



Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de
las Ciencias
ISSN: 1697-011X
revista.eureka@uca.es
Universidad de Cádiz
España

El experimento de Michelson y Morley en versión acústica, un trabajo de laboratorio de física universitaria basado en aprendizaje por indagación

Bernal, Luis Jaime; Insabella, Roberto Mariano; López, Jorge Nicolás; Pérez, Gabriel Horacio; Sánchez, Pablo Alejandro; Tesolin, Horacio; Szigety, Esteban Guillermo

El experimento de Michelson y Morley en versión acústica, un trabajo de laboratorio de física universitaria basado en aprendizaje por indagación

Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, vol. 20, núm. 1, 2023

Universidad de Cádiz, España

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92072334011>

DOI: https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i1.1203

El experimento de Michelson y Morley en versión acústica, un trabajo de laboratorio de física universitaria basado en aprendizaje por indagación

Michelson and Morley's experiment in acoustic version, a university physics lab work based on inquiry learning

Luis Jaime Bernal

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas
y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata,
Argentina*

bernal1314@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7262-9559>

DOI: <https://doi.org/10.25267/>

Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i1.1203

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92072334011>

Roberto Mariano Insabella

*Departamento de Física, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Buenos Aires, Argentina*


insabella@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-8857-214X>

Jorge Nicolás López

*Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias
Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del
Plata, Argentina*

jorgenicolaslopez@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-1386-7186>

Gabriel Horacio Pérez

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas
y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata,
Argentina*

ghperez@mdp.edu.ar

 <https://orcid.org/0000-0002-8766-1949>

Pablo Alejandro Sánchez

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas
y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata,
Argentina*

pabalesan@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7502-9815>

Horacio Tesolin

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas
y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata,
Argentina*

horacio.teso@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-0463-2991>

Esteban Guillermo Szigety

*Departamento de Física, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina*

esteszige@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-6472-2393>

Recepción: 10 Septiembre 2021

Revisado: 12 Octubre 2022

Aprobación: 27 Octubre 2022

RESUMEN:

Este artículo presenta una actividad didáctica desarrollada en el aula universitaria dentro del marco del aprendizaje basado en la indagación (Inquiry-Based Learning). En la misma, estudiantes del profesorado y la licenciatura en ciencias físicas generaron nuevas preguntas e hipótesis haciendo uso de un diseño experimental previamente construido: un interferómetro acústico de ultrasonido. Se muestran los resultados de dos grupos de estudiantes que tomaron el dispositivo y modificaron su diseño original. En este trabajo se puede observar los recursos teóricos y metodológicos utilizados en clases de laboratorio de física ondulatoria con materiales de bajo costo. Se tuvo en cuenta también en el diseño de esta actividad formar a los estudiantes en las competencias propias de su carrera.

PALABRAS CLAVE: Ultrasonido, Trabajo práctico de laboratorio, Enseñanza de la física, Interferencia.

ABSTRACT:

This article presents a didactic activity developed in the university classroom within the framework of Inquiry-Based Learning. In this activity, students of the faculty and the degree in physical sciences generated new questions and hypotheses using an experimental design already built: an ultrasound acoustic interferometer. The results of two groups of students who took the device and modified its original design are shown. This work summarizes the theoretical and methodological resources used in wave physics laboratory classes with low-cost materials. It was also taken into account in the design of this activity to train students in the skills of their career.

KEYWORDS: Ultrasound, Practical laboratory work, Teaching of physics, Interference.

INTRODUCCIÓN

El aprendizaje basado en la indagación (en inglés *Inquiry-Based Learning*) es una estrategia didáctica donde los estudiantes construyen su conocimiento de forma semejante a como lo hacen los científicos: descubren relaciones causales, formulan preguntas o hipótesis y realizan experimentos para dar respuesta o probar sus afirmaciones (Pedaste, Mäeots, Leijen y Sarapuu 2012). Este aprendizaje ofrece una imagen de la ciencia próxima al real desempeño de la ciencia. Se logra así un conocimiento más allá de lo declarativo y conceptual, pasando a una comprensión de orden funcional.

