



EVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE DE INTERFERENCIA Y DIFRACCIÓN DE LA LUZ EN EL LABORATORIO DE FÍSICA

Learning evaluation of interference and diffraction of light in physics laboratory

Silvia Bravo^{1,2} [sbravo@herrera.unt.edu.ar]

Marta Pesa^{1,2} [mpesa@herrera.unt.edu.ar]

¹*Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.
Av. Independencia 1800. Tucumán. Argentina.*

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

Resumen

Este trabajo presenta los resultados de una investigación referida al aprendizaje de la interferencia y difracción de la luz en el contexto de un laboratorio de física, mediante la aplicación de una propuesta didáctica con estudiantes de licenciatura en física. El diseño de las actividades experimentales ha tenido en cuenta las dificultades reportadas por la investigación educativa, como así también los aportes de la teoría de campos conceptuales de Vergnaud, la teoría de aprendizaje significativo de Ausubel y la teoría sociolingüística de Vigotsky. La investigación se focalizó en el estudio del desarrollo cognitivo de los estudiantes durante la implementación de la propuesta didáctica y la evaluación de la misma a través del desarrollo de competencias. Se usó un enfoque metodológico de tipo cualitativo, en una perspectiva interpretativa, con un diseño de tipo investigación-acción, donde el investigador actúa en el rol de docente mientras se recoge la información. Se han utilizado en forma complementaria las notas de campo del investigador, grabaciones en audio de interacciones grupales, grabaciones en video del trabajo grupal de los estudiantes, informes grupales sobre las actividades y evaluaciones individuales. Los resultados obtenidos con el análisis de contenido de los registros y la interpretación desde la teoría de campos conceptuales muestran una evolución en los esquemas de los estudiantes. Sus esquemas iniciales centrados en la óptica de rayos evolucionan hacia esquemas centrados en el modelo ondulatorio. Los resultados obtenidos con los informes grupales y con la evaluación individual muestran que todos los estudiantes han logrado desarrollar la mayoría de las competencias planteadas como objetivos de aprendizaje en la propuesta didáctica.

Palabras clave: óptica ondulatoria; coherencia luminosa; actividades experimentales; esquemas de Vergnaud.

Abstract

This paper presents the results of an investigation referred to the learning of interference and diffraction of light in the context of a physics laboratory, through the application of a didactic proposal with students from an undergraduate course in physics. The design of the experimental activities has taken into account the difficulties reported by educational research, as well as the contribution of the Vergnaud conceptual fields theory, Ausubel meaningful learning theory and Vigotsky sociolinguistics theory. The research was focused in the study of students cognitive development during the implementation of the didactic proposal and the assessment of it through the skills development. A methodological qualitative approach was used, in an interpretative perspective, with a research-action design, where the researcher acts as a teacher while he collects the data. Researcher's field notes have been used in a complementarily, audio recordings of group interactions, video recordings of students' teamwork, group reports about the individual activities and assessments. The results obtained from the analysis of the content of the registers and the interpretation from the theory of conceptual fields show an evolution in the students' schemes. Their initial schemes, which were focused on ray optics, evolve to schemes focused on the wave model. The results obtained from the group reports and from the individual assessment show that all the students have managed to develop most skills raised as learning objectives in the didactic proposal.

Keywords: laboratory; wave optics; didactic proposal; learning; Vergnaud schemes.

INTRODUCCIÓN

El mundo de las ondas luminosas se constituye en la experiencia más cotidiana de los estudiantes y, sin embargo, es una de las áreas de mayor dificultad de comprensión en la estructura conceptual de la disciplina. La complejidad del concepto mismo de onda electromagnética, el alto grado de abstracción de las magnitudes físicas involucradas en este concepto, las características de nuestro sistema visual como sensor y del sistema cognitivo en la percepción de estas magnitudes físicas (frecuencia, intensidad de la radiación, etc.), convergen durante el proceso de aprendizaje para dar origen a numerosas incomprendiones relacionadas con los aspectos mencionados.

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

1- Physics Education Research Group (PERG) de la Universidad de Washington, con los reportes de Mc Dermott (2000 y 2001, 2002 y 2007), Ambrose et al. (1999a y 1999b) y Wosilait et al. (1999),

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

Los resultados presentados por ambos grupos de investigación coinciden en la dificultad 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 a los fenómenos de interferencia y difracción al iniciar el estudio de la óptica física. También desarrollan materiales de enseñanza tendientes a la superación de estas dificultades. Es el caso de los tutoriales desarrollados por el PERG para complementar la enseñanza tradicional y una serie de cuestionarios desarrollados por el grupo francés para ser abordados en diferentes instancias, clases tradicionales o experimentales.

Se identifican también en la literatura otros aportes significativos que provienen del área de la epistemología e historia de la ciencia, los cuales permiten ampliar y profundizar la interpretación e hipótesis acerca del origen de las dificultades de los alumnos durante el aprendizaje. Por ejemplo, Galili (2014) propone representar la teoría dominante de la luz en cada momento de la historia, con una estructura cultura-disciplina que permite al docente visualizar la transición entre las teorías sucesivas de la luz y la competencia entre ellas. Krapas (2011) y Araujo y Da Silva (2009), por otro lado, cuestionan la presentación que realizan hoy en día los libros de texto acerca del principio de Huygens: la interpretación de la construcción geométrica de Huygens es distinta a la que éste había considerado.

La mayoría de las investigaciones reportadas 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. En este trabajo se plantea la continuidad y la profundización de estas investigaciones en el contexto particular de un trabajo de laboratorio, tomando como punto de partida el conocimiento de las posibles dificultades que pueden afrontar nuestros estudiantes durante el aprendizaje de la óptica ondulatoria.

La investigación sobre el trabajo de laboratorio en enseñanza de la ciencia ha sido planteada hoy como una cuestión prioritaria. En este sentido, distintas revisiones que se encuentran sobre el área señalan la necesidad de establecer programas de investigación donde se presente de manera explícita el marco conceptual en el que se desarrollan y a partir del cual se delimite el problema de investigación con claridad y coherencia (Hodson, 1994; Lazarowitz & Tamir, 1994). También se propone implementar y evaluar los trabajos de laboratorio en la enseñanza de la ciencia apoyados en lineamientos que se guíen con una fundamentación consistente y no sólo basados en creencias, intuiciones o ideas que parezcan plausibles (Heering & Wittje, 2012).

En este trabajo se plantea avanzar más allá de una descripción y caracterización de las ideas de los alumnos relacionadas con las dificultades que evidencian para conceptualizar los fenómenos de interferencia y difracción. Se propone profundizar en la interpretación de estas dificultades desde un marco teórico que pueda dar cuenta de su estructura y de sus cambios durante el aprendizaje.

Siguiendo la línea de las investigaciones referidas a la fundamentación teórica, en este trabajo se van a considerar marcos teóricos que sustenten propuestas dirigidas al desarrollo integral de competencias cognitivas, metodológicas y de interacción social en el ámbito de la óptica ondulatoria. La investigación se realizó desde la teoría de campos conceptuales de Gérard Vergnaud (1990) como principal referente,

considerando que proporciona un marco coherente para el estudio del desarrollo y del aprendizaje de competencias complejas, especialmente las que se refieren a las actividades científicas y técnicas en el ámbito del laboratorio.

Para desarrollar esta investigación se elaboró una propuesta didáctica conformada por varias situaciones experimentales de orden creciente de complejidad, con el objetivo de estudiar la actividad de los estudiantes frente a las distintas situaciones, y la evolución de sus aprendizajes a medida que avanzan en el desarrollo de la propuesta. Por su parte, los objetivos específicos de la propuesta didáctica consisten en:

1- ayudar a los estudiantes a comprender los conceptos de interferencia y difracción de la luz, complementando el aprendizaje adquirido en otras instancias como las clases teóricas, demostraciones o resolución de problemas;

2- ayudar a los estudiantes desarrollar una amplia gama de habilidades y herramientas básicas de la física experimental y del análisis de datos;

3- ayudar a los estudiantes a entender el papel de la experiencia y a distinguir la diferencia entre inferencias basadas en la teoría y resultados de los experimentos, poniendo en evidencia la interrelación entre conceptos, hipótesis, teorías y observaciones;

4- ayudar a los estudiantes desarrollar habilidades de aprendizaje colaborativo.

REFERENCIAL TEÓRICO

La teoría de campos conceptuales se ubica dentro del paradigma constructivista de la educación. El aporte de esta teoría consiste en la consideración del dominio de conocimiento y el estudio de la actividad del sujeto en situación. Una situación se entiende como una tarea compleja, o combinación de sub-tareas, a la cual se enfrenta el sujeto. Pueden ser situaciones cognitivas producidas en la escuela o en la vida diaria y que implican acción, ya sea procedimental o declarativa (Rodríguez & Moreira, 2004). Los procesos cognitivos y las respuestas dependen de las situaciones a las que se confronta al sujeto.

En este referencial, el comportamiento ante una situación dada está dirigido por esquemas, los cuales generan una secuencia de acciones que dependen de los parámetros de la situación. Un esquema comprende cuatro categorías de componentes:

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

Los objetivos constituyen la parte intencional del esquema y en general, se encuentra dividida en sub-metas ordenadas 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, pero no expresan algo acerca de la realidad, sino 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. Pero los conceptos-en-acción no nos permiten razonar: si el razonamiento no tiene la forma de un teorema-en-acción, no se puede resolver el problema o la situación. Los teoremas-en-acción son proposiciones a partir de las cuales se hacen inferencias. El teorema-en-acción es una construcción mental más compleja que se puede considerar verdadera o falsa. Los conceptos-en-acción son ingredientes necesarios de los teoremas-en-acción (Vergnaud, 1994) pero 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.

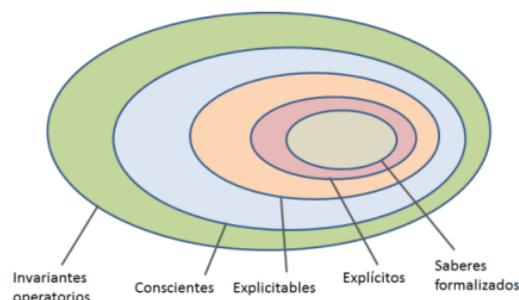


Figura 1 - Grado de explicitación de los invariantes operatorios. Extraído de Vergnaud (2007).

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. En este sentido, los conceptos-en-acción y teoremas-en-acción pueden, progresivamente, volverse verdaderos conceptos y teoremas científicos (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 fenómenos 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 y se van a constituir así en significantes de
- algunas de las posibles representaciones simbólicas que representan las propiedades y procedimientos asociados a los conceptos de interferencia y difracción en tales situaciones.

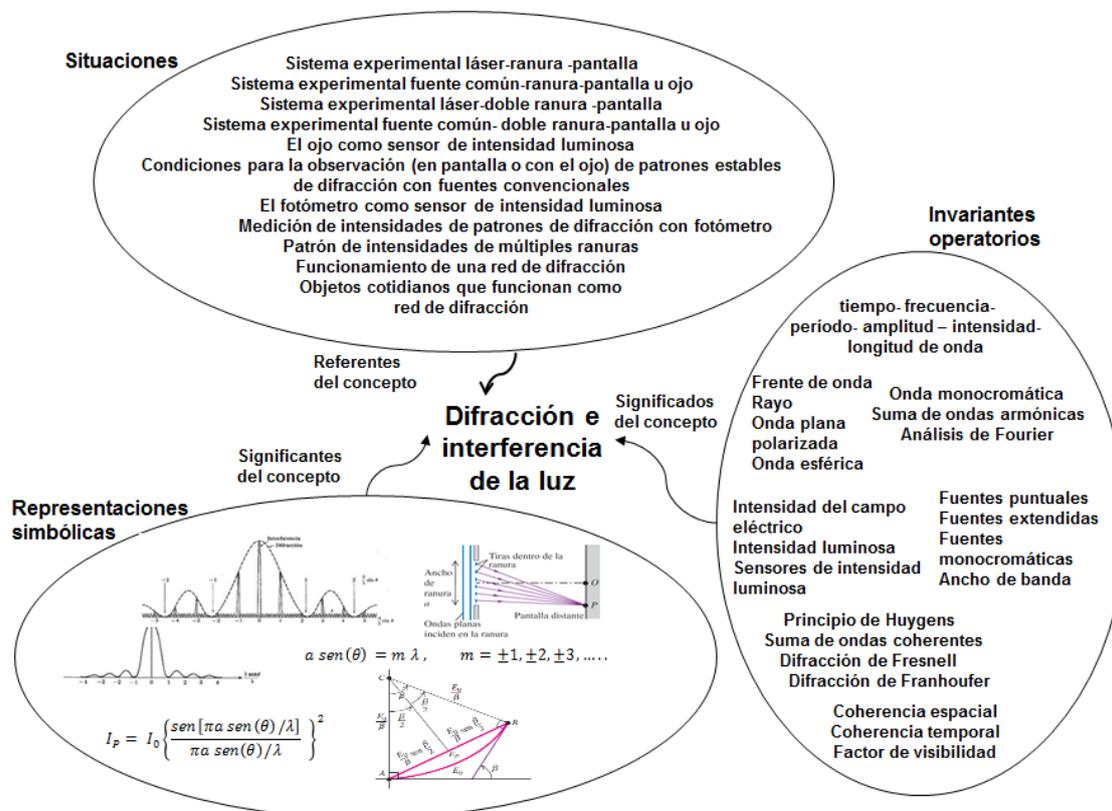


Figura 2 - Interpretación de los conceptos de interferencia y difracción desde la teoría de campos conceptuales

Un estudio de este tipo, es decir, la caracterización del contenido a desarrollar en la instrucción formal desde la visión de campo conceptual permite al docente, por ejemplo, seleccionar situaciones apropiadas, prever de qué invariantes operatorios necesitaría disponer el alumno para abordar las situaciones elegidas y qué representaciones podría utilizar durante su desempeño. Es decir, actúa como una estructura conceptual de referencia que puede orientar al docente en la elaboración de la propuesta didáctica y en el conocimiento de las posibles dificultades a enfrentar, como así también en la evaluación continua del aprendizaje.

