

Aprendizaje de óptica ondulatoria en un laboratorio de física para ingenierías

Learning wave optics in a physics laboratory for engineering

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Silvia Bravo^{1,2}, Marta Pesa^{1,2}

¹Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Avenida Independencia 1800, CP 4000, Tucumán, Argentina.

²Facultad Regional Tucumán, Universidad Tecnológica Nacional, Rivadavia 1050, CP 4000, Tucumán, Argentina.

E-mail: sbravo@herrera.unt.edu.ar

(Recibido el 23 de junio de 2016; aceptado el 14 de octubre de 2016)

Resumen

Este trabajo presenta los resultados de una investigación referida al aprendizaje de los conceptos de interferencia y difracción de la luz en el ámbito de un laboratorio de física para carreras de ingeniería. Involucra el diseño de una propuesta didáctica de carácter experimental y el análisis e interpretación de resultados obtenidos con estudiantes del ciclo básico de ingeniería. La investigación se realizó desde la teoría de campos conceptuales de Vergnaud como marco teórico de referencia. Involucra el estudio del desarrollo cognitivo de los estudiantes durante la implementación de la propuesta didáctica y la evaluación de resultados de la misma a través de la evolución de sus esquemas. Los resultados obtenidos en el estudio del desarrollo cognitivo durante todas las actividades, focalizado en tres de los estudiantes, muestran que los esquemas iniciales estaban centrados en la óptica de rayos y evolucionan paulatinamente hacia esquemas centrados en el modelo ondulatorio, a medida que desarrollan las actividades experimentales. Los resultados obtenidos con la evaluación individual muestran que más de la mitad de los estudiantes ha logrado una evolución de sus esquemas iniciales y ha logrado desarrollar, en consecuencia, las competencias necesarias para enfrentar satisfactoriamente las situaciones experimentales.

Palabras clave: Óptica ondulatoria; Actividades experimentales; Esquemas de Vergnaud.

Abstract

This paper shows the results of a research referred to the conceptual learning of light interference and diffraction in the context of a physics laboratory for engineering careers. The design comprehends an experimental didactic proposal and the analysis and interpretation of the results obtained by the students in the engineering basic cycle. The theoretical framework used for this research is Vergnaud's theory of conceptual fields. This study involves the students' cognitive development during the implementation of the didactic proposal and the evaluation results through their evolution schemes. The results obtained in the cognitive development study during all activities, centered on three students show that the initial schemes on the optical beams were focused and they gradually evolve towards schemes centered on the wave model as the experimental activities were developed. The individual evaluation results show that more than half of the students have achieved an evolution on their initial schemes. Consequently they have developed the necessary competencies to deal successfully with experimental situations competencies.

Key words: Wave optics; Experimental activities; Vergnaud's schemes; Skills development.

I. INTRODUCCIÓN

En la estructura conceptual de la Física se pueden identificar áreas de mayor dificultad de comprensión, entre las cuales se incluyen los fenómenos relacionados al comportamiento ondulatorio de la luz. Durante el proceso de aprendizaje se ponen de manifiesto y convergen la complejidad del concepto de onda electromagnética, el alto grado de abstracción de las magnitudes físicas involucradas (campo eléctrico, intensidad de la radiación, etc.), las características de nuestro sistema visual como sensor y del sistema cognitivo en la percepción de las mismas, generando numerosas incomprensiones relacionadas con los aspectos mencionados.

Las principales contribuciones específicas de la investigación educativa sobre las dificultades de estudiantes en el aprendizaje de la óptica ondulatoria provienen de dos centros de investigación:

- Physics Education Research Group (PERG) de la Universidad de Washington, en colaboración con la Universidad de Maryland, con los reportes de Mc Dermott (2000 y 2001), Mc Dermott y Shaffer, (2002), Ambrose, Heron, Vokos y Mc Dermott, (1999), Ambrose, Schaffer, Steinberg y Mc Dermott, (1999) y Wosilait, Heron, Schaffer y Mc Dermott (1999).

- Universidad Denis Diderot, París 7, con las investigaciones de Maurines (2002 y 2010), Maurines y Mayrargue (2007) y Colin y Vienott (2000, 2001 y 2002).

Los resultados presentados por ambos grupos de investigación coinciden en señalar la dificultad de los estudiantes para delimitar el alcance y ámbito de aplicación de los modelos de la óptica geométrica y de la óptica ondulatoria y la dificultad para comprender los conceptos y representaciones asociados con los fenómenos de interferencia y difracción. También desarrollan materiales de enseñanza tendientes a la superación de algunas dificultades detectadas. Es el caso de los tutoriales desarrollados por el PERG, basados en analogías y secuencia de actividades, que complementan la enseñanza tradicional con el objetivo de guiar a los estudiantes en el razonamiento involucrado en el desarrollo y aplicación de los conceptos. Y en el caso del grupo francés, una serie de cuestionarios para ser abordados en diferentes instancias, clases tradicionales o experimentales.

Se identifican además en la literatura aportes provenientes del área de la epistemología e historia de la ciencia, que permiten ampliar y profundizar la interpretación y las hipótesis acerca de las dificultades de los alumnos en la delimitación de los modelos de la óptica durante el aprendizaje. Por ejemplo, Galili (2014) estudia la evolución de las teorías sobre la luz a lo largo de la historia y propone representar la teoría dominante de la luz en cada momento de la historia con una estructura y organización de los conceptos, que denomina cultura-disciplina. En su propuesta se puede visualizar la transición entre las teorías sucesivas de la luz y la competencia entre ellas, en términos de la organización de conceptos.

La mayoría de las investigaciones citadas utilizan cuestionarios de lápiz y papel en una situación de aula o de entrevistas donde se describen y esquematizan las distintas situaciones experimentales sobre las cuales debe razonar el estudiante. Con los reportes de la literatura mencionada como punto de partida, en este trabajo se presentan resultados parciales obtenidos con una propuesta didáctica en el contexto particular de los trabajos de laboratorio para carreras de ingeniería. La propuesta estuvo dirigida a ayudar a los estudiantes a superar sus dificultades en la delimitación del límite de validez de los modelos de la óptica y en la comprensión de los conceptos y representaciones de la óptica ondulatoria.

Los trabajos de laboratorio están relacionados al desarrollo de habilidades y destrezas en el uso de los procedimientos, pero también de habilidades que conllevan una interacción de elementos cognitivos y de procedimientos, con altos niveles de complejidad (Beneitone, Esquetini, Gonzalez, Maletá, Siufi y Wagenaar, 2007). Así, el proceso de aprendizaje en el ámbito del laboratorio consiste en el desarrollo de actividades complejas en las cuales los contenidos teóricos y experimentales, la cognición y la acción están en permanente relación e interdependencia.

Esta forma de concebir el aprendizaje de conceptos, la indisoluble relación entre el saber y el saber hacer, fundamenta la elección de la teoría de campos conceptuales de Vergnaud como un referencial teórico potencialmente útil para la investigación acerca de la construcción de conceptos en el ámbito del laboratorio. El objetivo de la teoría de los campos conceptuales es proporcionar un encuadre teórico a las investigaciones sobre las actividades cognitivas complejas, especialmente aquellas referidas a los aprendizajes científicos y técnicos. Discípulo de Piaget, Vergnaud amplía el concepto de *esquema* incorporando el dominio del conocimiento al estudio de la actividad del sujeto en situación. Se trata de una teoría psicológica de conceptualización de lo real, que permite localizar y estudiar las continuidades y las rupturas entre conocimientos desde el punto de vista de su contenido conceptual (Vergnaud, 1990).

II. MARCO TEÓRICO

A. Principales conceptos de la teoría de campos conceptuales

En este referencial el desarrollo del conocimiento de un sujeto depende de las situaciones a las cuales se va enfrentando y en consecuencia, de los esquemas que construye cuando las enfrenta. Estos esquemas dirigen el comportamiento ante una situación dada, generando una secuencia de acciones que dependen de los parámetros de la situación. Un esquema comprende cuatro categorías de componentes:

- uno o varios objetivos, sub-objetivos y anticipaciones;
- reglas de acción, de toma de información y de control;
- invariantes operatorios (conceptos-en-acción y teoremas-en-acción);
- posibilidades de inferencia.

Los objetivos o metas constituyen la parte intencional del esquema y en general, se encuentran divididos en sub-objetivos ordenados secuencial y jerárquicamente, que van dando origen a diferentes anticipaciones. Son esenciales en la actividad aunque no sean del todo conscientes y aun cuando los efectos esperados de la acción no sean todos previsibles para el sujeto (Vergnaud, 2013).

Las reglas de acción están asociadas a la búsqueda de información para la continuación de la actividad y de los controles que le permiten al sujeto asegurarse de que ha hecho realmente lo que pensaba hacer. En este sentido, aseguran la función generativa del esquema (Vergnaud, 2013). Tienen la forma de proposiciones acerca de la conveniencia de las acciones que pueda tomar el sujeto y se encuentran condicionadas por la representación de la meta a alcanzar.

Los invariantes operatorios son los conocimientos contenidos en los esquemas, es decir, el conjunto de elementos cognitivos de la estructura mental (conocimientos-en-acción) que determinan la activación de los esquemas. Este conocimiento-en-acción en general es implícito, y está constituido por los conceptos-en-acción y los teoremas-en-acción. Se trata de conceptos y teoremas que tienen un status diferente a los conceptos y teoremas científicos.

Los conceptos-en-acción son categorías para obtener información relevante, son los que llevan a buscar la información necesaria para resolver la situación. Los teoremas-en-acción son proposiciones que relacionan conceptos, objetos, predicados, etc., a partir de las cuales se hacen inferencias. Se trata de construcciones mentales más complejas que se pueden considerar verdaderas o falsas (Vergnaud, 1994). Ambos tienen características diferentes, ya que las proposiciones pueden ser verdaderas o falsas, mientras que los conceptos-en-acción solo pueden ser relevantes o irrelevantes para una determinada situación.

Vergnaud (2013) utiliza la expresión invariantes operatorios para designar a los conocimientos-en-acción, con el objetivo de resaltar por medio del léxico que estos conocimientos no son necesariamente explícitos, ni explicitables, ni aún conscientes en el caso de algunos de ellos, como se ve en la figura 1.

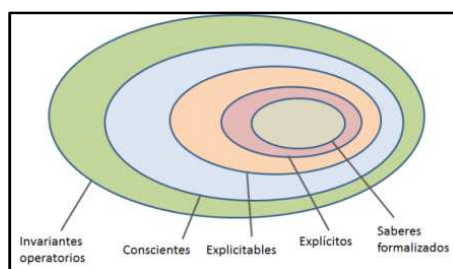


FIGURA 1. Grado de explicitación de los invariantes operatorios. Extraído de Vergnaud, 2007, p.299.

En general, los alumnos no son capaces de explicar o incluso expresar verbalmente sus teoremas-en-acción y conceptos-en-acción. Al enfrentar una situación problemática, la secuencia de acciones que llevan a cabo depende de teoremas-en-acción y de la identificación de diferentes tipos de elementos pertinentes (conceptos-en-acción). La mayor parte de ese conocimiento en acción permanece totalmente implícita, pero puede ser explicitada ayudando al alumno a construir conceptos y teoremas explícitos y científicamente aceptados, a partir del conocimiento implícito.

B. El aprendizaje de los conceptos de interferencia y difracción desde la perspectiva de Vergnaud

La idea de que no se puede abordar por separado el estudio de conceptos que están interconectados, que los conceptos se construyen y operan en el conocimiento en función de las situaciones a las que el sujeto se enfrenta y que en ese proceso entran en juego procedimientos, concepciones y representaciones simbólicas con el objeto de dominar las situaciones llevó a Vergnaud a la idea de campo conceptual (Rodríguez y Moreira, 2004).

Para comprender el desarrollo cognitivo durante el transcurso de una experiencia de aprendizaje es necesario tomar como objeto de estudio un conjunto de situaciones y un conjunto de conceptos que conforman un campo conceptual. Si estamos interesados en estudiar el proceso de aprendizaje de los conceptos de interferencia y difracción de la luz, por ejemplo, tenemos que considerar que estos conceptos se desarrollan en una variedad muy grande de situaciones y a su vez, estas situaciones se abordan desde una variedad muy grande de conceptos. En la estructura conceptual de la física este conjunto de situaciones y conceptos corresponde al ámbito de lo que se conoce como la teoría electromagnética de la luz u óptica ondulatoria y hablamos entonces del campo conceptual de la óptica ondulatoria.

