo replicó, pero esta vez con electrones, obteniendo los mismos resultados que daban cuenta de un comportamiento ondulatorio al igual

que la luz. Por la misma época también se da cabida definitiva al comportamiento corpuscular de la luz por medio del efecto fotoeléctrico; de modo que para tener una sola explicación de estos resultados surge el modelo dualidad onda-partícula para los sistemas cuánticos que comenzaría a regir la física en los sistemas más diminutos (Sabadell, 2012). Todo este proceso de evolución de la física da una nueva imagen de esta rama de la ciencia que no se presenta en los currículos escolares, es anti-intuitivo y refleja muy bien el paso del determinismo de la mecánica clásica a la visión probabilística de la mecánica cuántica; lamentablemente, la población en general toma la física moderna como actores en un campo ficticio pero no tiene real conocimiento de lo que han avanzado las teorías físicas en los últimos 100 años, ***“Los estudiantes oyen hablar de temas como agujeros negros y big bang en la televisión o en películas de ficción científica, pero jamás en clases de física.”*** (Ostermann, 1999). Aun así, en las aulas de clase se sigue enseñando solo los modelos tradicionales a los que se ha acostumbrado la educación en ciencias naturales, la innovación de problemas físicos y de conocimiento adquirido en las últimas décadas no hace parte de los planes curriculares y se normalizan las temáticas que no despiertan un interés particular, o un raciocinio fuera de los estándares tradicionales, desaprovechando así las importantes reflexiones a las que se puede llegar con este tipo de experimentos pertenecientes a la física contemporánea (García & Calixto, 1999).

De igual manera, se ha usado la experimentación como una herramienta para verificar la teoría en los libros de texto sin dar paso al debate o la reflexión sobre los fenómenos que se abordan, como si se trataran de dogmas, la educación en física junto con la actividad experimental se vuelven ejercicios mecánicos y no dan paso a crear ciencia real en el aula de clases (García & Calixto, 1999), desconociendo el papel epistemológico de la actividad experimental, es así como Ian Hacking destaca a la experimentación como un factor de gran importancia para la construcción de las ciencias, poniéndola al mismo nivel de las teorías y no como un subordinado de estas (Hacking, 1996).

Es así, que el papel del experimento en la enseñanza de las ciencias es fundamental, ya que, es una de sus funciones en la creación del conocimiento, según Hacking, relaciona las teorías físicas con los sentidos y la observación fenomenológica, verificando o refutando teorías, esto hace que el aprendizaje sea significativo en los estudiantes y permite la creación de relaciones directas con su entorno, vivir los fenómenos físicos en carne propia facilita que las teorías se acerquen a lo que se

puede percibir por los sentidos y no se queden como definiciones vacías y faltas de significado en un libro de texto (Monjes, 2018). Además, el experimento como tal en las ciencias, es de igual importancia a la creación de las teorías, es inherente el uno del otro, la observación de cierto fenómeno está condicionada, ya sea para dar explicación a un experimento con base a una teoría o para darle explicación a una teoría con base al experimento (Gonzalez, 2013).

A partir de lo anterior, se planteó la pregunta problema que guiara la propuesta de investigación, **¿Cómo la actividad experimental alrededor de la naturaleza ondulatoria de la luz como un sistema cuántico, aporta en los procesos de aprendizaje de los estudiantes del IPN de grado once?**

Antecedentes

No es la primera vez que se abordan este tipo de problemáticas en contextos escolares, se han recogido para la sustentación de este proyecto algunos trabajos afín con las ideas problematizadoras que se plantean en este trabajo, como lo es el trabajo de Adriana Serrano llamado **“El comportamiento de la luz: diseño y evaluación de una secuencia de enseñanza basada en el aprendizaje como investigación orientada”**, de la Universidad Pedagógica Nacional en 2013, donde se trabaja los fenómenos ópticos y sus características al pasar de los años, desde las ideas de Newton, pasando por las de Huygens y terminando con las concepciones contemporáneas que deja la mecánica cuántica; se parte de un estudio profundo de la temática con un análisis histórico de la evolución de las teorías alusivas a los fenómenos ópticos y se va desglosando poco a poco en la secuencia didáctica que da lugar a la implementación de varios experimentos que dan evidencia del comportamiento ondulatorio y corpuscular de la luz para dar un panorama amplio de la evolución que ha tenido la física en este campo; se maneja una metodología transitoria para no chocar directamente con las concepciones previas de los estudiantes que se complementa con experiencias cotidianas y de laboratorio para aportar al aprendizaje significativo de los estudiantes, es de resaltar que para la explicación de todos estos fenómenos no basta con una sola experiencia que explique los fenómenos, se necesita una serie de actividades que den cuenta de la construcción de las teorías y, por supuesto, en donde entra el fenómeno de interferencia explicado por el experimento de Young como algo intrínseco de la evidencia sobre la naturaleza ondulatoria de la luz.

Ya que, trata el comportamiento dual de la luz, muy cercano al trabajo anterior se encuentra la tesis de grado de Cristina Díaz llamada **“Estrategia de aula orientada a la comprensión del modelo dualidad onda-partícula: una propuesta para estudiantes de grado once”** de la Universidad Pedagógica Nacional en 2014, propuesta que se lleva a cabo en el 2014 desde el departamento de física de la UPN. Cristina Díaz aborda la temática del comportamiento dualidad onda-partícula por medio de una serie de actividades experimentales apoyadas en un blog que brinda a los estudiantes el apoyo teórico suficiente para el desarrollo del programa. Recoge mucho de lo que se quiere hacer con la propuesta de enseñanza que hoy se presenta, ya que, si bien el comportamiento dual de los sistemas cuánticos no es el fenómeno que se quiere abordar en este trabajo, si es de las reflexiones finales a las que se pretende que los estudiante lleguen con el experimento de Young, experimento que por cierto también esta implementado en una de las actividades al final del trabajo de Cristina Díaz para explicar el fenómeno de interferencia como un apartado experimental extra, ya que, en general se centra en la reflexión y refracción de la luz. El blog es creado y modificado por la implementadora del proyecto con la información que ella crea pertinente del desarrollo de las actividades, puesto que, los formalismos matemáticos y conceptuales que se ven en los libros de textos no son apropiados para la población estudiantil de los colegios, esta misma problemática la resalta Erick Ortiz en su proyecto **“El juguete de Einstein: una experiencia que permite evidenciar el principio de equivalencia en el aula”** de la Universidad Pedagógica Nacional en 2013, decide hacer las guías que implementa a “prueba y error” con un método de carácter cualitativo al estilo de una investigación acción-participación, este trabajo intenta llevar al aula el principio de equivalencia, la piedra angular de la relatividad general planteada por Einstein, desarrolla toda su metodología entorno a la actividad experimental con el juguete de Einstein y las explicaciones fundamentadas teóricamente que hay detrás de este. Nuevamente se resalta que los conceptos teóricos aunque están bien fundamentados en fuentes, el investigador no implementa ningún libro de texto como guía para los procesos de enseñanza, rescata los conceptos más fundamentales para las explicaciones y deja que los estudiantes formulen sus propios problemas y soluciones en base a los conocimientos previos, teniendo en cuenta que la relatividad general es un avance reciente y una ampliación desafiante a la gravitación universal que propone Newton, el introducir esta temática en estudiantes de colegio es un gran desafío, pero se logra hacer con resultados favorables para la implementación de la física moderna en las aulas de clase; al finalizar esta investigación, Erick Ortiz concluye que los temas fueron bien

recibidos y entendidos por los estudiantes a pesar de no haber tenido conocimientos previos del tema, por lo que sugiere poder enseñar este tipo de temáticas en grados inferiores a la población que se trató entonces (grado 11°).

Basado en lo anterior, se puede evidenciar que los estudiantes de colegios poseen la capacidad para aprender nociones básicas de física moderna sin mayor dificultad, se muestra que puede enseñarse conceptos de relatividad general sin necesidad de conocimientos previos o formalismos conceptuales y matemáticos, Gustavo López en su trabajo **“Enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela media a partir del concepto de superposición”** desarrollado en la Universidad Nacional en el 2014, muestra algo diferente a lo anterior, ya que, para enseñar el concepto de superposición cuántica si utiliza formalismos matemáticos y conceptuales que podrían llegar a intimidar a algunos estudiantes, conceptos tales como: qubits, espín, vectores en un espacio de Hilbert, y toda la notación de Dirac (bra-ket) que conlleva esto; además, muestra una aplicación directa en programación digital, todo esto dentro de una unidad didáctica que desarrolla con una población de estudiantes de grado 11°, atendiendo la necesidad de llevar la física moderna a las aulas escolares mediante profundas reflexiones filosóficas a cerca de las interpretaciones que se le dan a los experimentos de la mecánica cuántica, sin duda, un trabajo fascinante que deja ver las capacidades intelectuales de los estudiantes de colegio para el entendimiento de temas avanzados de la física, en donde no solo se resalta los procesos de aprendizaje de los estudiantes, sino también, el interés que este tema le genera a los jóvenes.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el impacto de una secuencia didáctica centrada en el experimento de Young que contribuya a la creación de modelos explicativos con base en la interpretación de la mecánica cuántica, para estudiantes del Instituto Pedagógico Nacional (IPN).

Objetivos específicos

- Revisar actividades experimentales que hayan sido fundamentales para construir conceptos básicos de óptica (reflexión y refracción).

- Diseñar una secuencia de actividades que permitan al estudiantado entender fenómenos ópticos desde la perspectiva de la óptica clásica.
- Relacionar los principios de mecánica cuántica evidenciados en el experimento de la doble rendija (experimento de Young).
- Explorar el desarrollo interpretativo al que se acoge el experimento de Young a través del desarrollo teórico de la física.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

La naturaleza de la luz previo al siglo XIX

El Renacimiento y la Revolución Científica, que abarcaron los siglos XV al XVII, representaron una época de profundos cambios en la visión del mundo y en los métodos de investigación científica. Estos períodos estuvieron marcados por un renovado interés en la observación directa y la experimentación como medios válidos para adquirir conocimiento, en contraposición a la dependencia exclusiva de la autoridad de los antiguos y la teología en la comprensión del universo. Figuras influyentes como Leonardo da Vinci, Galileo Galilei y Johannes Kepler se destacaron por su dedicación a la observación meticulosa y el análisis racional de los fenómenos naturales, sentando así las bases de la ciencia moderna (Darrigol, 2012).

En este contexto intelectual en ebullición, la óptica emergió como un área de estudio particularmente fascinante y fructífera. El desarrollo de la fabricación de lentes y la refinación de instrumentos ópticos permitieron a los científicos de la época realizar observaciones más detalladas y precisas sobre la luz y su comportamiento en diversos medios. Experimentos con lentes, como los realizados por el matemático y filósofo René Descartes, condujeron a una mejor comprensión de la refracción de la luz, mientras que los estudios sobre la dispersión de la luz a través de prismas, como los llevados a cabo por el científico y matemático inglés Isaac Newton, arrojaron nueva luz sobre la compleja naturaleza de la luz blanca y los colores del arcoíris. Antes de los trabajos de Newton y Huygens, hubo varios intentos de explicar la naturaleza de la luz.

Desde las concepciones atomistas de los antiguos griegos hasta las especulaciones filosóficas medievales, la búsqueda de una teoría coherente de la luz se remonta a la antigüedad. Sin embargo, fue durante el Renacimiento y la Revolución Científica cuando se desarrollaron las teorías más

influyentes sobre el tema, durante los siglos XVII y XVIII, la naturaleza de la luz fue objeto de intensos debates y exploraciones científicas. En esta época, surgieron dos teorías predominantes que intentaban explicar la naturaleza de la luz: la teoría corpuscular y la teoría ondulatoria. Estas teorías reflejaban la dualidad observada en los fenómenos luminosos y sentaron las bases para el desarrollo de la óptica clásica (Darrigol, 2012).

Trabajo pionero de Isaac Newton

Isaac Newton, en su monumental obra "Opticks" publicada en 1704, realizó una investigación exhaustiva sobre la naturaleza de la luz y sus propiedades, sentando las bases para el estudio científico de la óptica. En este trabajo, Newton propuso su teoría corpuscular de la luz, argumentando que la luz estaba compuesta por partículas discretas, o corpúsculos, que viajaban en línea recta y exhibían propiedades similares a las partículas de materia.

Newton dedica una muy corta parte de su obra a dar definiciones importantes y reglas generales que se asumen como indiscutiblemente ciertas a lo largo de su obra, se debe recalcar que este tratado de óptica es producto del trabajo de muchos investigadores, matemáticos y filósofos naturales que precedieron a Newton y sobre los cuales este se apoyó para justificar sus avances, tal es el caso de su mentor Isaac Barrow, esto se puede ver evidenciado en su axioma VIII: "Un objeto visto por reflexión o refracción, aparece en ese lugar desde donde los rayos después de su última reflexión o refracción divergen al caer sobre el ojo del espectador", una definición de imagen dada por Barrow años atrás (Darrigol, 2012), en escritos anteriores a su tratado de óptica Newton ya tenía una postura clara de la naturaleza de la luz, adoptó la postura de Charleton a cerca de la necesidad de corpúsculos indivisibles para definir la materia.

“Newton estaba de acuerdo con Charleton en que la materia estaba necesariamente compuesta de un número finito de partes indivisibles con intersticios vacíos” (Darrigol, 2012)

Esta postura lo llevo a refutar y redefinir las interpretaciones del filósofo Rene Descartes.

“Rechazó la explicación cartesiana de la luz como presión entre los glóbulos del segundo elemento argumentando que, si fuera cierta, la luz se generaría cuando los

glóbulos fueran presionados por la gravedad, por el movimiento de la tierra, o incluso por el movimiento del observador. En un manuscrito posterior sobre la gravitación y el equilibrio de los fluidos, demostró que la presión se transmitía uniformemente a través de toda la masa de un fluido en equilibrio. Este resultado contradecía implícitamente la explicación de Descartes de la propagación rectilínea de la luz”

(Darrigol, 2012)

A pesar de que Newton no cita textualmente a estos autores es evidente la influencia que tienen al recorrer las páginas de su tratado de óptica, no se profundizara mucho en el trabajo de los predecesores de Newton, ya que, como se dijo anteriormente, el trabajo de Newton en Opticks es una eficaz síntesis de los avances en la óptica hasta el siglo XVII.

Newton investigó en profundidad la refracción de la luz, explicó fácilmente la ley sinusoidal de esta manera, afirmó, “se conserva la componente paralela de "la cosa moviente o en movimiento", y el cuadrado de la componente normal cambia en una cantidad constante", es decir, la componente perpendicular a la arista del prisma o de cualquier superficie refractante se verá afectado por el cambio de medio debido a la densidad de este, mientras que la componente paralela de la velocidad del rayo incidente se mantendrá constante.

Matemáticamente lo esboza de la siguiente manera en la ecuación 1:

$$1) m(v'^2 - v^2) = 2\Delta$$

donde v es la velocidad inicial, v' la velocidad final, m la masa y Δ la integral de la fuerza en su rango. La conservación de la componente paralela del momento lineal produce la ecuación 2:

$$2) v \sin i = v' \sin r$$

En consecuencia, la ley del seno de refracción $\sin i = n \sin r$ se cumple con:

$$3) n^2 - 1 = \frac{2\Delta}{mv^2}$$

El índice varía con m , v y Δ . En su derivación, Newton no decidió a cuál de estas variaciones debía atribuirse un cambio de color. (Darrigol, 2012)

Newton dedica gran parte del tratado al estudio del color y la luz blanca, para ello, hace uso de la ley de refracción para dar explicación a como la luz blanca está compuesta de todos los tonos cromáticos vistos en el arcoíris.

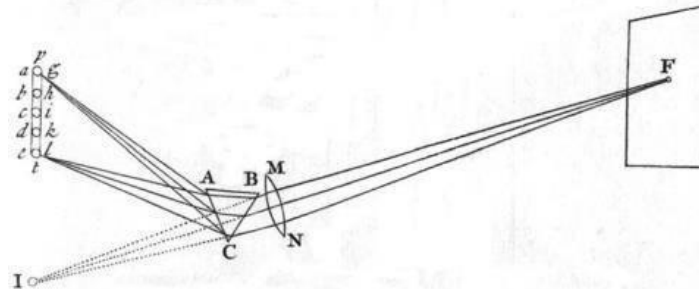


figura 1: imagen tomada de Darrigol 2012.