ESTRUCTURA DE LA PROPUESTA DIDÁCTICA

El diseño de la propuesta (Bravo & Pesa, 2015) ha tenido en cuenta las dificultades que reportan los trabajos de investigación sobre el tema y los principales lineamientos que se derivan para el aprendizaje desde la teoría de campos conceptuales de Vergnaud (1990, 2007, 2013), la teoría de aprendizaje significativo de Ausubel (1973, 2002) con sus aportes más recientes y la teoría sociolingüística de Vygotsky (1978, 1995). Estos marcos teóricos proveen una serie de implicaciones que llevan a considerar la importancia del conocimiento previo, de la organización conveniente de las situaciones, de la utilización de diversidad de situaciones y actividades y de la puesta en cuestión permanente del conocimiento que se va construyendo. Se utilizaron de manera complementaria los aportes de estas teorías para identificar

situaciones que actúen como referentes de los conceptos involucrados, elaborar material didáctico que actúe como organizador previo, proponer secuencias de actividades según un orden creciente de complejidad y pautar las intervenciones del docente durante el desarrollo de las mismas.

En lo referido al ámbito en que se va a desarrollar la propuesta didáctica, trabajo grupal dentro de un laboratorio, cobran valor también las implicaciones de la teoría de Lev Vygotsky para la educación. Una de las contribuciones más importantes de Vygotsky (1978) es el concepto de mediación como factor fundamental del desarrollo cognitivo: el aprendizaje se considera una actividad social en la cual los alumnos construyen los significados de los conceptos a través del diálogo, de discusiones y negociaciones entre compañeros y profesores.

La teoría de Vygotsky aporta el concepto de zona de desarrollo próximo (ZDP) como una categoría central en que se basa el diseño de estrategias de enseñanza. Se refiere a la ZDP como: “la distancia entre el nivel real de desarrollo, determinado por la capacidad de resolver independientemente un problema, y el nivel de desarrollo potencial, determinado a través de la resolución de un problema bajo la guía de un adulto o en colaboración con otro compañero más capaz” (Vygotsky, 1991). El aprendizaje debería operar sobre los niveles superiores de la ZDP, es decir, sobre aquellos logros del desarrollo que todavía están en adquisición y que solo se despliegan en colaboración con otros (Baquero, 2009).

Otro aspecto que guarda relación con las categorías de ZDP y andamiaje son los intercambios discursivos en clase: las interacciones docente-alumno y las interacciones entre pares. Las interacciones docente-alumno se refieren a las modalidades de intervención docente otorgando pistas, guiando, persuadiendo y corrigiendo los pensamientos y estrategias de los alumnos. Constituyen un mecanismo típico en los intercambios en el aula en busca de facilitar o producir ciertos efectos cognitivos en los alumnos. El concepto de ZDP puede orientar la tarea docente referida a la mediación durante el desarrollo de las actividades, en el contexto de trabajo grupal dentro de un laboratorio.

La propuesta se estructuró en base a ciclos de actividades grupales 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 de trabajo. En la Figura 3 se esquematiza la estructura de la propuesta.

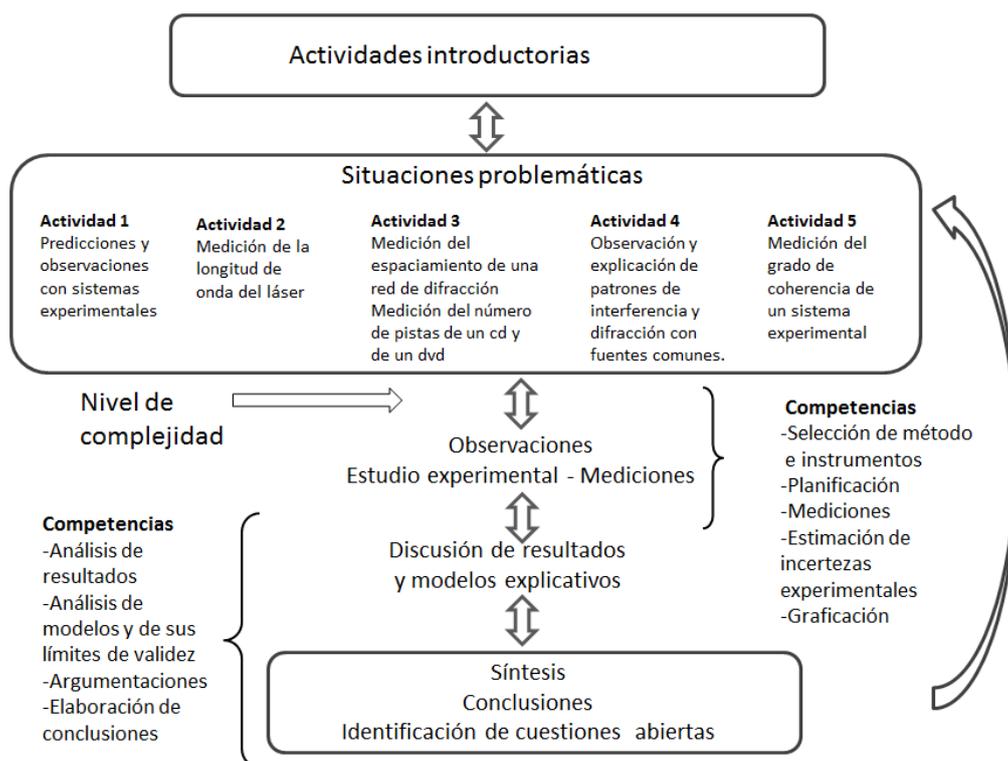


Figura 3 - Estructura de la propuesta didáctica

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. Los enunciados de las distintas actividades que conforman la propuesta se presentan en el Anexo.

METODOLOGIA DE TRABAJO CON LOS ESTUDIANTES

La institución cuenta con un local para el laboratorio de física con infraestructura adecuada para el trabajo experimental en grupos pequeños de dos o tres estudiantes. Los estudiantes disponen de una guía semi-estructurada 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. Según el trabajo a realizar, se incluyen también preguntas de reflexión a medida que se realizan las actividades. Pero en general, 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. Es el docente quien va planteando las preguntas de la guía de trabajo en el momento conveniente, de acuerdo al avance del grupo y no como una secuencia preestablecida. En esta metodología de trabajo resultan fundamentales las intervenciones del docente, otorgando pistas, guiando, persuadiendo y corrigiendo los pensamientos y estrategias de los alumnos.

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

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). 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 arduo trabajo de interpretación. 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.

En el marco de una investigación cualitativa el término diseño se refiere al abordaje general que se utiliza en el proceso de investigación. En este trabajo, 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 una determinada propuesta didáctica, identificar dificultades, elaborar estrategias superadoras de esas dificultades y evaluar los resultados de la propuesta didáctica. 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 de los alumnos en forma individual y 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. Por ello, se han utilizado en forma complementaria diversos instrumentos que permiten recoger datos en formato textual, gráfico y visual. Se trata del discurso, acciones e interacciones en el aula de los participantes, grabados en audio o en video, de notas del investigador registrando detalles de lo acontecido en cada jornada, reportes escritos de los alumnos en el que usan diversas representaciones simbólicas además del lenguaje y evaluaciones finales escritas con las mismas características de los reportes.

La técnica utilizada para analizar los datos en esta investigación consiste en el análisis de contenido cualitativo. A partir del análisis de contenido, se identifican los diferentes elementos de los esquemas que, según el marco teórico escogido, permiten caracterizar las dificultades y/o logros de los alumnos durante el aprendizaje.

Previamente se había realizado en una cohorte anterior la implementación parcial de la propuesta didáctica a modo de prueba piloto, dirigida a la identificación de pautas para el ajuste de las diversas actividades (tareas y sub-tareas) que involucra el trabajo experimental, como así también a la identificación de pautas para el ajuste en la implementación de los instrumentos utilizados para recoger datos.

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 en audio o video. Las notas de campo, redactadas inmediatamente después de realizada 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 una especial atención a los gestos de los estudiantes que no interactúan verbalmente. En la mayoría de los casos realizan gestos de asentimiento o negación frente 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 y grado de coherencia). 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. Las notas de campo del investigador no pueden cubrir todos los aspectos en forma detallada. Se considera que la descripción sería más ajustada si se cuenta con este registro adicional.

La implementación de la propuesta se realizó con estudiantes del ciclo básico de las carreras de licenciatura en física y de ingeniería. Desde el punto de vista de Hernández et al. (2010) tiene el carácter de muestra por oportunidad y de muestra homogénea. En el caso de la licenciatura en física se trata de un grupo de 11 alumnos que cursaban la asignatura Laboratorio IV durante el semestre en que se realiza la observación. Los estudiantes tenían conocimiento de los propósitos de la investigación, y de su rol de participantes.

En este reporte se presentan en forma exhaustiva los resultados obtenidos con los estudiantes de licenciatura en física en la implementación definitiva de la propuesta didáctica. A modo de ejemplo, se presentan algunas respuestas obtenidas en la instancia de prueba piloto. Las respuestas de los estudiantes se han codificado para su presentación. Se denomina A y B al grupo de licenciatura en física y de ingeniería, respectivamente, en la instancia de prueba piloto. Se denomina C y D al grupo de licenciatura y de ingeniería, respectivamente, en la implementación definitiva de la propuesta.

PROPUESTA DE TIPOLOGÍA DE ESQUEMAS

El análisis e interpretación de los registros con la prueba piloto permitió inferir los elementos que conforman el esquema de los estudiantes en los que se focalizó el estudio. Pero también evidenció la necesidad de un criterio para caracterizar a los esquemas.

Para caracterizar la estructuración de los invariantes operatorios de los esquemas se han tomado los aportes de Galili (2014), quien considera que las teorías físicas fundamentales poseen una estructura denominada disciplina-cultura (DC) compuesta por núcleo-cuerpo-periferia (Figura 4-a), en lugar de la estructura regular de las disciplinas compuesta por núcleo- cuerpo (Figura 4-b).

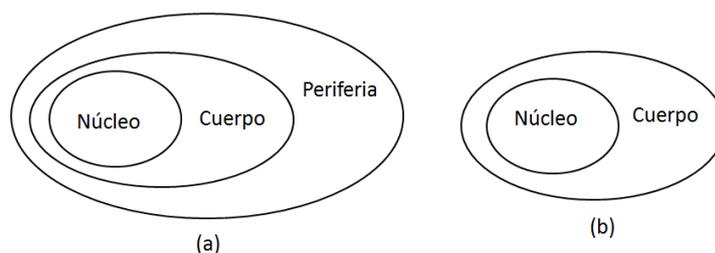


Figura 4 - (a) Representación esquemática de la estructura disciplina-cultura de una teoría científica. Los elementos del conocimiento se localizan en diferentes áreas. (b) Representación esquemática de la estructura disciplina de una teoría científica. Extraído de Galili (2014).

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.

Los resultados obtenidos en la prueba piloto muestran que la mayoría de los estudiantes abordan las actividades de predicción con un razonamiento coherente con un esquema cuyos invariantes operatorios se estructuran como indica a la Figura 5. Sus predicciones son producto de inferencias realizadas a partir de los resultados de la óptica de rayos. En el currículo de la carrera, 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”, en acuerdo con el desarrollo secuencial de los principales libros de texto consultados por los estudiantes (Young & Freedman, 2013; Serway & Jewett, 2005; Tipler, 1996). Han adquirido así cierta experiencia en realizar “marcha de rayos” para explicar la formación de imágenes en óptica geométrica. Efectivamente, el estudiante 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). No distingue la situación presentada como una nueva situación.