Desde la estructura formal de la disciplina, se puede decir que los fenómenos de interferencia y difracción están íntimamente relacionados. Indefectiblemente se debe considerar el fenómeno de

interferencia cuando se quiere explicar por qué ocurre el fenómeno de la difracción. A la inversa, aunque se puede abordar la interferencia de ondas sin considerar la difracción, los textos de nivel básico universitario más consultados por los alumnos en nuestra institución (Serway, 2005; Tipler, 1996; Young, 2013) introducen el concepto de interferencia de la luz a partir de la experiencia de Young. Ello implica una definición previa, aunque sea en forma cualitativa, del fenómeno de difracción de la luz para justificar que las ondas interfirieran en un dispositivo de dos ranuras. Al respecto, Hecht y Zajac, (2000) afirman que “no hay distinción física significativa entre interferencia y difracción”, y aceptan que hay una especie de consenso que no siempre resulta apropiado, en hablar de interferencia cuando se considera la superposición de pocas ondas y de difracción cuando se trata de numerosas ondas.

Esta situación se puede evidenciar en la figura 2. La misma presenta una interpretación desde la perspectiva de Vergnaud de los conceptos de difracción e interferencia en la estructura formal de la disciplina Física, en la cual se identifican:

- una variedad de situaciones en las cuales se pueden desarrollar estos conceptos y que van a actuar como referentes de los mismos;
- una variedad de conceptos en acción y teoremas en acción relacionados con las propiedades de la interferencia y difracción, con los que se puede abordar cada una de las situaciones propuestas;
- algunas de las posibles representaciones simbólicas que representan las propiedades y procedimientos asociados a los conceptos de interferencia y difracción en tales situaciones.

La caracterización del contenido a desarrollar en la instrucción formal desde la visión de campo conceptual permite al docente, por ejemplo, planificar secuencia de situaciones con las cuales otorgar sentido a los conceptos de interferencia y difracción, prever de qué invariantes operatorios necesitaría disponer el alumno para abordar las situaciones y qué representaciones podría utilizar durante su desempeño. Actúa como una estructura conceptual de referencia que contribuye a orientar al docente en la elaboración de la propuesta didáctica, teniendo en cuenta resultados de la investigación educativa y de su práctica docente en cuanto a las posibles dificultades a enfrentar.

Pero también cabe destacar que desde la perspectiva de Vergnaud del aprendizaje, en la estructura cognitiva de los estudiantes estos conceptos generalmente están implícitos y no tienen la categoría de conceptos y/o teoremas científicos. Incluyen al conocimiento intuitivo y deberían ser explicitados para poder negociar su significado en la clase y orientar al estudiante hacia la construcción de esquemas que resulten efectivos para abordar las situaciones.

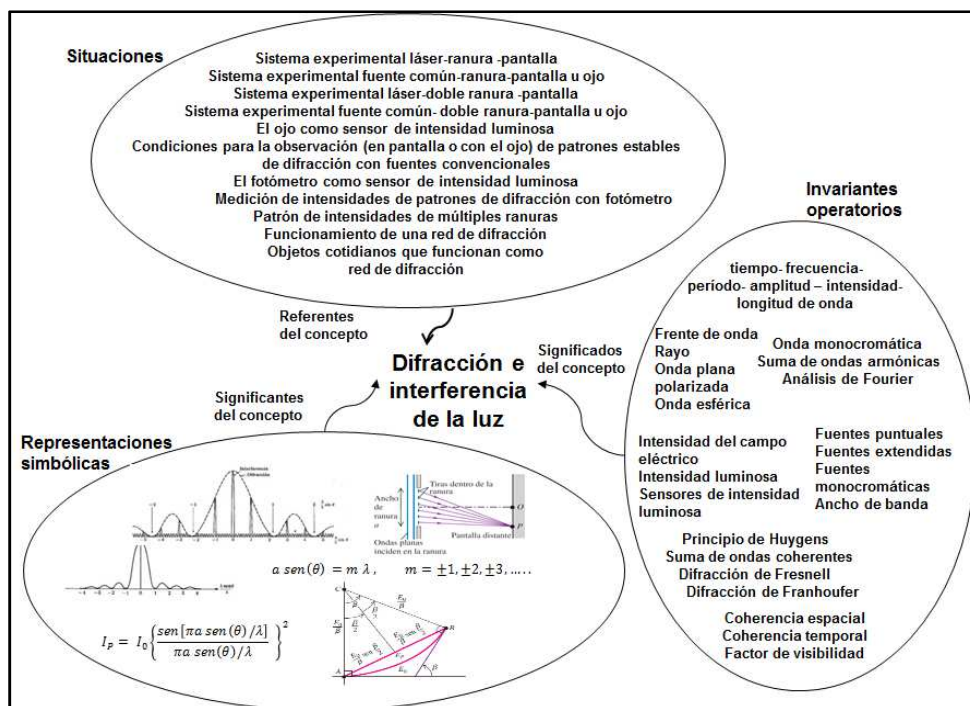


FIGURA 2. Interpretación de los conceptos de interferencia y difracción desde la teoría de campos conceptuales.

C. Aportes de la epistemología e historia de la ciencia a la interpretación de la dificultad de los estudiantes en el cambio de paradigma

Desde que fue observado el fenómeno de difracción en las cuidadosas y detalladas experiencias de Grimaldi y de Hooke en 1618, no pudo ser explicado por la teoría ondulatoria de Huygens ni por la corpuscular de Newton. Tuvo que transcurrir un siglo para que se pudiera vencer el peso de la autoridad de Newton, con la genial interpretación de Fresnel en 1917. El escollo más duro para un cambio de paradigma parecía estar centrado en la necesidad de encontrar hipótesis y explicaciones que no contradigan la propagación rectilínea de la luz (Hull, 2011).

Si se analiza el papel que tuvo el fenómeno de la difracción en la formulación de las distintas teorías sobre la naturaleza de la luz y todos los intentos que se hicieron para explicarlo sin hacer abandono de la propagación rectilínea de la luz, resulta comprensible que hoy los alumnos evidencien dificultades en el cambio de paradigma entre la óptica geométrica y la óptica ondulatoria, dado que una de las experiencias más cotidianas de los estudiantes es la propagación rectilínea de la luz. Hoy en día, la tecnología láser que se utiliza en diversos espectáculos refuerza aún más esa percepción.

Según Matthews (1994), una parte significativa de las publicaciones sobre historia y filosofía de la ciencia y enseñanza de las ciencias en la década del noventa se ha ocupado de averiguar en qué forma se influyen mutuamente el desarrollo cognitivo individual y el proceso del desarrollo histórico conceptual. Ello ha contribuido a dar un nuevo papel a la dimensión histórica, tanto en la práctica pedagógica como en la reflexión sobre la educación.

Teniendo en cuenta que esta investigación plantea el estudio de la estructuración del conocimiento de los estudiantes a medida que van abordando una secuencia de actividades experimentales, se considera pertinente considerar los aportes de Galili (2014). Este enfoque considera que a cada momento de la historia, la teoría dominante de la luz se puede representar con una estructura triádica denominada disciplina-cultura (DC) compuesta por núcleo-cuerpo-periferia (Figura 3a), en lugar de la estructura regular de las disciplinas compuesta por núcleo- cuerpo (Figura 3b). El núcleo incluye los fundamentos, el modelo paradigmático, principios y conceptos, mientras el cuerpo se compone de varias aplicaciones del núcleo: resolución de problemas, trabajo con modelos, explicación de los fenómenos y experimentos, y tecnología desarrollada. La periferia es la zona que incorpora los elementos que se contradicen y desafían el núcleo, tales como problemas o fenómenos que no se pueden resolver o explicar por un núcleo en particular. Según Galili (2014), la enseñanza de la óptica busca transformar el conocimiento ingenuo de los estudiantes en conocimiento estructurado en forma de disciplina-cultura.

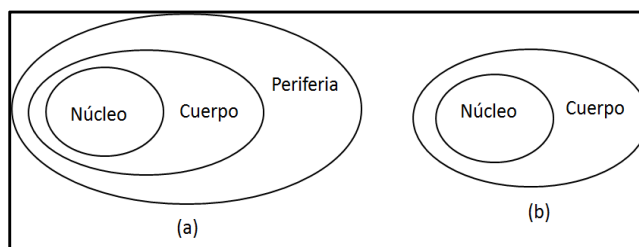


FIGURA 3. (a) Representación esquemática de la estructura *disciplina-cultura* de una teoría científica. Los elementos del conocimiento se localizan en diferentes áreas. (b) Representación esquemática de la estructura *disciplina* de una teoría científica. Extraído de Galili, 2014, p. 105.

En una estructura DC de la teoría luminosa de rayos del siglo XVII, los fenómenos de interferencia y difracción se ubicarían en la periferia, mientras que la propagación rectilínea y las leyes de reflexión y refracción estarían en el núcleo, como se ilustra en la figura 4.

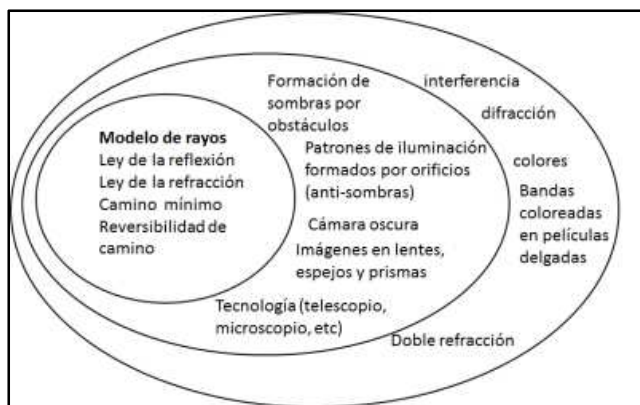


FIGURA 4. Estructura disciplina-cultura de la teoría de rayos, en tiempos de la revolución científica del siglo XVIII. Extraído de Galili, 2014, p. 108.

Por el contrario, en la estructura DC de la teoría ondulatoria de la luz el núcleo estaría compuesto por las leyes del modelo ondulatorio que explican la propagación de ondas luminosas, en el cuerpo estarían los fenómenos que se explican desde los conceptos del modelo ondulatorio y la periferia estaría representada por aquellos fenómenos que desafían al cuerpo por la imposibilidad de generar una explicación a los mismos. Una estructura de este tipo está representada por la figura 5.

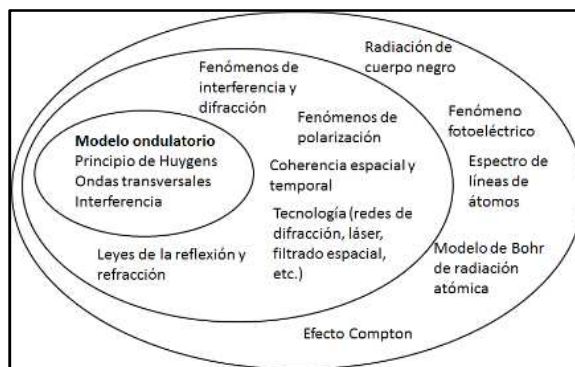


FIGURA 5. Estructura cultura- disciplina de la teoría ondulatoria de la luz luego de la revolución científica del siglo XX. Adaptado de Galili, 2014, p. 111.

Desde la perspectiva de Galili, la propuesta didáctica desarrollada pretende ayudar a los estudiantes a transformar paulatinamente la estructura del contenido conceptual de sus esquemas, en el sentido de evolucionar hacia esquemas que tengan efectividad para explicar y/o abordar con éxito situaciones referidas a los fenómenos de interferencia y difracción de la luz. Un esquema de este tipo correspondería a una estructuración de los invariantes operatorios similar a la de la figura 5.