La enseñanza de grado basada en el desarrollo de competencias es una nueva perspectiva que se extiende dentro del ámbito de las universidades argentinas. En la educación universitaria actual (ingenierías, licenciaturas y profesados en ciencias) es clave modificar el rol docente tradicional (Aduriz-Bravo 2017, Almerich *et al.* 2018). Este trabajo se basa en el concepto de competencia introducido por Perrenoud (2009) y Le Boterf (1998; 2002). El primero lo hace desde una perspectiva educativa, mientras que el segundo está más vinculado al campo de las competencias laborales y profesionales. Podemos decir que, *competencia* es la capacidad de actuar en situaciones complejas ante las cuales es necesario tomar decisiones y resolver problemas, movilizando un conjunto de recursos. El enfoque basado en competencias transforma el conocimiento disciplinario en recursos para realizar proyectos, dar solución a problemas y tomar decisiones (Perrenoud 2009).

La competencia se define como conocimiento en acción; es decir que se manifiesta actuando en un contexto específico, pero no se limita a lo que se observa como resultado final. También involucra aquellas acciones internas que lleva adelante quien actúa. Dicho de otra forma, es conocimiento que se traduce en capacidad efectiva de uso y manejo intelectual, verbal y/o práctico. Perrenoud (2008) considera que lograr la autonomía en el estudiante es fundamental en términos de objetivos educativos y desarrollo personal.

Dicho autor considera que formar en competencias se contrapone a una educación basada en contenidos acumulados, la cual no permite actuar sobre lo concreto o proyectar la resolución de un problema. Así pues, apuntar a la formación de competencias es una manera de desarrollar sujetos autónomos, capaces de actuar por sí mismos en distintos contextos y situaciones sociales. Tanto así que los requerimientos presentes en los planes de estudio universitarios actuales incentivan la enseñanza en competencias desde hace varios años (Consejo Federal de Decanos de Ingeniería 2018).

En el caso concreto de la física, hablar de enseñanza orientada al desarrollo de competencias es facilitar situaciones de aprendizaje a los estudiantes donde puedan desarrollar la capacidad de resolver problemas teóricos y empíricos a través de procesos de análisis, planeamiento de soluciones y posterior evaluación de los mismos (Brown y Kuratko 2015). Se considera alcanzada una determinada competencia cuando el estudiante ha podido articular eficazmente un conjunto de esquemas que pongan en juego saberes en el contexto de una actividad de laboratorio, según se plantea en este trabajo. Dichas competencias son la capacidad de identificar una situación problemática, delimitar el problema y formularlo en forma de pregunta o hipótesis. Además, se espera que el estudiante sea capaz de organizar datos pertinentes al problema, evaluar el contexto del problema e incluirlo en un análisis final (Consejo Federal de Decanos de Ingeniería 2006, García-Carmona 2013). Estas competencias se encuentran contenidas en el aprendizaje basado en indagación, como lo muestran estudios recientes (Tan *et al.* 2017, Sujarittam *et al.* 2019). Los trabajos que ahondan en esta metodología coinciden en que la resolución de problemas complejos y las actividades experimentales son muy eficaces para alcanzar un aprendizaje por indagación, al mismo tiempo que se aseguran competencias propias de la educación científica.

El aprendizaje basado en la indagación parte de la motivación y los conocimientos previos que tenga el estudiante. Aplicar esta metodología en la enseñanza de física experimental ayuda a identificar los conceptos relevantes que se necesitan comprender, permitiendo a los estudiantes integrar esquemas y patrones de los fenómenos físicos y así diseñar nuevos experimentos (Madhuri *et al.* 2012). Por este motivo el trabajo de laboratorio se considera un entorno adecuado para el aprendizaje a través de la indagación. Por otro lado, numerosos investigadores confirman la importancia de replantear la práctica experimental en la enseñanza de la ciencia (Hodson 1994, Gil Pérez y Valdés Castro 1996, Saraiva-Neves *et al.* 2006, Acevedo *et al.* 2007). Estos autores coinciden en que el trabajo de laboratorio con fines educativos no se puede pensar con una finalidad meramente ilustrativa, apuntando a un conocimiento ya procesado y terminado. La posibilidad de observar un fenómeno no solo le permite al estudiante conceptualizar la teoría a través de una experiencia, sino también comprender el papel que juega esta instancia dentro del quehacer científico.