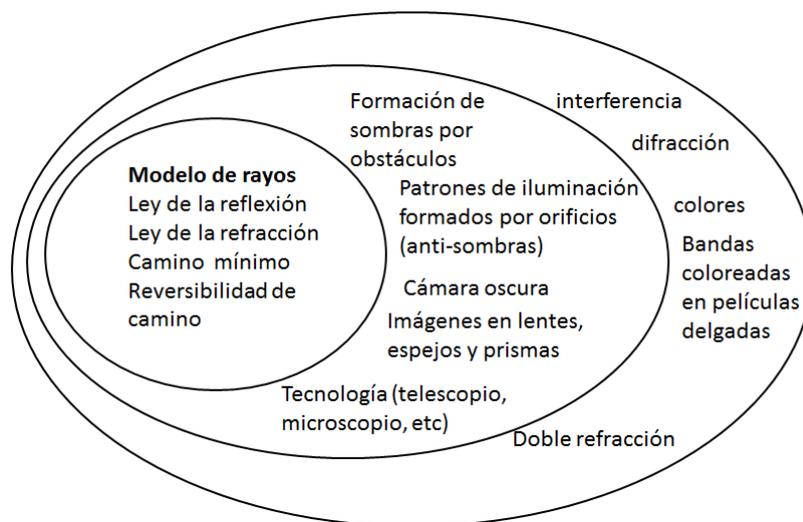


Figura 5 - Estructura disciplina-cultura de la teoría de rayos en tiempos de la revolución científica del siglo XVIII. Extraído de Galili, 2014.

A esta organización de los invariantes operatorios de los estudiantes, la denominamos Esquema Centrado en Modelo de Rayos (ECMR). Como ejemplos se presentan las siguientes respuestas obtenidas en la actividad de predicción:

A6: “con láser y dos ranuras se verán dos líneas porque el láser es direccionado”. “con láser y una ranura se verá una línea”.

A5: “con láser y una ranura se ve una línea”, “con luz blanca y una ranura se ve la ranura”

Los estudiantes que responden desde esta clase de esquema realizan gráficos similares al de la Figura 6. 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.

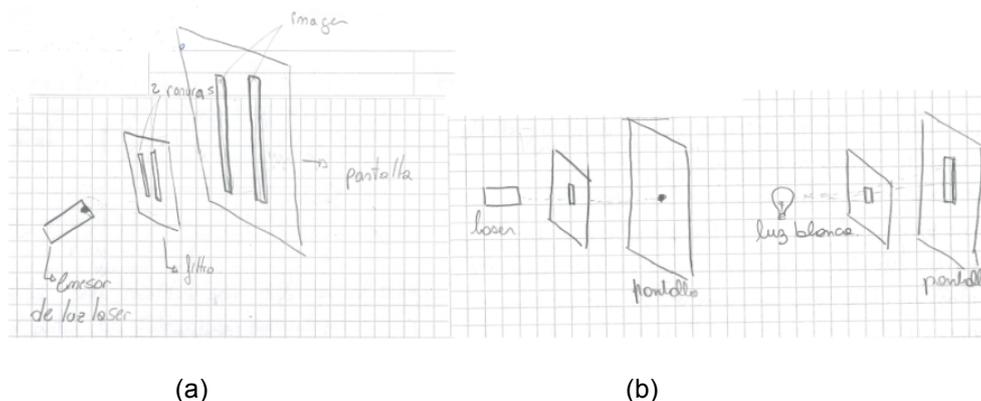


Figura 6 - (a) Diagrama empleado por el estudiante A2 para explicar su predicción sobre un sistema con dos ranuras, (b) diagrama empleado por el estudiante A5 para explicar su predicción sobre un sistema con una ranura.

En los resultados de la prueba piloto también se detectan 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 decir 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 acomodan en la estructura. La Figura 7 ilustra esta situación.

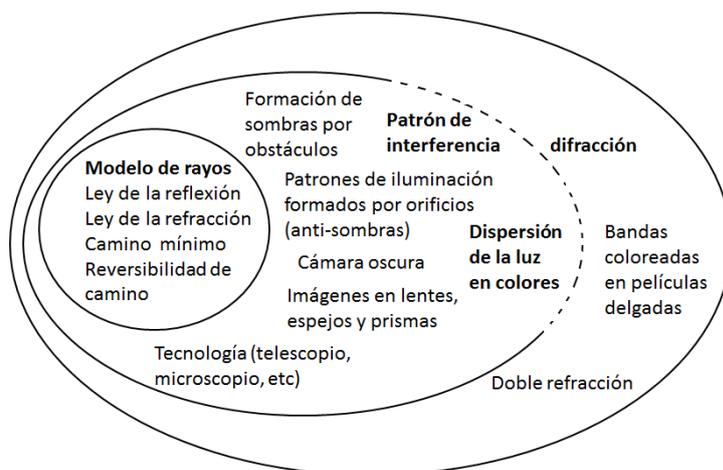


Figura 7- Estructura disciplina-cultura de la teoría de rayos durante el aprendizaje de los estudiantes. Adaptado de Galili, 2014.

Los resultados de la implementación de la propuesta a modo de prueba piloto muestran una variedad de respuestas de este tipo. Las mismas se podrían interpretar como un continuo de posibilidades, en el cual los invariantes 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 (McDermott, 2001; Maurines, 2012; Bravo, 2007). Galili ilustra esta situación en el campo de la ciencia, a través del ejemplo de Descartes, quien atribuía el fenómeno de la visión a la presión ejercida por un objeto luminoso sobre un fluido universal, de tal forma que el objeto luminoso empujaba al fluido y este empuje se traducía “instantáneamente” en una presión sobre los ojos de quien está mirando el objeto luminoso. Si bien su concepción de la luz sugería una onda de presión, al

mismo tiempo utilizó rayos de luz para explicar otros fenómenos de una manera precisa, tales como arco iris, visión, etc.

La Figura 8 representa una estructura caracterizada por una mayor “hibridización” de los invariantes operatorios, donde ya no se distingue el núcleo y el cuerpo. A esquemas como los de las figuras 7 y 8, se les denomina Esquema Híbrido (EH).

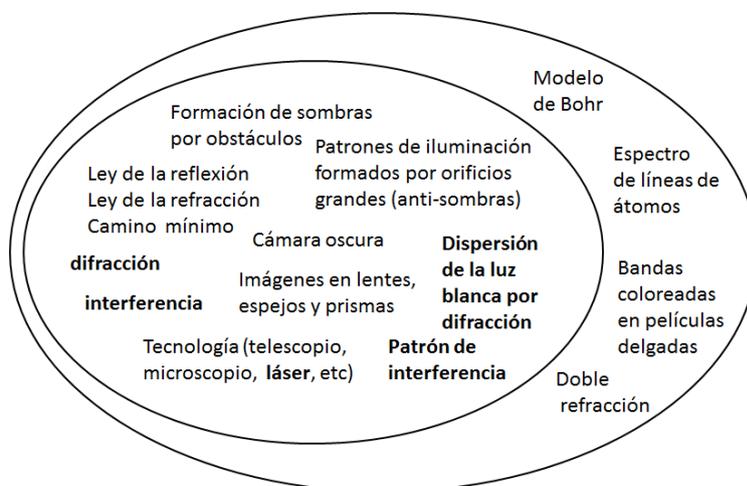


Figura 8- Hibridización de la estructura disciplina-cultura de la teoría de rayos durante el aprendizaje de los estudiantes. Adaptado de Galili, 2014.

Como ejemplos de respuestas basadas en un esquema denominado EH, detectadas en la prueba piloto, se presentan las siguientes:

A1: “el láser es un haz direccionado, entonces se ve la forma de la ranura”, “con luz blanca y una ranura hay dispersión, entonces se ve el espectro”, “a la salida de las rendijas hay interferencia, entonces se verá el patrón de interferencia”, “con luz blanca se verán zonas iluminadas y negras”.

A3: “Con una ranura y luz blanca se tiene que difractar” y a continuación expresa: “no, el que difracta es el prisma”.

El estudiante A3, al realizar las observaciones del fenómeno de difracción por una rendija, no entiende por qué se obtiene ese patrón de intensidades y pregunta si ello se debe a la “reflexión de la luz en los bordes de la ranura”. En este tipo de respuestas se mantiene el modelo de rayos, pero sin constituir ahora el núcleo de la estructura. El estudiante A3 activa los conceptos de dispersión, espectro de colores, difracción entendida como dispersión, que coexisten con el de propagación rectilínea de la luz para tratar de explicar los fenómenos observados. Las grabaciones en audio ponen en evidencia que los estudiantes muchas veces pasan de uno a otro en cuestión de segundos, en su desempeño frente a una situación determinada. El estudiante A1, por ejemplo, expresa verbalmente que a la salida de las ranuras hay interferencia pero luego predice dos líneas en la pantalla para un sistema de doble ranura.

El desafío de la propuesta didáctica desarrollada consiste en ayudar a los estudiantes a transformar paulatinamente la estructura de sus esquemas hacia un esquema centrado en el modelo ondulatorio, que tenga efectividad para explicar y/o abordar con éxito situaciones referidas a los fenómenos de interferencia y difracción de la luz. Desde el enfoque de Galili correspondería a una estructura como la de la Figura 9. Un esquema de este tipo se denomina Esquema Centrado en el Modelo Ondulatorio (ECMO).

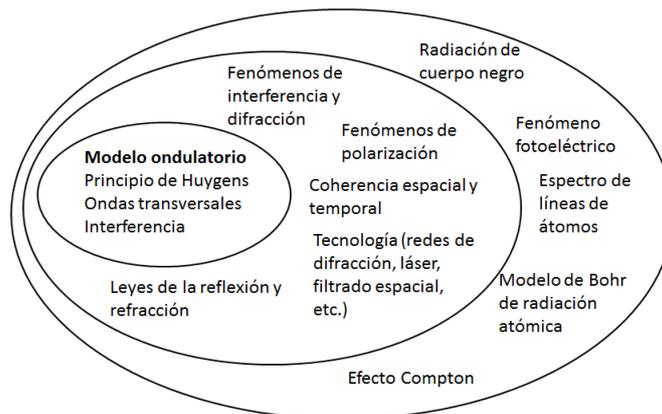


Figura 9 - Estructura cultura- disciplina de la teoría ondulatoria de la luz luego de la revolución científica del siglo XX. Adaptado de Galili, 2014

IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA

Los objetivos de la investigación en esta nueva instancia de implementación de la propuesta completa, se pueden resumir en:

1- Identificación de elementos que conforman el esquema de los estudiantes a lo largo del desarrollo de las actividades experimentales y caracterización de los mismos.

2- Evaluación de la efectividad de la propuesta para el aprendizaje de los fenómenos de interferencia y difracción de la luz

Ambos objetivos están comprometidos metodológicamente. Para el primero se necesita un enfoque que permita seguir en el tiempo, con el mayor detalle posible, los logros cognitivos de los participantes durante el desarrollo de la propuesta. A la vez, para evaluar la efectividad de la propuesta se necesita considerar logros obtenidos por el total de participantes al finalizar la misma. Obviamente, no es factible realizar un seguimiento continuo y detallado a todos los estudiantes sin interferir en el desarrollo de las actividades, y sobre todo, sin descuidar el rol del docente que contempla la propuesta. En la medida en que la investigación se desarrolle sin afectar las características propias del trabajo de laboratorio formuladas en la propuesta, los resultados de la investigación serán válidos y confiables.

INSTRUMENTOS	ACTIVIDADES
Notas de campo Grabaciones en audio	⇒ 1- Interferencia de ondas Analogía usando placas de interferencia
Notas de campo Grabaciones en audio	⇒ 1- Predicciones y observaciones de patrones de interferencia y difracción
Notas de campo Grabaciones en audio Grabaciones en video	⇒ 2- Medición de longitud de onda del láser
Notas de campo Grabaciones en audio Grabaciones en video	⇒ 3- Medición del número de líneas por mm en una red de difracción
Notas de campo Informe grupal	⇒ 4- interferencia con fuentes comunes
Notas de campo Grabaciones en audio Grabaciones en video	⇒ 5- Medición del grado de coherencia
Informe grupal Evaluación final	⇒ Síntesis

Figura 10 - Instrumentos aplicados en cada una de las actividades, para realizar el seguimiento de los estudiantes

El abordaje múltiple permite desempeñar con mayor tranquilidad el rol de docente al tener garantizado que puede contar con datos suficientes para complementar las notas de campo, tales como grabaciones en audio, en video y registros escritos por los estudiantes. La Figura 10 muestra qué instrumentos se utilizan para recoger datos en cada una de las actividades, en esta segunda instancia de aplicación de la propuesta.

Para evaluar la efectividad de la propuesta, los registros involucran a todos los participantes. Se realiza en dos instantes del desarrollo de la misma: la actividad de predicción frente al sistema experimental, por un lado, y los informes grupales y evaluación individual integradora al finalizar las actividades, por otro. Los resultados alcanzados al finalizar la implementación de la propuesta 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). Para evaluar los resultados, se realiza una caracterización del esquema con que los alumnos abordan los fenómenos de interferencia y difracción cuando se enfrentan al sistema experimental y del esquema con que abordan las situaciones que se plantean en la evaluación final.

ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE RESULTADOS

Los registros de cada actividad se procesaron en forma complementaria. Teniendo en cuenta el contexto que se describe en las notas de campo, se realiza el análisis de contenido a la grabación en audio y video de las distintas actividades. Durante el trabajo de análisis e interpretación de datos en la prueba piloto, se encontró que es más fértil el trabajo con la escucha de las grabaciones que con la transcripción de la misma. Se consigue una mejor interpretación de los invariantes operatorios que pone en juego el estudiante durante sus intervenciones.

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 identifican y/o infieren los elementos de los esquemas de 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 por escrito de los elementos de los esquemas. La Figura 11 resume este proceso.

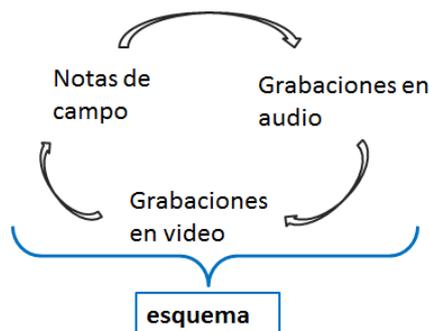


Figura 11- Proceso de análisis de los datos.

SOBRE LOS ESQUEMAS QUE DESARROLLAN LOS ESTUDIANTES

Los elementos de los esquemas, conceptos en acción, teoremas en acción, reglas de acción, metas e inferencias identificados y/o inferidos mediante este análisis se presentan en las Tablas 1 y 2, para los dos estudiantes de licenciatura en física identificados como C1 y C2, en los cuales se focaliza esta instancia de la investigación. Se debe resaltar que la tabla no representa al esquema en toda su complejidad, sino a una descripción del mismo en términos de sus componentes. El esquema está caracterizado además, por la jerarquía que se otorga a los invariantes operatorios.

Tabla 1 - Caracterización de los esquemas del estudiante C1, a medida que va abordando las actividades.

Estudiante C1					
Actividades	Conceptos en acción	Teoremas en acción	Inferencias	Reglas de acción	Metas y/o submetas
Actividades introductorias	Máximos Mínimos Ciclo completo Campo E Campo B Crestas Ondas en fase $E(r)$, $E(x)$	En los lugares oscuros la interferencia es constructiva. En los lugares con interferencia constructiva la amplitud siempre es cte.	La cantidad de líneas de máximos es mayor si aumenta la separación. Están desfasadas porque no tienen la misma frecuencia.	Las gráficas se suman punto a punto.	
Predicciones	Luz blanca Dispersión Fuente láser Interferencia Franjas de interferencia Patrón de interferencia Orden de magnitud de la distancia entre ranuras Longitud de onda del láser	A la salida de las rendijas hay interferencia. Con luz blanca hay dispersión. El láser no se dispersa. Con una ranura y láser se verá una zona más ancha iluminada. Con una ranura y luz blanca se verá difuso a la salida.	La luz blanca se dispersa, entonces con dos ranuras se verá una zona difusa. La luz blanca se dispersa, entonces con una ranura se verá una zona difusa. La fuente no es puntual, entonces se verá difuso alrededor.		Verificar experimentalmente
Observaciones	Patrón de intensidades Máximos de intensidad Mínimos de intensidad Interferencia destructiva Interferencia constructiva Orden de los máximos	Los patrones de una rendija y de dos rendijas se ven distintos. El láser es monocromático. La intensidad de los máximos de interferencia no es la misma.		Hay que ir cambiando el ancho de la ranura. Voy aumentando la distancia entre rendijas.	Describir Explicar
Medición de λ	Longitud de onda Máximos de interferencia Orden de los máximos de interferencia Método de cuadrados mínimos Error relativo $\text{Sen}\theta$, $\text{tg}\theta$	La longitud de onda depende de la distancia entre ranuras. El patrón de interferencia está modulado. Con método analítico el error de la pendiente es más pequeño.	Para rendijas más juntas, los máximos se alejan. Para ver más separados los máximos hay que alejar las rendijas de la pared (pantalla).	Hay que comprobar que el ángulo es pequeño. Se debe calcular la pendiente de la recta. Se debe utilizar cuadrados mínimos.	Medir la distancia para varios m. Graficar "y" en función de "m". Calcular la pendiente de la gráfica. Calcular λ . Evaluar los errores de medición.
Medición del espaciamiento en una red	Máximos de interferencia Ángulo subtendido hasta los máximos Orden de los máximos de interferencia $\text{Sen}\theta$ y $\text{tg}\theta$ Dispersión de la luz	Los máximos están muy separados. Las distancias entre máximos no es la misma. La red puede separar los colores. El ángulo de cada valor de m depende de la distancia entre ranuras.	Si los máximos están muy separados el ángulo no es pequeño. Si el ángulo no es pequeño la propagación de errores es más complicada.	Hay que medir el máximo valor posible de m. Se usa la regla de tres para calcular número de líneas.	Medir la distancia al primer máximo. Calcular el ángulo Calcular la distancia d entre líneas Propagar errores

Interferencia con fuentes reales	Tamaño de la fuente Distancia fuente-ranuras Distancia ranura-pantalla Luz blanca Luz monocromática Rendijas cercanas Ranura pequeña El ojo como sensor Coherencia espacial Coherencia temporal	Las fuentes más alejadas “parecen” más pequeñas. La luz blanca no es coherente. El ojo actúa de pantalla.	La intensidad es muy baja, en la pantalla no se ve nada	Medir primero con fuentes muy lejanas y seguir con fuentes cercanas. Medir primero con fuentes de luz blanca y colocar luego filtros frente a las ranuras.	Variar las distancias para sacar conclusiones Variar el tipo de fuente Hacer tablas Explicar
Medición del grado de coherencia	Intensidad luminosa Patrón de intensidades Representación gráfica Frecuencia de muestreo Factor de visibilidad	El sensor mide intensidad luminosa. El máximo central es el más intenso.	Cuanto más alejados estén los máximos, V tendrá un valor más cercano a uno.	Hay que seleccionar una apertura pequeña para el fotómetro	Medir intensidades Interpretar la distribución de intensidades Calcular el grado de coherencia

Tabla 2 - Caracterización de los esquemas del estudiante C2, a medida que va abordando las actividades.

Estudiante C2					
Actividades	Conceptos en acción	Teoremas en acción	Inferencias	Reglas de acción	Metas y/o submetas
Actividades introductorias	Frentes de onda Ondas circulares Ondas de agua Campo E Intensidad de radiación Diferencia de fase Suma de amplitudes	En las líneas de los máximos la intensidad de E es siempre doble. En las líneas de los mínimos la intensidad siempre es cero.	Si alejo mucho las fuentes, no se distinguen los máximos.	Se procede a sumar como si fueran ondas mecánicas.	Comparar Describir
Predicciones	Fuente láser Haz “lineal” Propagación rectilínea Luz blanca Ranura “pequeña”	El haz láser es direccionado. Las ranuras están muy juntas. El ancho del haz abarca las dos ranuras. El haz de luz blanca se abre. El láser es más intenso.	El haz láser abarca las dos ranuras, entonces se ven dos líneas iluminadas. La luz blanca no llega como rayos paralelos, también se abre y queda una zona iluminada El haz láser abarca toda la ranura, entonces se ve una línea. La luz blanca no		Hacer la experiencia Comprobar las predicciones

			sigue paralela luego de atravesar la rendija, se ve difuso.		
Observaciones	<p>Patrón de intensidades</p> <p>Máximos de intensidad</p> <p>Mínimos de intensidad</p> <p>Interferencia destructiva</p> <p>Modulación de la intensidad</p>	<p>El láser es una fuente coherente. La luz blanca no es coherente</p> <p>Con una ranura también se ve un patrón de máximos y mínimos.</p> <p>El patrón de dos ranuras es diferente del patrón de dos ranuras.</p>	Las rendijas actúan como dos fuentes.		<p>Describir</p> <p>Explicar</p>
Medición de λ	<p>Patrón de interferencia</p> <p>Máximos de interferencia</p> <p>Patrón de difracción</p> <p>Mínimos de difracción</p> <p>Método de cuadrados mínimos para el cálculo de la pendiente.</p> <p>Error relativo</p>	<p>Con método analítico el error de la pendiente es más pequeño</p>	<p>Si el ángulo es pequeño, la gráfica debería dar lineal. Conviene alejar lo más posible la pantalla para medir distancias más grandes entre máximos.</p>	<p>Se debe calcular la pendiente de la recta. Teniendo el valor de la pendiente de la recta, podemos calcular λ.</p>	<p>Contar los máximos</p> <p>Medir la distancia para varios m.</p> <p>Graficar “y” en función de “m”.</p> <p>Calcular la pendiente de la gráfica</p> <p>Calcular λ</p>
Medición del espaciamiento en una red	<p>Dispersión de la luz</p> <p>Longitud de onda</p> <p>Ángulos subtendido hasta los máximos</p> <p>Máximos de interferencia</p> <p>Colores</p>	<p>El ángulo hasta el máximo es grande. Cada color tiene distinta posición para los m distintos de cero. La dispersión por la red es “parecida” a la dispersión por un prisma.</p>	<p>Según la expresión para los máximos, no se debería ver más que dos (máximos)</p>	<p>Se usa la regla de tres para calcular número de líneas</p> <p>Hay que propagar errores</p>	<p>Seleccionar el último máximo</p> <p>Calcular el ángulo.</p> <p>Calcular la distancia d entre líneas</p> <p>Calcular cuántas líneas por mm tiene</p>
Interferencia con fuentes reales	<p>Distancia fuente-ranuras</p> <p>Distancia ranura-pantalla</p> <p>Luz blanca</p> <p>Luz monocromática</p> <p>Fuente extendida</p>	<p>La luz blanca no es coherente. El filtro la transforma en luz monocromática. El ojo “colecta” la imagen.</p>	<p>Si se usa una red de difracción, no se necesita que la fuente esté tan alejada para ver el patrón de interferencia</p>	<p>Hacer una tabla para ir escribiendo las observaciones</p> <p>No hay que medir, hay que explicar, por lo tanto</p>	<p>Explicar</p> <p>Deducir cómo depende el patrón de la distancia a la fuente</p> <p>Variar el tipo de fuente.</p>

	Tiempo de respuesta del ojo Coherencia espacial Coherencia temporal			solamente se estiman las distancias Hay que variar las distancias	
Medición del grado de coherencia	Intensidad luminosa Sensor de intensidad luminosa Patrón de intensidades Frecuencia de muestreo	El sensor mide la intensidad luminosa	Si la frecuencia con que el sensor toma datos es baja, no se “ve” la curva. Si la abertura del sensor es grande, no se distingue un máximo de otro.	Hay que recorrer el patrón con el fotómetro	Medir intensidades Graficar la distribución de intensidades. Calcular el grado de coherencia.

INTERPRETACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS ESQUEMAS

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.

El desempeño del estudiante C1 en las predicciones muestra que su esquema reconoce la posibilidad de la interferencia cuando se trata de un sistema experimental de dos rendijas. No habla explícitamente de difracción, pero describe verbalmente un patrón de intensidades con las características de un patrón de difracción. Reconoce que con luz blanca no hay patrón de interferencia, en el sentido de franjas claras y oscuras. Este estudiante inicia sus actividades con un esquema que ya activa invariantes operatorios referidos a la interferencia y difracción de la luz, pero que conserva la propagación rectilínea cuando se refiere a la luz blanca que atraviesa la rendija. De acuerdo a la tipología de esquemas propuesto correspondería al tipo EH.

El estudiante C2, en cambio, responde a las predicciones desde un esquema centrado en la propagación rectilínea de la luz (ECMR). Considera que con una ranura o con dos ranuras se verán una o dos líneas respectivamente si se utiliza láser porque es una fuente muy direccionada y una zona central iluminada y difusa en los bordes si se utiliza linterna. Esta clase de esquema también surgió en forma predominante en la implementación de la propuesta en la cohorte anterior a modo de prueba piloto.

En las actividades que involucran mediciones de magnitudes físicas, es notable la utilización de metas parciales y reglas de acción, explicitadas no solo a través del lenguaje sino también a través de sus gestos. La grabación en video de estas actividades permite acceder a información complementaria de las grabaciones en audio. Se puede observar a los estudiantes C1 y C2 trabajando con autonomía durante las mediciones y el procesamiento de los datos. Todos los grupos se caracterizan por una automatización de ciertas conductas. Por ejemplo, el video también muestra que el estudiante C3 trabaja en conjunto con el estudiante C4 en la medición de las distancias entre máximos de intensidad que se observan en la pared del aula. C3 realiza marcas en las posiciones de los máximos, C4 ayuda con una pequeña linterna dado que acaban de oscurecer el aula, controlan cuidadosamente las posiciones de los máximos, C3 se levanta para buscar una regla y C4 sigue con el marcado de los máximos, C3 vuelve a su posición y continúan realizando las mediciones. Sus gestos reflejan un sincronismo en la secuencia y la regulación de esas pequeñas acciones, de forma tal que no necesitan explicitar verbalmente qué hace uno y qué hace otro, sus reglas de acción parecen estar implícitas en esa sucesión de gestos coordinados, entendiendo como gestos a pequeños fragmentos de la actividad. Esto se podría explicar por la experiencia de estos estudiantes en realizar trabajos de laboratorio, como si tuvieran “formateado” un esquema para proceder experimentalmente cuando abordan la tarea de medir una magnitud física a partir de un cierto modelo. Hay una actividad de pensamiento subyacente, que no depende de la situación en sí, sino de la destreza adquirida en situaciones anteriores.