“Artifugio mejorado de Newton para el análisis de la luz blanca. Sin el prisma, la lente MN enfocarí la luz desde el pequeño orificio F hasta la intersección de las líneas punteadas. Con el prisma, enfocarí la luz homogénea en un punto del segmento pt. Los pequeños círculos g, h, i, k, l representan los focos de cinco colores simples.” (Darrigol, 2012)

En la figura 1 se puede apreciar uno de los experimentos expuestos por Newton, en este experimento se muestra como la luz se desvía de la trayectoria natural al entrar en contacto con un medio refractante, la nueva trayectoria depende del color en particular que ingrese al prisma, demostró que la luz blanca podía descomponerse en un espectro de colores al pasar a través de un prisma, un fenómeno conocido como dispersión de la luz. Esta observación condujo a la formulación de la teoría del color, donde Newton argumentaba que el color era una propiedad intrínseca de la luz y no simplemente una propiedad de los objetos iluminados.

Para concluir su teoría sobre la luz blanca, Newton propuso el siguiente montaje para demostrar la teoría de composición del color a partir de la luz blanca:

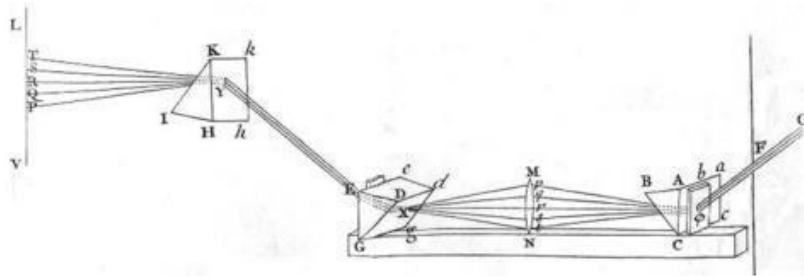


figura 2: imagen tomada de Darrigol 2012.

“Síntesis de Newton de la luz blanca a partir de colores simples. El prisma FDG recombina los colores separados por el primer prisma ABC, de modo que el haz FY tiene todas las propiedades de la luz blanca. El bloqueo de un color simple en los puntos p, q, r, s, t de la lente MN implica la falta de color P, Q, R, S, T en el espectro producido por el prisma KIH.” (Darrigol, 2012)

Con este experimento, Newton demuestra que la luz blanca se puede descomponer en los diferentes colores del arcoíris, pero también logra evidenciar que las propiedades intrínsecas de cada color al componer la luz blanca no se pierden al separarse de los otros colores mediante la refracción.

Durante todo el tratado de óptica, Newton procura ser cauteloso frente a su postura sobre la naturaleza de la luz, a pesar de ya tener una postura bien marcada sobre la naturaleza corpuscular que ya había expresado anteriormente en otros escritos y conferencias, en

“Opticks” es reservado al respecto y muestra una perspectiva neutra; no es hasta 1706 en la edición traducida al latín en la que agrega 7 preguntas nuevas en las que se nota su inclinación a la teoría corpuscular de la luz tal como se puede apreciar en esta ***“¿No son los rayos de luz cuerpos muy pequeños emitidos por sustancias brillantes?”***(Newton, 1706), además, también rechazó cualquier explicación en las que se recurriera al éter argumentando que de existir dicho medio ralentizaría el movimiento de los cuerpos celestes (Darrigol, 2012), además reitera la tendencia de la luz a propagarse en línea recta y la compara con la propagación acústica:

“Si [la luz] consistiera en Presión o Movimiento, propagado en un instante o en el tiempo, se doblaría en la Sombra... Las olas en la superficie del agua estancada, pasando

por los lados de un amplio obstáculo que detiene parte de ellas, se doblan después y se dilatan gradualmente en el agua tranquila detrás del obstáculo. Las ondas, pulsos o vibraciones del aire, en qué consisten los sonidos, se doblan manifiestamente, aunque no tanto como las ondas del agua. Porque una campana o un cañón pueden oírse más allá de una colina que intercepta la vista del cuerpo que resuena, y los sonidos se propagan tan fácilmente a través de tubos torcidos como a través de tubos rectos. Pero nunca se sabe que la Luz siga Pasajes torcidos ni que se doblegue hacia la Sombra.” (Newton, 1706)

El trabajo de Newton en "Opticks" no solo proporcionó una comprensión más profunda de la naturaleza de la luz, sino que también estableció un nuevo estándar para el rigor científico y el método experimental en el estudio de la óptica. Aunque su teoría corpuscular fue posteriormente superada por la teoría ondulatoria de la luz, el legado de Newton en óptica sigue siendo reconocido como uno de los hitos más importantes en la historia de la ciencia.

La teoría ondulatoria de la luz de Christiaan Huygens

Los comienzos de la naturaleza ondulatoria se remontan a mucho antes del siglo XVII, sin embargo, los mayores exponentes de la postura ondulatoria, en oposición a la postura corpuscular de Newton, fueron Hooke y Huygens. Por su lado, Christiaan Huygens, un destacado científico del siglo XVII, contribuyó significativamente al campo de la óptica con su teoría ondulatoria de la luz, presentada en su obra "Traité de la Lumière" (Tratado de la Luz) publicada en 1690. En dicho documento plantea una explicación fenomenológica de los

fenómenos a partir de una postura claramente ondulatoria que heredó de su mentor Pardies, quien luego de fallecer dejó su legado en manos de Huygens. su descripción de la refracción de la luz se muestra en la figura 3.

modelo ondulatorio tenía varias inconsistencias que tratar, en primer lugar la base del modelo ondulatorio estaba fuertemente ligados a analogías con ondas acústicas, lo que debilitaba los argumentos debido a las grandes diferencias, en primer lugar el sonido suele propagarse a través de medios irregulares, contrario a la luz que tiene una tendencia evidente a propagarse en línea recta; además, el medio por el que se propaga la luz (el aire) no es el mismo, evidentemente la luz se podía propagar en el vacío, por otro lado, mediante experimentos ya realizados por Torricelli y Boyle se demostró que el sonido necesita del aire para propagarse.

Huygens lo expresa así: ***“Si [el sonido y la luz] son similares en este aspecto [velocidad finita de propagación], difieren en varios otros aspectos, a saber: en la primera producción de movimiento que los causa, en la manera en que se propaga este movimiento y en la manera en que se comunica” (Huygens, 1690).***

Para explicar estas inconsistencias del modelo ondulatorio, Huygens plantea un nuevo modelo que dista de los propuestos por sus antecesores:

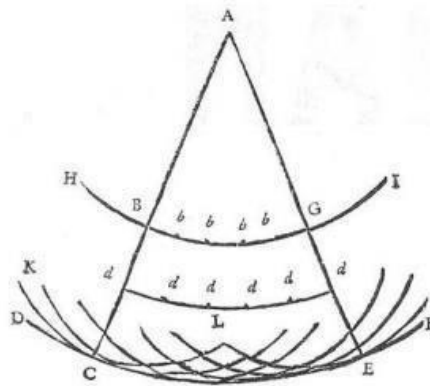


figura 4: imagen tomada de Darrigol 2012.

“Consideró una onda esférica centrada en A y encontrándose con el diafragma formado por las superficies opacas HB y GI. Los puntos b del medio son excitados por la onda cuando pasa por el diafragma.” (Darrigol, 2012)

De esta forma Huygens creó el primer modelo ondulatorio que justificaba con éxito la trayectoria rectilínea de la luz, uno de los puntos más débiles en el modelo ondulatorio análogo a las ondas acústicas, en este modelo, el foco A funciona como fuente radial de las ondas lumínicas, y se

extienden a los puntos b y d consecutivamente, esta parte se conoce como el diafragma, que es tal cual la trayectoria de la onda esférica en una expansión radial.

Pero su mayor logro a la óptica se dio en lo que él llamó la refracción extraordinaria, En 1669, el médico danés Erasmus Berthelsen había descubierto que un rayo que entraba en el cristal del espato se dividía en dos rayos, uno siguiendo la ley habitual de refracción y el otro obedeciendo a una regla más compleja. En el caso de la refracción extraordinaria, Huygens asumió que las ondas particulares emitidas en la superficie del cristal eran elipsoides achatados en lugar de esferas, (las ondas ordinarias son las esferas inscritas en estos elipsoides). Esto implica que los rayos que unen los centros de estas ondas a la onda envolvente ya no son ortogonales a esta última, de modo que un rayo que entra en el cristal con una incidencia normal se refracta, tal como se ve en la figura 5. (Darrigol, 2012)

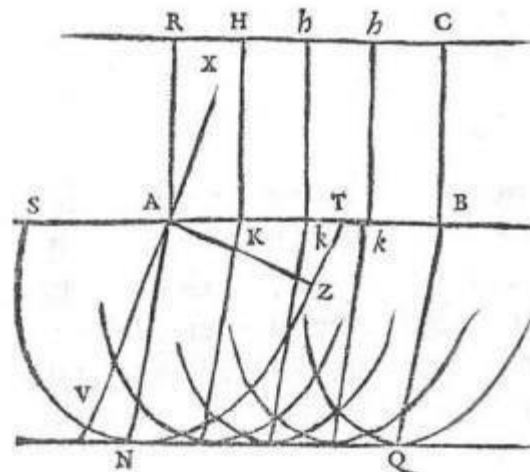


figura 5: imagen tomada de Darrigol 2012.

“Construcción de Huygens para la refracción de una onda plana (RC) al entrar en un medio anisotrópico con incidencia normal. La forma elíptica de una onda particular SNT implica que el rayo AN que une su centro A a su punto de contacto N con la envolvente NQ de todas estas ondas no es perpendicular a la onda resultante NQ.”

(Darrigol, 2012)

Todo este trabajo de Huygens en la teoría de transmisión de luz por medios lo llevaron a ser uno de los más grandes filósofos naturales de su época, gracias a su elegancia en sus demostraciones geométricas y la lucidez que mostraba al momento de explicar sus teorías se ganó un puesto prestigioso entre los grandes pensadores de la época y su opinión ante los debates teóricos eran bien respetada entre la comunidad.

Newton en oposición a la teoría ondulatoria

En los últimos dos apartados se ha visto la postura de cada uno de los trabajos más influyentes dedicados a la óptica del siglo XVII. La discrepancia entre las teorías de Newton y Huygens residía en la naturaleza misma de la luz: Newton la concebía como partículas discretas que viajaban en línea recta, mientras que Huygens la consideraba como una perturbación ondulatoria que se propagaba en un medio material. Esta diferencia fundamental llevó a un intenso debate entre los científicos de la época, cada uno defendiendo su postura con argumentos convincentes. Newton argumentaba que sus experimentos con prismas y lentes respaldaban su teoría corpuscular, mientras que Huygens defendía la teoría ondulatoria basándose en la difracción y otros fenómenos que no podían explicarse fácilmente con partículas de luz. Sin embargo, ninguno de los dos científicos pudo ofrecer una explicación completa y satisfactoria para todos los fenómenos ópticos observados.

Con riesgo de hipersimplificar el debate establecido entre los dos pensadores (Newton y Huygens) se podría resumir a una discusión sobre si la luz es un fenómeno explicado a través de un modelo corpuscular o uno ondulatorio. Isaac Newton y Christiaan Huygens, dos de los más destacados científicos del siglo XVII, ofrecieron visiones revolucionarias sobre la naturaleza de la luz. Sus teorías, aunque divergentes, representaron un punto crucial en la historia de la óptica y marcaron el comienzo de una profunda exploración sobre la verdadera esencia de la luz. Newton, conocido por sus contribuciones en campos tan diversos como la física, las matemáticas y la astronomía, propuso su teoría corpuscular de la luz en su obra "Óptica" de 1672. En ella, defendía que la luz consistía en partículas, o corpúsculos, que se movían en línea recta a través del espacio. Su enfoque estaba arraigado en la mecánica newtoniana, que dominaba el pensamiento científico de su tiempo. Para respaldar su teoría, Newton realizó una serie de experimentos, entre los que destacan su investigación sobre la refracción y la dispersión de la luz. Utilizando prismas, demostró que la luz blanca se descomponía en un espectro de colores al pasar a través de un prisma, un fenómeno

conocido como dispersión. en comparación al trabajo de Newton, Huygens reconocía que su teoría óptica tenía ciertas debilidades, para empezar, jamás pudo dar una teoría concreta que explicara la teoría del color de Newton, además que la refracción extraordinaria que descubrió, solo se daba en ciertos ángulos específicos, de otro modo la refracción se explicaba fácilmente por la ley de refracción ordinaria; la ventaja predominante de Newton estuvo en la simplicidad que implicaba describir la luz por medio de corpúsculos, los colores dependiente del tamaño de cada uno de ellos, la tendencia a líneas rectas en su trayectoria fácil de explicar por medio de mecánica ordinaria, en definitiva las abstracciones propuestas por Newton eran mucho más amenas a la comunidad en general de filósofos naturales, por otro lado la percepción ondulatoria enfrentaba varios desafíos en cuanto a la consolidación de la teoría y la complejidad que requería para justificar sus fundamentos, a pesar de esto, Newton tubo que valerse de mucha cautela frente a su postura y defender fervientemente sus avances frente a sus detractores que no eran pensadores de talla menor o de bajo prestigio.

A pesar de las discrepancias entre sus teorías, tanto Newton como Huygens realizaron contribuciones significativas al campo de la óptica. El trabajo de Newton estableció un enfoque riguroso y experimental en el estudio de la luz, mientras que el de Huygens proporcionó una explicación coherente para una amplia gama de fenómenos ópticos. Aunque las teorías de ambos científicos fueron posteriormente superadas por la teoría electromagnética de la luz en el siglo XIX, su legado sigue siendo reconocido como un hito importante en la historia de la ciencia y ha influido en la investigación óptica moderna.

Antes de pasar a la parte de la naturaleza ondulatoria de la luz como sistema cuántico es necesario resaltar que es un salto temporal considerable, en el que se omiten varios desarrollos de la interpretación de la luz, tal es el caso de la luz como onda electromagnética, para evitar entrar en discusiones teóricas amplias que extenderían de más la potestad de este trabajo se decide omitir esta parte histórica y pasar directamente a una época donde ya se asume esta naturaleza electromagnética como verdadera; Y enfocarse en mostrar en paralelo como desde la física clásica se justificaba la luz como partícula o como onda con base a fenómenos ópticos, y por otro lado la mecánica cuántica que unifica estos dos enfoques en uno solo, partiendo de una conveniente dualidad dependiente del experimento en el que se ponga en tela de juicio su naturaleza.

La naturaleza de la luz como sistema cuántico

La tesis doctoral de Louis de Broglie, "Recherches sur la théorie des quanta", presentada en la Universidad de París en 1924, representa un hito crucial en la historia de la física al proponer la hipótesis de la dualidad onda-partícula. En este trabajo revolucionario, de Broglie propuso que todas las partículas, incluida la luz, exhiben tanto comportamientos de partícula como de onda propone su hipótesis de la siguiente manera: ***“Si hoy nos parece bastante probable que todas las ondas tengan concentraciones de energía, por otra parte, la dinámica del punto material probablemente oculta una propagación de ondas”*** (De Broglie, 1924), con esta frase no solo hace mención al “punto material”, concepto entorno al cual gira toda la mecánica clásica propuesta por Newton en los Principia, y entorno a la cual se ha venido trabajando la dinámica hasta la actualidad; también hace mención a los recientes descubrimientos de la cuantización de la energía gracias al trabajo de Planck respecto a la radiación del cuerpo negro, además, del trabajo de Einstein al solucionar el problema del efecto fotoeléctrico e introducir el concepto de “fotón”, primeramente conocido como “cuanto de luz”, hay que tener en cuenta que para esta época ya se había dado la revolución del electromagnetismo en la física, es decir, a partir de la síntesis que hizo Maxwell con la electrostática y el magnetismo, se consideró la luz como una onda electromagnética, y sus argumentos, tanto experimentales, matemáticos y teóricos fueron tan contundentes que no dieron cabida al debate o la duda de su veracidad. Es por ello que, para este punto, volver a atribuirle propiedades corpusculares a la luz, tal como lo hizo Einstein, fue algo impactante para la comunidad científica, marcando así un cambio fundamental en nuestra comprensión de la naturaleza de la radiación.