III. DISEÑO DE LA PROPUESTA DIDÁCTICA

A. El laboratorio de física en la institución

En el ciclo básico de las carreras de ingeniería de nuestra institución, al momento de realizar el trabajo práctico de laboratorio, los estudiantes ya han asistido a clases teóricas y/o teórico-prácticas (resolución de problemas de lápiz y papel) referidas a la temática que se aborda,

En las clases de laboratorio trabajan alrededor de 36 estudiantes distribuidos en grupos pequeños de tres o cuatro estudiantes. Disponen de una guía semiestructurada que les brinda orientaciones mínimas acerca del trabajo a realizar, tales como objetivos, planteo del problema, preguntas de iniciación y algunas pautas para desarrollar el trabajo y elaborar conclusiones. Pero el desarrollo del trabajo experimental de los alumnos se apoya, más que en la guía de trabajo, en la orientación permanente del docente asignado a cada uno de los grupos pequeños. El docente va planteando las preguntas en el momento conveniente, de acuerdo al avance del grupo y no como una secuencia preestablecida.

B. Estructura de la propuesta didáctica

El diseño de la propuesta (Bravo y Pesa, 2015) ha tenido en cuenta los principales lineamientos que se derivan para el aprendizaje desde la teoría de campos conceptuales de Vergnaud (1990, 2007, 2013): la importancia de la explicitación del conocimiento previo, la utilización de diversidad de situaciones para darle cada vez más sentido a los conceptos y el proceso de mediación permanente del docente para negociar el significado de las distintas representaciones simbólicas y del conocimiento que se va construyendo.

La propuesta se estructuró con base en ciclos de actividades desarrolladas en grupos pequeños, que atienden a la progresión en la construcción del conocimiento y suponen una interacción permanente de los alumnos entre sí y del docente con los grupos. En la figura 6 se esquematiza la estructura de la propuesta.

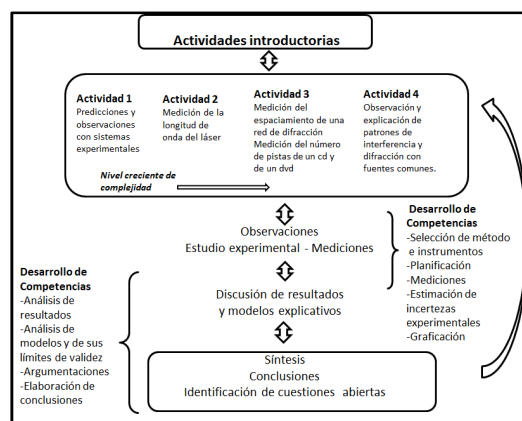


FIGURA 6. Estructura de la propuesta didáctica.

En todas las situaciones problemáticas a abordar se distinguen las principales etapas involucradas en el trabajo experimental. La doble flecha entre estas etapas indica que en la actividad se pueden producir avances y retrocesos que implican revisar o repetir una etapa anterior. Se pone de manifiesto además, el carácter recursivo de estas actividades cuando al final del primer ciclo de actividades se inicia uno nuevo, en torno a otro interrogante o nueva situación problemática con mayor nivel de complejidad, o cuando se necesita volver a revisar una actividad anterior. Cabe mencionar que la Actividad 2 se realizaba tradicionalmente en el ámbito del laboratorio para ingenierías sin las actividades introductorias y sin el estudio del grado de coherencia del campo luminoso. En esta propuesta forma parte de la estructura de actividades propuestas.

Se debe destacar la importancia del rol del profesor como mediador en este proceso de aprendizaje, para ayudar a los estudiantes a ganar complejidad conceptual a través del planteo permanente de preguntas en cada una de las metas y sub-metas que se distinguen en las actividades experimentales.

C. Actividades Introdutorias

La instrucción formal en ondas y en óptica en el nivel universitario se basa principalmente en el uso de representaciones abstractas de cantidades físicas. Se trata de representaciones esquemáticas, gráficas, algebraicas, y vectoriales que los alumnos no terminan de comprender en su totalidad. Las representaciones que se usan describen parcialmente algún aspecto del concepto, como la variación en el espacio o la variación en el tiempo de la propagación de dos campos vectoriales ortogonales que oscilan y se propagan. Ambrose y otros (1999) afirman que no es posible construir un modelo coherente para el tratamiento de la luz como una onda si no se pueden distinguir y relacionar ciertas ideas básicas (por ejemplo, longitud de onda, la longitud del trayecto, diferencia de longitud del camino, diferencia de fase, etc.) y señalan algunas incomprendiones en el modelo de onda, tal como la asignación de extensión espacial a la amplitud del campo eléctrico.

Con el objetivo de hacer explícitas las dificultades de los estudiantes con las diferentes representaciones y ayudarlos en el proceso de conceptualización de la luz como onda electromagnética, se implementan una serie de actividades introductorias. Estas se basan en el estudio cualitativo de la propagación de ondas luminosas a partir de una analogía con la propagación de ondas superficiales en el agua.

C.1. El uso del conocimiento previo

Si bien las leyes físicas que explican las propiedades de las ondas mecánicas son distintas a las leyes que explican las propiedades de las ondas electromagnéticas, en casi todos sus aspectos la cinemática de las ondas electromagnéticas es exactamente igual a la de las ondas mecánicas (Eisberg y Lerner, 1985), por lo cual el tratamiento algebraico es casi idéntico. Hay invariantes operatorios y representaciones simbólicas que son comunes a ambos modelos, es decir, ondas mecánicas y ondas electromagnéticas. Este hecho resulta de utilidad en la práctica docente tanto para introducir la temática a través de conceptos que el estudiante ya conoce de su instrucción formal (conocimiento previo) como para la elaboración de materiales destinados a introducir conceptos nuevos referidos a las ondas electromagnéticas.

Para el estudio cualitativo de la propagación de una onda electromagnética en el rango del visible se ha realizado la adaptación de una serie de tutoriales desarrollados por Mc Dermott y Shaffer (2002) referidos a la interferencia de ondas periódicas circulares en la superficie del agua, que provienen de dos fuentes. La adaptación realizada consiste en referir todas las representaciones simbólicas y las cuestiones que se plantean sobre interferencia de ondas mecánicas, a los correspondientes conceptos en el campo conceptual de las ondas electromagnéticas. Así, se pretende utilizar el conocimiento previo para explicitar el significado de las distintas representaciones que utilizan los textos y que se usan durante la instrucción (diagrama de onda electromagnética, gráficos de intensidad de E o B en función del tiempo y del espacio, diagrama de círculos para propagación de frentes de onda esféricos, dirección de propagación, etc.). El objetivo consiste en relacionar, diferenciar y explicitar los significados de conceptos como longitud de onda, frecuencia, fuente puntual, frente de onda, interferencia, amplitud de la onda, etc. en los dos modelos: ondas mecánicas y ondas electromagnéticas.

C.2. El uso del conocimiento previo en las analogías

Las analogías son comparaciones entre fenómenos que mantienen una cierta semejanza a nivel funcional o estructural y permiten relacionar una situación cotidiana para el estudiante con otra que es desconocida o nueva, facilitando la elaboración de esas relaciones y de estructuras de conocimiento más comprensibles. En base a la analogía, los alumnos trabajan con distintos tipos de representaciones gráficas sobre propagación de ondas armónicas abordando los conceptos de fase, diferencia de fase, coherencia espacial y coherencia temporal. Utilizan gráficos de círculos concéntricos y fotocopias en papel transparente de los mismos, que se superponen para representar dos fuentes luminosas que emiten en fase (Figura 7).

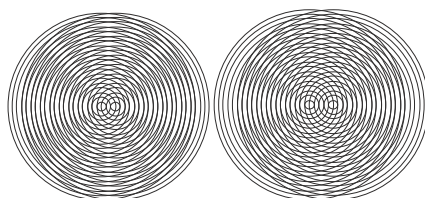


FIGURA 7. Superposición de frentes de onda circulares en papel y transparencia, para dos valores distintos de distancia entre las fuentes

Estos diagramas permiten “visualizar” un patrón de líneas de máximos y mínimos de interferencia en el espacio que rodea a dos fuentes que emiten en fase y con la misma frecuencia, y analizar cualitativamente la dependencia de esta configuración de líneas con la separación entre las fuentes. El análisis detallado del patrón de interferencia en el plano y la estimación de los órdenes de magnitud de las variables involucradas en la representación permite otorgar significado a los conceptos de frecuencia, longitud de onda, diferencia de fase, coherencia espacial y temporal, intensidad de campo eléctrico, interferencia de ondas, etcétera.

La incorporación del ojo como sensor para la observación de los patrones de intensidad luminosa y las características de emisión de distintas fuentes luminosas, requiere la revisión de conceptos tales como frecuencia de emisión, ancho de banda, fuente puntual, fuente monocromática. Son conceptos fundamentales que determinan, conjuntamente con las dimensiones de los sistemas ópticos y las características del sensor, la posibilidad de obtener patrones estables de interferencia y/o difracción.

En este caso se necesita un cuestionamiento permanente del profesor con preguntas tales como: ¿Cuándo dos ondas son coherentes? ¿De qué depende la diferencia de fase en distintos puntos del espacio? ¿La diferencia de fase en cualquier punto del espacio se mantiene en el tiempo? ¿Cómo es la intensidad del campo eléctrico resultante en cada punto del espacio a medida que transcurre el tiempo? ¿Cómo es la intensidad luminosa en cada punto del espacio a un tiempo t ? ¿Y a medida que transcurre el tiempo en un punto del plano? ¿Qué detecta el ojo? ¿Qué detecta un fotómetro?, etcétera.

D. ACTIVIDAD 1: Predicciones y observaciones sobre el comportamiento de sistemas experimentales sencillos

El planteo de esta actividad tiene como objetivo que los estudiantes expliciten sus concepciones sobre los fenómenos de interferencia y difracción de la luz y lleguen a realizar inferencias acerca de cuáles son los factores que influyen en las características de los patrones de intensidad luminosa que se obtienen, a partir de la observación de los mismos.

D.1. La experiencia cotidiana y el conocimiento previo

En la historia de la ciencia se pone de manifiesto la enorme dificultad de los científicos para considerar el fenómeno de la difracción como ondulatorio y en consecuencia, las dificultades asociadas al cambio de paradigma. Huygens usó una analogía con las crestas de agua en un estanque para construir un modelo de la propagación de la luz frentes de onda y sin embargo, no pudo “ver” el fenómeno de la difracción como un nuevo fenómeno ondulatorio a causa de un particular interés en tratar de explicar la propagación rectilínea de la luz a través su modelo geométrico. Newton también impuso el peso de su autoridad contra toda teoría ondulatoria a causa de que con ella no veía explicación posible a la “verdad experimental” de que la luz se propaga en línea recta. En este aspecto, cabe resaltar que una de las experiencias más cotidianas de los estudiantes es la propagación rectilínea de la luz.

Además, es frecuente que los fenómenos de interferencia y difracción se presenten en la instrucción formal y libros didácticos como introducción a la óptica ondulatoria después de haber abordado los fenómenos de reflexión y refracción de la luz con la introducción del concepto de “rayo luminoso” (Young y Freedman, 2013; Serway y Jewett, 2005; Tipler, 1996). De esta manera, explicar la formación de imágenes por lentes y espejos y la formación de sombras y penumbras por orificios y obstáculos exige a los estudiantes una especie de adiestramiento en realizar diagramas de “marcha de rayos”. Sería fácil para ellos confundir un patrón de difracción con una región de sombra y penumbra si recientemente atribuyeron ese efecto al hecho de que la fuente no es puntual sino extensa y que la luz se propaga en forma rectilínea.

Las consideraciones expuestas llevan a plantear una estrategia didáctica donde el estudiante pueda explicitar sus consideraciones sobre la formación de patrones de interferencia y difracción en una situación experimental, para discutir a partir de allí sobre los modelos que explican esos resultados experimentales.

D.2. Sistema experimental y predicciones

Se considera en primer lugar un sistema experimental formado por una fuente, una doble ranura y una pantalla, donde la distancia d entre ranuras es aproximadamente 0,1 mm y el tamaño a de la abertura de las ranuras es también aproximadamente 0,1 mm. Se solicita la predicción de lo que se observaría en la pantalla con la fuente encendida en cada una de las siguientes situaciones:

- a) se utiliza como fuente luminosa un haz láser;
- b) se utiliza como fuente luminosa una lámpara incandescente común.