Las columnas correspondientes a conceptos en acción y teoremas en acción, recorridas en forma temporal en las tablas presentadas, muestran cómo el estudiante va incorporando paulatinamente

conceptos en acción y teoremas en acción de mayor grado de abstracción y cómo va re-utilizando los conceptos iniciales en las diversas situaciones experimentales que va abordando.

SOBRE LA EFECTIVIDAD DE LA PROPUESTA

En el ítem anterior se realizó una caracterización diacrónica de los esquemas de dos estudiantes, utilizando distintos registros de la actividad que ponen de manifiesto tanto el discurso como la secuencia, regulación y ajuste de los gestos en función de las situaciones en cada instante. En esta instancia se evaluará el desempeño de los estudiantes a través de los informes grupales y a través de una evaluación final integradora individual que se presenta en el Anexo.

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. Sin embargo, es claro que el desempeño, en el sentido de saber hacer ahora lo que antes no sabía, es sólo un primer acercamiento a la evaluación de sus competencias, que también dependen de la disposición por parte del alumno de mejores metodologías, de recursos alternativos y de herramientas para no estar desprotegido frente a situaciones nuevas (Vergnaud, 2013).

REPORTES GRUPALES DE LOS ESTUDIANTES

La Tabla 3 muestra las competencias básicas que son evaluadas a través de los informes y las dimensiones que se han considerado en cada una de ellas. Los resultados corresponden a los logros finales de los estudiantes después de haber corregido y completado aquellos aspectos que el docente aconseja mejorar.

Para evaluar el logro de las competencias en cada una de las dimensiones se utilizó la siguiente rúbrica: Se indica con una X si el informe evidencia el logro de la competencia en cuestión y se distingue con un signo X+ si la misma se presenta en forma clara y explícita y con un símbolo X- cuando su respuesta no esté claramente explicitada, pero contiene indicios de un razonamiento correcto. Se utiliza un casillero en blanco cuando el informe no la incluye o su presentación y/o razonamientos involucrados sean incorrectos.

Tabla 3 - Desempeño de los estudiantes de licenciatura en física en la redacción de informes grupales.

Dimensiones		Grupo 1 C1 y C2	Grupo 2 C3 y C4	Grupo 3 C5 y C6	Grupo 4 C7 y C8	Grupo 5 C9, C10 y C11
Competencias para la organización y	Consistencia en la estructura y articulación entre las partes.	X ⁻	X ⁻	X ⁻		X ⁺
	Explicitación clara y precisa del problema a investigar	X ⁻				
	Claridad y precisión en el lenguaje.	X ⁺	X ⁺	X ⁻	X ⁻	X ⁺
Competencias cognitivas	Comprensión del concepto de onda electromagnética luminosa. Limitaciones del mismo.	X ⁺				
	Comprensión de los conceptos de interferencia y difracción.	X ⁺				
	Comprensión de los conceptos de coherencia espacial y temporal de la radiación	X ⁺		X ⁺		X ⁺
	Comprensión del concepto de grado de coherencia de un sistema experimental.	X ⁻	X ⁻	X ⁻		X ⁻
	Comprensión del modelo de interferencia y difracción en campo lejano.	X ⁺				

Competencias metodológicas	Aplicación del conocimiento teórico en el diseño, realización e interpretación de las experiencias.	X ⁺				
	Evaluación y estimación del grado de ajuste entre modelos y sistemas reales.	X ⁺				
	Argumentaciones válidas identificando hipótesis y conclusiones.	X ⁻				

Os reportes o informes de las actividades experimentales son elaborados grupalmente por los estudiantes y forman parte de una etapa final de síntesis y evaluación que, en general, resulta difícil y compleja a los estudiantes. Exige repensar, relacionar, reconstruir, transformar y reorganizar ideas desarrolladas en las clases, con el objetivo de elaborar un documento articulado para ser comunicado a los otros (Pesa, Bravo & Bravo, 2015). La evaluación de los informes de los alumnos se realiza con realimentación, es decir, tienen oportunidad de corregir y completar los aspectos no satisfactorios del informe.

EVALUACIONES INDIVIDUALES INTEGRADORAS

La evaluación integradora, de carácter individual, informa sobre el avance o progreso en determinado dominio o conocimiento, es decir, proporciona indicaciones de las competencias que va adquiriendo el estudiante. Con este criterio, se han elaborado una serie de preguntas y problemas para evaluar algunas de esas competencias básicas al finalizar el desarrollo de la propuesta. Las competencias que se pretende evaluar han sido seleccionadas entre los objetivos definidos en cada una de las actividades de la propuesta didáctica y las preguntas o problemas propuestos para la evaluación han sido sometidos a la revisión de pares docentes que se desempeñan en la misma asignatura. En el ámbito del laboratorio de la institución, la evaluación se realiza con realimentación, es decir, está integrada al proceso de aprendizaje y su principal objetivo es formativo. Los estudiantes, tanto aprobados como desaprobados, tienen la posibilidad de rever y corregir sus errores y los estudiantes desaprobados tienen otra instancia de evaluación. No solo se evalúa para promover sino para ayudarlos a alcanzar las competencias deseadas para la unidad de aprendizaje. En este reporte se consideran los resultados alcanzados en la primera instancia de evaluación.

De acuerdo al enunciado de la evaluación, las competencias involucradas en las distintas situaciones planteadas son las siguientes:

1- Reconocimiento de las limitaciones del diagrama para onda plana monocromática y linealmente polarizada.

2- Comprensión de las derivaciones básicas del análisis de Fourier: contenido en frecuencia de una onda cuando existe modulación de amplitud, de frecuencia y de fase.

3- Comprensión del concepto de diferencia de fase de dos ondas, expresiones algebraicas y representaciones simbólicas asociadas al mismo.

4- Comprensión de las características del ojo referidas al tiempo de respuesta, en cuanto a la capacidad para distinguir cambios aleatorios de patrones de intensidad.

5-Comprensión de las características de una cámara, en cuanto a la capacidad para distinguir cambios aleatorios de patrones de intensidad.

6- Comprensión del poder de resolución del ojo, como factor que impide visualizar la variación de la intensidad a lo largo de una dirección de propagación

7- Comprender los resultados que arrojan los medidores de intensidad luminosa según la frecuencia de muestreo

8- Comprensión de la relación entre el factor de visibilidad V y la coherencia de la fuente

9- Comprensión de la relación entre el factor de visibilidad V y las características del sistema

10- Comprensión de la relación entre V y el grado de coherencia

11- Explicar el origen de los patrones coloreados producidos por redes de difracción

12- Explicar la formación de patrones estables de intensidad con el uso de redes de difracción y de fuentes extensas

13- Identificar las magnitudes del sistema experimental que influyen en la visibilidad de un patrón estable de interferencia.

14- Evaluar el orden de magnitud de las distancias involucradas en el sistema experimental para garantizar la visibilidad de un patrón de interferencia y/o difracción

El desempeño de los alumnos de licenciatura en Física en la instancia de la evaluación final integradora se consigna en la Tabla 4, donde las competencias mencionadas en el párrafo anterior se consignan con el correspondiente número, en forma abreviada.

Los resultados se clasificaron según la siguiente rúbrica: Se indica con una X cuando la respuesta del estudiante manifiesta que logró desarrollar la competencia específica que se está evaluando. Se distingue además la calidad de su desempeño, con un signo X+ si la justificación de su respuesta es clara y explícita y con un símbolo X- cuando su respuesta no esté claramente explicitada, pero contiene indicios de un razonamiento correcto. Se utiliza un casillero en blanco cuando el estudiante no responda o la respuesta indica que no logró desarrollar la competencia que se está evaluando, es decir, es incorrecta

Tabla 4 - Desempeño de los estudiantes de licenciatura en física en la instancia de evaluación

Competencia	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		Grupo 4		Grupo 5		
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
1- limitaciones diagrama onda	X ⁺	X ⁺	X ⁻	X ⁻	X ⁺	X ⁺	X ⁺	X ⁻	X ⁺	X ⁺	X ⁺
2- comprensión análisis Fourier	X ⁺	X ⁻		X ⁻			X ⁻			X ⁻	X ⁻
3- comprensión diferencia de fase	X ⁺										
4- tiempo de respuesta del ojo	X ⁻	X ⁺	X ⁺		X ⁺	X ⁺	X ⁺		X ⁺	X ⁻	X ⁻
5- tiempo de respuesta cámara	X ⁻	X ⁻	X ⁺	X ⁺	X ⁺	X ⁺	X ⁻		X ⁻	X ⁻	X ⁻
6- poder de resolución del ojo		X ⁻	X ⁺	X ⁺	X ⁺	X ⁺	X ⁻	X ⁻	X ⁻	X ⁻	
7- mediciones I (t)		X ⁻					X ⁻		X ⁻		
8- V y la coherencia de la fuente	X ⁺	X ⁻	X ⁻	X ⁺	X ⁺	X ⁺					
9- V y las características del sistema	X ⁻	X ⁻	X ⁻	X ⁻	X ⁺	X ⁻			X ⁻	X ⁺	X ⁺
10- relación entre V y γ	X ⁺				X ⁻	X ⁺	X ⁺				
11- patrones coloreados en redes	X ⁻	X ⁺									
12- redes y fuentes extensas	X ⁻	X ⁺	X ⁻	X ⁻	X ⁺	X ⁺	X ⁺				
13- visibilidad del patrón	X ⁺	X ⁻		X ⁻	X ⁻	X ⁻	X ⁻		X ⁻	X ⁻	X ⁻
14- orden magnitud de las dimensiones sistema experimental	X ⁻	X ⁻		X ⁻	X ⁻		X ⁻		X ⁻	X ⁻	X ⁻

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS SOBRE LA EFECTIVIDAD DE LA PROPUESTA

Para dimensionar los logros obtenidos, se pueden analizar las predicciones de los alumnos antes de desarrollar las actividades experimentales, inferidas a través de la grabación en audio y de los gráficos que realizan antes de las observaciones. En el caso de los estudiantes de licenciatura en física los resultados se pueden resumir de la siguiente forma:

* Esquemas centrados en el modelo de rayos (ECMR):

Los estudiantes C2, C3, C4, C5 y C8 realizan predicciones en las cuales no utilizan conceptos de la óptica ondulatoria. Algunas respuestas características que se obtienen de los registros en audio son las siguientes:

(a) *“con dos rendijas y láser se verán dos líneas”*

(b) *“con dos rendijas y láser se verá una zona clara”* (o no se verá nada por baja intensidad)

(c) *“con una rendija y láser se verá una línea”*

(d) *“con una rendija y fuente común de luz blanca se verá un poco de luz blanca en la pantalla”*

* Esquemas híbridos (EH)

Los estudiantes C1, C6, C7, C9, C10 y C11 mantienen razonamientos basados en la propagación rectilínea de la luz e incorporan a la vez conceptos de la óptica ondulatoria. Algunas respuestas características de este tipo de esquema combinan la opción (a) con las restantes:

(a) *“con una rendija y láser se verá una línea porque el láser es direccionado”*

(b) *“con dos rendijas y láser se verá interferencia”*

(c) *“con dos rendijas y fuente de luz blanca se verá dispersión de la luz”*

(d) *“con una rendija y luz blanca se verá dispersión”*

Los resultados presentados en la Tabla 4 permiten inferir que, a excepción del estudiante C8, los demás han desarrollado la mayoría de las competencias necesarias para responder satisfactoriamente a las situaciones que se han considerado en la evaluación. De acuerdo a los criterios de corrección que se aplican en el ámbito de las experiencias de laboratorio en la institución, corresponden a resultados calificados como muy buenos o buenos. Según la tipología de modelos que se ha propuesto, los resultados presentados implican el desarrollo de esquemas centrados en el modelo ondulatorio de la luz (ECMO) por parte de diez de los estudiantes.

Se debe resaltar aquí que la actividad de elaboración del informe, incluida la corrección y nueva presentación, constituye una etapa de síntesis e integración de todas las actividades, que influyen notablemente en la integración y estructuración de sus conceptos en acción, y en consecuencia, en su desempeño frente a las situaciones y/o cuestiones presentadas en la evaluación final integradora.