A pesar de que la investigación de Louis De Broglie se centra en varios aspectos de la mecánica cuántica, abordando fenómenos ondulatorios y corpusculares en igual medida, es evidente que el punto de partida para definir la naturaleza de los sistemas cuánticos está fuertemente ligado con el análisis que se haga alrededor de la radiación electromagnética. Es por ello que dedica todo el capítulo V llamado ***“Los cuantos de luz”*** y dedica todo el capítulo a definir ***“el átomo de luz”*** a partir de las investigaciones hechas hasta el momento, teniendo en cuenta el más reciente hallazgo de la época, la cuantización de la energía como solución a la catástrofe ultravioleta causada por la radiación del cuerpo negro.

como no se abordarán en este capítulo todo el extenso trabajo alrededor de la radiación del cuerpo negro, ya que, conllevaría a otro capítulo entero, pero si se abordara la cuantización de la energía vista desde la perspectiva de De Broglie, se ha de recordar que para este problema se plantearon dos soluciones que daban cuenta de aspectos específicos del fenómeno, pero no de una teoría completa que lo explicara del todo, surgieron entonces la ley de Rayleigh-jeans y la ley de Wien, ambos modelos son una aproximación a la explicación del fenómeno de la radiación pero tenían un punto de inflexión, mientras que uno explicaba satisfactoriamente la radiación solo para cierto rangos de frecuencias, el otro complementaba el rango de frecuencias restante pero era ineficaz para explicar el rango de frecuencias del primero. Con la cuantización de la energía de Planck se logra dar una explicación completa de ambos modelos cubriendo en su totalidad el fenómeno así lo esboza De Broglie: ***“era posible interpretar la transición de la ley de Wien a la ley de Rayleigh concibiendo la existencia de conjuntos de átomos de luz ligados a la propagación de la misma onda de fase”.*** (De Broglie, 1924)

La frecuencia de la onda con múltiples centros de energía está determinada por la relación:

$$hv = \frac{\mu_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

donde hv es la energía de un fotón (la constante Planck por la frecuencia), μ_0 es la masa propia de cada centro de energía, c es la velocidad de la luz y β corresponde a la razón entre la velocidad del cuerpo con masa y la velocidad conocida de la luz es decir $\beta = \frac{v}{c}$.

Esto parece necesario para tener en cuenta la emisión y absorción de energía en cantidades finitas hv . Pero tal vez podríamos suponer que la masa de los centros de energía relacionados con la misma onda difiere de la masa propia m_0 de un centro aislado y depende del número de otros centros con los que interactúan. Tendríamos entonces:

$$\mu_0 = f(p) \quad \text{con} \quad f(1) = m_0$$

La necesidad de recurrir a las fórmulas del electromagnetismo para frecuencias muy bajas, nos llevaría a suponer que $f(p)$ es una función decreciente de p que tiende a 0 cuando p tiende a infinito. La velocidad de todos los p centros que forman una onda sería:

$$\beta c = c \sqrt{1 - \left(\frac{f(p)c^2}{hv}\right)^2}$$

Para frecuencias muy altas, p casi siempre sería igual a 1, los granos de energía estarían aislados, tendríamos la ley de Wien para la radiación del cuerpo negro y la fórmula para la velocidad de la energía radiante:

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{m_0^2 c^4}{h^2 v^2}}$$

Para frecuencias muy bajas, p siempre sería muy grande, los granos se reunirían en grupos muy numerosos en la misma onda. La radiación del cuerpo negro obedecería a la ley de Raleigh y la velocidad tendería hacia c cuando v tendería hacia 0. (De Broglie, 1924)

A partir de lo anterior se le debe otorgar una cierta naturaleza dual al comportamiento de la luz, se puede evidenciar fácilmente que para que haya una continuidad entre la ley de Wien y la ley Rayleigh-Jeans debe de considerarse una cantidad de corpúsculos expresada por $f(p)$, De Broglie expresa la necesidad de unificar las teorías electromagnéticas y los fenómenos fotoeléctricos mediante esta interpretación de esta manera:

“...Esta conexión se obtendría, me parece, mediante la introducción de la función $f(p)$ porque, para una energía dada, una onda tendrá que incluir un número cada vez mayor de p de granos cuando v y hv disminuyan; Cuando la frecuencia se hace cada vez más baja, el número de granos debe aumentar indefinidamente, su masa propia M_0 tiende hacia 0 y su velocidad hacia C , de modo que la onda que los transporta se vuelve cada vez más análoga a la onda electromagnética.” (De Broglie, 1924)

Teniendo en cuenta lo anterior, De Broglie se basa en la idea de que las partículas subatómicas, como los electrones, no están confinadas únicamente a comportamientos de partícula discretos, sino que también pueden exhibir propiedades ondulatorias: *“Por lo tanto, para describir las propiedades de la materia, así como las de la luz, las ondas y los corpúsculos tienen que ser referidos al mismo tiempo.”* (De Broglie, 1924), Esto desafía la visión tradicional de las partículas

como entidades puntuales y rígidas, y sugiere que su comportamiento está intrínsecamente ligado a las características de una onda.

De Broglie presenta una serie de razonamientos matemáticos y físicos para respaldar esta idea. Uno de los pasajes más importantes de su tesis es donde desarrolla la relación entre la longitud de onda asociada a una partícula y su momento lineal. De Broglie propuso que esta relación está dada

por la ecuación $\lambda = \frac{h}{p}$, donde λ es la longitud de onda h es la constante de Planck y p es el momento lineal de la partícula. Esta ecuación sugiere que las partículas con mayor momento lineal tienen longitudes de onda más cortas, lo que implica comportamiento más "particulístico", mientras que las partículas con menor momento lineal tienen longitudes de onda más largas, lo que implica comportamiento más "ondulatorio". (De Broglie, 1924)

De Broglie argumentó que esta dualidad onda-partícula no se limita solo a las partículas subatómicas, sino que también se aplica a la luz. Propuso que los fotones, las partículas de luz, también tienen asociadas propiedades ondulatorias. Esto significa que la luz puede exhibir tanto comportamientos de onda, como la interferencia y la difracción, como comportamientos de partícula, como la absorción y emisión de fotones individuales. Esta idea desafía la concepción clásica de la luz como una onda electromagnética y plantea nuevas preguntas sobre la naturaleza dual de los sistemas cuánticos. Para respaldar su hipótesis, de Broglie presentó una serie de argumentos y experimentos en su tesis. Uno de los experimentos más destacados es el análisis de la difracción de electrones por cristales. De Broglie sugirió que, si los electrones tienen propiedades ondulatorias, deberían exhibir patrones de interferencia cuando se difracten por una rejilla cristalina, de manera similar a las ondas de luz. (De Broglie, 1924) Este experimento, aunque no fue realizado por de Broglie mismo, fue llevado a cabo por Clinton Davisson y Lester Germer en 1927, quienes observaron patrones de interferencia característicos de las ondas en la difracción de electrones, confirmando así la hipótesis de de Broglie y proporcionando un apoyo experimental crucial para su teoría.

En conclusión, el trabajo de Louis de Broglie sobre la dualidad onda-partícula proporcionó una nueva perspectiva sobre la naturaleza fundamental del universo, al sugerir que todas las partículas, incluida la luz, tienen propiedades tanto de onda como de partícula. Este concepto revolucionario ha transformado nuestra comprensión de la física cuántica y ha sentado las bases para numerosos

avances en la ciencia moderna. La naturaleza dual de los sistemas cuánticos, tal como la luz y las partículas subatómicas, sigue siendo objeto de intensa investigación y debate en la física contemporánea.

El experimento de Young y su desarrollo interpretativo

El experimento de Young, llevado a cabo por Thomas Young en 1801, representa un punto de inflexión en la historia de la física, donde la comprensión de la naturaleza de la luz y su comportamiento experimentó una transformación radical. En su experimento, Young enviaba luz a través de una barrera con dos rendijas y observaba el patrón de interferencia resultante en una pantalla de detección. Esta observación desafiaba las concepciones establecidas sobre la naturaleza de la luz y su comportamiento corpuscular.

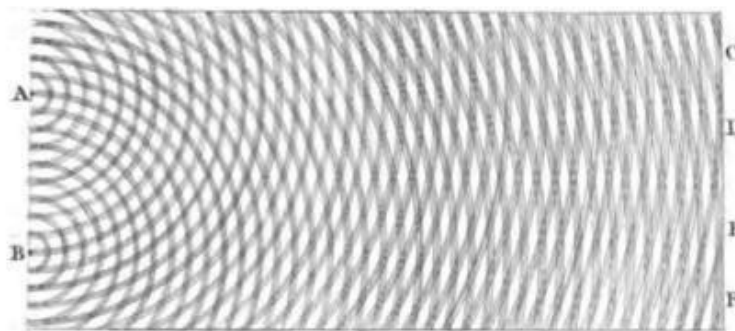


figura 6: imagen tomada de Darrigol 2012.

En la figura 6 podemos apreciar lo que Young definió como interferencia de ondas, en esta analogía con ondas en el agua, muestra como al producir dos focos de ondas en A y B, colisionan frecuentemente causando interferencia, constructiva cuando coinciden en fase, los picos se muestran en los puntos C, D, E, F; y destructiva cuando coinciden en contrafase y los vacíos se muestran en los espacios entre C-D, D-E, E-F. (Darrigol, 2012)

Inicialmente, desde la perspectiva de la mecánica clásica, el experimento de Young se interpretó en términos de ondas mecánicas, no es de extrañar, ya que, Young baso su trabajo en la mecánica ondulatoria de Huygens y Hooke, desafortunadamente Young no portaba con la experticia en las matemáticas que sus predecesores, de modo que sus argumentos perdieron credibilidad a falta de formalismo matemático o geométrico. Según esta interpretación, las ondas provenientes de las dos rendijas interferirían entre sí en la pantalla de detección, dando lugar a regiones de interferencia constructiva y destructiva, lo que resultaría en un patrón de franjas de luz brillantes y oscuras. Esta explicación parecía adecuada para describir el fenómeno observado y se alineaba con la comprensión clásica de la luz como una onda. Sin embargo, a medida que avanzaba el siglo XIX, surgieron discrepancias con esta explicación puramente ondulatoria del experimento de Young. (Darrigol, 2012)

Fenómenos como el efecto fotoeléctrico y la emisión de electrones en experimentos de dispersión de luz desafiaban las ideas establecidas sobre la naturaleza de la luz como onda electromagnética y sugerían que tenía propiedades corpusculares además de su naturaleza ondulatoria. Fue la llegada de la mecánica cuántica a principios del siglo XX lo que revolucionó nuestra comprensión del experimento de Young y la naturaleza de la luz.

“uno siempre puede preguntarse si la oposición entre los dos puntos de vista es real o se debe únicamente a la insuficiencia de nuestros esfuerzos por sintetizarlos.” (De Broglie, 1924)

La mecánica cuántica introdujo el concepto de dualidad onda-partícula, que sugería que la luz, así como otras partículas subatómicas, podían exhibir tanto comportamientos de onda como de partícula. Desde esta perspectiva, el experimento de Young adquirió una nueva interpretación. En la mecánica cuántica, se considera que la luz está compuesta por partículas discretas llamadas fotones, que exhiben propiedades ondulatorias en determinadas circunstancias. Cuando un fotón individual pasa a través de las rendijas en la barrera de Young, no sigue una trayectoria definida, sino que se describe mediante una función de onda cuántica. Esta función de onda cuántica describe la probabilidad de que el fotón se transmita por una rendija u otra, y esta probabilidad da lugar a los patrones de interferencia observados en la pantalla de detección. (De Broglie, 1924)

La transición de la mecánica clásica a la mecánica cuántica en la interpretación del experimento de Young es fundamental para comprender la verdadera naturaleza de la luz y su comportamiento

en el nivel subatómico. Mientras que la mecánica clásica proporcionaba una explicación parcial del fenómeno en términos de ondas electromagnéticas, la mecánica cuántica ofrecía una comprensión más completa al considerar la naturaleza dual de la luz como partícula y onda.

En conclusión, el experimento de Young ha sido un catalizador para el cambio conceptual en la física, llevándonos desde una comprensión limitada basada en la mecánica clásica hacia una comprensión más profunda y completa proporcionada por la mecánica cuántica. Este cambio no solo ha transformado nuestra comprensión de la luz y su comportamiento, sino que también ha abierto nuevas puertas para explorar los misterios del mundo subatómico y la naturaleza fundamental del universo. La dualidad onda-partícula de la luz, evidenciada por el experimento de Young, sigue siendo uno de los pilares fundamentales de la física moderna y continúa inspirando investigaciones y descubrimientos en la frontera de nuestro conocimiento científico.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

investigación acción pedagógica

La enseñanza de la física en las escuelas enfrenta desafíos significativos en cuanto a la contextualización y actualización de los contenidos, especialmente en relación con los avances científicos modernos. Varias investigaciones alrededor de la física señalan esta problemática desde varios años atrás, *“Los estudiantes no tienen contacto con el excitante mundo de la física actual, pues la física que ven no pasa de 1900. Dicha situación es inaceptable en un siglo en el cual ideas revolucionarias han cambiado totalmente la ciencia.”* (Ostermann, 1999), La brecha entre la física clásica y la mecánica cuántica, por ejemplo, representa un desafío para los educadores al intentar proporcionar una comprensión completa y actualizada de esta disciplina a los estudiantes. En este contexto, la investigación acción pedagógica (IAP) emerge como un enfoque valioso y efectivo para abordar estos desafíos y mejorar la práctica educativa en el aula.

La IAP, según Kemmis, 2014, resalta 4 aspectos importantes a tratar en una investigación de este tipo:

1. **Enfoque crítico:** La investigación-acción pedagógica, bajo la perspectiva de Stephen Kemmis, se distingue por su enfoque crítico hacia los problemas educativos. Este enfoque no se limita a abordar los síntomas superficiales de los desafíos educativos, sino que busca entender las

raíces más profundas que los generan. Kemmis sostiene que la verdadera mejora en la educación solo puede lograrse al cuestionar y desafiar las estructuras sociales y educativas subyacentes que perpetúan las desigualdades y las injusticias en el sistema educativo. Al adoptar un enfoque crítico, los educadores se embarcan en un proceso de análisis profundo de las condiciones sociales, políticas y culturales que influyen en la práctica educativa. En palabras de Kemmis, *"la investigación-acción debe ser crítica, no solo abordando los síntomas superficiales de los problemas educativos, sino también explorando sus raíces más profundas"* (Kemmis, 2014), este llamado a la crítica invita a los educadores a examinar cómo las normas, los valores y las estructuras de poder impactan en la experiencia educativa de los estudiantes. Implica también cuestionar las prácticas educativas tradicionales y considerar alternativas que promuevan la equidad y la justicia social. Kemmis destaca que *"solo al desafiar las estructuras de poder existentes y trabajar hacia cambios fundamentales podemos aspirar a una educación verdaderamente inclusiva y equitativa"* (Kemmis, 2014), esto implica no solo mirar hacia adentro, hacia nuestras propias prácticas educativas, sino también hacia afuera, hacia las políticas y estructuras más amplias que dan forma al sistema educativo. El enfoque crítico de la investigación-acción pedagógica también destaca la importancia de la reflexión y el diálogo como herramientas para desafiar las concepciones convencionales y promover el cambio. Kemmis enfatiza que *"la reflexión crítica nos permite cuestionar nuestras suposiciones y prácticas arraigadas, abriendo la puerta a nuevas formas de pensar y actuar en el aula"* (Kemmis, 2014). Este proceso de reflexión crítica no solo beneficia a los educadores individualmente, sino que también contribuye a la construcción de una comunidad educativa más reflexiva y comprometida con el cambio.