En segundo lugar se solicitan las mismas predicciones en un sistema experimental formado por una fuente, una ranura de ancho aproximado 0,1 mm y una pantalla.

A continuación se realizan las observaciones en las dos situaciones y con ambos tipos de fuentes y se genera la discusión en los grupos de trabajo.

En virtud de los reportes de la investigación educativa y a partir de la propia experiencia docente, se espera que las predicciones estén basadas en la óptica geométrica y que los resultados experimentales sorprendan a los estudiantes, en especial en el caso de la difracción. En general, el estudiante usa el modelo más sencillo, el que puede explicar fenómenos de su vida cotidiana, o de la enseñanza formal relacionados con sistemas experimentales similares al que ahora enfrenta, es decir fuente común-orificio/obstáculo-pantalla (formación de sombras y penumbras). Desde la perspectiva de Vergnaud, interpretamos que han logrado desarrollar un esquema efectivo basado en la propagación rectilínea de la luz, pero ese esquema no cuenta con invariantes operatorios que permitan reconocer sus límites de validez.

Se espera también que la discrepancia de los resultados experimentales con sus predicciones represente un factor de motivación para generar explicaciones de los mismos. Implica una nueva instancia de abordaje para los conceptos de coherencia espacial y temporal de trenes de onda que interfieren, a partir del análisis de los distintos mecanismos de emisión de las dos fuentes utilizadas, de las características de cada una de ellas y de los órdenes de magnitud involucrados en el sistema experimental.

D.3. Observaciones: estudio experimental cualitativo

La Actividad 1 continúa con un estudio experimental cualitativo exhaustivo acerca de cómo se modifican los patrones de interferencia y difracción obtenidos con la fuente láser, cuando se cambia el ancho de las ranuras o la distancia entre ranuras, y también cuando se utilizan sistemas de más de una ranura. El uso de una fuente de luz láser garantiza la coherencia de las ondas que interfieren y se pueden observar fácilmente los patrones de intensidad luminosa en la pantalla. Para ello los estudiantes disponen de dispositivos con ranuras simples, dobles y múltiples, de ancho variable y de separación variable.

En la sala de óptica del laboratorio de la institución, se puede trabajar con el equipo experimental de tal manera que las paredes actúen de pantalla. Generalmente la distancia entre la/s rendija/s y la pared es de aproximadamente dos metros, por lo que es factible distinguir claramente los máximos de los mínimos, como se observa en la figura 8.

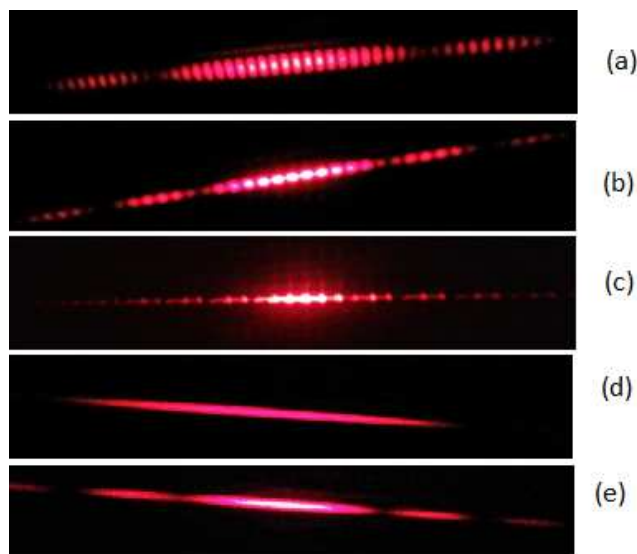


FIGURA 8. Fotografías de resultados experimentales. (a) patrón de interferencia y difracción de dos rendijas de ancho 0,04 cm y separación 0,5 mm; (b) patrón de interferencia y difracción de dos rendijas de ancho 0,04 cm y separación 0,25 mm; (c) patrón de interferencia y difracción de 5 rendijas de ancho 0,04 cm y separación 0,25 mm; (d) patrón de difracción de una rendija de ancho 0,02 mm; (e) patrón de difracción de una rendija de ancho 0,04 mm.

En esta instancia se plantea la discusión grupal para explicar los resultados observados en la pantalla (posición de los máximos y mínimos de intensidad luminosa), retomando nuevamente el análisis con los gráficos de círculos concéntricos y profundizando de esta manera los significados de conceptos tales como frecuencia, longitud de onda, diferencia de fase, coherencia espacial y temporal, intensidad de campo eléctrico, interferencia constructiva, interferencia destructiva, patrón de intensidades, modulación, etc. Se puede también trabajar con más de una transparencia para simular varias rendijas y explicar cualitativamente por qué los máximos de interferencia se ven más definidos y más intensos.

Algunas de las cuestiones que se pueden plantear a los alumnos para guiarlos en el proceso de entender la complejidad del modelo, de las representaciones asociadas al mismo y del sistema visual como sensor de las magnitudes involucradas son las siguientes:

¿Qué vería en el espacio entre la rendija iluminada por el láser y la pantalla si hubiera humo o polvillo de tiza en el ambiente? ¿Podría distinguir en algún punto de la trayectoria (línea) que corresponde a la zona del plano donde se tiene interferencia constructiva, la variación temporal de la intensidad luminosa si miro a ese punto o coloco un sensor como el fotómetro en ese punto? ¿Podría distinguir los máximos y mínimos de intensidad luminosa a lo largo de la línea de interferencia constructiva máxima si pudiera fotografiar desde arriba las líneas de interferencia constructiva? ¿Hay diferencias entre los patrones de dos rendijas y de una rendija? ¿De qué dependen? ¿Por qué con luz blanca no se ve en la pantalla lo mismo que con el láser? ¿Cómo se pueden explicar los patrones de difracción? ¿Por qué son distintos a los de interferencia? ¿Se produciría interferencia por dos o más rendijas si no hubiera difracción a la salida de cada rendija?

E. ACTIVIDAD 2: Medición de la longitud de onda de un láser

La actividad consiste en medir la longitud de onda del láser, utilizando el sistema experimental que se muestra en la figura 9.

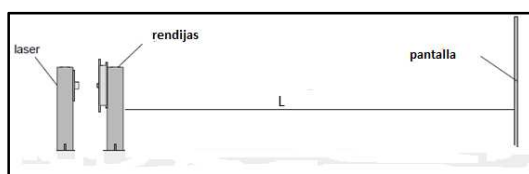


FIGURA 9. Sistema experimental para medir la longitud de onda λ del láser.

El planteo de esta actividad tiene por objetivo que los estudiantes comprendan los modelos teóricos que pueden explicar sus resultados experimentales. La actividad va adquiriendo ahora mayor complejidad metodológica, como la medición de la longitud de onda del láser utilizando rendijas simples o sistemas de doble rendija. Cualquiera de estas actividades mencionadas representa una instancia más de abordaje para dar sentido a los conceptos involucrados y contempla además objetivos específicos de la actividad experimental, tales como el desarrollo de competencias en la selección del método e instrumentos, mediciones y desarrollo de criterios experimentales para analizar supuestos de los modelos.

La propuesta contempla la revisión de los modelos teóricos sobre interferencia y difracción de la luz por parte de los estudiantes y una posterior síntesis grupal con el docente a cargo de las experiencias. Implica la revisión de las expresiones y de las distintas representaciones gráficas para la posición de máximos de intensidad luminosa y para la distribución de la intensidad luminosa en la pantalla, en el caso de difracción por una rendija y en el caso de la interferencia por dos o más rendijas (Young y Freedman, 2013; Serway y Jewett, 2005; Tipler, 1996).

Algunas de las cuestiones que puede abordar el docente para guiar las inferencias y/o discusiones en la síntesis grupal son las siguientes: ¿Cómo se interpretan las distintas representaciones del modelo de la óptica ondulatoria? ¿Cuáles son los supuestos de los modelos que describen el comportamiento del sistema experimental? ¿Cómo se podrían controlar estos supuestos en la actividad experimental? ¿Cuáles son las características del láser? ¿Conviene medir la longitud de onda utilizando el fenómeno de la interferencia por dos rendijas o utilizando la difracción por una rendija? ¿Cuál es el criterio para controlar la validez de la hipótesis de ángulo pequeño en la expresión?

F. ACTIVIDAD 3: Medición del número de líneas por unidad de longitud en redes de difracción. La difracción en CD y DVD

Esta actividad tiene como objetivos que los estudiantes comprendan los modelos teóricos que pueden explicar sus resultados experimentales, que otorguen mayor significación a los conceptos y que afiancen las competencias intrínsecas de la actividad experimental. Profundiza el análisis de la interferencia por varias rendijas, agregando el estudio de elementos de uso cotidiano que producen fenómenos de interferencia y difracción observables con fuentes comunes (no coherentes).

La nueva situación consiste en la medición del número de líneas por unidad de longitud, en una red de difracción. En esta etapa del desarrollo de la propuesta didáctica los alumnos ya han tenido la oportunidad de realizar observaciones de patrones de interferencia de varias rendijas durante la Actividad 1, donde pueden visualizar máximos secundarios entre los máximos principales. Es conveniente aquí plantear una revisión a través de la analogía con la interferencia de las crestas de agua. Utilizando las transparencias con círculos, se superponen tres de ellas con un espaciamiento adecuado y se puede observar con claridad el máximo secundario entre dos máximos principales (Figura 10).

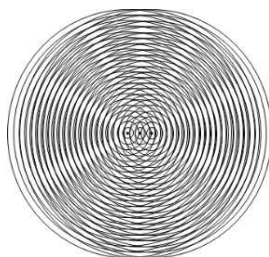


FIGURA 10. Superposición de tres frentes de onda circulares en papel y transparencia, donde se puede observar un máximo secundario entre dos máximos principales

La síntesis grupal sobre el modelo teórico que explica las observaciones de los patrones de interferencia con varias rendijas, puede traducirse en una motivación para iniciar una segunda ronda de observaciones, esta vez, con redes de difracción.

Cuando se ilumina con un haz de rayos paralelos de luz monocromática una rejilla con cientos o miles de ranuras por mm, el patrón es una serie de líneas muy pronunciadas en ángulos θ determinados por la relación

$$d \operatorname{sen}\theta_{m\acute{a}x} = m \lambda \qquad m = 0,1,2 \dots \qquad (1)$$

donde d es el espaciamiento entre rendijas.

Si se ilumina la rejilla con luz blanca con una distribución continua de longitudes de onda, a cada valor de m corresponde un espectro continuo en el patrón. La posición de los máximos para cada color depende del espaciamiento d entre líneas y de la longitud de onda λ de la radiación. En espectroscopía es importante distinguir longitudes de onda que difieren muy poco entre sí, por lo que las redes de difracción son muy utilizadas para estos fines. La tecnología actual puede producir redes con espaciamientos entre rendijas muy pequeños y una red típica rayada con 500 líneas por mm tiene un espaciamiento entre rendijas $d = (1/500) \text{ mm} = 0,002 \text{ mm}$. En general, se suele caracterizar las redes de difracción por el parámetro que indica la cantidad de líneas por mm.

Las observaciones resultan motivantes para los alumnos dadas las características del funcionamiento de estos dispositivos. Cuando trabajan con láser, el ángulo que subtiende el primer máximo del patrón de intensidad es muy grande comparado con los ángulos con los que habían trabajado en los casos anteriores. Cuando no están trabajando con el láser, y están encendidas las luces de la sala de óptica o de otro ambiente del laboratorio, se pueden observar los colores del arco iris, por reflexión en las mismas, o por transmisión si miran a través de ellas. Además de las redes de difracción con que cuenta el laboratorio, se entrega a los estudiantes un conjunto de CD y DVD “pelados” (a los que se les quitó la capa reflectora) y sin “pelar”, que actúan como redes de transmisión o redes de reflexión, respectivamente. Algunas de estas observaciones se presentan en las figuras 11, 12 y 13.