SINTESIS DE RESULTADOS

Los resultados referidos a los componentes de los esquemas, para los estudiantes de licenciatura muestran un enriquecimiento 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, asociada al incremento de inferencias; 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.

Se consideró avanzar más allá de una caracterización de los componentes de los esquemas, tratando de identificar en ellos alguna estructura. Los resultados de la prueba piloto referidos al desempeño inicial de los estudiantes y al desempeño en la evaluación final integradora, han sugerido una evolución en la organización y estructura de los componentes. En busca de una categorización para describir esa

evolución de los esquemas, se consideró apropiada la interpretación de Galili sobre la estructuración de las teorías físicas fundamentales (2014) y se propone así una tipología que distingue tres clases de esquemas:

- ECMR (esquema centrado en el modelo de rayos) donde todas las respuestas involucran razonamientos basados en la propagación rectilínea de la luz.
- EH (esquema híbrido), donde se mezclan acriticamente conceptos de la óptica geométrica y conceptos de la óptica ondulatoria. Representan un continuo de posibilidades, en el cual los invariantes que corresponden a la óptica ondulatoria se van integrando en el cuerpo de esa estructura, de manera híbrida al inicio y tendiendo paulatinamente a desplazar de su lugar central a los invariantes correspondientes al modelo de rayos.
- ECMO (esquema centrado en el modelo ondulatorio), donde los invariantes operatorios que ocupan el núcleo y el cuerpo de la estructura, pertenecen a la óptica ondulatoria o han adaptado su significado inicial al de la óptica ondulatoria.

Los estudiantes manifiestan al iniciar las actividades experimentales, dificultades similares a las reportadas en la investigación educativa. En efecto, 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 bien desde el esquema denominado EH (esquema híbrido). Esta situación se manifiesta durante la implementación de la prueba piloto y durante la implementación definitiva de la propuesta. Las grabaciones en audio permiten detectar además, algunas intervenciones en las que asignan extensión espacial a la onda electromagnética para predecir si atraviesa o no la rendija.

Los resultados del desempeño con los reportes o informes grupales y con la evaluación individual integradora, luego de la aplicación de la propuesta didáctica, indican que la mayoría de los estudiantes de ambas carreras han logrado una evolución desde esquemas iniciales del tipo ECMR o EH, hasta esquemas de tipo ECMO. Esta afirmación se realiza teniendo en cuenta la consideración de Vergnaud (2014) acerca de que un esquema organiza la conducta y la actividad de pensamiento. En este sentido, un buen desempeño en las situaciones que se están evaluando solo es posible si sus razonamientos están basados en esquemas que tienen una estructura del tipo ECMO. El análisis realizado muestra que:

* diez de once estudiantes de licenciatura en física han respondido satisfactoriamente a la evaluación individual y han calificado como aprobados durante la implementación definitiva de la propuesta didáctica.

Se puede decir entonces que el desafío de la propuesta didáctica consistió en ayudar a los estudiantes a transformar paulatinamente la estructura de sus esquemas en el sentido de evolucionar hacia un esquema centrado en el modelo ondulatorio, de manera tal que tenga efectividad para explicar y/o abordar con éxito situaciones referidas a los fenómenos de interferencia y difracción de la luz.

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 o mediante la asignación de nuevos significados.

REFLEXIONES FINALES

En distintas etapas de la investigación han surgido reflexiones sobre aspectos de este proceso que ameritan ser profundizados.

La comprensión del fenómeno de la difracción resulta sumamente complejo para los estudiantes. Al finalizar el desarrollo de la propuesta 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 la conceptualización del principio de Huygens-Fresnel les sigue resultando difícil. Aparentemente este hecho está relacionado con la dificultad referida también en la investigación educativa, 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.

La potencialidad de las interacciones discursivas entre pares y entre estudiante-docente durante el desarrollo de actividades experimentales, para el desarrollo cognitivo, se ha revelado también como un campo de estudio promisorio para el planteo de estrategias en el contexto de un laboratorio de física. Los registros en audio y en video muestran una variedad de interacciones, que van entrelazando las reglas de acción que activa un estudiante con las que propone el grupo del trabajo o el estudiante que toma el papel de líder. Por ejemplo, sería interesante estudiar si hay diferencias en cuanto al desarrollo cognitivo que logra un estudiante interactuando con un par aventajado y el desarrollo que puede alcanzar en una interacción con un grupo más diversificado, como lo son los grupos de ingeniería.

La contribución al proceso de aprendizaje que proporciona la actividad de síntesis y reflexión que el estudiante realiza durante la elaboración de sus informes o reportes de la actividad realizada también es otro tema interesante y factible de profundizar. La capacidad para desarrollar por escrito ideas y conceptos implica comprenderlos con un nivel de profundidad mayor que cuando simplemente se los aborda y estudia en el laboratorio. En esta investigación se los ha considerado una instancia para evaluar el desempeño luego de realizar las actividades experimentales, pero no se han constituido por sí mismos en un objeto de estudio.

REFERÊNCIAS

- Ambrose, B., Heron, P., Vokos, S., & McDermott, L. (1999). 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., & Mc Dermott, L. (1999). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference. *American Journal of Physics*, 67(2), 146–155.
- Araújo, S., & Da Silva, F. (2009). A teoria ondulatória de Huygens em livros didáticos para cursos superiores. *Ciência & Educação*, 15(2), 323-341.
- Ausubel, D. (1976). *Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo*. México: Trillas.
- Ausubel, D. (2000). *Adquisición y retención del conocimiento. Una perspectiva cognitiva*. Barcelona: España: Paidós.
- Baquero, R. (2009). *Vygotsky y el aprendizaje escolar*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Aique.
- Bravo, S., & Pesa, M. (2015). Diseño de una propuesta didáctica para el aprendizaje significativo de los conceptos de interferencia y difracción en el laboratorio de física. In *Actas del VII Encuentro Internacional sobre Aprendizaje Significativo* (511-525). Burgos, España. Recuperado de <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.
- Colin P., & 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., & 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](https://doi.org/10.1119/1.1371256)
- Colin, P., & Viennot, L. (2002). Géométrie, phase, cohérence: Questions d'optique. *Bulletin de la Société Française de Physique*, 137, 1-19. Recuperado de [http://sfp.in2p3.fr/bulletin/article COLIN VIENNOT.pdf](http://sfp.in2p3.fr/bulletin/article_COLIN_VIENNOT.pdf)
- Galili, I., & Hazan, A. (2000). The influence of an historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets-schemes analysis. *Physical Education Research, American Journal of Physics. Suppl.* 68(7), S3-S15.
- Galili, I. (2014). Teaching Optics: A Historico-Philosophical Perspective. In M. Matthews (Ed.) *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*. (pp.97-128) 3 vols. New York, NY: Springer.

- Hecht, E., & Zajac, A. (2000). *Optica*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Iberoamericana S.A.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2010). *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw Hill.
- Hodson, D. (1994). Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(3), 229-313.
- Hofstein, A., & Kind, P. (2012). Learning In and From Science Laboratories. In B. J. Fraser, K. Tobin, & Campbell J. McRobbie (Eds). *Second International Handbook of Science Education*. (pp. 189-208). Dordrecht: Springer.
- Krapas, S., Pessôa G., & Uzêda, D. (2011). O tratado sobre a luz de Huyguens: comentarios. *Caderno Brasileiro de Ensino Física*, 28(1), 123-151.
- Lazarovitz, R., & Tamir, P. (1994). Research on using laboratory instruction in science. In *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*. D. L. Gabel (Ed.). Nueva York, NY: Macmillan
- Maurines L., & Mayrargue A. (2007) Utiliser l'histoire de l'optique dans l'enseignement : pourquoi ? comment ? , *Journées nationales de l'UdPPC "Paris de Sciences"*, Paris.
Recuperado de 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.
Recuperado de <http://sfp.in2p3.fr/bulletin/Maurines%20corrige.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. & 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.
- Moreira, M. A. (2004). Lenguaje y aprendizaje significativo. In M. A. Moreira, C. Caballero, & M. L. Rodríguez Palmero, (Coords.). *Aprendizaje significativo: interacción personal, progresividad y lenguaje*. (pp 67-86) Burgos: Servicio de Publicaciones Universidad de Burgos, España.
- Pesa, M., Bravo, S., & Bravo. B. (2015). Los informes de laboratorio como recurso efectivo para el desarrollo de competencias comunicativas y argumentativas. In *Actas del VII Encuentro Internacional sobre Aprendizaje Significativo* (373-383). Burgos. Recuperado de <http://www.xinix.es/jornadas/actas.pdf>
- Rodríguez, M., & Moreira, M. (2004). La teoría de campos conceptuales de Gérard Vergnaud. *La Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, la Enseñanza de las Ciencias y la Investigación en el Área*. Instituto de Física da UFRGS. Porto Alegre, RS.
- Serway R., & Jewett J. (2005). *Física para ciencias e ingeniería*. (7a ed., Vol. 2) México: CENGAGE Learning.
- Tipler, P. (1996). *Física*. Barcelona: Reverté S. A.
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Récherches en Didactique des Mathématiques*, 10(23), 133-170.
- Vergnaud, G. (1994). Multiplicative conceptual field: what and why? In H. Guershon, & J. Confrey, J. (Eds.) *The development of multiplicative reasoning in the learning of mathematics*. (pp. 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.
- Vygotsky, L.S. (1991). *A formação social da mente*. (4a ed.). São Paulo, SP: Martins Fontes.
- Vygotsky, L. (1978). *Mind in Society*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Vygotsky, L. (1995). *Pensamiento y Lenguaje*. (Traducción del original ruso, 1978). Buenos Aires, Argentina: Ediciones Fausto. Recuperado de <http://psikolibro.blogspot.com>
- Wosilait, K., Heron, P., Schaffer, P., & Mc 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). México: Pearson.

Recebido em: 19.05.2016

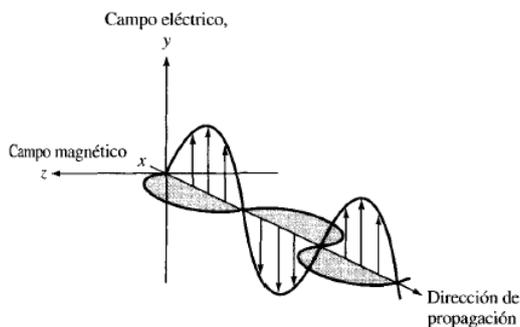
Aceito em: 21.07.2016

ANEXO 1: Guía de Actividades de la propuesta didáctica

Actividades Introdutorias

La siguiente figura representa una onda electromagnética plana y monocromática, que se propaga en la dirección del eje x . La intensidad del campo eléctrico E y del campo magnético B varían sinusoidalmente.

1) A partir de la bibliografía disponible realice una síntesis sobre los conceptos principales y las características de este modelo de onda electromagnética. Compare con el modelo de onda mecánica.

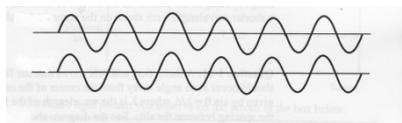


a) ¿Qué tipo de representación es?

b) Describa cómo varían E y B en el tiempo y en el espacio a medida que se propaga la onda.

c) A partir de la bibliografía disponible realice una síntesis sobre los conceptos principales y sobre las características de este modelo de onda electromagnética. Compare con el modelo de onda mecánica.

2) Suponga que los gráficos siguientes representan la variación de la intensidad (del campo eléctrico) en función del tiempo de dos ondas luminosas que inciden en un punto P cualquiera en una pantalla.

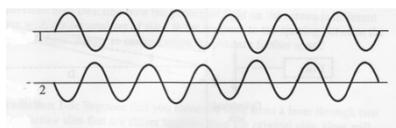


Si las ondas 1 y 2 se comportan como indica la figura (están en fase en el punto P)

a) dibuje la onda que resulta de la adición de estas dos ondas

b) ¿Cómo será la intensidad luminosa en ese punto? ¿Se mantiene en el tiempo?

3) Ahora suponga que la variación de la intensidad del campo eléctrico en función del tiempo en otro punto Q es como se indica en la figura siguiente, es decir, las ondas están desfasadas un ángulo π .

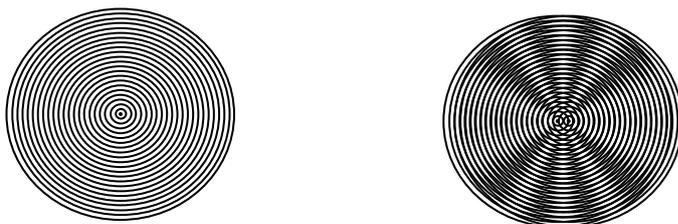


a) Dibuje el resultado de la superposición de estas dos ondas en el punto P

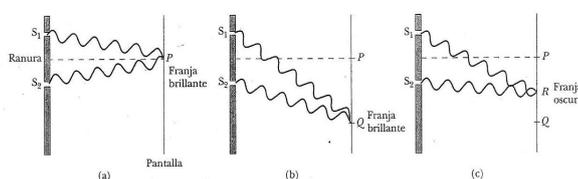
b) ¿Cómo será la intensidad luminosa en ese punto? ¿Se mantiene este valor?