Este trabajo pretende contribuir a la didáctica de la física con un caso concreto de enseñanza por indagación en el laboratorio de física. Esta propuesta pone en juego los conceptos de física ondulatoria relacionados con la interferencia, dentro del segundo año de las carreras de Licenciatura y Profesorado en Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad donde trabajan algunos de los autores. Dicha asignatura utiliza dos horas semanales de laboratorio, pero en este caso el grupo de estudiantes hizo uso de horas extras para lograr los objetivos del trabajo práctico propuesto. La actividad se desarrolló a lo largo de un mes.

APRENDIZAJE POR INDAGACIÓN EN EL LABORATORIO DE FÍSICA

Existe una amplia taxonomía sobre las distintas prácticas de laboratorios (Camaño Ros 2004, Domin 1999, Petrucci *et al.* 2006). La actividad experimental que se pone en juego al llevar adelante un aprendizaje por indagación es conocida como *trabajo práctico de laboratorio de investigación*, *trabajo de indagación*, o también *experiencia abierta*. Distintos autores coinciden en que llevar adelante laboratorios de este tipo enriquece la conceptualización, el desarrollo intelectual y las habilidades para resolver problemas. En contrapartida, dentro de la taxonomía se encuentran los tan cuestionados experimentos guías-recetas o actividades de laboratorio tradicionales. Al respecto de estos ya hay contadas pruebas de que sólo desarrollan habilidades

cognitivas de orden inferior, como el aprendizaje de memoria y la resolución algorítmica de problemas (Domin 1999, Hofstein y Lunetta 1982). Muy por el contrario, los autores consideran que una investigación como la presentada en este trabajo posibilita poner en práctica competencias como: la creatividad, el pensamiento crítico, la colaboración y la comunicación, competencias consideradas fundamentales en el aula universitaria por el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (2006). Y es a través de la actividad de laboratorio basada en la indagación que se logra integrar nuevas experiencias con conocimientos previos, establecer un contexto para el propósito de la actividad de laboratorio y que los estudiantes determinen por ellos mismos la relevancia que tiene esta actividad en su formación. Existen numerosas propuestas para diseñar y pensar actividades de laboratorio como la formulada aquí, algunas que han servido de referencia en este trabajo son Mc Dermott *et al* (1996), Mc Dermott y Shaffer (1998) y Sokoloff, Thornton y Laws (2011).

La primera pregunta que debemos hacernos es cómo llevar adelante un trabajo práctico de laboratorio basado en la indagación. Y al respecto diremos que cada propuesta de una actividad abierta presenta maneras particulares de desarrollarse. En este caso se ha tomado como referencia el trabajo de Pedesta *et al.* (2015), quienes realizan un exhaustivo relevamiento de las distintas fases que conforman el aprendizaje por indagación. En base a este trabajo y al de otros autores (Chinn y Malhotra 2002, Budnyk *et al.* 2021) hemos construido la Tabla 1 para definir y referenciar las distintas fases dentro de este proceso. La tabla tiene una columna destinada a la definición más aceptada de estas fases (Pedesta *et al.* 2015, Madhuri *et al.* 2012) y una última columna con el detalle del desarrollo de las mismas.