FIGURA 11. (a) Patrón de intensidades en una pantalla, obtenido en el laboratorio con una fuente láser y una red de 600 líneas por mm; (b) Patrón obtenido en el laboratorio con una fuente láser y una red de 1000 líneas por mm.



FIGURA 12. Fotografías de los patrones obtenidos en el laboratorio con distintas redes de difracción, mirando a través de la red una linterna de led alejada aproximadamente 5 m. Las fotografías se obtuvieron reemplazando el ojo por una cámara fotográfica.



FIGURA 13. (a) y (b) Descomposición de la luz blanca por interferencia en los surcos de un CD. Figuras de libre disposición en la web; (c) Fotografía de arco iris obtenido en la pared, por reflexión de un delgado haz de luz solar sobre un DVD; (d) Detalle de la fotografía anterior (c).

Para la medición del número de líneas por mm de una red de difracción, los estudiantes pueden usar la expresión (1), tomando como dato conocido ahora la longitud de onda λ del láser y midiendo el ángulo θ . A partir de este cálculo, se puede conocer cuántas líneas tiene el dispositivo por cada mm.

Durante las observaciones y durante todo el desarrollo de la actividad de medición, el docente puede realizar preguntas que ayuden a los estudiantes a explicitar paulatinamente sus ideas y razonamientos, y que orienten los pasos a seguir en el desarrollo de la misma. Algunas cuestiones a abordar podrían ser las siguientes: ¿Por qué se ve el espectro de colores al mirar a través de una red de difracción? ¿Por qué los CD o DVD reflejan los colores si incide luz blanca? ¿Por qué con una red de difracción y luz blanca común puedo ver un patrón estable de intensidades si la fuente no es coherente? ¿Qué otros fenómenos cotidianos conocen donde se manifieste este fenómeno? ¿Cuáles son los supuestos de los modelos que describen el comportamiento del sistema experimental? ¿Cómo se podrían controlar estos supuestos en la actividad experimental? ¿Cómo procederían para evaluar la validez de la hipótesis de ángulo pequeño en esta situación? ¿Cómo se calcula la incerteza de la medición si no es válida la aproximación de ángulo pequeño?

G. ACTIVIDAD 4: Observación y explicación de patrones de interferencia y difracción con fuentes comunes

El objetivo de esta actividad consiste en comprender que el grado de coherencia es una característica del campo luminoso y no depende solamente de la fuente que está emitiendo. A este objetivo general contribuyen diversos objetivos específicos tales como comprender las limitaciones de las distintas representaciones gráficas de la radiación luminosa, comprender los conceptos de tiempo de coherencia y longitud de coherencia para una fuente real, comprender los conceptos de coherencia espacial y coherencia temporal para un sistema óptico y desarrollar habilidades para explicar resultados experimentales cualitativos.

La actividad plantea una situación de ruptura con la hipótesis de onda plana y monocromática. El uso del láser en las actividades experimentales permitía sostener esta hipótesis, por sus características de coherencia, obteniendo fácilmente patrones observables de intensidad luminosa en la pantalla. Si ahora cambiamos la fuente en los mismos sistemas experimentales utilizados en las Actividades Introdutorias o en la Actividad 1, por una fuente extensa de luz blanca, no se observa nada en la pantalla. Podríamos pensar que no se ve por una cuestión de falta de contraste, dado que la intensidad de radiación a la salida de la/s rendija/s es muy baja comparada con la del láser, pero si reemplazamos la pantalla por el ojo o por una pequeña cámara a la salida de la/s ranura/s, tampoco se observa ningún patrón definido de intensidades. Y surge así la primera cuestión ¿Por qué no se pueden formar patrones de interferencia y/o difracción con fuentes comunes? Cabe aclarar aquí que el ojo recoge toda la radiación a la salida del sistema y actúa como sistema convergente que “trae” la imagen del infinito al plano focal de la retina.

Ahora, si miramos hacia una “fuente lejana” a través de la/s rendija/s con el ojo o usamos la cámara, se pueden observar patrones de interferencia y/o difracción. Recordemos también que al trabajar con redes de difracción, el estudiante puede evidenciar que se pueden “ver” patrones nítidos aún con fuentes comunes. ¿Qué ha cambiado en la situación para que ahora se puedan ver los patrones?

La actividad que se plantea entonces, consiste en una serie de observaciones utilizando el ojo como sensor a la salida del sistema de ranuras, del patrón de intensidades de fuentes comunes a distintas distancias de las ranuras. Se requiere entonces estudiar el grado de coherencia espacial y temporal de un sistema experimental para explicar por qué bajo ciertas condiciones sí se pueden observar patrones estables de interferencia y/o difracción, aún con fuentes extensas y no monocromáticas. Representa una actividad de síntesis de la temática, al poner en evidencia que la coherencia del sistema no es sólo una característica de la fuente, sino que depende también de las dimensiones del sistema experimental y de las características del

sensor. Del análisis sobre el tamaño de la fuente y la monocromaticidad de la misma en relación a las dimensiones del sistema experimental (Landsberg, 1983), se concluye que la separación entre ranuras debe cumplir ciertas condiciones para que se pueda observar un patrón de intensidad estable. En las expresiones 2 y 3, d representa la distancia entre ranuras, s la extensión de la fuente en la misma dirección de d , L es la distancia entre la fuente y ranuras, y D la distancia entre las ranuras y la pantalla.

$$2d \ll \frac{1}{4} \frac{\lambda L}{s} \quad (2)$$

$$2d \ll \frac{1}{4} \frac{D}{y} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (3)$$

¿Cómo podríamos realizar las experiencias de interferencia por dos rendijas o de difracción por una rendija si la fuente no es ideal? De hecho, la historia de la ciencia muestra que estas experiencias se realizaron ya en el siglo XVII (Pescic, 2007), y lo asombroso es que los patrones de intensidad luminosa se registraron en una pantalla. ¿Cómo pudieron hacerlo en aquella época? Sin duda, la respuesta a esta pregunta puede resultar en una motivación de los alumnos para estudiar con más profundidad el fenómeno.

Los estudiantes estiman distancias y tamaño de las fuentes y rendijas, y tratan permanentemente de explicar los resultados de esas observaciones. El docente puede ir formulando preguntas y alentando las observaciones e inferencias en los grupos de trabajo, mientras desarrollan las actividades. Algunas de las cuestiones a plantear son las siguientes:

¿Por qué no se ven los patrones de interferencia y/o difracción en el sistema experimental fuente-ranuras-pantalla, de la Actividad 1, cuando se utiliza una fuente común de filamento? ¿Es una cuestión de intensidad luminosa y falta de contraste suficiente, u obedece a otra cuestión? ¿Cómo piensan que se pudieron observar los patrones de difracción en el siglo XVII? ¿Cuáles pudieron haber sido las condiciones experimentales que se utilizaron? ¿Uds. podrían repetir esas experiencias? ¿Por qué se ven patrones de intensidad luminosa y se pueden distinguir distintos máximos observando los tubos fluorescentes del aula, con distintas redes de difracción?

Se debe notar que al realizar todas las observaciones utilizando el ojo como sistema óptico a la salida de las ranuras, no es factible variar la distancia entre ranuras y pantalla (D) para estudiar cómo depende el grado de coherencia de esta variable. Sin embargo se puede variar la distancia entre ranuras para ver cómo el sistema se vuelve más coherente o menos coherente.

IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

A. Descripción de la metodología de investigación

Las implicaciones que tiene el marco teórico que guía esta investigación y los objetivos que se han definido para la misma, llevan al planteo de un enfoque metodológico de tipo cualitativo, en una perspectiva interpretativa. Cuando los estudiantes enfrentan una situación problemática, toda la acción que despliegan, tales como mediciones y secuencia de cálculos, depende de teoremas en acción y de la identificación de elementos que les parecen pertinentes (conceptos en acción) y que provienen tanto de su instrucción formal como de su vivencia cotidiana. Pero la mayor parte de ese conocimiento en acción permanece implícita. Sacar a luz ese conocimiento implícito requiere entonces de una variedad de instrumentos y de un profundo trabajo de interpretación.

En el trabajo con la propuesta didáctica, el investigador actúa en el rol de docente mientras se recoge la información, con el propósito de comprender cómo se produce la conceptualización en el ámbito del laboratorio de física durante el desarrollo de las actividades y evaluar los resultados obtenidos. En su rol de docente, en forma simultánea, actúa como mediador, identificando dificultades en la marcha de las actividades y planteando estrategias superadoras de esas dificultades. Estos propósitos sitúan a esta investigación dentro de las características del diseño denominado investigación- acción, según la tipología de diseños que presentan Hernández, Fernández y Baptista (2010).

En la práctica, es sumamente difícil describir con detalle la actividad individual de los alumnos como así también sus interacciones en el grupo de trabajo, sin descuidar el rol docente dentro de los grupos y la implicancia del papel del profesor desde el marco teórico. Se han utilizado en forma complementaria diversos instrumentos que permiten recoger datos en formato textual, gráfico y visual. Los instrumentos consisten en grabaciones en audio o video del discurso, acciones e interacciones en el aula de los participantes, notas del investigador registrando detalles de lo acontecido en cada jornada, reportes escritos de los alumnos en el que usan representaciones simbólicas además del lenguaje y evaluaciones finales escritas con las mismas características de los reportes.

Para analizar los datos se ha utilizado la técnica del análisis de contenido cualitativo (Krippendorff, 1997). En este estudio se ha tomado como unidades de análisis frases y párrafos expresados por los estudiantes, cuando se trata de datos textuales y las acciones que ejecuta el estudiante, en el caso de los videos.

A partir de la lectura de las notas de campo, de la escucha reiterada de la grabación en audio y de la revisión de los videos en caso que correspondiere, se han identificado o se han inferido los elementos de los esquemas de los estudiantes en los cuales se focalizó la investigación. Generalmente, el ciclo debe repetirse por lo menos una vez más, antes de proceder a la identificación y registro escrito de los elementos de los esquemas. Se analizan cada una de las actividades y se va llenando un cuadro para cada uno de los estudiantes, donde se registran los elementos de los esquemas que se han identificado o inferido.

Para garantizar la fiabilidad interna del estudio, estos primeros resultados se discuten luego con otro docente que tiene experiencia en investigaciones desde este marco teórico. El investigador expone las razones por las cuales considera que determinadas expresiones de los estudiantes corresponden a inferencias, reglas de acción o teoremas en acción y de qué manera se infieren las metas o sub-metas durante la actividad experimental, recurriendo en cada caso a los registros disponibles. Se revisan las discrepancias hasta llegar a un consenso. Además, los registros en audio, en video, las notas de campo y las producciones de estudiantes están disponibles como respaldo de la interpretación de resultados.

B. Caracterización de la muestra

La implementación de la propuesta didáctica se desarrolló durante tres jornadas semanales de tres horas de duración cada una, a las que se suma una jornada de evaluación individual. El diseño de la investigación contempló la implementación parcial de la propuesta didáctica a modo de prueba piloto en tres grupos pequeños de estudiantes de una cohorte anterior, dirigida a la identificación de pautas para el ajuste de las diversas actividades (tareas y sub-tareas) experimentales, como así también a la identificación de pautas para el ajuste en la implementación de los instrumentos utilizados para recoger datos. Este grupo de alumnos pertenecían a un turno de cursado identificado como B.

La implementación definitiva de la propuesta se realizó con estudiantes del ciclo básico de ingeniería que cursaban la asignatura Física III, quienes tenían conocimiento de los propósitos de la investigación, y de su rol de participantes. Desde el punto de vista de Hernández y otros (2010) tiene el carácter de muestra por oportunidad y de muestra homogénea. La figura 15 describe el mecanismo de implementación de la propuesta en la presente investigación.

Se trata de seis grupos pequeños de alumnos de ingeniería, conformados por tres o cuatro estudiantes cada uno, asignados al docente investigador durante el semestre en que se realiza la observación, dentro del formato de trabajo en el laboratorio ya explicitado. Tres de estos grupos pequeños corresponden a la clase codificada como D en esta investigación y los otros tres a la clase codificada como E. Las respuestas de cada estudiante también se han codificado para su presentación.