2. **Participación colaborativa:** Kemmis sostiene que la participación activa y la colaboración entre los maestros, los estudiantes, los padres y la comunidad son esenciales para abordar los problemas educativos de manera efectiva y promover el cambio significativo en las aulas y más allá. La participación colaborativa en la investigación-acción pedagógica se fundamenta en la idea de que la experiencia y el conocimiento de diversos actores en la comunidad educativa son valiosos recursos para comprender y abordar los desafíos educativos. En palabras de Kemmis, *"la colaboración de todos los interesados es esencial para abordar los problemas educativos de manera efectiva"* (Kemmis, 2014). Esta participación activa no solo aumenta la legitimidad y la relevancia

de la investigación, sino que también garantiza que las soluciones propuestas sean culturalmente sensibles y contextualmente apropiadas. Además, la participación colaborativa fomenta un sentido de responsabilidad compartida y empoderamiento entre los participantes. Kemmis enfatiza que *"la colaboración permite a los participantes tener voz en el proceso de toma de decisiones y trabajar juntos hacia objetivos comunes"* (Kemmis, 2014), este sentido de pertenencia y compromiso conduce a una mayor motivación y compromiso con el cambio, ya que los participantes se convierten en agentes activos en la mejora de la práctica educativa. También promueve el aprendizaje mutuo y el intercambio de conocimientos entre los participantes. Kemmis destaca que *"la colaboración facilita el intercambio de ideas y experiencias entre maestros, estudiantes, padres y miembros de la comunidad, enriqueciendo así el proceso de investigación"* (Kemmis, 2014). Este diálogo abierto y respetuoso permite a los participantes aprender unos de otros y desarrollar una comprensión más profunda de los problemas educativos y las posibles soluciones.

3. **Ciclo de planificación-acción-reflexión:** En la investigación-acción pedagógica, el ciclo de planificación-acción-reflexión es un componente fundamental para mejorar la práctica educativa de manera continua y significativa. Según las ideas de Stephen Kemmis, este ciclo cíclico permite a los educadores planificar cuidadosamente sus acciones, implementar cambios prácticos en el aula y reflexionar críticamente sobre los resultados obtenidos para informar futuras acciones. El primer paso en el ciclo de planificación-acción-reflexión es la planificación cuidadosa de la acción. Los educadores identifican un problema o desafío educativo en su práctica y desarrollan un plan de acción para abordarlo. Esta etapa involucra la recopilación de datos, el establecimiento de objetivos claros y la consideración de estrategias y recursos necesarios para implementar el cambio deseado. Una vez que se ha desarrollado el plan de acción, los educadores proceden a la implementación de cambios prácticos en el aula. Este segundo paso del ciclo implica poner en práctica las estrategias planificadas y recopilar datos sobre su efectividad. Durante esta etapa, los educadores tienen la oportunidad de observar cómo responden los estudiantes, ajustar las estrategias según sea necesario y recopilar información sobre el impacto de las acciones implementadas. Finalmente, el ciclo de planificación-acción-reflexión culmina con la etapa

de reflexión crítica sobre los resultados obtenidos. Los educadores revisan los datos recopilados durante la implementación de la acción, evalúan el progreso hacia los objetivos establecidos y reflexionan sobre los desafíos encontrados y las lecciones aprendidas. Esta reflexión crítica informa la siguiente iteración del ciclo, ya que los educadores identifican áreas para mejorar y ajustan su enfoque en consecuencia. (Kemmis, 2014).

4. **Conciencia crítica y emancipación:** Según Kemmis, no solo busca mejorar la práctica educativa, sino también promover la conciencia crítica y la emancipación de los educadores y los estudiantes. Estos conceptos están estrechamente vinculados y se basan en la idea de que la educación debe ser un vehículo para la reflexión crítica y la acción transformadora.

La conciencia crítica, según Kemmis, implica cuestionar las estructuras sociales y educativas existentes, así como las relaciones de poder que influyen en la experiencia educativa de los estudiantes. Como señala, *"la investigación-acción debe fomentar una conciencia crítica entre los educadores y los estudiantes, permitiéndoles comprender y cuestionar las estructuras de poder y las injusticias en el sistema educativo"* (Kemmis, 2014). Este proceso de reflexión crítica invita a los participantes a examinar cómo las normas, los valores y las estructuras sociales influyen en la educación y a considerar formas de abordar estas inequidades. Además, la investigación-acción pedagógica puede contribuir a la emancipación de los educadores y los estudiantes, permitiéndoles participar de manera activa en la transformación de su propia realidad educativa. Kemmis sostiene que *"este enfoque puede promover la emancipación, permitiendo a los individuos desafiar las estructuras de poder existentes y trabajar hacia una educación más justa y equitativa"* (Kemmis, 2014). Al fomentar la reflexión crítica y la acción colaborativa, la investigación-acción pedagógica capacita a los participantes para convertirse en agentes de cambio en sus propias comunidades educativas. La conciencia crítica y la emancipación son fundamentales para el empoderamiento de los educadores y los estudiantes en la investigación-acción pedagógica. Al desarrollar una comprensión más profunda de las estructuras de poder y las injusticias en el sistema educativo, los participantes pueden trabajar juntos para abordar estos problemas y promover un cambio significativo en sus aulas y comunidades. Como señala Kemmis, *"solo al desafiar las estructuras de poder existentes y trabajar hacia cambios fundamentales podemos aspirar a una educación verdaderamente inclusiva y equitativa"* (Kemmis, 2014).

Es por todo lo anterior que se ha optado por usar esta corriente de pensamiento pedagógico, ya que se aspira a que los estudiantes mediante la secuencia didáctica sean capaces de forjar su propio conocimiento mediante la actividad experimental, bien lo señala Hacking, enfatiza que la actividad experimental no solo nos permite adquirir conocimiento sobre el mundo, sino que también contribuye a su construcción. Al intervenir en la naturaleza a través de experimentos, los científicos pueden influir en los fenómenos estudiados y contribuir al desarrollo de nuevas teorías y paradigmas científicos. En este sentido, la actividad experimental es fundamental para la evolución y el progreso del conocimiento científico.

(Hacking, 1996).

Planeación didáctica

La población a tratar en esta investigación son estudiantes del grado 11°, del Instituto Pedagógico Nacional (IPN), un instituto de educación básica primaria y secundaria fuertemente ligado a la Universidad Pedagógica Nacional (UPN), es una institución pública que alberga estudiantes de diversas edades, estratos, capacidades cognitivas, etc. Es decir, la diversidad que se puede encontrar en este instituto entre estudiante y estudiante es bastante variada. En particular el curso con el que se planteó hacer la implementación de la propuesta didáctica es el grupo número 3 del grado 11°, este grado está enfocado en el énfasis de arte, se eligió este grupo por la tendencia que muestra a ser participativos, abiertos de mente, creativos y a generar preguntas poco usuales a comparación de los otros énfasis, la decisión final de implementar o no con este grupo se dio en conjunto con el profesor titular de la institución quien también fue el docente tutor en la última etapa de prácticas en este mismo colegio; y con quien se decidió unánimemente implementar en dicho curso basado en tanto su experiencia como docente activo de la institución como en mi breve pero enriquecedora experiencia en las practicas docente.

Al recorrer varias páginas de trabajos similares presentados en la parte de antecedentes de este documento, se logró vislumbrar una serie de actividades y estrategias didácticas que no solo ayudarían a llevar un tema nuevo a las aulas de clase, también a contribuir a la elaboración de preguntas, tanto filosóficas como teóricas, por parte de los estudiantes; en un principio se procuraba simplemente innovar los currículos escolares con nuevos temas, sin embargo, al avanzar en la consulta que implica elaborar un trabajo de grado con implementación didáctica, se aprecia

la importancia de generar nuevas cuestiones en los estudiantes, una nueva forma de entender el mundo y una perspectiva innovadora en la construcción de conocimiento, y lo que comenzó como una propuesta de contenido nuevo dentro de un aula de clases, se convirtió en una invitación a pensar de manera poco convencional lo que ya parece a nuestros ojos

“cotidiano”. Dicho lo anterior, se planteó una secuencia didáctica, entendiendo esta como una serie de actividades correlacionadas entre sí en un orden lógico acorde a los objetivos planteados en la investigación; se divide en 3 sesiones, en las que se abordan 3 fenómenos ópticos representativos a través de la historia de la luz, se mostrará a continuación la estructura de la propuesta.

La secuencia didáctica se diseñó planeando 3 sesiones de clase, cada una con 3 actividades correspondientes a la introducción, desarrollo y cierre; todo a la luz de los 4 enfoques principales propuestos por Kemmis anteriormente mencionados, se estructuró de la siguiente manera:

La primera sesión propone una actividad a cerca de la reflexión de la luz, los estudiantes son organizados en grupos de 3 o 4 integrantes y se les proporciona el material correspondiente a esta actividad. Como introducción se proyecta un video dando definiciones básicas del fenómeno de reflexión y anotando las ideas fundamentales resaltadas por los estudiantes en el tablero, la segunda actividad consiste en trabajar con un espejo, se da la instrucción de solapar las imágenes de alfileres desde algún ángulo en específico, primero trabajando con los alfileres en una secuencia directa frente al observador y posteriormente con alfileres ubicados tanto en frente del ojo del observador como en el campo de reflexión del espejo; al terminar esta actividad se plantean unas preguntas específicas en la guía que se deben contestar en una hoja cuadrículada a parte y al final de la sesión como cierre, la actividad 3 consiste en dar apreciaciones finales y retroalimentación a las respuestas dadas por los estudiantes. Para comprender mejor la actividad y entender las instrucciones de la actividad en específico se recomienda observar la guía correspondiente, este taller se halla en la parte de anexos como anexo 2.

Para el segundo taller se lleva material para explorar el fenómeno de refracción, análogo a la actividad anterior se organiza a los participantes en grupos de 3 y se les proporciona el material correspondiente. La sesión inicia con un video introductorio que explica superficialmente el fenómeno de refracción, nuevamente se anotan en el tablero las características relevantes para los estudiantes a cerca del fenómeno y posteriormente se da paso a la actividad que en esta ocasión se

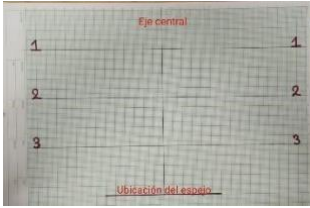
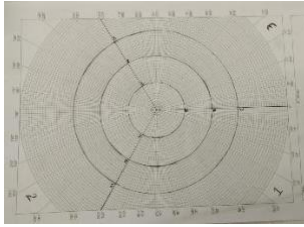

hará con prismas, al igual que en la sesión anterior se trabaja con alfileres observando las imágenes de estos en frente del observador y luego a través del prisma, se responden las preguntas dadas en la guía y para dar cierre al taller se retroalimentan las apreciaciones finales y conclusiones que hayan surgido de la actividad. Para comprender mejor la actividad y entender las instrucciones de la actividad en específico se recomienda observar la guía correspondiente, este taller se halla en la parte de anexos como anexo 3.

Para la tercera sesión lleva al aula el experimento de Young mediante el taller 3, nuevamente los estudiantes son organizados en grupos de a 3 y se les proporciona el material necesario para la clase, para dar inicio a la sesión los estudiantes cuentan con una linterna laser acompañados de un prisma y un espejo usados en las sesiones anteriores, se pide a los estudiantes replicar el montaje experimental de los talleres 1 y 2, esta vez haciendo uso de la linterna laser en lugar de los alfileres; se cuestiona a los estudiantes si el uso de la luz laser o de los alfileres altera los resultados de los experimento por medio de 4 preguntas al principio de la guía, posteriormente se pasa al desarrollo en la actividad 2, en esta actividad se presenta el montaje experimental “el experimento de la doble rendija” por medio de un video ilustrativo, al terminar el video se pide a los estudiantes desarrollar una hipótesis a cerca de lo que esperan ver al poner en funcionamiento el montaje, luego de pasar por cada grupo mostrando el fenómeno se pide a los estudiantes hacer una comparativa entre lo que esperaban ver y lo que vieron, así mismo, se pide desarrollar una serie de preguntas en la parte final de la guía y explicar de alguna manera lo visto en la actividad, al contrario de las actividades anteriores, la retroalimentación de las preguntas se dan antes de dar cierre a la actividad por medio de el restante del video ilustrativo, este termina de explicar el fenómeno y deja la interpretación abierta los estudiantes.

En la siguiente tabla (tabla 1) se resume la secuencia didáctica y se muestra la estructura dada para esta.

Tabla 1

| | | | |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| Taller # objetivo | Actividad 1: apertura | Actividad 2: desarrollo | Actividad 3: cierre |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|

| | | | |
|---------------------------------|--|--|----------------------------------|
| 1. Reflexión de la luz: | Video introductorio a la reflexión. | Actividad con alfileres y espejo. | Observaciones y apreciaciones |
| | |  | |
| 2. Refracción de la luz | Video introductorio a la refracción. | Actividad con alfileres y prisma | Observaciones y apreciaciones |
| | |  | |
| 3. Experimento de doble rendija | Relación experimentos 1 y 2 con luz del laser. | Experimento de Young | Vídeo explicativo de Dr. quantum |
| | |  | |

Se puede apreciar que durante el diseño de la secuencia se tiene en cuenta los 4 aspectos de la IAP propuestos por Kemmis anteriormente, primeramente el ciclo de planificación-acción-reflexión es un aspecto que se tiene en cuenta antes, durante y después de cada taller, un ejemplo claro de esto se da en el taller dos donde se opta por usar hojas polares en lugar de hojas milimetradas como anteriormente de había proyectado en la propuesta didáctica (anexo 1) y que luego del taller 1 se consideró mejor opción hojas polares para reducir los posibles inconvenientes que eran extremadamente susceptibles a fallar en dicha propuesta, dado esto se decidió cambiar a hojas polares como se puede apreciar en la guía 2 (anexo 3). También es necesario mencionar que al terminar cada clase se hacen apreciaciones finales justamente para valorar el proceso que llevan

los estudiantes, de ser necesario se cambiaría el modo de proceder del docente y el formato de las actividades. Es de resaltar el papel fundamental que juega la participación colaborativa, los estudiantes son organizados en grupos delimitados, sin embargo, no se inhibe a los estudiantes de colaborar con otros grupos si lo consideran necesario para comparar resultados, esto se vio reflejado a lo largo de todas las actividades cuando un participante de algún grupo pedía asesoría a otro grupo a cerca del procedimiento, esto ayudó notablemente no solo a la participación activa, también al desarrollo eficiente de las actividades. Por último es de destacar el proceso de emancipación de los estudiantes en el transcurso de las actividades, a medida que se fue avanzando en el tema se puede notar que se va dejando cada vez más cosas a interpretación de los estudiantes, al comparar las actividades del taller 1 y 3 se puede apreciar que primeramente las instrucciones son específicas y dejan poca cabida a modificaciones en el experimento, mientras que en la actividad 3 ya se pide realizar hipótesis, relaciones teóricas entre varias situaciones y explicaciones concretas a cerca de los fenómenos.

Como se puede apreciar en la tabla, el primer taller consiste en identificar y caracterizar el fenómeno de reflexión de la luz, este es un fenómeno que Newton en su tratado de óptica no se molesta en profundizar, ya que, lo considera absolutamente intuitivo y axiomático lo que implica, es por ello que solo le dedica un par de líneas en la sección de axiomas y definiciones, para Newton y para sus colegas contemporáneos resultaba obvio que la luz se reflejaba en un espejo mediante trayectorias en líneas rectas congruentes. (Darrigol, 2012).

Dicho lo anterior, el argumento principal “es intuitivo y fácil de concluir que la luz sigue trayectorias rectas” es perfecto para comenzar con la caracterización de la luz, con este experimento se espera que los estudiantes, que durante toda su formación han recibido educación con base en la mecánica clásica y siendo Newton su mayor referente, puedan llegar a análisis similares a los expuestos por él y en los que se deja ver su postura corpuscular. Para dar inicio al taller los participantes se organizan en grupos de 3 o 4, esto para mantener una participación colaborativa correspondiente a las ideas de Kemmis y la IAP, se pone el video explicativo a cerca de la reflexión, se buscó un video muy neutro a la hora dar definiciones, que no se incline por alguna postura en específico de la naturaleza de la luz, en el que se explique a grandes rasgos en que consiste el fenómeno, al terminar esta actividad se anotan en el tablero los aspectos relevantes que los estudiantes destacan del video, se mantienen presente durante toda la clase para que

funcionen como un recordatorio permanente, tanto para los estudiantes como para el docente, en que conceptos en específico se quieren trabajar sin llegar a influir involuntariamente sobre algún otro aspecto adicional. A continuación, se entrega el material requerido para la actividad y se lee en voz alta las instrucciones de la guía, al final de dichas instrucciones hay una sección con preguntas para que contesten los estudiantes referentes a lo que observaron, la actividad consiste en ir ubicando alfileres frente a un espejo de tal manera que al mirar desde cierto ángulo la visión sea obstruida y de cuenta de la tendencia de la luz a desplazarse en línea recta. Las instrucciones específicas y la actividad paso a paso se describen por completo en la guía 1 en la sección de anexos. Para dar cierre se socializan las respuestas de los estudiantes y se dan conclusiones y apreciaciones finales alrededor de lo trabajado en la sesión.