TABLA 1
Fases del aprendizaje basado en la indagación

Fase	Definición	Desarrollo
Orientación	El proceso de estimular la curiosidad sobre un tema y abordar un desafío de aprendizaje a través de una declaración del problema.	Se tiene que explorar y observar un fenómeno para interesarse en él. Leer los contenidos teóricos para conocer las preguntas científicamente relacionadas con este fenómeno en particular, y comprometerse con el tema a través de un punto de anclaje desafiante. También puede ser el docente quien genere preguntas para repasar el tema y fortalecer las ideas importantes del trabajo de investigación. Los aspectos históricos y epistemológicos del experimento pueden resultar muy apropiados para introducir el tema a los estudiantes.
Conceptualización	El proceso de generación de preguntas y/o hipótesis basadas en el estado del problema.	Para iniciar este proceso el docente plantea un objetivo inicial que permite generar las preguntas. En el caso de la actividad propuesta en este artículo es fundamental que el docente solamente guíe y oriente en esta etapa, ya que se está trabajando en base a un diseño experimental previamente construido y queda en el estudiante realizar nuevas preguntas sobre su funcionamiento.
Investigación	En esta etapa hay tres procesos de exploración que consisten en: <ul style="list-style-type: none"> - sistematizar y plantear. - diseñar y llevar adelante un experimento que permita testear la hipótesis o preguntas. - darle sentido a nuestros datos recolectados y lograr una síntesis con ellos. 	Hay que dar tiempo al grupo de estudiantes para que elaboren la manera de dar respuesta a sus preguntas. Ellos y ellas explorarán varios caminos, pero el docente debe orientar y facilitar material para lograr esta fase. Esta exploración también tiene un aspecto teórico, bajo el cual los estudiantes pueden hallar las expresiones que modelan el experimento. Una vez confirmada la dirección de la investigación, los estudiantes se ponen manos a la obra y llevan adelante la toma de datos. Esta parte requiere que haya varias idas y vueltas, ya que no siempre lograrán que los datos obtenidos sean los indicados para dar respuesta a la pregunta. El último paso es poder procesar los datos y/o graficarlos adecuadamente.
Conclusión	Inferir la respuesta a sus preguntas o hipótesis a partir de datos.	En esta fase se dará respuesta a la pregunta de la fase de conceptualización. El proceso de conclusión tiene que ver con argumentar una respuesta a la pregunta. Los estudiantes deben lograr un razonamiento válido a favor de la hipótesis, o también es posible que sea en contra.
Discusión	El proceso de presentar los resultados de cada fase al grupo (compañeros/as, profesores/as) y recopilar los comentarios que surjan. El proceso de describir, criticar, evaluar y discutir todo el ciclo de investigación o una fase específica.	En esta fase cada grupo informa al resto de los integrantes de la cátedra sus resultados. La interacción entre los grupos no solo tiene como objetivo comunicar, sino también promover la generación de nuevas preguntas que estimulen a un replanteo de la investigación. La investigación no debe ser entendida como un proceso cerrado con un objetivo cumplido y finalizado. Muy por el contrario, el estudiante debe entender que se trata de un proceso bidireccional entre la hipótesis y los resultados.

EL INTERFERÓMETRO ACÚSTICO

Este trabajo, como se mencionó al principio, está basado en un diseño experimental conocido como interferómetro acústico, y sus detalles técnicos pueden encontrarse en Bernal *et al.* (2017). Este experimento con ondas sonoras es análogo al experimento realizado por Michelson y Morley (1887), quienes esperaban observar un desfase entre las ondas de luz a causa del movimiento relativo respecto del éter lumífero. En el diseño de este interferómetro acústico el éter es sustituido por el aire en movimiento, y la luz por el sonido.

Básicamente este experimento necesita hacer uso de tres transductores piezoeléctricos, uno funcionando como emisor de ultrasonido y otros dos como receptores. Estos dispositivos son de bajo costo y funcionan con el principio de la piezoelectricidad. El emisor está conectado a un generador de ondas, al cual le precede un filtro paso banda centrado en 40 kHz para eliminar señales espurias. Luego se amplifica la señal con una ganancia variable para cada canal. Los receptores están conectados a los dos canales del osciloscopio (ver Figura 1 – detalle 2), ya que se espera obtener una diferencia de tiempo entre las dos señales.