Resulta difícil en la práctica grabar simultáneamente a todos los grupos y realizar notas de campo detalladas sobre todos ellos mientras se está actuando como investigador-docente, por lo cual en cada clase los registros se “focalizaron” en un solo grupo de estudiantes, señalados en la figura 14 con líneas punteadas. Sin embargo, en la medida de lo posible se realizan registros para todos los grupos aunque no resulten muy detallados, dada la utilidad de la información para contextualizar los resultados del grupo “foco” en relación a su interacción con los demás.

En este reporte se presentan resultados obtenidos en la implementación definitiva de la propuesta didáctica en la clase de laboratorio identificada como D.

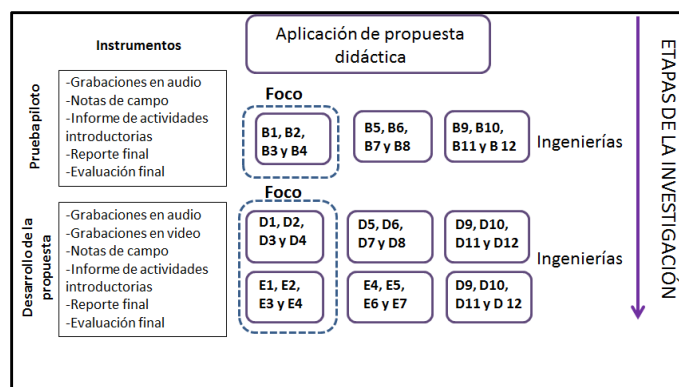


FIGURA 14. Esquema de la aplicación de instrumentos.

V. PRESENTACIÓN E INTERPRETACION DE RESULTADOS

El análisis de los datos en la prueba piloto permitió valorar la importancia del detalle en las notas de campo para contextualizar las intervenciones que se registran con las grabaciones de audio o video. Las notas de campo, redactadas inmediatamente después de la intervención (o segmentos de la misma) con los estudiantes, están destinadas a proporcionar el contexto en que se realiza la actividad y registrar circunstancias que podrían no aparecer en los diálogos. Por ejemplo, las predicciones frente al sistema experimental se realizan en conjunto con todos los estudiantes y se precisa especial atención a los gestos de quienes no interactúan verbalmente. En la mayoría de los casos realizan gestos de asentimiento o negación e a las predicciones de otros compañeros, que permiten caracterizar cuál es su modelo implícito inicial.

La experiencia con la prueba piloto señaló también la necesidad de incorporar como instrumento para recoger datos la grabación en video de las actividades que implican medición de magnitudes (longitud de onda del láser, número de líneas por mm de la red). En la grabación en audio no se manifiestan las actividades gestuales, como todas las secuencias de pequeñas acciones coordinadas involucradas en el proceso de medición y las notas de campo del investigador no cubrían todos los aspectos en forma detallada. Se consideró que la descripción sería más ajustada con este registro adicional.

A. Caracterización de los esquemas que desarrollan los estudiantes

Los elementos de los esquemas, conceptos en acción, teoremas en acción, reglas de acción, metas e inferencias identificados o inferidos mediante el análisis de contenido de los distintos registros se presentan en las Tablas I, II y III para tres (D1, D2 y D3) de los cuatro estudiantes que integraban el grupo en el cual se focalizó la toma de registros en la clase de cursado D (Figura 15). El estudiante D4 participaba muy poco en las interacciones, por lo cual no se incluye en la tabla. Las tablas presentadas pretenden caracterizar cómo se van acomodando, modificando o reforzando los elementos de sus esquemas iniciales a medida que van encarando distintas situaciones.

En el análisis de contenido de los distintos registros, los elementos de los esquemas pueden estar explícitos, es decir, son textuales. En este caso decimos que se identifican los mismos y se escriben con comillas en las tablas. Para identificar en los registros qué es un concepto en acción, un teorema en acción, una inferencia o una meta se tiene en cuenta la definición de los mismos desde el marco teórico, explicitada en este trabajo en el ítem Marco Teórico. Por ejemplo, la proposición “el láser emite un haz muy fino” (estudiante D1) se considera un teorema en acción pues es una proposición que relaciona conceptos y expresa algo acerca de la situación. Dentro de este teorema en acción se identifican los conceptos en acción “láser”, “haz” y el predicado “muy fino”. Lo mismo para la proposición “el filtro transforma la luz blanca en luz monocromática” (estudiante D1): expresa algo acerca de la realidad (la situación) y relaciona los conceptos en acción “filtro”, “luz blanca” y “luz monocromática”. La proposición “con láser y una ranura se verá una línea” (estudiante D1) se interpreta como una inferencia basada en los teoremas en acción “el ancho del haz láser es mayor que el ancho de la ranura” y “la luz se propaga en forma rectilínea”.

Cuando los conceptos en acción o teoremas en acción no están explícitos en el discurso oral o escrito de los estudiantes, se infieren de la conducta frente a la situación problemática, de la secuencia de acciones que ponen en juego o de los gráficos que eventualmente realizan, siempre teniendo en cuenta la definición desde el marco teórico de estos elementos de los esquemas. Por ejemplo, la figura 15 muestra un gráfico realizado por el estudiante D, que permite inferir los siguientes teoremas en acción: “el ancho del haz láser es mayor que el ancho de la ranura” y “la luz se propaga en forma rectilínea”. En la Tabla I se escriben sin comillas por tratarse de una inferencia del investigador.

La figura 15 presenta los diagramas realizados por D9 para justificar sus predicciones. Se puede inferir el teorema en acción “la luz se propaga en forma rectilínea” y el razonamiento involucrado (inferencias) que realiza en función de comparar el ancho del haz láser con las dimensiones (largo y ancho) de la abertura.

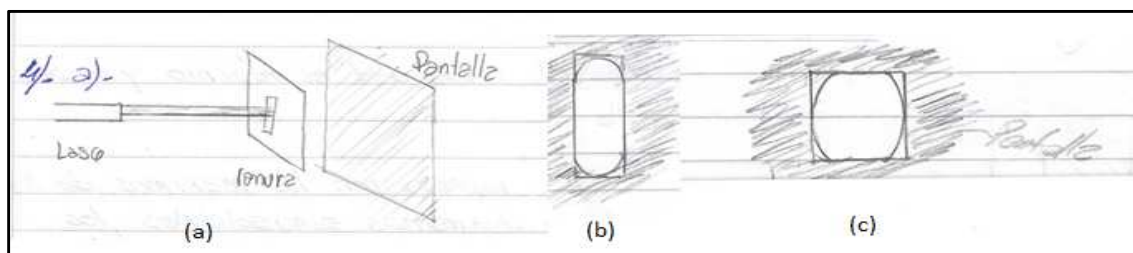


Figura 15. Diagramas realizados por el estudiante D9. (a) Esquema del dispositivo experimental, (b) diagrama que ilustra lo que se verá en la pantalla si el ancho del haz láser es mayor que el ancho de la abertura pero menor que su longitud y (c) diagrama que ilustra lo que se verá en la pantalla si el ancho del haz láser es menor que el ancho y longitud de la abertura.

Las reglas de acción y metas o sub-metas de la actividad, en general se infieren de las grabaciones en audio o de las grabaciones en video, a partir de la secuencia de acciones que realiza el estudiante. Para el análisis interpretativo también se tiene en cuenta la definición de estos elementos desde el marco teórico. Muy pocas de ellas son explícitas. Por ejemplo, se puede ver al estudiante D1 explorando todas las posibilidades del dispositivo experimental, con varias ranuras y con distintas aberturas, para tratar de describir el comportamiento del sistema. Se interpreta que las reglas de acción en este caso son implícitas y consisten en “variar el ancho de la ranura” en función de la metas “describir los resultados” y “explicar de qué depende la forma del patrón de intensidades”. Otras veces la regla de acción son explícitas tales como “uso *regla de tres simple* para calcular el parámetro de la red”, o “ahora hay que propagar los errores”.

Se debe destacar que tanto las reglas de acción como las inferencias son proposiciones, por lo que en algunos casos una inferencia puede actuar como una regla de acción (que se refiere a la conveniencia de las acciones a seguir). Por ejemplo, la regla de acción “conviene medir la mayor distancia posible entre el máximo central y el de orden m ” proviene de la inferencia: “el error relativo del cálculo disminuye a medida que se miden valores más grandes de la distancia entre los máximos, en consecuencia, conviene medir hasta el máximo más alejado”. En este sentido, hay que analizar en detalle en qué contexto usa las proposiciones el estudiante.

De igual forma se procede para tablas II y III correspondientes a los estudiantes D2 y D3.

TABLA I. Caracterización de los elementos que conforman el esquema del estudiante D1 en cada actividad desarrollada.

	Conceptos en acción	Teoremas en acción	Estudiante D1 Inferencias	Reglas de acción	Metas y/o sub-metas
Predicciones	“Luz blanca “ “Ranura pequeña” “Ranuras muy cercanas” “Fuente láser” Propagación rectilínea	El ancho del haz láser es mayor que el ancho de la ranura. La luz se propaga en forma rectilínea	“Con láser y una ranura se verá una línea” “Con láser y dos ranuras se verán dos líneas” “Con luz blanca no se ve porque es poco intensa”	Se debe usar marcha de rayos para justificar	Comprobar experimentalmente
Observaciones	“Interferencia” “Difracción” “Haz muy fino” Distribución de máximos de intensidad “Patrón” de intensidad luminosa	“El láser emite un haz muy fino.” “La fuente común emite en todas direcciones”. “El patrón de difracción es más ancho que la ranura”	“Los máximos están más separados si las ranuras están más juntas” “El patrón se abre más si la ranura es más angosta”	Variar el ancho de la ranura para ver cómo cambia el patrón en la pantalla	Describir la relación entre las variables Explicar la relación entre variables
Medición de λ	“Longitud de onda” Mínimos de difracción “Error relativo de la medición”	“El ángulo a medir es pequeño”	Si el ángulo es grande, no vale la aproximación por <i>ángulo pequeño</i> . Si se quiere minimizar el error relativo hay que medir hasta el máximo más alejado.	Antes de usar la expresión simplificada se debe comprobar si el ángulo se puede considerar pequeño. Conviene medir hasta el máximo más alejado	Calcular λ Propagar errores. Calcular el valor acotado de λ
Medición del espaciamiento en una red	“Ángulo hasta el primer máximo” “Colores” “Interferencia” “Longitud de onda” “Luz blanca”	“El ángulo es grande” “No se ve el tercer máximo” “A través de la red se ven los colores de la luz blanca”	El ángulo es grande y en consecuencia no se puede aproximar el $\sin \theta$ por $\text{tg } \theta$.	“Uso regla de tres simple para calcular el número de líneas por mm”	Explicar lo que se observa a través de la red Calcular espaciamiento de la red
Interferencia con fuentes reales	“Fuente extensa” “Luz blanca” “Luz monocromática” “Fuente alejada”	“La luz blanca no es coherente” El filtro transforma la luz blanca en luz monocromática	“Si se usa una red de difracción, no se necesita que la fuente esté tan alejada para ver el patrón de interferencia”	Variar el tipo de fuente. Acercarse y alejarse para observar Usar distintos filtros Hacer tablas de observaciones	Explicar por qué se observan patrones estables de interferencia con fuentes comunes

TABLA II. Caracterización de los elementos que conforman el esquema del estudiante D2 en cada actividad desarrollada.