El taller 2 es una experiencia análoga a la anterior, sin embargo, tiene diferencias significativas que se mostraran más adelante, esta actividad está enfocada a caracterizar la refracción de la luz, este fue un fenómeno que genero mucho más debate dentro de las posturas a cerca de la naturaleza de la luz, y como se pudo observar en el marco teórico, el fenómeno es explicado lucidamente tanto desde un modelo corpuscular como uno ondulatorio, de modo que se espera que los estudiantes a partir de este momento comiencen a sentirse un poco más incómodos frente a la concepción de la luz que puedan o no tener arraigada; la actividad comienza con un video introductorio acerca de que es la refracción, nuevamente es un video sumamente neutro que no brinda mayor detalle a los estudiantes más que una definición muy general de lo que se va a observar en la actividad, nuevamente se toman las apreciaciones de los estudiantes en el tablero y se da inicio a la segunda parte del taller. Para el desarrollo del taller se proporciona el material especificado en el taller anterior, con dos diferencias importantes, un prisma en lugar de un espejo y una hoja polar en lugar de una milimetrada, nuevamente se leen las instrucciones y se deja a trabajo autónomo el desarrollo de las preguntas en la parte final de la guía, para dar cierre a la actividad se recogen las apreciaciones finales y conclusiones.

El taller número 3 es la “culminación” de todo el trabajo hecho hasta ahora por decirle de alguna manera, aunque con este taller termina la implementación de la secuencia didáctica, el objetivo de la propuesta en ningún momento fue dar por terminado un tema, al contrario, lo previsto es dar una introducción a un tipo de pensamiento nuevo en el aula, al final de este taller se aspira a que los estudiantes salgan del salón de clases con más dudas de las que tenían cuando entraron y que

se comiencen a cuestionar cosas que no se habían cuestionado hasta el momento, aclarado esto, el taller 3 da inicio con la entrega de material, se proporciona las hojas utilizadas en los talleres anteriores junto con el espejo, el prisma y una linterna laser, por supuesto, todo esto acompañado de la correspondiente guía de trabajo, durante esta primera parte los estudiantes replicaran los experimentos de los talleres 1 y 2, esta vez con la luz láser, de modo que asocien los conceptos destacados en la clase anterior y que en ese momento estaban atribuyendo a la visión humana y ahora reconocerán en la linterna laser, se hacen el tipo de preguntas como “¿observo los mismo resultados experimentales con el láser que con los alfileres?”, luego de responder en total 4 preguntas por el estilo se pasa a la siguiente fase. La actividad 2 consiste en la presentación del experimento de Young, para comenzar se proyecta el principio del video de Dr quantum, se detiene el video en el momento en el que termina de explicar el montaje de la doble rendija, justo antes de que arroje alguna explicación del fenómeno, se repite la explicación del montaje con los materiales que se encuentran en el aula, el docente a cargo tiene la única rendija que se va utilizar en la sesión para evitar que los estudiantes alteren la continuidad de la secuencia; luego de mostrar el material y explicar el montaje se les pide a los estudiantes elaborar una hipótesis a cerca de lo que creen que pasara al proyectar el láser contra la rendija, se pide hacer una representación gráfica de su hipótesis, luego de asegurarse de que todos tienen una hipótesis planteada se pasa por cada grupo de trabajo para que evidencien el efecto del experimento en funcionamiento, al concluir el experimento se pide al grupo que realice una representación gráfica de lo que se observó y haga una comparativa con la hipótesis planteada, por último se pide responder la sección de preguntas alusivas a al experimento, todas las preguntas se encuentran en la guía 3 en la sección de anexos de este documento. Para dar cierre al taller, se socializa los resultados de cada grupo y se da paso a las posibles explicaciones del fenómeno que puedan surgir, al recaudar dichos aportes se da paso a la continuidad del video de

Dr quantum en el cual se termina de “explicar” el modelo de la doble rendija y se dan apreciaciones finales en forma de preguntas como “¿Por qué los electrones se comportan igual que la luz?”, “¿por qué en el mundo macroscópico no funciona así?”, “¿Qué otros experimentos dan evidencia de los misterios de la cuántica?”, etc.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos por medio de los talleres se muestran en las tablas 2, 3 y 4 correspondientes a las guías de los talleres 1, 2 y 3 respectivamente, las tablas se muestran las respuestas dadas por los estudiantes al conjunto de preguntas dadas en cada guía, posteriormente se hace el respectivo análisis de resultados que se da desde la IAP como corresponde a la metodología de este trabajo de investigación, los criterios que dan paso al análisis de estos resultados en congruencia con lo anterior son: las respuestas y análisis críticos por parte de los estudiantes, se mide la capacidad de los estudiantes de responder las preguntas basadas en sus propias palabras y teniendo como única referencia conceptual lo que se haya trabajado en el aula, se es fácil identificar condicionamientos conceptuales previos al reconocer que los estudiantes usan formalismos con poca exactitud o descontextualizados del tema, lo que conlleva a respuestas confusas y poco claras, de igual manera se podría llegar a apreciar la falta de capacidad de los estudiantes para justificar sus respuestas verbalmente; para evitar estos posibles inconvenientes se usa el segundo criterio que es la participación colaborativa, se organizó a los estudiantes en grupos de 3 a 4 participantes para que puedan dialogar entre ellos las definiciones, hipótesis, teorías, conceptos, etc. De modo que las respuestas deben ser justificadas verbalmente primero ante sus compañeros antes de plasmarlo en el papel, acompañado de esto el docente a cargo va rondando por cada grupo aclarando dudas de procedimiento e inquietudes en cuanto a las preguntas, esto permite una constante monitorización del proceso en el aula, lo que nos lleva al tercer y último criterio que se tiene en cuenta, la planificación-acción-reflexión se ha llevado hasta el momento a cabo por parte del docente, sin embargo hemos de recordar que la emancipación de los sujetos en el proceso de construir su conocimiento también es un factor importante en este tipo de metodología, de modo que los estudiantes en este proceso también tienen que tener en mente una relación entre la acción y el análisis del procedimiento, es decir, se tendrá en cuenta la capacidad de los estudiantes de razonar frente al procedimiento, de interpretar el fenómeno propuesto y mentalmente dar inferencias claras a cerca de las causas, efectos y variantes de los visto en cada actividad.

Taller 1: reflexión de la luz

- a. De las cualidades de la luz escritas en el tablero, ¿Cuáles se pueden evidenciar con esta actividad?

- b. ¿Qué trayectoria recorre la luz antes y después de entrar en contacto con el espejo?
- c. ¿hay alguna relación entre la posición de los alfileres en el lado derecho y el izquierdo?
Explique con base a lo que realizó en clase
- d. Teniendo los alfileres en las mismas posiciones ¿Qué esperarías ver al cambiar alguno de estos parámetros?, justifique su respuesta.
- El tamaño del espejo
 - La distancia entre el espejo y los alfileres
 - La inclinación del espejo respecto a la línea central
 - La centralización del espejo con la línea central

Tabla 2

| | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 | Grupo 4 |
|-------------------|--|--|--|---|
| Pregunta a | La relación en ángulos, ejes centrales, línea recta, luz rebota. | Luz rebota Relación de ángulos Línea recta | Relación de ángulos, línea recta, eje central. | Se puede evidenciar una relación de ángulos y línea recta. |
| Pregunta b | La trayectoria de la luz es recta que al reflejarse hace una forma de “V”. | reflexión | Que los alfileres del lado izquierdo y derecho son paralelos entre si. | Recorre una línea recta y al entrar en contacto con el espejo este rebota de forma paralela a la recta. |
| Pregunta c | En la hoja milimetrada se mueve 0.5 cm aproximadamente. | Si, la relación se da en el punto de reflexión | La trayectoria que recorre la luz antes y después de | No cuenta con la misma posición pero cuenta con el |

| | | | | |
|--|--|---|---|-----------------------------------|
| | | <p>(alfiler situado en la mitad del espejo) al ocultar todos los alfileres desde la perspectiva del primer alfiler del lado izquierdo se comprueba la relación entre los dos lados.</p> | <p>entrar en contacto con el espejo es recta.</p> | <p>mismo ángulo y proyección.</p> |
|--|--|---|---|-----------------------------------|

| | | | | |
|------------|---|--|--|--|
| Pregunta d | Al cambiar el tamaño del espejo no se evidencia cambio ya que este seguirá reflejando, al cambiar la distancia entre los espejos y los alfileres no se evidencia cambio ya que los alfileres y el espejo siguen aun la trayectoria de la luz, al cambiar la inclinación del | | Si cambiamos el tamaño del espejo no va a alterar la posición de los alfileres, si cambiamos la distancia del espejo los alfileres también tendrían que cambiar de posición ya que los alfileres ya no están | El tamaño del espejo: no cambiaría nada, la distancia entre los espejos y los alfileres no cambiaría la alineación, la inclinación del espejo respecto a la línea central: el rebote varia, la centralización del espejo con |
|------------|---|--|--|--|

| | | | | |
|--|---|--|---|--|
| | <p>espejo respecto a la línea central se evidencia cambios respecto a la trayectoria de la luz (dirección), al cambiar la centralización del espejo con la línea central no se evidencia cambios en la trayectoria de la luz.</p> | | <p>paralelos, si porque cambia la perspectiva respecto a los alfileres, si cambia porque se cambia la perspectiva desde donde se ven y no van a quedar paralelos a ambos lados.</p> | <p>la línea central cambia todo.</p> |
|--|---|--|---|--|

- Mediante el análisis en la pregunta “a” se puede notar claramente que todos los estudiantes otorgan como característica especial de la luz la tendencia a ir en línea recta y a reflejarse en un espejo mediante una relación angular entre el rayo incidente y el reflejado, de 4 grupos encuestados 4 respondieron relación de ángulos y línea recta al enumerar las características que evidenciaba el experimento.
- Las respuestas a la pregunta “b” son un poco confusas entre sí pero en general se puede inferir sin mayor problema que asimilan la relación de ángulos entre

el rayo incidente y el reflejado, 3 grupos de 4 contestaron que notaban la relación entre lo que se veía del lado izquierdo y lo que se veía del lado derecho.

- Se puede apreciar que los estudiantes son más específicos en sus respuestas en la pregunta “c” de lo que se contemplaba, 1 respuesta de 4 ofreció datos numéricos precisos de la desviación del rayo de luz, por otro lado, los tres grupos restantes contestaron de manera cualitativa pero igualmente especifica detalles pequeños en cuanto al error en la medición.
- Las respuestas en la pregunta “d” son muy variadas, todos tiene en común la opinión acerca de que el tamaño del espejo no cambia los resultados, sin embargo, dos grupos coinciden en que la distancia entre el espejo y los alfileres no cambiarían los resultados siempre y cuando se mantengan los alfileres en la misma línea, un grupo respondió a esta pregunta que si cambiaría la orientación de los alfileres al mover el espejo de cualquier forma y el grupo sobrante no respondió a esta pregunta; nuevamente vuelven a coincidir todos los grupos con la hipótesis de que al inclinar el espejo cambiaran los resultados, y dividen sus opiniones en igual proporción que antes en la opción de la alineación del espejo con el eje central.

Taller 2: refracción de la luz

- a. De las cualidades de la luz escritas en el tablero, ¿Cuáles se pueden evidenciar con esta actividad?
- b. ¿Qué trayectoria recorre la luz antes y después de entrar en contacto con el prisma?
- c. ¿hay alguna relación entre la posición de los alfileres en el lado derecho y el izquierdo?
Explique con base a lo que realizó en clase
- d. ¿Nota una desviación en la trayectoria de la luz?
- e. ¿Qué factores cree que afecten posibles desviaciones en la luz y por qué?
 - Forma del prisma
 - Tamaño del prisma

- Orientación del prisma
- Distancia entre el prisma y los alfileres
- Otro ¿Cuál?

Tabla 3

| | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 | Grupo 4 | Grupo 5 |
|------------|--|---------|--|---|---|
| Pregunta a | En el experimento podemos evidenciar la | | Desviación de la luz Relación de ángulos. | Desviación de la luz Dependiente del medio | Desviación de la luz Dependiente del medio |
| | desviación de la luz, relación de ángulos y se observa la dependencia de un medio, pues el prisma no produce la misma imagen o ángulo que un espejo plano. | | | | |

| | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|
| Pregunta b | Recorre la hoja en línea recta y al atravesar el prisma cambia de dirección a 75°. | | Iba recta y después se desvió hacia un lado 45°. | La luz del cuadrante 1 al chocar con el prisma se desvía en otra dirección pasando por los cuadrantes 1 y 3. | La trayectoria que recorre la luz es recta hasta que entra en contacto con el prisma se desvía, es decir, cambia de medio. |
| Pregunta c | Que los alfileres de la derecha están | | Si, el prisma los relaciona desde la | Si, la relación es el medio de refracción (prisma)desde | El lado derecho e izquierdo. |

| | | | | | |
|------------|--|--|---|--|---|
| | ubicados en una misma trayectoria y los de la izquierda también están ubicados en una misma línea o trayectoria. | | luz y también las distancias entre ellos. | una vista especifica la vista del alfiler 3 tapando la vista de los demás alfileres crea una relación entre todos los alfileres siguiendo una línea recta en una perspectiva especifica debido a la forma triangular y el material del prisma. | No, ya que no comparten ni ángulo ni la posición |
| Pregunta d | Si, el solo hecho de que la trayectoria cambie 75° demuestra la desviación de la luz. | | | Si, la forma triangular del prima desvía la dirección la luz haciendo que cambie la dirección en determinado punto al | Si, ya que en el sector 1 hay un ángulo aproximado de 70° y en el otro de 80° por lo que si hay |

| | | | | | |
|------------|--|--|---|---|---|
| | | | | chocar con el prisma. | una desviación. |
| Pregunta e | La forma del prisma y la dirección o el ángulo del prisma. | | La forma del prisma porque está diseñado para desviar la luz entonces si, el tamaño del prisma no, la orientación del prisma si porque depende de cómo lo coloques va a proyectar de diferente manera la luz. | Forma, por el número de lados. Orientación, si se divide la orientación se desvía en otra dirección la luz. | Distancia entre el prisma y los alfileres, ya que mientras mas lejos mayor será la desviación también dependiendo de la intensidad y de donde venga la luz. |

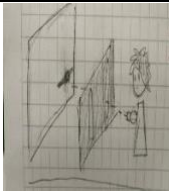
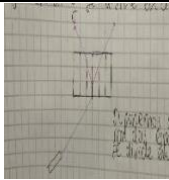
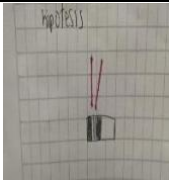
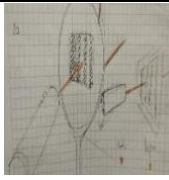
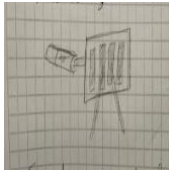

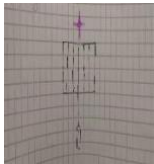
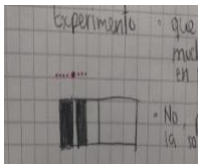
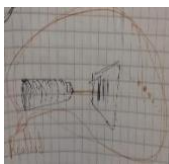
- En la pregunta “a” podemos ver que todos los grupos coinciden en que existe una desviación de la luz a causa del prisma, solo un grupo no le atribuye a su respuesta el cambio de medio como causa de la desviación.
- En respuesta a la pregunta “b” hay dos grupos que deciden calcular el ángulo de desviación autónomamente, los otros dos grupos restantes describen la desviación meramente cualitativa y uno de esos dos últimos grupos recalca el cambio de medio como factor primordial en el efecto.
- En respuesta a la pregunta “C” tres grupos reconocen la relación entre las imágenes a través del prisma y enfocan sus análisis entorno al prisma y sus cualidades particulares, el grupo sobrante recalca que las líneas que dibujo difieren mucho de los resultados esperados.
- En la pregunta “d” los estudiantes reconocen plausiblemente la desviación de la luz a causa del prisma e intentar dar explicaciones al efecto atribuidas a la forma, material u otro elemento de fondo del prisma.
- En la pregunta “e” tres grupos atribuyen la desviación de la luz a las propiedades del prisma, coinciden en que se debe a la forma y material en igualdad de importancia, un tercer grupo propone la idea de que se debe a la orientación del observador o por donde ingrese la luz al prisma.