4) Se pueden representar los trenes de onda de una fuente luminosa puntual por medio de círculos concéntricos, de la misma manera que los frentes de ondas de fuentes puntuales que generan ondas en el agua.

Utilice los diagramas que se proporcionan (en papel y transparencia) para representar dos fuentes luminosas emitiendo, y explique en este caso:



- ¿Qué representan los círculos concéntricos? ¿Qué tipos de diagrama son: $E(t)$, $E(x)$ o algún otro? Explique
 - ¿Qué representa la distancia entre un círculo y otro?
 - ¿Cómo puede saber si las dos fuentes están emitiendo en fase?
 - ¿Qué sucede en aquellos puntos del plano donde se cruzan dos círculos cuando se superponen las ondas generadas por las dos fuentes? Explique.
 - ¿Cómo influye la separación entre las fuentes en la formación de las líneas de máximos de interferencia? Explique
 - ¿Se forma un patrón de interferencia luminosa si S_1 emite radiación con una diferencia de fase constante con respecto a la fuente S_2 ?
 - ¿Cómo varía el campo eléctrico a lo largo de la línea que une todos los puntos donde se cruzan los círculos?
 - ¿Cómo puedo lograr que este patrón de franjas brillantes y oscuras se mantenga constante en el espacio a medida que transcurre el tiempo? Analice cómo avanzan los frentes de onda y explique.
- 5) Explique por qué se forman franjas brillantes y oscuras en los puntos P, Q y R de la siguiente figura. Explique qué representan las “ondas” que va desde S_1 y S_2 hasta el punto P y las hipótesis que se están considerando en este gráfico.



Objetivos de las actividades introductorias

- Identificar las magnitudes físicas que definen una onda electromagnética
- Comprender las limitaciones del diagrama de onda electromagnética plana de extensión infinita y amplitud máxima constante, para representar la radiación luminosa
- Comprender los principales fundamentos del análisis de Fourier
- Explicitar y comprender los conceptos de fase, longitud de onda, frecuencia y amplitud de una onda electromagnética.
- Conocer los órdenes de magnitud de la longitud de onda y frecuencia de una onda electromagnética en el rango del visible

f- Diferenciar las distintas representaciones que se utilizan en la enseñanza formal para describir aspectos de las variables relacionadas a las ondas electromagnéticas y comprender sus significados: gráficos $E(t)$, $B(t)$, $E(x)$ y $B(x)$, frentes de onda, dirección de propagación, etc.

g- Explicitar y comprender los conceptos de diferencia de fase, coherencia temporal y coherencia espacial, para dos fuentes que emiten

h- Incorporar el ojo como sensor de la intensidad luminosa en una pantalla

i- Conocer los órdenes de magnitud del tiempo de respuesta del ojo como sensor y de su poder de resolución

j- Comprender las limitaciones del ojo como sensor para detectar las variaciones en el tiempo y en el espacio de la intensidad luminosa

k- Comprender el fenómeno de la interferencia de ondas luminosas a partir de la analogía con las ondas de agua en un estanque

l- Comprender el principio de superposición de ondas

m- Realizar inferencias acerca de las condiciones necesarias para la estabilidad del patrón de intensidades en una pantalla

n- Realizar inferencias acerca de la dependencia del patrón de intensidades con la distancia entre las fuentes y con la diferencia de fase

Actividad 1: Predicciones y Observaciones

Actividades de Predicción

1- Considere un sistema experimental constituido por: una fuente de luz láser, dos pequeñas ranuras separadas una distancia d ($d < 0,1$ mm) y una pantalla.

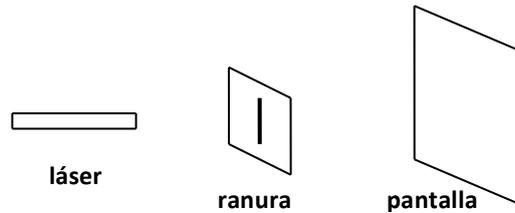


a) ¿Qué espera observar en la pantalla cuando se encienda la fuente de luz láser? Explique su respuesta

b) ¿Qué espera observar en la pantalla si cambia la fuente láser por una lámpara incandescente común? Explique su respuesta

c) ¿Qué espera observar en las situaciones anteriores si cambia el espaciado (aumenta o disminuye) entre las rendijas? Explique su respuesta.

2- Ahora considere un sistema experimental formado por: una fuente de luz láser, una pequeña ranura de ancho a ($a < 0,1$ mm) y una pantalla.



a) ¿Qué espera observar en la pantalla cuando se encienda la fuente de luz láser? Explique su respuesta.

b) ¿Qué esperaría observar en la pantalla si cambia la fuente láser por una lámpara incandescente común? Explique su respuesta.

c) ¿Qué espera observar en la pantalla en las dos situaciones anteriores si se cambia la ranura por otra más ancha (mayor que 1mm)? Explique su respuesta.

Actividades experimentales: estudio cualitativo

3- ¿Se cumplen las predicciones realizadas en (1) y (2)? ¿Por qué? Explique las observaciones realizadas.

4- Utilice el sistema experimental (de múltiples ranuras) que se muestra a continuación para variar la distancia en las ranuras y el ancho de las ranuras. Observe en una pantalla los patrones de intensidades que se obtienen con fuente láser y realice una descripción detallada.



5- Utilice un sistema similar (de ranuras simples) para variar el ancho de las ranuras. Observe en la pantalla los patrones de intensidades que se obtienen con fuente láser y realice una descripción detallada.

6- Realice una síntesis de los resultados de sus observaciones.

a) ¿Puede explicar los resultados con las dos ranuras, a partir del modelo cualitativo de interferencia de dos fuentes puntuales estudiado a través de los diagramas de frentes de onda? Retome la actividad con las transparencias si es necesario.

b) ¿Cómo explicaría los resultados obtenidos con una sola ranura?

Objetivos de la Actividad 1

a- Distinguir experimentalmente un patrón de interferencia por dos ranuras de un patrón de difracción por dos ranuras con fuente láser

b- inferir la dependencia de los máximos y mínimos de interferencia con la distancia entre rendijas, con fuente láser

c- Inferir a partir de las observaciones cualitativas la dependencia de los mínimos de difracción con el ancho de la rendija, con fuente láser.

d- Distinguir la diferencia entre un patrón de interferencia de dos rendijas y un patrón de interferencia de varias rendijas, para el mismo espaciamiento entre ellas y el mismo ancho, con fuente láser

e- Generar explicaciones cualitativas acerca de los máximos de interferencia a partir de la superposición de frentes de onda que provienen de una fuente puntual y monocromática

f- Explicitar las características del láser, que permiten la observación de los patrones de interferencia y difracción en la pantalla

g- Realizar inferencias cualitativas acerca de la coherencia espacial y temporal de una fuente extensa y no monocromática

h- Realizar inferencias cualitativas acerca de la variación temporal de la intensidad luminosa en la posición de los máximos y mínimos de interferencia y de las limitaciones del ojo como sensor para detectar los cambios

i- Realizar inferencias cualitativas acerca de la variación espacial de la intensidad luminosa en un plano que contenga las líneas de máximos y mínimos de interferencia y de las limitaciones del ojo como sensor para detectar

j- Observar experimentalmente la distribución de la intensidad luminosa en la pantalla con rendijas simples y múltiples, de las mismas dimensiones que las utilizadas con láser

k- Generar explicaciones cualitativas acerca de las observaciones con fuentes comunes.

Actividad 2: Medición de la longitud de onda del láser

Difracción por una rendija

1- Diseñe y arme un sistema experimental formado por una rendija simple iluminada con luz láser y una pantalla:

a) ¿Cuáles son las características del patrón observado en la pantalla? ¿Qué diferencia existe con el patrón obtenido con las ranuras dobles?

b) ¿Cuál es el modelo que explica los resultados? ¿Cuáles son los supuestos del modelo? ¿Se cumplen los supuestos del modelo en el sistema experimental? Justifique su respuesta.

d) ¿Cómo se modifica el patrón de difracción si cambia el ancho de la ranura? Justifique cuantitativamente.

Interferencia por dos o más rendijas

2- Diseñe y arme un sistema experimental formado por dos ranuras, una fuente de luz láser y una pantalla:

a) ¿Cuáles son las características del patrón observado en la pantalla? ¿En qué se diferencia del patrón de difracción?

b) ¿Cuál es el modelo que explica los resultados? ¿Se cumplen los supuestos del modelo en su sistema experimental? Explique.

c) ¿Cómo se modifica el patrón de intensidades si cambia la distancia entre ranuras? ¿y si cambia el ancho de las ranuras?

d) ¿La intensidad de los máximos de interferencia que se observa en la pantalla es la misma para todos? Explique

e) Considere un sistema de tres o más ranuras y explique los resultados en base al modelo de interferencia de ondas coherentes

Medición de λ

3- Elija el sistema experimental que le parezca más conveniente, difracción por una ranura o interferencia por dos o más ranuras, y determine experimentalmente la longitud de onda del láser (λ). Considere como datos los valores consignados del ancho de las ranuras y de la distancia entre ranuras, que figuran en el instrumental utilizado. Solicite al docente la precisión de estos datos.

- a) Explícite el método de medición e identifique las variables a medir
- b) Controle los supuestos del modelo teórico
- c) Planifique la experiencia a fin de minimizar la incerteza experimental del resultado final
- d) Compare sus resultados con los obtenidos por otros grupos de trabajo y discuta los resultados

Objetivos de la Actividad 2

- a- Seleccionar y justificar el método de medición de λ
- b- Identificar todos los supuestos del modelo teórico
- c- Controlar adecuadamente los supuestos del modelo
- d- Medir magnitudes y evaluar la incerteza experimental
- e- Evaluar correctamente la incerteza del resultado final
- f- Identificar pautas para minimizar el error final del resultado.

Actividad 3: Medición del parámetro de una red de difracción

1- Analice teóricamente el fenómeno de difracción por un sistema de N rendijas de ancho a y separadas una distancia d , una fuente de luz láser y una pantalla.

- a) ¿Qué distribución de intensidades espera observar en una pantalla?
- b) Controle experimentalmente en forma cualitativa las predicciones del modelo
- c) Aumente el número N de rendijas y observe cómo varía el patrón de intensidades. Explique sus resultados experimentales
- d) Utilice una “red de difracción” por transmisión y observe el patrón de intensidades con la fuente de luz láser. Explique los resultados experimentales.
- e) Observe a través de una red de difracción, colocándola frente al ojo, una fuente de luz blanca y explique los resultados.

2- Considere ahora conocida la longitud de onda del láser que está utilizando (pida las especificaciones al docente) y proponga un método para medir el número de líneas por mm de una red de difracción.

- a) Explícite el método de medición e identifique las variables a medir
- b) Controle los supuestos del modelo teórico
- c) Planifique la experiencia a fin de minimizar la incerteza experimental del resultado final
- d) Compare sus resultados con los obtenidos por otros grupos de trabajo y discuta los mismos.

3- Un disco compacto funciona como una red de difracción por reflexión. Ud. dispone de varios CD y DVD a los cuales se les retiró la capa reflectora, por lo cual ahora pueden funcionar como redes de difracción por transmisión.

a) Utilice el láser para obtener el patrón de difracción (puede hacerlo por reflexión o por transmisión) y mida la cantidad de líneas por mm para un CD y para un DV.

b) Explique los espectros de colores que se observan con los CDs cuando incide luz blanca.

c) ¿Por qué se llama red de difracción?

d) ¿Cómo define el poder separador de una red de difracción?

4- Analice ahora el funcionamiento de la red de difracción como base de un método para medir longitudes de onda, (analice sensibilidad, exactitud, alcance, etc. en términos de la dispersión y el poder separador de la red). Compare la red con el prisma, ambos como elementos básicos de un espectrómetro. Analice ventajas, desventajas y limitaciones.

Objetivos de la Actividad 3:

a- Identificar redes de difracción en la vida cotidiana

b- Comprender el funcionamiento de las redes de difracción

c- Conocer aplicaciones tecnológicas de las redes de difracción

d- Seleccionar y justificar el método de medición del número de líneas por mm

e- Identificar todos los supuestos del modelo teórico

f- Controlar adecuadamente los supuestos del modelo

g- Medir magnitudes y evaluar correctamente la incerteza experimental de ellas

h- Evaluar correctamente la incerteza del resultado final

i- Identificar pautas para para minimizar el error final del resultado.

Actividad 4: interferencia y difracción con fuentes comunes

1- Realice las siguientes experiencias, de carácter cualitativo:

a) Observe a través de una ranura, distintas fuentes luminosas: fuentes cuasi puntuales (linterna de un solo led) y fuentes extendidas (tubos fluorescentes).

b) ¿Qué ocurre si ahora pone filtros a la salida de la ranura? ¿Cambian sus resultados?

c) ¿Qué ocurre si se aleja de la fuente para hacer las observaciones (considere distancias entre un metro y 300 metros)?

d) ¿Qué ocurre si se utilizan ranuras de distinto ancho?

e) ¿Qué ocurre si rotamos la ranura en un plano perpendicular a la dirección en que incide la luz sobre ellas?