	Conceptos en acción	Teoremas en acción	Estudiante D2 Inferencias	Reglas de acción	Metas y/o submetas
Prediccio-nes	“Luz blanca” “Interferencia” “Propagación rectilínea”	La luz se propaga en forma rectilínea El láser emite en una sola dirección Dos ranuras producen interferencia.	Con una ranura y láser se verá una línea Con dos ranuras habrá interferencia	Cuando hay dos ranuras aparece el fenómeno de interferencia	Comprobar experimentalmente
Observaciones	“Interferencia” “Difracción” “Fuente direccionada” Patrón de intensidades “Máximos y mínimos de interferencia”	“El láser emite en una sola dirección” “El haz de la fuente común se abre” Las dos ranuras producen interferencia.	Los máximos están más separados si las ranuras están más juntas El patrón se abre más si la ranura es más angosta. Los patrones de dos ranuras y de una ranura no son iguales	Para ver cómo cambia el patrón hay que variar el ancho de la ranura y la distancia entre ranuras	Describir Explicar
Medición de λ	“Longitud de onda” “Máximos de interferencia” Error relativo de la medición Valor acotado	El ángulo a medir es pequeño.	Cuanto mayor es la distancia “y” menor es el error relativo, entonces conviene medir hasta el último mínimo de difracción	“Conviene medir hasta el último mínimo de difracción” Se debe aplicar algún criterio para ver si el ángulo se puede considerar pequeño.	Calcular λ Propagar errores. Calcular el valor acotado de λ
Medición espaciamiento en una red	“Ángulo hasta el primer máximo” “Longitud de onda” “Luz blanca” “colores”	“El primer máximo está muy separado del centro” “La red de difracción puede separar los colores”.	Los ángulos son grandes y entonces no se puede usar la fórmula aproximada.	Se usa “regla de tres” para calcular el número de líneas por mm de la red	Calcular espaciamiento de la red Calcular número de líneas por mm.
Interferencia con fuentes reales	“Fuente extensa” “Fuente alejada” “Fuente puntual” “Luz monocromática”	La luz blanca no es coherente “El filtro transforma la luz blanca en luz monocromática”.	“Si la fuente está muy alejada, se puede considerar puntual”	Estimar distancias Observar patrones para fuentes cercanas y muy alejadas Comparar resultados.	Explicar por qué se ve patrones con fuentes no coherentes

TABLA III. Caracterización de los elementos que conforman el esquema del estudiante D3 en cada actividad desarrollada.

	Conceptos en acción	Teoremas en acción	Estudiante D3 Inferencias	Reglas de acción	Metas y/o submetas
Predicciones	Propagación rectilínea "Luz blanca" "Espectro de colores" "Fuente láser"	La luz se propaga en forma rectilínea. El láser emite un haz colimado, en una sola dirección. "Con luz blanca el haz se dispersa"	"El láser emite en una sola dirección, entonces se ve la forma de la ranura" "Con láser y dos ranuras se verán dos líneas porque el láser es direccionado" Con luz blanca se verá iluminada la pantalla porque la fuente emite en todas direcciones	Se debe usar marcha de rayos para demostrar.	Comprobar experimentalmente
Observaciones	Patrón de intensidades Máximos de intensidad Mínimos de intensidad Difracción	Un patrón es una distribución de intensidades en la pantalla Los patrones de una rendija y de dos rendijas no son iguales	Cuando están más cerca las ranuras, los máximos están más separados. Cuando disminuye el ancho de la rendija "se abre el patrón"	Las dos rendijas se comparan a dos fuentes	Describir Explicar
Medición de λ	"Longitud de onda" "Máximos de interferencia" "Mínimos de difracción" "Error relativo"	El láser tiene una sola longitud de onda La difracción es como una interferencia	Los mínimos están más alejados cuando más angosta es la ranura.	Se debe aproximar la expresión del modelo considerando "ángulo pequeño". Conviene medir la distancia para el mínimo más alejado.	Medir las distancias Propagar errores Calcular λ
Medición del espaciamiento en una red	"Dispersión de la luz" "Colores de la luz blanca" "Máximos de interferencia"	La red puede "dispersar" la luz blanca	Si el ángulo hasta el primer máximo depende de λ , entonces será diferente para cada color	Se debe usar la misma fórmula de interferencia por dos ranuras Para calcular el número de líneas por mm, "uso regla de tres".	Medir la distancia al primer máximo. Calcular el ángulo. Calcular la distancia d entre líneas
Interferencia con fuentes reales	"Fuente extensa" "Fuente alejada" "Fuente puntual" "Luz monocromática" Visibilidad del patrón	"Una fuente extensa no produce ondas coherentes" "Un fuente de luz blanca no produce ondas coherentes"	Si la fuente está muy alejada, se puede considerar puntual "Si las rendijas están muy juntas, no necesito que la fuente sea tan puntual"	Solo se debe estimar las distancias Observar patrones para fuentes cercanas y muy alejadas y comparar resultados	Explicar por qué se ve patrones con fuentes no coherentes

En las tablas presentadas se puede observar que:

- Las columnas conceptos en acción y teoremas en acción, recorridas en forma temporal, muestran cómo el estudiante va incorporando paulatinamente más conceptos en acción y teoremas en acción del ámbito de la óptica ondulatoria y de mayor grado de abstracción a medida que avanzan las actividades. También se observa cómo va re-utilizando los conceptos iniciales en las diversas situaciones experimentales.

- Las inferencias y las reglas de acción que se ponen en juego a medida que avanzan las actividades, muestran una organización de la conducta (esquema) que tiende a integrar aspectos de la actividad experimental (tales como control de modelos y cálculo de incertezas) con el dominio progresivo del campo conceptual.

B. Cambios en la estructuración de los invariantes operatorios

La estructura propuesta por Galili permite interpretar los resultados de acuerdo a cómo se estructuran los invariantes operatorios de los estudiantes y cómo se van modificando en cada actividad.

En este punto cabe destacar que en la programación de la asignatura, coincidente con el desarrollo temático de los principales libros de texto consultados por los estudiantes del ciclo básico (Young y Freedman, 2013; Serway y Jewett, 2005; Tipler, 1996), los fenómenos de interferencia y difracción se estudian después de haber abordado los fenómenos de reflexión y refracción de la luz y formación de imágenes con un modelo simplificado basado en el concepto de “rayo luminoso”. Han adquirido así cierta experiencia en realizar “marcha de rayos” para explicar la formación de imágenes en óptica geométrica. Ahora, en una situación que involucra un sistema experimental del mismo tipo pero que difiere sustancialmente en el orden de magnitud de las dimensiones de los orificios, no considera este último aspecto y usa el modelo más sencillo, el que ha resultado tan exitoso en la explicación de fenómenos de su vida cotidiana y del comportamiento de sistemas experimentales en su enseñanza formal, tales como fuente común-orificio/obstáculo-pantalla, o fuente común-lente-pantalla (formación de sombras y penumbras y formación de imágenes reales y virtuales).

A una organización de este tipo, de los invariantes operatorios de los estudiantes, la denominamos Esquema Centrado en Modelo de Rayos (ECMR). Esta clase de respuesta no considera los límites de validez de la óptica geométrica, no dispone de invariantes operatorios que permitan identificar los aspectos relevantes de las situaciones presentadas. Ejemplo: “con láser y una ranura se verá una línea”, “con láser y dos ranuras se verán dos líneas” (estudiante D1)

Los resultados presentados muestran también respuestas centradas en el modelo de rayos (núcleo) para realizar predicciones con el sistema experimental láser-ranura-pantalla, pero que simultáneamente incorporan al cuerpo de la estructura el fenómeno de interferencia, como una imagen visual de franjas claras y oscuras, al predecir los resultados de dos rendijas iluminadas con fuente láser. Se podría interpretar que la estructura de sus invariantes operatorios tiene desdibujada la frontera entre el cuerpo y la periferia, de tal manera que los elementos de la periferia se reacomodan en la estructura. La figura 16 ilustra esta situación.

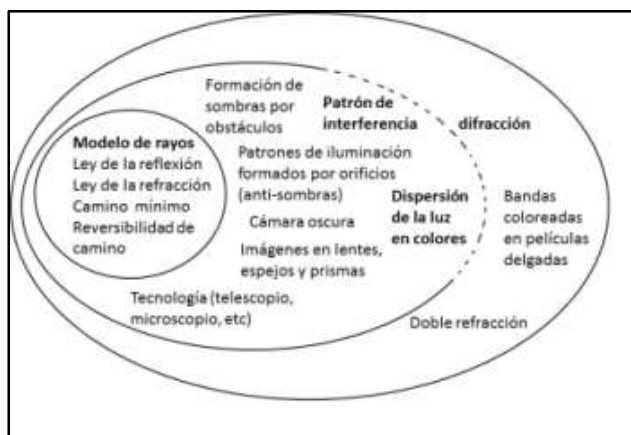


FIGURA 16. Estructura disciplina-cultura de la teoría de rayos durante el aprendizaje de los estudiantes. Adaptado de Galili, 2014.

Los registros de la implementación de la propuesta con el grupo D muestran una variedad de respuestas de este tipo. Las mismas se podrían interpretar como un continuo de posibilidades, en el cual los invariantes operatorios que corresponden a la óptica ondulatoria se van integrando en el cuerpo de esa estructura, de manera híbrida al inicio y tendiendo a desplazar del núcleo a los invariantes correspondientes al modelo de rayos en su última etapa. En esta re-estructuración le van otorgando nuevos significados a los conceptos iniciales. Se debe resaltar que así como en la historia de la ciencia muchos científicos no se identifican con una sola teoría, generalmente los estudiantes también muestran una “hibridización” de conocimientos durante su aprendizaje (Mc Dermott, 2001; Maurines, 2012; Bravo, 2007).

A esquemas como el de la figura 16 se los denominamos Esquema Híbrido (EH) en el marco de esta investigación. Por ejemplo: “Con una ranura y láser se verá una línea porque el láser es direccionado”, “con dos ranuras habrá interferencia” (estudiante D2). En este tipo de respuestas se mantiene el modelo de rayos, pero sin constituir ahora el núcleo de la estructura, si hay dos ranuras se desactiva la consideración de la propagación rectilínea de la luz.

Para dimensionar los logros obtenidos en el turno de cursado designado como D, se analizan las predicciones de todos los alumnos participantes antes de desarrollar las actividades experimentales, a partir de la grabación en audio y/o de los gráficos que realizan para justificar sus respuestas, antes de las observaciones. Se detectan los siguientes esquemas:

* Esquemas centrados en el modelo de rayos (ECMR). Los estudiantes D1, D3, D4, D6, D9, D10 y D12 realizan predicciones que combinan algunas de las siguientes afirmaciones, sin incorporar conceptos de la óptica ondulatoria:

- “Con láser y una ranura se verá una línea”
- “Con láser y dos ranuras se verán dos líneas”
- “Con luz blanca se verá una ranura ampliada”
- “Con luz blanca y dos ranuras se verán las dos ranuras superpuestas”

* Esquemas híbridos (EH). Los estudiantes D2, D5, D7, D8 y D11 realizan predicciones que combinan algunas de estas afirmaciones. En su razonamiento emplean conceptos de los dos modelos

- “Con dos rendijas hay interferencia” (con láser y fuente común)
- “Con una rendija y láser se verá una línea porque el láser emite en una sola dirección”
- “Con una rendija y luz blanca se verá dispersión”

Ninguno de los razonamientos presentados como ejemplos responde a una estructura ECMO. Todos se realizan desde un modelo centrado en la óptica de rayos o desde un modelo híbrido que incorpora acríticamente conceptos propios de la óptica ondulatoria.

Al final del desarrollo de la propuesta didáctica los estudiantes responden a una evaluación de carácter cuali-cuantitativo con el propósito de acreditar la aprobación de la actividad realizada y de evaluar el esquema que han logrado desarrollar. Para acreditar la aprobación, los resultados alcanzados se miden en términos de competencias, entendidas desde el marco teórico, como “la forma operatoria del conocimiento, que permite actuar y lograr éxito en una situación” (Vergnaud, 2013). Las competencias han sido seleccionadas entre los principales objetivos definidos en cada una de las actividades de la propuesta didáctica y las preguntas o problemas propuestos para la evaluación (Anexo) han sido sometidos a la revisión de pares docentes que se desempeñan en la misma asignatura.

De acuerdo a los criterios de corrección que se aplican en el ámbito de las experiencias de laboratorio en la institución, los estudiantes D7, D10 y D12 no reúnen las condiciones para calificar como aprobados. Los restantes estudiantes califican como aprobados, pero revelan algunas falencias en las competencias cognitivas referidas a la comprensión del concepto de difracción y de las condiciones para que el patrón sea observable. En las competencias de tipo metodológicas, la mayoría muestra un buen desempeño. La calificación de los estudiantes también ha sido discutida y consensuada con otro docente de la asignatura.