Taller 3: experimento de Young

- a. Haga una representación gráfica de lo observado en el desarrollo del experimento.
- b. ¿Qué patrón se forma en la pantalla?
- c. ¿Difiere con su hipótesis anteriormente planteada? Justifique
- d. ¿Se observa lo mismo en este experimento que al pasar la luz del sol por alguna ventana de tu casa?

- e. ¿Por qué cree que la luz se comporta de este modo en este montaje en específico?
- f. ¿Qué factores cree que se deberían cambiar para que el experimento mostrará otros resultados?
- El color del láser
 - La intensidad del láser
 - La separación entre las rendijas
 - El tamaño de los orificios
 - La cantidad de orificios
 - Las distancias (entre la pared y la rendija o entre la rendija y el láser)

Tabla 4

| | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 | Grupo 4 | Grupo 5 |
|-----------|---|---|--|--|---|
| Hipótesis |  |  <p>Suponemos que es porque son dos espacios, por eso se parte en dos.</p> |  |  |  <p>A la hora de proyectar el láser en la doble rendija esta se va a refractar y mostrara dos puntos de luz</p> |
| Pregunta |  |  |  <p>experimento que mud en 3 - No, p la sab</p> |  | |

| | | | | | |
|---------------|------------------------|---|--|-------|---|
| Pregunta b | Una línea con franjas. | Se forma una cruz tal y como se ve en el dibujo | Que se proyectan muchos puntos y no solo uno | | Su patrón sigue siendo el mismo pero este |
|---------------|------------------------|---|--|-------|---|

| | | | | | |
|--|--|---|--|--|--|
| | | pero solo un punto con línea formando así una cruz. | | | disminuye su intensidad entre mas alejado al punto original. |
|--|--|---|--|--|--|

| | | | | | |
|---------------|--|--|--|---|--|
| Pregunta c | Es incorrecta la hipótesis porque nosotros creíamos que la luz solo se iba a volver más larga pero al final se volvió una secuencia de puntos. | Si diferimos ya que en nuestra hipótesis afirmábamos que el laser se iba a dividir en dos direcciones opuestas pero en realidad lo que ocurrió fue que el laser se fragmento en muchas líneas pero solo un punto y de forma de fruz. | No, porque no se ve la sombra de la rejilla. | Si porque planteamos que al chocar la luz con la doble rendija iba a disminuir la luz o a disminuir el diámetro Pero lo que sucedió fue que se mostro fue como una luz horizontal hecha por puntos donde el punto central tiene más intensidad. | Es incorrecta nuestra hipótesis ya que la refracción de la luz es de puntos infinitos no solo dos. |
| Pregunta d | No porque la ventana es | | | Si, las cortinas | No, ya que no hay |

| | | | | | |
|--|------------------------------------|--|--|--|--|
| | muy grande y deja pasar mucha luz. | | | cumplen la función de una doble rendija. | refracción y la luz traspasa la ventana. |
|--|------------------------------------|--|--|--|--|

| | | | | | |
|------------|---|--|-------------------------------------|---|---|
| Pregunta e | Porque luego de pasar por la rendija la luz choca consigo misma y entonces no cae al frente de cada rendija. | Por qué los fotones al pasar por la ranura buscan una manera de esparcirse por el lugar donde se refleja esto crea una luz que se expande por ese lugar. | Gracias al montaje de las rejillas. | No tengo ni idea. | |
| Pregunta f | La separación entre las rendijas porque hace que los puntos se separen mas El tamaño de los orificios porque permiten | La separación entre las rendijas El tamaño de los orificios La cantidad de orificios. | La separación de las rejillas. | Tamaño de los orificios, intensidad del láser, separación entre rendijas, distancias. | Se debería cambiar la separación de las rendijas y el tamaño de los orificios, de igual manera depende de la distancia. |
| | pasar mas o menos luz. | | | | |

- En el punto destinado para crear una hipótesis todos los estudiantes participantes predijeron un rayo de luz que se partía a la mitad o que proyectaría una sombra de dos orificios, en su totalidad predijeron un comportamiento rectilíneo de la luz.
- Las preguntas “a” y “b” son espacios para que los estudiantes expresen gráfica o verbalmente lo que perciben del efecto al observar el fenómeno, los estudiantes lo caracterizaron como un patrón lumínico hecho de puntos, un grupo lo describió como una cruz igualmente hecha de franjas.
- La pregunta “c” es el espacio dedicado a la comparación entre la hipótesis y la experimentación, en todos los casos los estudiantes reconocen que la hipótesis es incorrecta y que el efecto visto difiere totalmente de los resultados esperados.
- La pregunta “d” tiene el objetivo de comparar las vivencias cotidianas con lo visto en el experimento, dos grupos respondieron a la pregunta con un negativo a la similitud entre el mundo macroscópico y lo visto en escala pequeña en el experimento, mientras que otro estudiante propuso un caso especial en el que las cortinas del cuarto podrían provocar un efecto similar, los otros dos grupos se abstuvieron de responder la pregunta.
- En la pregunta “e” dos estudiantes se aventuraron a responder alguna explicación del fenómeno, y aunque las respuestas están muy lejos de lo que se podría considerar teóricamente correcto, es destacable que se usan términos que se podrían reforzar mediante otras actividades, como “fotones” e “interferencia”, un grupo de estudiantes admitió abiertamente que desconoce por completo la forma de explicar el fenómeno, y los dos grupos restantes no contestan las preguntas.
- La pregunta “e” deja ver un patrón de respuestas, todos coinciden en que el tamaño y separación de las rendijas está fuertemente relacionado con el efecto visto, el resto de las respuestas son variadas y raramente justificadas de alguna manera.

Conclusiones y apreciaciones finales

- Mediante la secuencia se puede apreciar que los estudiantes son capaces de construir conceptos ópticos a partir de montajes simples sin necesidad de una capacitación previa en óptica

geométrica, se puede involucrar conceptos mas profundos que la reflexión y la refracción siempre y cuando impliquen un orden de complejidad graduado entre sesiones.

- Por medio de la primera parte de la actividad dedicada a la reflexión y refracción los estudiantes asumieron indirectamente cualidades corpusculares en la luz, esto se puede apreciar en el taller 3 cuando las hipótesis al comienzo de la actividad 2 señalan que la luz se dividirá en dos franjas, de modo que los experimentos planteados desde la física clásica ayudan a dar una naturaleza corpuscular de la luz casi que intuitivamente.
- Los estudiantes no se muestran rechazo ante los cambios conceptuales, al contrario muestran asombro e interés al tema mientras más entrañables son sus misterios, esto se puede ver al final del taller 3 cuando en las apreciaciones finales los estudiantes no solo discuten sus posturas entre ellos, sino que también, generan preguntas al docente a cerca del fenómeno.
- Los estudiantes logran separarse de la postura corpuscular de la luz luego de lo evidenciado en el experimento de Young, se puede apreciar esto al final del taller 3, varios estudiantes discutiendo por una explicación hasta llegar a la conclusión de que un rayo de luz puede pasar por ambas rendijas al mismo tiempo.
- La actividad fue un éxito con este curso en específico ya que cuenta con varias cualidades que al principio del diseño de la actividad se tenían previstas, como el grado escolar, el énfasis tratado y el espacio académico específico. Sin embargo se considera viable la implementación de esta propuesta para cursos inferiores y de distintos énfasis.
- La complejidad de los conceptos pudo ser reducida gracias a las actividades experimentales que se abordaron, ya que, esto hace que los estudiantes construyan conocimiento de forma empírica y relacionen lo aprendido en el aula de forma significativa con experiencias cotidianas.

El trabajo original hecho por los estudiantes se encuentra en el anexo 5 donde se recopila todo el material físico recogido por parte del docente.

Bibliografía

Darrigol, O. (2012). *A History Of Optics*. New York: OXFORD University Press.

De Broglie, L. (1924). *Research on the Theory of Quanta*. Paris: Minkowski.

Diaz, C. (2014). *ESTRATEGIA DE AULA ORIENTADA A LA COMPRENSIÓN DEL MODELO DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA: UNA PROPUESTA PARA ESTUDIANTES DE GRADO ONCE*. BOGOTA D.C: UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL.

- Garcia, & Calixto. (1999). *Actividades experimentales para la enseñanza de las ciencias naturales en educacion basica*. Mexico: Instituto de investigaciones sobre la universidad y la educacion.
- Grajales, H. (2017). *LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA MODERNA EN LA EDUCACIÓN BÁSICA: UNA APROXIMACIÓN DESDE EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE*. Bogota : Universidad pedagogica nacional.
- Hackin, I. (1996). *representar e intervenir*. Mexico: PAIDOS.
- Kemmis, S. (2014). *Action Research Reader*. Nueva York: Routledge.
- Lopez, G. (2014). *Enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela media a partir del concepto de superposición*. Bogotá: Universidad Nacional.
- Ortiz, E. (2013). *EL JUGUETE DE EINSTEIN: UNA EXPERIENCIA QUE PERMITE EVIDENCIAR EL PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA EN EL AULA*. BOGOTA D.C: UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL.
- Ostermann, F. &. (1999). *física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Sabadell, M. A. (2012). *LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA FEYNMAN CUANDO UN FOTÓN CONOCE A UN ELECTRÓN*. ESPAÑA: NATIONAL GEOGRAPHIC.
- Serrano, A. (2013). *EL COMPORTAMIENTO DE LA LUZ: DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA SECUENCIA DE ENSEÑANZA BASADA EN EL APRENDIZAJE COMO INVESTIGACIÓN ORIENTADA*. BOGOTA D.C: UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL.

ANEXOS

Anexo 1: secuencia didáctica

Juan Gabriel Daza Colorado
Universidad Pedagógica Nacional



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA
NACIONAL**
Educadora de educadores

Facultad de ciencia y tecnología

Departamento de física

Línea de profundización 3: La actividad experimental para la enseñanza de la física

Secuencia didáctica para la comprensión de fenómenos ópticos en introducción al pensamiento de la mecánica cuántica

Desde los albores de la humanidad, la luz ha cautivado la mente humana con su belleza y misterio. Desde las pinturas rupestres hasta las investigaciones científicas más avanzadas, hemos buscado comprender la naturaleza esencial de

la luz y su papel en el cosmos. En esta secuencia didáctica, nos sumergiremos en el fascinante mundo de la óptica, explorando los fenómenos de reflexión, refracción e interferencia con una mente abierta y curiosa. Nuestro viaje comenzará con una mirada a la luz desde una perspectiva clásica, donde los principios de la reflexión y la refracción han sido fundamentales para nuestro entendimiento del mundo que nos rodea. A través de actividades prácticas y experimentos cautivadores, descubriremos cómo la luz se comporta cuando interactúa con superficies y medios diferentes, desde espejos hasta prismas, desafiándonos a analizar y comprender los resultados.

Pero nuestro objetivo va más allá de simplemente comprender los fenómenos ópticos básicos. Nos proponemos llevar a los estudiantes a un nivel más profundo de comprensión, introduciéndolos a la fascinante intersección entre la óptica clásica y la física cuántica. A medida que avanzamos en nuestra exploración, exploraremos cómo los principios de la mecánica cuántica arrojan nueva luz sobre fenómenos aparentemente familiares, como la reflexión y la refracción, desafiando nuestras intuiciones y expandiendo nuestros horizontes mentales.

A lo largo de esta secuencia, no solo buscaremos adquirir conocimientos sobre la luz y sus propiedades, sino también desarrollar habilidades para el pensamiento crítico y la resolución de problemas. Nos esforzaremos por fomentar una mentalidad científica, donde la curiosidad, la observación y el análisis riguroso sean las herramientas principales para desentrañar los misterios de la naturaleza. Al final de nuestro viaje, esperamos que los estudiantes no solo hayan adquirido un entendimiento más profundo de la luz y la óptica, sino también una apreciación renovada por la belleza y complejidad del mundo que nos rodea, así como una disposición a seguir explorando y cuestionando, siempre en busca de nuevos horizontes de conocimiento y comprensión.

Objetivo general:

Promover un cambio conceptual en los estudiantes al explorar la transición de la óptica clásica a la mecánica cuántica, con el propósito de que reconozcan y articulen cómo los modelos explicativos evolucionan y se relacionan en la ciencia, y cómo esta transición amplía su comprensión de los fenómenos ópticos y su impacto en nuestra comprensión del mundo físico.

Taller 1: Reflexión de la luz**Objetivo:**

Comprender los principios básicos de la reflexión de la luz mediante la realización de actividades prácticas y experimentos con espejos, con el fin de desarrollar habilidades de observación, análisis y aplicación de conceptos ópticos en el entorno experimental específico del taller.

Actividad 1: video introductorio a cerca de la reflexión de la luz.

El video en cuestión es “diferencias entre reflexión y refracción” del canal de YouTube Lagartijas vlogs.

<https://youtu.be/GGHHBgUjdYE?si=EmvKSqyJ5ntbY4VJ>

Como inicio de la clase se pide a los estudiantes poner atención al video que se reproducirá hasta el minuto 4:26, una vez terminado se pregunta a los estudiantes: ¿qué aspectos importantes sobre la luz se mencionan en el video?, se anotan los aportes de los estudiantes en el tablero.

Duración prevista del inicio: 10 minutos

Actividad 2: experimentación con espejos y alfileres

Una vez anotadas los aspectos destacados por los estudiantes a cerca del video se propone la actividad de óptica con espejos y alfileres.

Materiales:

- Hoja milimetrada
- Lápiz
- Alfileres
- Espejo
- Plastilina
- Papel foami

La hoja milimetrada será otorgada por el docente a los estudiantes con marcas específicas: una línea central que atraviesa la hoja por su lado más corto, una línea perpendicular a la línea central mencionada anteriormente que indica la posición del espejo en la parte inferior de la hoja, tres líneas equidistantes entre sí, perpendiculares a la línea central y enumeradas de 1 a 3 siendo 1 la más cercana al espejo y 3 la más distante, tal como se muestra en la imagen

1:



Imagen 1: hoja de trabajo, experimento de reflexión

Procedimiento:

1. Ponga el papel foami bajo la hoja milimétrica

-
2. Con ayuda de la plastilina ubique el espejo en la marca correspondiente que se encuentra en la parte inferior de la hoja, procure que quede lo más centrado posible y que quede orientado de la misma manera que la

señalización base para el espejo.

3. Ahora ubique un alfiler justo en la unión entre la línea central y la base del espejo
4. Comenzando desde la línea 3 al costado derecho de la línea central, ubique un alfiler sobre la línea de tal forma que usted pueda ver desde algún ángulo que las imágenes de los alfileres se solapan, es decir que un alfiler que ubique en la línea 3 tape visualmente al alfiler que se encuentra junto al espejo.
5. Repita el paso anterior con las líneas 1 y 2 procurando que las imágenes de cada alfiler que va ubicando sobre las líneas cumplan las mismas condiciones de solapamiento que los dos alfileres mencionados en el paso anterior.
6. Repita el procedimiento para el lado izquierdo de la hoja, pero ahora debe procurar que las imágenes se solapen también en el espejo, es decir los alfileres que se encuentran ubicados deben tapar la imagen de los otros alfileres frente a ellos y los reflejos del lado contrario de la hoja.
7. Una vez ubicados todos los alfileres correctamente, retire el espejo y los alfileres, con ayuda de un lápiz trace líneas rectas que una los puntos en donde estaban ubicados los alfileres.