2- Realice las siguientes experiencias, de carácter cualitativo:

a) Observe a través de un sistema de dos ranuras, distintas fuentes luminosas: fuentes cuasi puntuales (linterna de un solo led) y fuentes extendidas (tubos fluorescentes).

b) ¿Qué ocurre si ahora pone filtros a la salida de la/s ranura/s? ¿Cambian sus resultados?

c) ¿Qué ocurre si se aleja de la fuente para hacer las observaciones (considere distancias entre un metro y 300 metros)?

d) ¿Qué ocurre si se utilizan distintos sistemas de ranuras (mayor número de ranuras, más juntas, redes de difracción, etc.)?

e) ¿Qué ocurre si rotamos las ranuras en un plano perpendicular a la dirección en que incide la luz sobre ellas?

3- Realice un cuadro para resumir sus resultados anteriores, o sistematícelos de alguna otra forma para comparar. Elabore conclusiones.

4- Considere un modelo más cercano a la realidad: el modelo de fuente extensa y no monocromática y las condiciones para que se distinga un patrón estable de interferencia y/o difracción en la pantalla (Landsberg, 1983; Cudmani et al., 1990). Explique los resultados obtenidos en las experiencias anteriores a través de estas consideraciones

5- ¿Cuándo podemos considerar que una fuente luminosa se comporta como “fuente puntual”? Utilice la relación teórica que vincula las dimensiones de su sistema y la longitud de onda de la luz para estimar cuándo puede considerar la fuente como puntual. ¿Concuerdan sus estimaciones teóricas con sus resultados experimentales?

6.- ¿Es posible realizar la experiencia de Young con luz blanca? ¿Para qué se necesita el primer orificio del dispositivo de Young? ¿Cuán pequeño debe ser? ¿A qué distancia del orificio se debe colocar la doble abertura? ¿Existe algún límite para la separación entre las mismas? Explique. Busque bibliografía que describa cómo realizó Young su experimento de doble rendija en 1801. ¿Ud. cree que podría reproducirlos?

7- La difracción de la luz se observó experimentalmente en la década de 1660, en cuidadosos experimentos realizados por Grimaldi. En sus experimentos dejaba pasar un rayo de luz solar a un cuarto oscuro a través de un orificio lo más pequeño posible en una de sus paredes, para iluminar la pared opuesta encontrando que la mancha de luz, sobre la segunda pared, era más ancha que lo predicho por los cálculos geométricos y, además, estaba bordeada por bandas coloreadas. Encontró resultados similares cuando observó en la pared opuesta la sombra de un delgado hilo colocado dentro de la trayectoria del haz de luz. Así observó por primera vez el fenómeno de la *difracción* por un obstáculo: franjas iluminadas dentro de la sombra del objeto. ¿Ud. podría reproducir hoy en día esas experiencias? Justifique desde el modelo de fuente extensa y no monocromática las dimensiones que deberían tener las distintas variables que intervienen para observarlo en las mismas condiciones.

Objetivos de la Actividad 4

El objetivo general 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:

- a- comprender las limitaciones de las distintas representaciones gráficas de la radiación luminosa
- b- comprender los conceptos de tiempo de coherencia y longitud de coherencia para una fuente real
- c- comprender los conceptos de coherencia espacial y coherencia temporal para un sistema óptico
- d. conocer los órdenes de magnitud del tiempo de coherencia y de la longitud de coherencia para las fuentes más comunes
- e- conocer el tiempo de respuesta y el poder de resolución del ojo y de algunas cámaras
- f- comprender el modelo que explica los resultados experimentales
- g- desarrollar habilidades para explicar resultados experimentales cualitativos
- h- desarrollar habilidades para estimar magnitudes y diseñar sistemas ópticos que permitan visualizar los patrones de intensidad.

Actividad 5: Medición del grado de coherencia del campo luminoso

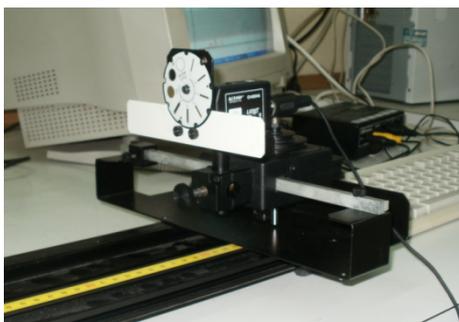
La posibilidad de observación de la distribución alterna de las franjas claras y oscuras en el campo de interferencia depende sustancialmente de la iluminación de ese fondo. Para valorar la visibilidad o el contraste del cuadro de interferencia en un punto dado del campo de interferencia de dos ondas, Michelson introduce el parámetro de visibilidad V , definido como:

$$V = \frac{I_{máx} - I_{mín}}{I_{máx} + I_{mín}}$$

El valor V puede variar entre uno y cero. Cuando $V=1$ el cuadro de interferencia es de mayor contraste y cuando $V=0$ desaparece totalmente. Para que el ojo humano pueda diferenciar con seguridad la alternación de las franjas claras y oscuras en el cuadro de interferencia, el valor de V debe ser mayor que uno ($V \geq 0,1$).

Considerando que los haces que interfieren tienen la misma intensidad y el mismo estado de polarización, el parámetro de visibilidad del cuadro de interferencia resulta ser igual a la fracción de luz coherente que se encuentra presente en los haces que interfieren (ver Lansdberg, 1983). Las ideas acerca de luz completamente coherente o completamente incoherente son condiciones extremas, todas son parcialmente coherentes, y se habla entonces de *coherencia parcial* o de *grado de coherencia*.

Ud. dispone de un equipo que cuenta con un fotómetro que se puede deslizar sobre una pantalla para medir las intensidades a lo largo de la misma, y una interfase a PC para el registro y procesamiento de los datos. El fotómetro tiene incorporado un disco para seleccionar distintas aperturas.



a) Ajuste el sistema experimental, para lograr un patrón de interferencia o difracción en la pantalla. Regule la frecuencia de muestreo del sensor, según la velocidad con que se desliza sobre la pantalla.

b) Realice las mediciones de las intensidades del patrón a lo largo de la pantalla. Procese los datos con el software asociado a la interfase y obtenga las gráficas que le permiten estudiar el patrón de intensidades.

c) Calcule el grado de coherencia, dado por el factor de visibilidad V de la radiación, en distintas zonas del patrón de intensidades.

d) Repita las mediciones para:

- i) Distintas distancias de las ranuras a la pantalla
- ii) Un láser con mayor ancho de banda
- iii) otros sistemas de ranuras, con distintos espaciamientos
- iv) otros valores de apertura del fotómetro (mayor o menor resolución espacial)

e) Explique los resultados anteriores. ¿De qué depende el grado de coherencia en su sistema experimental? ¿Cómo se relacionan estos resultados con las observaciones realizadas en la Actividad 4? Realice una síntesis.

Objetivos de la Actividad 5

El objetivo general de la actividad consiste en comprender el concepto integrador de *grado de coherencia* de la radiación incidente en una zona de la pantalla. A ello contribuyen varios objetivos específicos tales como:

a- profundizar sobre el funcionamiento del ojo como sensor de la intensidad luminosa y su respuesta a las características de los patrones de interferencia y difracción

b- comprender el funcionamiento del fotómetro como sensor de la intensidad luminosa

c- comprender la relación entre el factor de visibilidad del patrón, V , y el grado de coherencia γ del campo luminoso en una región del espacio.

d- comprender el significado del parámetro γ

e- desarrollar habilidades de planificación de la experiencia (por ej., seleccionar la apertura del fotómetro, seleccionar la frecuencia de muestreo, etc.)

f- desarrollar capacidad de realizar explicaciones, inferencias y síntesis de resultados.

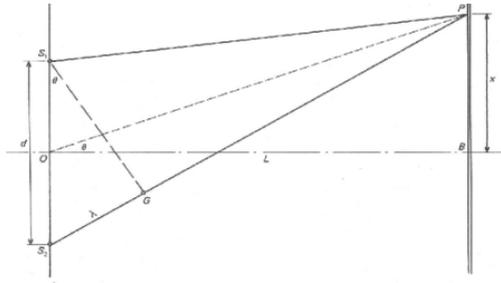
ANEXO 2: Enunciado de evaluación

1.- Un análisis de la interferencia de dos fuentes puntuales que emiten con diferencia de fase φ constante, muestra que a distancias grandes y ángulos pequeños la posición de los máximos estará dada por:

$$y = \lambda \frac{L}{d} \left(m - \frac{\varphi}{2\pi} \right) \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

y la posición de los mínimos de intensidad por:

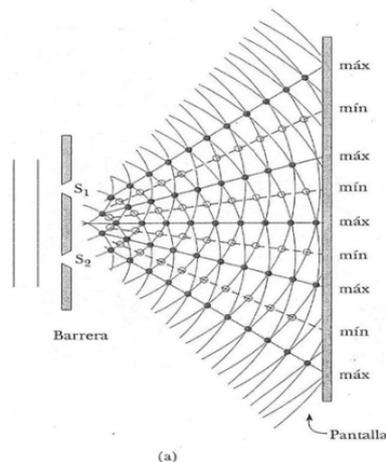
$$y = \frac{\lambda}{2} \frac{L}{d} \left(m - \frac{\varphi}{\pi} \right) \quad m = 3, 5, 7, 9, \dots$$



Responda si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas, justificando su respuesta:

- a) Cualquiera que sea la diferencia de fase entre las dos fuentes, siempre habrá un máximo de intensidad en el punto de la pantalla que equidista de ambas fuentes
- b) Si ahora la diferencia de fase cambia aleatoriamente en el tiempo con una frecuencia superior a 100 Hz, no se puede observar con el ojo un patrón estable de máximos y mínimos de intensidad en la pantalla (tiempo de respuesta del ojo $\approx 0,1$ s).
- c) Si ahora la diferencia de fase cambia aleatoriamente en el tiempo con una frecuencia superior a 10 Hz se podría fotografiar con una cámara un patrón de máximos y mínimos de intensidad en la pantalla.
- d) Todos los máximos de intensidad están igualmente espaciados.

2. Considere un láser que ilumina dos pequeñas rendijas verticales produciendo



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

b) Ud. coloca un detector tal como un fotómetro para medir la intensidad luminosa en uno de los puntos llenos durante un intervalo de 2 s y con una frecuencia de muestreo de 50 Hz (toma 50 datos por segundo) ¿Cómo sería la gráfica del registro?

3. Si Ud. utilizó el fotómetro para medir la intensidad luminosa a lo largo del patrón de interferencia producido por una fuente láser y un sistema de dos o más rendijas. Responda si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas, justificando cada una de sus respuestas.

a) El coeficiente de visibilidad $V = \frac{I_{\text{máximo}} - I_{\text{mínimo}}}{I_{\text{máximo}} + I_{\text{mínimo}}}$ medido a partir de la curva de intensidad debería ser igual a 1 porque trabajó con una fuente coherente.

b) El coeficiente V debería ser el mismo aunque trabaje con dos rendijas o con cinco rendijas

c) Si $V = 0,9$ se puede interpretar que hay un 10% de luz incoherente de proviene de las rendijas

d) Si $V < 1$ se debe a que la rendija colimadora situada a la entrada del fotómetro es ancha

e) Se puede lograr un valor de V cercano a 1 si se aumenta la distancia entre las rendijas y la pantalla donde se registran las intensidades.

4. Describa qué observa cuando mira a través de una red de difracción de 600 líneas por mm un tubo fluorescente situado a 2 m de distancia de la rendija, puede observar un patrón estable de interferencia si el tubo fluorescente no constituye una fuente puntual monocromática.

5. Explique por qué cuando mira un tubo fluorescente a través de una red de difracción de 80 líneas por mm, la imagen del orden cero corresponde a la imagen blanca de la fuente y los sucesivos máximos de orden n aparecen coloreados formando un espectro continuo. Explique cómo cambia el patrón observado cuando usa una red de 200 líneas por mm.

6. Ud. dispone de una fuente convencional de luz blanca de 5 cm de radio y un sistema de dos ranuras separadas una distancia 0,3 mm.

a) ¿cuál es la mínima distancia a la que debería situarse, si se quiere observar con el ojo a través de las ranuras un patrón nítido de interferencia?

b) ¿Cambiaría su respuesta al apartado anterior si usa un filtro rojo?

c) Suponiendo que la intensidad de la fuente de luz blanca sea suficiente para que Ud. pueda ver el patrón de interferencia en una pantalla, ¿a qué distancia de las ranuras la colocaría para que se pueda observar el patrón de interferencia? ¿Cómo cambia esta distancia si usa un filtro rojo cuyo ancho de banda es de 10 nm?