Según la tipología de modelos que se ha propuesto, un análisis de contenido de las respuestas de los estudiantes a las diferentes preguntas muestra el desarrollo, en distinto grado, de esquemas centrados en el modelo ondulatorio de la luz (ECMO) por parte de nueve de los doce estudiantes. Los resultados se consignan en la Tabla IV.

TABLA IV. Cambios en la estructuración de los invariantes operatorios de los estudiantes en la clase de laboratorio D.

Estudiante	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12
Esquema inicial (predicciones)	ECMR	EH	ECMR	ECMR	EH	ECMR	EH	EH	ECMR	ECMR	EH	ECMR
Esquema final (evaluación)	ECMO	ECMO	ECMO	ECMO	ECMO	ECMO	EH	ECMO	ECMO	EH	ECMO	EH

Los resultados indican que los estudiantes que han acreditado como aprobados han logrado una evolución desde esquemas iniciales del tipo ECMR o EH, hasta esquemas de tipo ECMO. Teniendo en cuenta la consideración de la teoría de campos conceptuales acerca del rol del esquema en el desarrollo de competencias: “un esquema organiza la conducta y la actividad de pensamiento” (Vergnaud, 2013), un buen desempeño (en términos de competencias) en las situaciones que se están evaluando solo sería posible si sus razonamientos están basados en esquemas que tienen una estructura del tipo ECMO.

VI. SÍNTESIS DE RESULTADOS

Los resultados referidos a los componentes de los esquemas de los estudiantes D1, D2 y D3 a lo largo del desarrollo de la propuesta, muestran una evolución en la estructuración de los mismos a medida que avanzan en el desarrollo de las actividades. Se detecta la incorporación paulatina de nuevos conceptos y teoremas en acción del ámbito de la óptica ondulatoria, asociados al incremento de inferencias y de reglas de acción que van determinando la organización de la conducta frente a las situaciones. Se observa la

reutilización permanente de invariantes operatorios en distintas situaciones, otorgándoles de esta manera cada vez más sentido, y el incremento de reglas de acción asociadas a la identificación de metas a lograr en cada actividad. Desde la tipología de esquemas que se ha propuesto, y a partir de las tablas que muestran cómo los estudiantes van activando cada vez más invariantes operatorios al abordar las distintas situaciones experimentales, se puede interpretar que los invariantes operatorios iniciales correspondientes al núcleo del ECMR, son desplazados del esquema a través de un reemplazo por conceptos que son más pertinentes para analizar la situación en algunos casos o mediante la asignación de nuevos significados a los conceptos que ya estaban utilizando.

Los estudiantes de la clase identificada como D manifiestan al iniciar las actividades experimentales, dificultades similares a las reportadas en la investigación educativa. Todas las respuestas a la actividad de predicción frente al sistema experimental se realizan desde el esquema denominado ECMR (esquema centrado en el modelo de rayos) o desde el esquema denominado EH (esquema híbrido). Aunque no se dispone de registros suficientes para caracterizar los esquemas de los estudiantes durante todas las actividades, se puede evaluar el esquema inicial y el final a partir de los registros de las predicciones y de la evaluación integradora. Los resultados obtenidos en la evaluación muestran que nueve de un total de doce estudiantes han calificado como aprobados en función de las competencias adquiridas. Y un análisis de contenido de las respuestas muestra la coincidencia de estos resultados con la evolución de los esquemas iniciales de los alumnos aprobados hacia esquemas del tipo ECMO.

Con respecto a cuestiones abiertas y factibles de profundizar detectadas en el análisis de contenido, cabe destacar que al finalizar el desarrollo de la propuesta didáctica los estudiantes han logrado establecer cuáles son los límites de validez de la óptica geométrica e identificar en qué condiciones experimentales el comportamiento de los sistemas se describe desde otro modelo. Han logrado explicar cualitativamente en qué consiste la difracción y relacionarla con la interferencia de ondas, pero siguen existiendo incomprendimientos al respecto. La comprensión del fenómeno de la difracción resulta sumamente complejo para los estudiantes y la conceptualización del principio de Huygens-Fresnel les sigue resultando difícil. Aparentemente este hecho está relacionado con la dificultad para comprender el concepto de onda electromagnética y la tendencia a asignarle una existencia física en el espacio a las variables que la componen. Un estudio más profundo sobre estas dificultades podría resultar en un aporte significativo al diseño de propuestas didácticas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los árbitros sus valiosos aportes y sugerencias.

REFERENCIAS

- Ambrose, B., Heron, P., Vokos, S. y Mc Dermott, L. (1999a). Students understanding of light as an electromagnetic wave: Relating the formalism to physical phenomena. *American Journal of Physics*, 67(10), 891-898.
- Ambrose, B., Schaffer, P., Steinberg, R. y Mc Dermott, L. (1999b). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67(2), 146-155.
- Bravo, S. y Pesa, M. (2015). Diseño de una propuesta didáctica para el aprendizaje significativo de los conceptos de interferencia y difracción en el laboratorio de física. *Actas del VII Encuentro Internacional sobre Aprendizaje Significativo*, 511-525. Burgos. Disponible en <http://www.xinix.es/jornadas/actas.pdf>
- Bravo, S. (2007). Concepciones de estudiantes referidas a fenómenos ondulatorios. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Tucumán. San Miguel de Tucumán. Argentina.
- Beneitone P., Esquetini C., Gonzalez J., Maletá M., Siufi G., Wagenaar R. (2007). Reflexiones y perspectivas de la Educación Superior en América Latina. *Informe Final Proyecto Tuning-América Latina 2004-2007*. Universidad de Deusto. Bilbao. Disponible en http://tuning.unideusto.org/tuningal/index.php?option=com_docman&Itemid=191&task=view_category&catid=22&order=dmdate_published&ascdesc=DESC Último acceso: 12/03/2016.

Colin P. y Viennot L. (2000). Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'image optique. *Didaskalia*, (17), 29-54.

Colin, P., y Viennot, L. (2001). Using two models in optics: Students' difficulties and suggestions for teaching. *American Journal of Physics* 69, S36 (2001), doi: 10.1119/1.1371256

Colin, P., y Viennot, L. (2002). Géométrie, phase, cohérence: Questions d'optique. *Bulletin de la Société Française de Physique*, (137), 30.

Disponible en <http://sfp.in2p3.fr/bulletin/article%20COLIN%20VIENNOT.pdf> Último acceso: 14/03/2016.

Galili, I. (2014). Teaching Optics: A Historico-Philosophical Perspective. In Matthews, M(ed.) *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*. Springer.

Hecht, E. yZajac, A. (2000). *Optica*. Edit. Addison-Wesley Iberoamericana S.A.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, M. (2010). *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw Hill.

Halliday, D., Resnick, R., Krane, K. (1998). *Física*. Vol. 2. México: CECSA.

Hull, L. (2011). *Historia y Filosofía de la ciencia*. Barcelona: Crítica.

Lazarovitz, R. yTamir, P. (1994). Research on using laboratory instruction in science. In Dorothy L. Gabel (ed.) *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*. Nueva York: Macmillan.

Matthews, M. (1994). Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual. *Enseñanza de las ciencias*,12(2), 255-27.

Maurines L. y Mayrargue A. (2007) Utiliser l'histoire de l'optique dans l'enseignement : pourquoi ? comment ?, *Journées nationales de l'UdPPC "Paris de Sciences"*, Paris. Disponible en: http://udppc.asso.fr/paris2007/actes/index.php?page=fiche_ev&num_ev=185

Maurines, L. (2002). Le raisonnement des étudiants dans la physique des ondes [The students' reasoning in wave physics]. *Bulletin de la Société Française de Physique*, décembre 2002–2003, (137), 30. Disponible en <http://sfp.in2p3.fr/bulletin/Maurines%20corrigi.PDF>

Maurines, L. (2010). Geometrical Reasoning in Wave Situations: The case of light diffraction and coherent illumination optical imaging. *International Journal of Science Education*, 32(14), 1895–1926.

McDermott, L., Shaffer, P. and the Physics Education Group at the University of Washington, (2002). *Tutorials in Introductory Physics*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

McDermott, L. (2000). Bridging the gap between teaching and learning: the role of physics education research in the preparation of teachers and majors. *Investigações em Ensino de Ciências*,5(3), 157-170.

McDermott, L. (2001). Oersted Medal Lecture 2001: 'Physics Education Research—The Key to Student Learning'. *American Journal of Physics*,69(11), 1127-1137.

Pesic, P. (2007). *El cielo en una botella. Historia de la pesquisa sobre el azul del firmamento*. Barcelona: Gedisa.

Serway R. y Jewett J. (2005). *Física*. Volumen II. Ed. Thomson.

Tipler, P. (1996). *Física*. España: Reverté.

Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10(23), 133-170.

Vergnaud, G. (1994). Multiplicative conceptual field: what and why? In Guershon, H. and Confrey, J. (Eds.) *The development of multiplicative reasoning in the learning of mathematics* (41-59). Albany, N.Y.: State University of New York Press.

Vergnaud, G. (2007) ¿En qué sentido la teoría de los campos conceptuales puede ayudarnos para facilitar el aprendizaje significativo? *Investigações em Ensino de Ciências*, 12(2), 285-302.

Vergnaud, G. (2013) ¿Por qué la teoría de los campos conceptuales? *Infancia y Aprendizaje*, 36(2), 131-161.

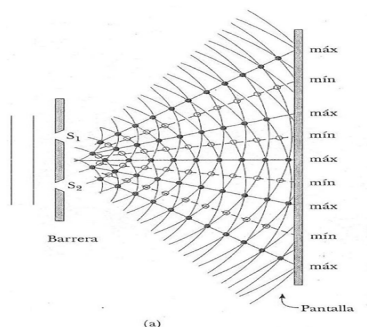
Wosilait, K., Heron, P., Schaffer, P. yMc Dermott, L. (1999). Addressing students' difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. *Physics Education Research: A supplement to the American Journal of Physics*, 67(7), S5-S15.

Young, H., Freedman, R. (2013). *Física Universitaria*. Vol 2. Editorial Pearson.

ANEXO

Enunciado de evaluación

1.- Considere un láser que ilumina dos pequeñas rendijas verticales produciendo un diagrama de interferencia en el plano horizontal como lo representa el siguiente esquema E(r):



a) Explique por qué Ud. ve una línea luminosa a lo largo de los puntos llenos cuando produce humo en el ambiente y no puede discriminar que la intensidad luminosa está variando entre 0 y $2 E_0^2$ a lo largo de ella.

b) Si Ud colocara el ojo como sensor (suponiendo que sea factible) en uno de los puntos de la línea correspondiente a un máximo y se queda allí durante un intervalo de 2 segundos, ¿Podría ver la variación de intensidad luminosa a medida que avanzan los frentes de onda? (el tiempo de retención de la imagen en la retina es de 0,1 s)

2- a) Realice un diagrama del sistema experimental que usó en su experiencia de interferencia por dos ranuras. Explique cualitativamente en qué consiste el fenómeno y por qué ocurre

b) Si la pantalla se encuentra a dos metros de las ranuras, éstas están separadas una distancia de 0,05 mm y se está usando una fuente láser que emite una luz de $\lambda = 7,8 \times 10^{-5}$ cm, ¿a qué distancia del centro del máximo central se encuentra el siguiente máximo? ¿Se puede considerar ángulo pequeño en esta situación experimental?

c) ¿Cómo cambiaría lo que se observa en la pantalla en la situación del ítem (b) si la ranura tiene un ancho de 1 mm?

d) ¿Se observa el patrón de interferencia en el apartado (b) si usa una linterna en lugar del láser?

e) ¿Cómo influye el fenómeno de la difracción en el patrón de intensidades que se observa en la pantalla?

f) ¿Cómo definiría a la difracción?

3- Responda si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas, justificando sus respuestas.

a) En el fenómeno de interferencia por dos ranuras la expresión $d \sin\theta = n \lambda$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) es válida solo para ángulos pequeños.

b) Para una red de difracción de 1000 líneas por mm se puede observar solamente el máximo central y el máximo de primer orden con fuente láser.

c) En un sistema de dos o más ranuras la intensidad de todos los máximos de interferencia no es la misma

d) El principio de Huygens-Fresnel permite interpretar el fenómeno de la difracción como una interferencia de ondas.