Responda

Responda las siguientes preguntas basado en los resultados que halló

- a. De las cualidades de la luz escritas en el tablero, ¿Cuáles se pueden evidenciar con esta actividad?
- b. ¿Qué trayectoria recorre la luz antes y después de entrar en contacto con el espejo?
- c. ¿Hay alguna relación entre la posición de los alfileres en el lado derecho y el izquierdo? Explique con base a lo que realizó en clase
- d. Teniendo los alfileres en las mismas posiciones ¿Qué esperarías ver al cambiar alguno de estos parámetros?
 - El tamaño del espejo
 - La distancia entre el espejo y los alfileres
 - La inclinación del espejo respecto a la línea central
 - La centralización del espejo con la línea central

Tiempo estimado de la actividad: de 30 minutos

Actividad 3: dibujo de diagramas y conclusiones generales

Para el cierre de la actividad se socializará el trabajo de los estudiantes, mostrando los diagramas obtenidos y anexo responderán las preguntas del taller, se darán apreciaciones finales y conclusiones alrededor de la pregunta ¿qué características de la luz podemos evidenciar con esta actividad? Tiempo estimado de cierre: 10 minutos

Taller 2: refracción de la luz Objetivo:

Explorar y experimentar con la refracción de la luz a través de diferentes medios, como prismas, para comprender cómo la refracción altera la trayectoria de la luz, mediante actividades prácticas y experimentales, con el fin de fortalecer la comprensión de los conceptos ópticos y desarrollar habilidades prácticas en la observación y análisis de fenómenos ópticos en el entorno del taller.

Actividad 1: video introductorio a cerca de la refracción de la luz

El video en cuestión es “diferencias entre reflexión y refracción” del canal de YouTube Lagartijas vlogs.
<https://youtu.be/GGHHBqUjdYE?si=EmvKSqyJ5ntbY4VJ>

Como inicio de la clase se pide a los estudiantes poner atención al video que se reproducirá a partir del minuto 4:27 hasta el final, como continuidad a la actividad en la sesión anterior, una vez terminado se pregunta a los estudiantes que aspectos importantes sobre la luz se mencionan en el video, se anotan los aportes de los estudiantes en el tablero.

Duración prevista del inicio: 10 minutos

Actividad 2: experimentación con prismas y alfileres

Una vez anotados los aspectos destacados por los estudiantes a cerca del video se propone la actividad de óptica con prismas y alfileres.

Materiales:

- Hoja milimetrada
- Lápiz
- Alfileres

- Prisma
- Papel foami

La hoja milimetrada será otorgada por el docente a los estudiantes con marcas específicas: una línea central que atraviesa la hoja por su lado más corto, una línea perpendicular a la línea central mencionada anteriormente que indica la posición del prisma, de tal forma que una de las aristas coincida con la línea y que el vértice opuesto a dicha arista coincida con la línea central. en la parte inferior de la hoja, tres líneas equidistantes entre sí, perpendiculares a la línea central y enumeradas de 1 a 3 siendo 1 la más cercana al prisma y 3 la mas distante, tal como se muestra en la imagen 2:

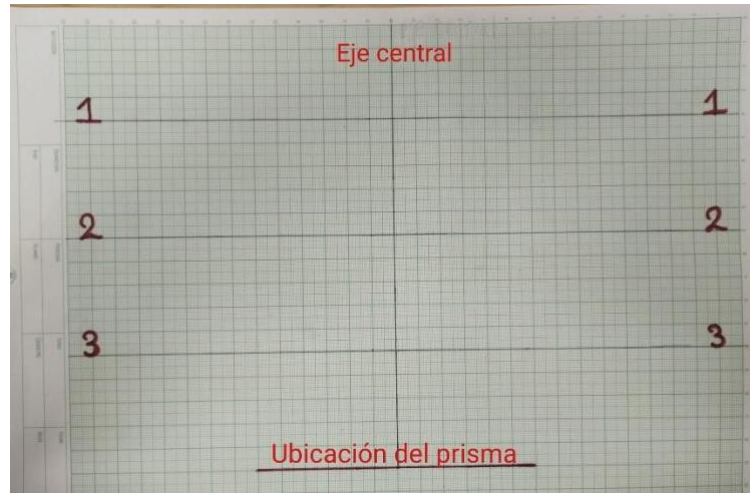


Imagen 2: hoja de trabajo, experimento de refracción

Procedimiento:

8. Ponga el papel foami bajo la hoja milimétrica
9. Ubique el prisma en la línea guía en la parte inferior de la hoja, de tal forma que una arista quede orientada sobre la línea y que su vértice opuesto coincida con la línea central de la hoja.
10. Ahora ubique un alfiler justo en el medio de la arista derecha, lo más cerca posible al prisma.
11. Comenzando desde la línea 3 al costado derecho de la línea central, ubique un alfiler sobre la línea de tal forma que usted pueda ver desde algún ángulo que las imágenes de los alfileres se solapan, es decir que un alfiler que ubique en la línea 3 tape visualmente al alfiler que se encuentra junto al prisma.
12. Repita el paso anterior con las líneas 1 y 2 procurando que las imágenes de cada alfiler que va ubicando sobre las líneas cumplan las mismas condiciones de solapamiento que los dos alfileres mencionados en el paso anterior.
13. Repita el procedimiento para el lado izquierdo de la hoja, pero ahora debe procurar que las imágenes se solapen también en la imagen que se observe a través del prisma, es decir los alfileres que se encuentran ubicados deben tapar la imagen de los otros alfileres frente a ellos y los vistos a través del prisma que se encuentran ubicados del lado contrario de la hoja.
14. Una vez ubicados todos los alfileres correctamente, retire el prisma y los alfileres, con ayuda de un lápiz trace líneas rectas que una los puntos en donde estaban ubicados los alfileres.

Responda

Responda las siguientes preguntas basado en los resultados que halló

- e. De las cualidades de la luz escritas en el tablero, ¿Cuáles se pueden evidenciar con esta actividad?
- f. ¿Qué trayectoria recorre la luz antes y después de entrar en contacto con el prisma?
- g. ¿hay alguna relación entre la posición de los alfileres en el lado derecho y el izquierdo? Explique con base a lo que realizó en clase
- h. ¿Nota una desviación en la trayectoria de la luz?
- i. ¿Qué factores cree que afecten posibles desviaciones en la luz y por qué?
 - Forma del prisma
 - Tamaño del prisma
 - Orientación del prisma
 - Distancia entre el prisma y los alfileres
 - Otra, ¿cuál?

Tiempo estimado de la actividad: de 30 minutos

Actividad 3: dibujo de diagramas y conclusiones generales

Para el cierre de la actividad se socializará el trabajo de los estudiantes, mostrando los diagramas obtenidos y anexo responderán las preguntas del taller, se darán apreciaciones finales y conclusiones alrededor de la pregunta ¿qué características de la luz podemos evidenciar con esta actividad?

Tiempo estimado de cierre: 10 minutos

Taller 3: actividad con laser objetivo:

Analizar el fenómeno de interferencia óptica a través del experimento de la doble rendija de Young y explorar su relación con la naturaleza dual de la luz, con el fin de comprender cómo los modelos explicativos de la óptica clásica y la física cuántica se interrelacionan para explicar fenómenos ópticos complejos.

Actividad 1: video introductorio de Dr quantum

El video en cuestión es “experimento de la doble rendija explicado por Dr. Quantum” se reproducirá hasta el minuto 1:46, este video solo da alcance a una descripción superficial del montaje de la doble rendija.

<https://youtu.be/C2HX3IFqCwc?si=ZYkYITk7IxW65G-0>

Luego de mostrar el video se recogerán ideas generales por parte de los estudiantes para resaltar conceptos fundamentales como:

- Partícula
- Onda
- Interferencias
- Patrones en las pantallas

Tiempo estimado de introducción: 10 minutos

Actividad 2: mostrar las propiedades de reflexión y refracción del laser

Ahora se harán observaciones alrededor del láser y se relacionara con los experimentos de los talleres 1 y 2.

Los estudiantes reutilizaran el material de los dos talleres anteriores, esta vez usaran los laser en vez de alfileres para trazar la trayectoria de la luz y responderán a las preguntas orientadoras.

- a. Con la hoja milimetrada usada en el taller 1, procure que el haz de luz pase por encima de la línea dibujada en la parte derecha de la hoja hasta llegar al espejo. ¿Qué pasa con el haz de luz al entrar en interacción con el espejo?, ¿que se ve en la parte izquierda de la hoja?
- b. Repita el procedimiento anterior para el montaje con el prisma con la hoja milimétrica correspondiente. ¿Qué pasa con la luz al interaccionar con el prisma?, ¿Qué pasa con el lado izquierdo de la hoja?

¿Los resultados que se obtienen al usar el láser son los mismos que cuando se empleó los alfileres?

Tiempo estimado de actividad: 10 minutos

Actividad 3: experimento de Young

El experimento de Young consiste en un montaje simple.

Materiales:

- Laser de luz monocromática
- Doble rendija
- Soporte para laser
- Soporte para rendija Montaje:

1. Mediante un soporte firme, se ubica la doble rendija en frente de una pared o fondo de preferencia de color blanco.
2. Detrás de la doble rendija se dispone el láser apuntando en dirección al punto medio entre la doble rendija, se puede poner sobre un soporte firme si así se prefiere tal como se muestra en la imagen 3.



Imagen 3: montaje experiment de Young.

Nota: la doble abertura tiene ciertas especificaciones en cuanto a separación entre los orificios, dado que al estar demasiado separadas las aberturas, no se dará cuenta de los efectos que se quieren evidenciar en esta parte de la secuencia, por ello se debe de especificar que las separaciones entre las aberturas deben ser del orden de $10^{-6}m$ (micrómetros)

Cada estudiante pasará por grupo a evidenciar el fenómeno que se proyecta en la pantalla al encender el láser; se pedirá hacer una representación gráfica de lo expuesto y debatirá con sus compañeros las siguientes preguntas:

- ¿Qué patrón se forma en la pantalla?
- ¿Se observa lo mismo en este experimento que al pasar la luz del sol por alguna ventana de tu casa?
- ¿Por qué cree que la luz se comporta de este modo en este montaje en

específico?

□ ¿Qué cree que pasaría si aumentamos la separación entre las rendijas?

Tiempo estimado de actividad: 20 minutos

Actividad 4: reflexiones generales y segunda parte del video de Dr quantum

Para dar cierre al taller se pondrá la segunda parte del video “experimento de la doble rendija explicado por Dr. Quantum” a partir del minuto 1:47 hasta el final. Luego de ver el video se hará una retroalimentación con los estudiantes para dar respuesta a las preguntas sobresalientes que hayan surgido en el transcurso de la actividad (incluyendo las preguntas propuestas por el docente).

Anexo 2: guía 1



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA
NACIONAL**
Educadora de educadores

Nombres:

| |
|--|
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |

grupo: #

Fecha: 18 de abril de 2024

Guía #1

Lea atentamente las instrucciones y desarrolle la guía con base en las indicaciones dadas:

Llene los espacios correspondientes al principio de esta guía con los nombres de los integrantes del grupo.

El docente le asignará el número de grupo y con ese marcará la hoja milimetrada que se le otorgue.

Responda las preguntas al final de esta guía en hojas cuadrículadas.

Para la actividad se le hará entrega a cada grupo de una hoja milimetrada con ciertas marcas específicas: una línea central que atraviesa la hoja por su lado más corto, una línea perpendicular a la línea central mencionada

anteriormente que indica la posición del espejo en la parte inferior de la hoja, tres líneas equidistantes entre sí, perpendiculares a la línea central y enumeradas de 1 a 3 siendo 3 la más cercana al espejo y 1 la más distante, tal como se muestra en la imagen 1:



Imagen 4: hoja de trabajo, experimento de reflexión

Procedimiento:

15. Ponga el papel foami bajo la hoja milimétrica
16. Con ayuda de la plastilina ubique el espejo en la marca correspondiente que se encuentra en la parte inferior de la hoja, procure que quede lo más centrado posible y que quede orientado de la misma manera que la señalización base para el espejo.
17. Ahora ubique un alfiler justo en la unión entre la línea central y la base del espejo
18. Comenzando desde la línea 1 al costado derecho de la línea central, ubique un alfiler sobre la línea de tal forma que usted pueda ver desde algún ángulo que las imágenes de los alfileres se solapan, es decir, que un alfiler que ubique en la línea 1 tape visualmente al alfiler que se encuentra junto al espejo.
19. Repita el paso anterior con las líneas 2 y 3 procurando que las imágenes de cada alfiler que va ubicando sobre las líneas cumplan las mismas condiciones de solapamiento que los dos alfileres mencionados en el paso anterior.
20. Repita el procedimiento para el lado izquierdo de la hoja, pero ahora debe procurar que las imágenes se solapen también en el espejo, es decir los alfileres que se encuentran ubicados deben tapar la imagen de los otros

alfileres frente a ellos y los reflejos del lado contrario de la hoja.

21. Una vez ubicados todos los alfileres correctamente, retire el espejo y los alfileres, con ayuda de un lápiz trace líneas rectas que una los puntos en donde estaban ubicados los alfileres.

Responda

Responda las siguientes preguntas basado en los resultados que halló

- j. De las cualidades de la luz escritas en el tablero, ¿Cuáles se pueden evidenciar con esta actividad?
- k. ¿Qué trayectoria recorre la luz antes y después de entrar en contacto con el espejo?
- l. ¿hay alguna relación entre la posición de los alfileres en el lado derecho y el izquierdo? Explique con base a lo que realizó en clase
- m. Teniendo los alfileres en las mismas posiciones ¿Qué esperarías ver al cambiar alguno de estos parámetros?, justifique su respuesta.
 - El tamaño del espejo
 - La distancia entre el espejo y los alfileres
 - La inclinación del espejo respecto a la línea central
 - La centralización del espejo con la línea central

Anexo 3: guía 2



**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA
NACIONAL**
Educadora de educadores

Nombres:

| |
|--|
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |

grupo: #

Fecha: 25 de abril de 2024

Guía #2

Lea atentamente las instrucciones y desarrolle la guía con base en las indicaciones dadas:

Llene los espacios correspondientes al principio de esta guía con los nombres de los integrantes del grupo.

El docente le asignara el numero de grupo y con ese marcara la hoja milimetrada que se le otorgue.

Responda las preguntas al final de esta guía en hojas cuadriculadas.

Para la actividad se le hará entrega a cada grupo de una hoja polar con ciertas marcas específicas: tres sectores marcados y enumerados de 1 a 3 y separados entre si por líneas guías que conectan en el centro de la hoja, tres círculos concéntricos y radios proporcionales entre si, dichos círculos están enumerados de 1 a 3 siendo 1 el más cercano al centro y 3 el más distante, tal como se muestra en la imagen 1:

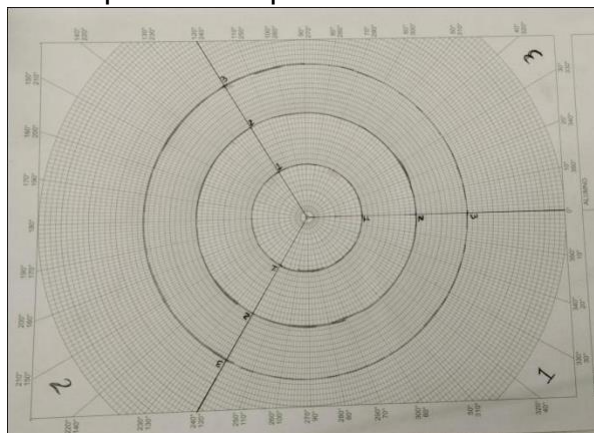
Procedimiento:

- Ponga el papel foami bajo la hoja polar
- Ubique el prisma en el centro de la hoja de tal forma que los vértices del prisma coincidan con las líneas separadoras de sectores.
- Ahora ubique un alfiler en el sector 1 en la línea circular 1.
- Ubique un alfiler en el sector 2 ó en el 3 a lo largo se la línea circular 1 de tal forma que las imágenes de los 2 alfileres se solapen entre si vistos desde algún ángulo (puede elegir en qué sectores va a trabajar a decisión propia).
- Ubique un alfiler a lo largo se las líneas 2 y 3 procurando que cada alfiler que vaya poniendo siga ocultando la imagen de los que ya están puestos en el papel.
- Una vez ubicados todos los alfileres correctamente, retire el prisma y los alfileres, con ayuda de un lápiz trace líneas rectas que una los puntos en donde estaban ubicados los alfileres.

Responda

Responda las siguientes preguntas basado en los resultados que halló

- De las cualidades de la luz escritas en el tablero, ¿Cuáles se pueden evidenciar con esta actividad?
- ¿Qué trayectoria recorre la luz antes y después de entrar en contacto con el prisma?
- ¿hay alguna relación entre la posición de los alfileres en el lado derecho y el izquierdo? Explique con base a lo que realizó en clase □ ¿Nota una desviación en la trayectoria de la luz?
- ¿Qué factores cree que afecten posibles desviaciones en la luz y por qué?



- Forma del prisma
- Tamaño del prisma
- Orientación del prisma
- Distancia entre el prisma y los alfileres
- Otro ¿Cuál?

Anexo 4: Guía 3



**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA
NACIONAL**
Educadora de educadores

Nombres:

| |
|--|
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |
| |

grupo: #

Fecha: 25 de abril de 2024

Guía #3

Lea atentamente las instrucciones y desarrolle la guía con base en las indicaciones dadas:

Llene los espacios correspondientes al principio de esta guía con los

nombres de los integrantes del grupo.

Actividad # 1

- n. Con la hoja milimetrada usada en el taller 1, procure que el haz de luz pase por encima de la línea dibujada en la parte derecha de la hoja hasta llegar al espejo. ¿Qué pasa con el haz de luz al entrar en interacción con el espejo?
- o. Repita el procedimiento anterior para el montaje con el prisma con la hoja polar correspondiente. ¿Qué pasa con la luz al interaccionar con el prisma?

¿Los resultados que se obtienen al usar el láser son los mismos que cuando se empleó los alfileres?

¿Las trayectorias seguidas por el láser son las misma que se dibujaron en sesiones anteriores?

Actividad # 2

Montaje: experimento de doble rendija

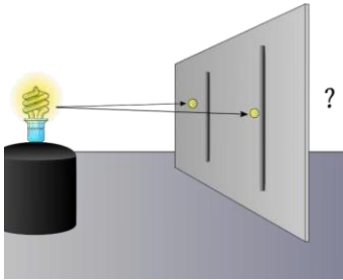
El experimento de Young consiste en un montaje simple.

Materiales:

- Laser de luz monocromática
- Doble rendija
- Soporte para laser
- Soporte para rendija

1. Mediante un soporte firme, se ubica la doble rendija en frente de una pared o fondo de preferencia de color blanco.
2. Detrás de la doble rendija se dispone el láser apuntando en dirección al punto medio entre la doble rendija

Tal como se muestra en la figura 1



¿Que imagen cree que se proyectará al otro lado de la rendija? Haga dibujo que represente su hipótesis y explique con sus propias palabras por qué aacevera eso.

Responda y desarrolle

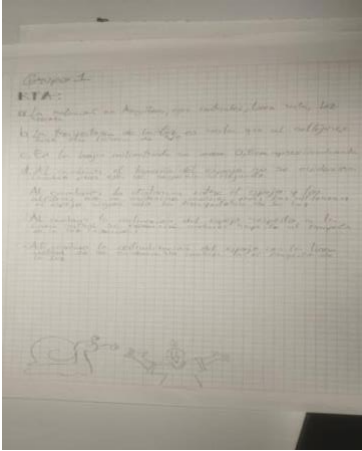
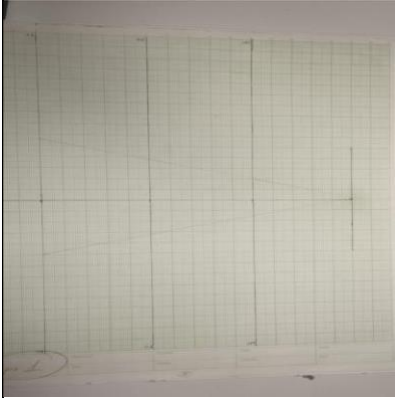
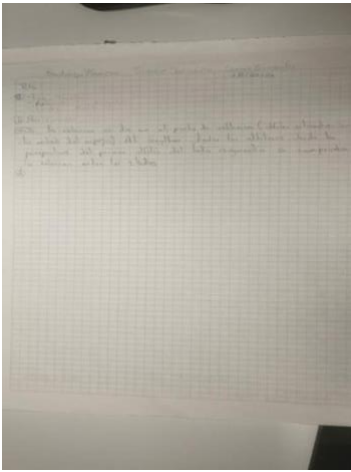
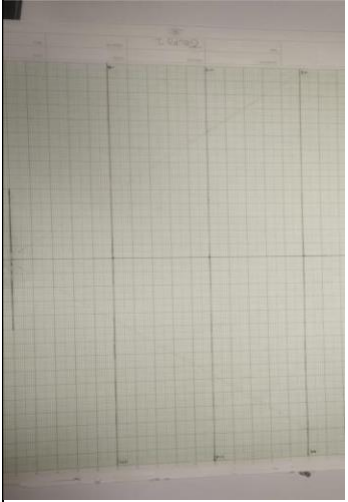
- Haga una representación gráfica de lo observado en el desarrollo del experimento.
- Responda las siguientes preguntas:
- ¿Qué patrón se forma en la pantalla?
- ¿Difiere con su hipótesis anteriormente planteada? Justifique
- ¿Se observa lo mismo en este experimento que al pasar la luz del sol por alguna ventana de tu casa?
- ¿Por qué cree que la luz se comporta de este modo en este montaje en específico?
- ¿Qué factores cree que se deberian cambiar para que el experimento mostrará otros resultados?
 - El color del láser
 - La intensidad del láser
 - La separación entre las rendijas
 - El tamaño de los orificios
 - La cantidad de orificios
 - Las distancias (entre la pared y la rendija o entre la rendija y el láser)

Al terminar el tiempo previsto para desarrollar las preguntas anteriores, cada grupo socializara sus respuestas y conclusiones mediante un representante de grupo.

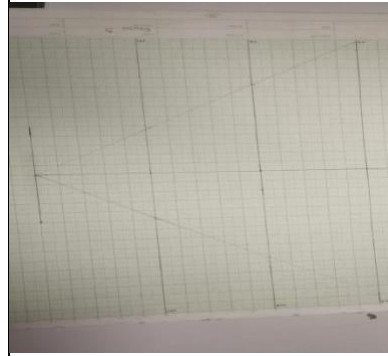
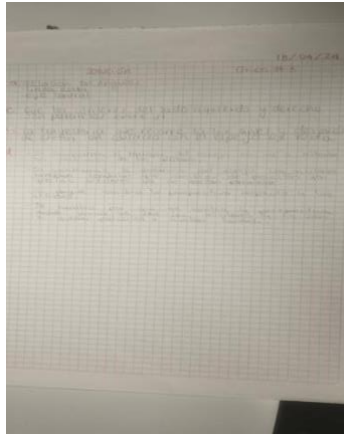
Anexo 5:

Trabajo físico recolectado mediante la implementación de los talleres 1, 2 y 3.

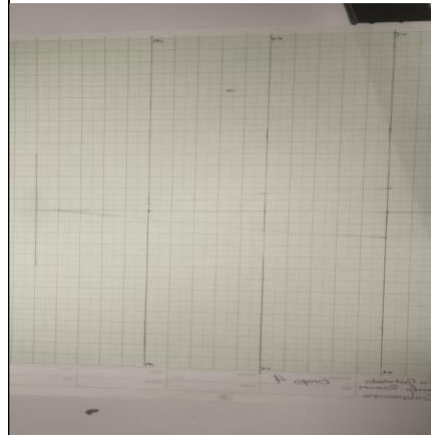
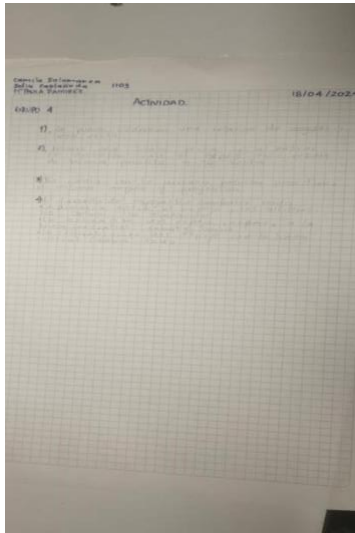
Taller 1

| | Hoja de respuesta | grafica |
|---------|--|---|
| Grupo 1 |  |  |
| Grupo 2 |  |  |

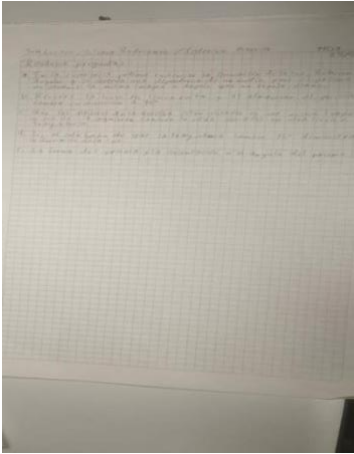
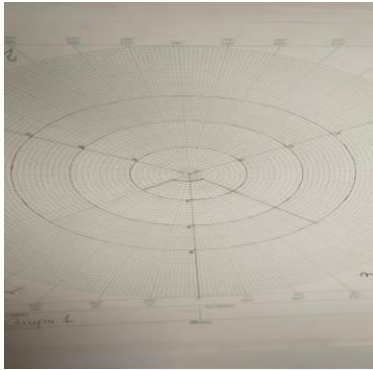
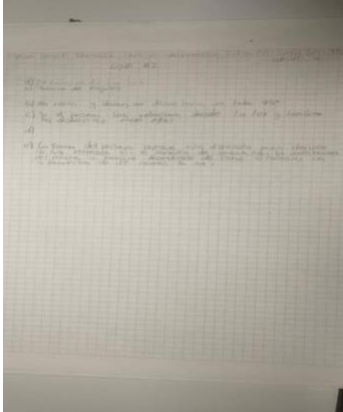
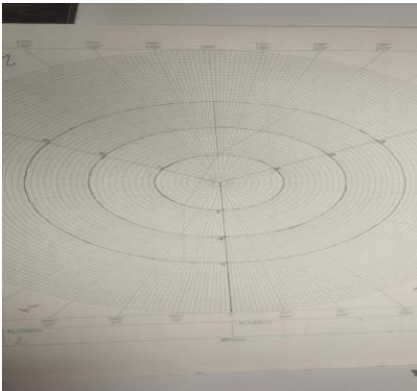
Grupo 3



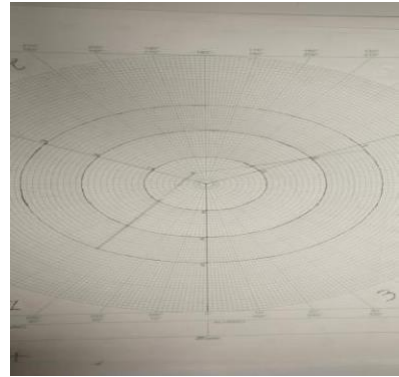
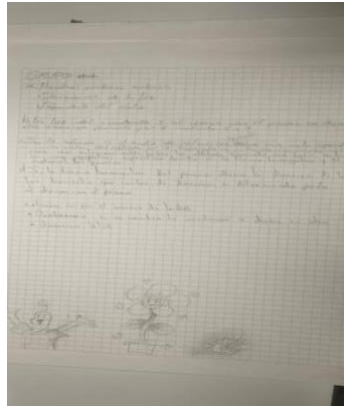
Grupo 4



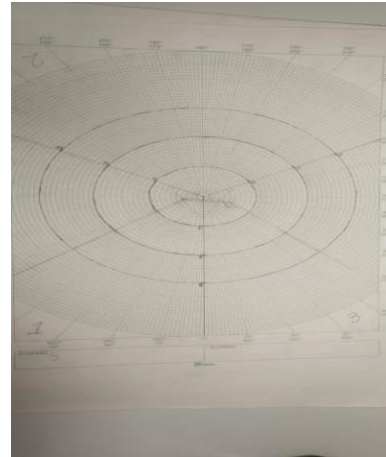
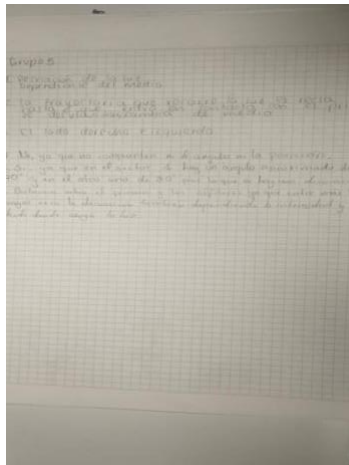
Taller 2

| | Hoja de respuestas | Grafica |
|---------|--|---|
| Grupo 1 |  |  |
| Grupo 2 |  |  |
| Grupo 3 | | |

Grupo 4



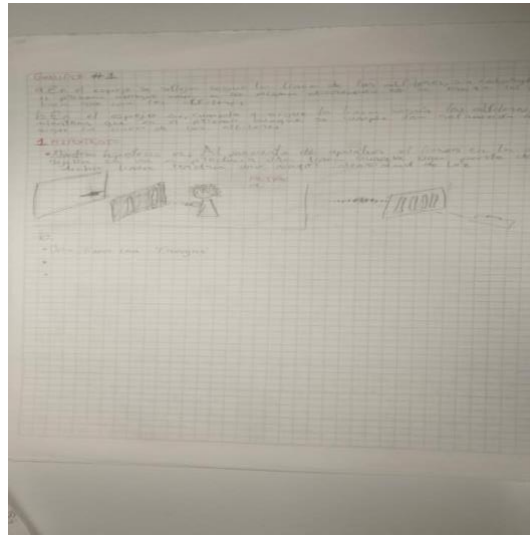
Grupo 5



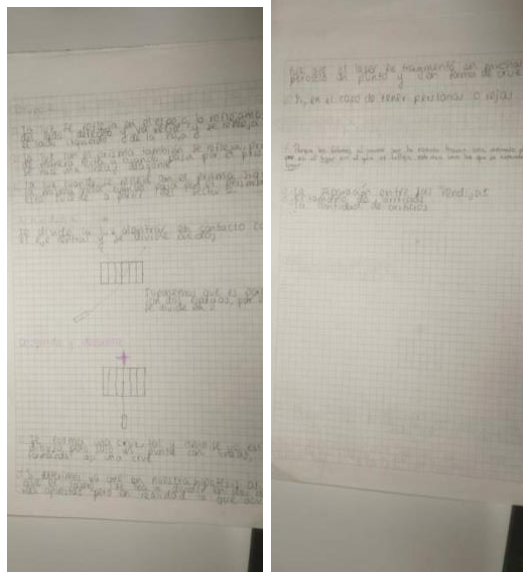
Taller 3

| | |
|--|--------------------|
| | Hoja de respuestas |
|--|--------------------|

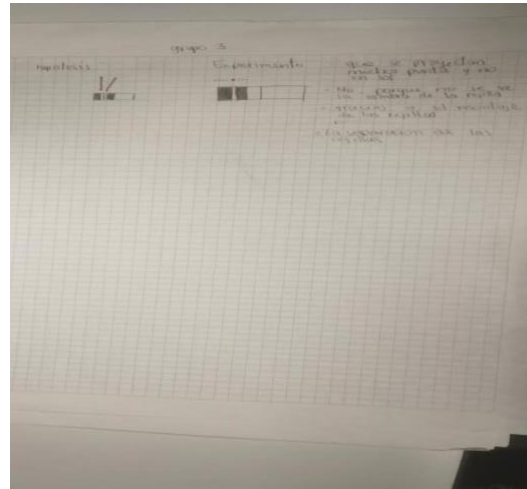
Grupo 1



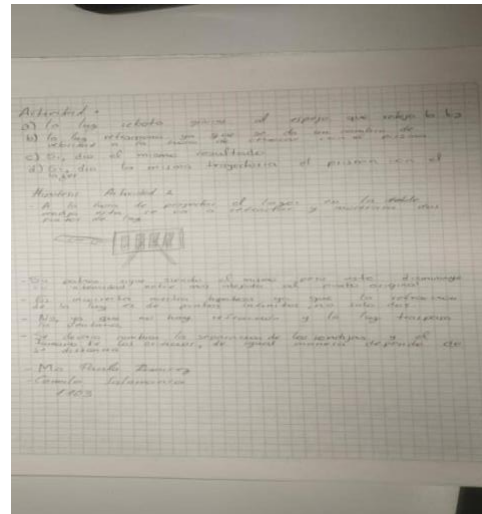
Grupo 2



Grupo 3



Grupo 4



Grupo 5