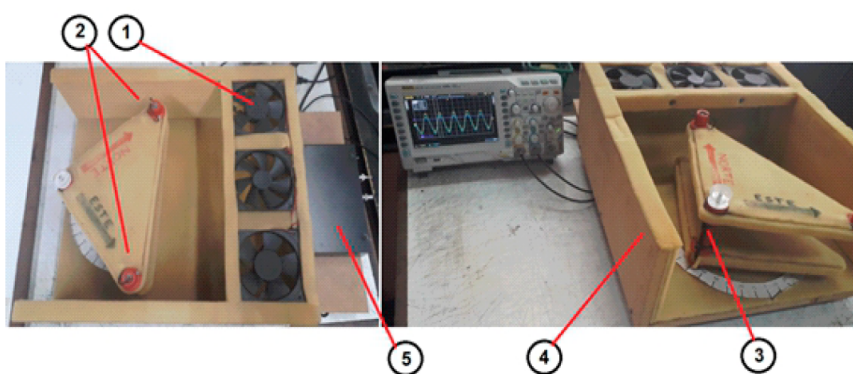


FIGURA 1

Disposición del dispositivo y piezas que lo conforman. 1- Ventiladores o coolers. 2- Receptores de ultrasonido. 3- Emisor de ultrasonido. 4- Estructura contenedora recubierta con goma espuma de poliuretano. 5- Caja contenedora de la fuente de alimentación, oscilador de 40 Khz e interfaz con el osciloscopio

Hay que tener en cuenta que ambos receptores se deben ubicar equidistantes del emisor; por tal motivo se construye una estructura en forma de triángulo rectángulo isósceles cuyos catetos miden 30 cm. En el centro de masa de la estructura triangular se ubica un eje con rodamientos que permite su rotación, pudiendo así variar el ángulo del triángulo respecto de la dirección del viento. La corriente de aire que generan los ventiladores pasa a través de la estructura y produce un corrimiento en la fase temporal de las ondas que llegan a uno y otro receptor. Para evitar que las ondas sonoras reboten en las paredes de la estructura, se revisten las paredes internas del aparato, incluido el triángulo rotante, con espuma de poliuretano (EP) para producir una mejor absorción de las ondas de ultrasonido.

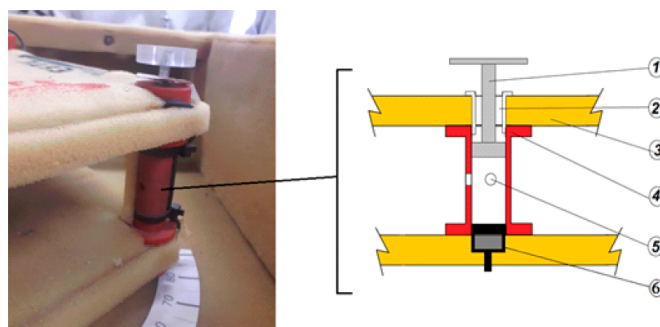


FIGURA 2

Detalle de la cavidad resonante. 1- Tornillo micrométrico adosado al pistón. 2- Rosca. 3- Fibropanel de Densidad Media (MDF) recubierto con goma espuma de poliuretano. 4- Cavidad resonante. 5- Orificios perpendiculares por donde se emite el ultrasonido. 6- Transductor piezoeléctrico usado como emisor.

La cavidad resonante cumple tres funciones. Está diseñada para que el ultrasonido se dirija hacia los sensores por medio de los orificios perpendiculares (Figura 2 – detalle 5), y por otro lado, a través del pistón se logra que la onda resuene dentro de la cavidad, obteniendo así un control sobre las fases con que salen emitidas las ondas por ambos orificios y facilitando la puesta a cero de los dos canales. Por último la cavidad resonante también permite realizar una medición de la velocidad del sonido a la manera de la conocida experiencia del tubo de Kundt (1868). Esto se logra moviendo el pistón en todo su rango y determinando la posición donde se produce la máxima intensidad del ultrasonido.

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD

A continuación, describimos el desarrollo de cada fase del aprendizaje basado en la indagación durante la actividad propuesta en torno al interferómetro acústico.

Fase de Orientación

En esta etapa la propuesta de trabajo apunta a que los estudiantes realicen una observación del dispositivo o, también diremos, una exploración. Esto implica que los estudiantes se familiaricen con los materiales y los objetivos, así como también los conceptos teóricos. En esta etapa es fundamental que los estudiantes se interesen y comprometan con la actividad de laboratorio. La atención tiene que estar puesta en el fenómeno de interferencia que ocurre cuando se comparan las fases de las ondas en el osciloscopio.

Durante esta etapa también se analizó con los estudiantes el funcionamiento del interferómetro acústico y sus diferencias con el interferómetro de Michelson y Morley. Replicar la experiencia original pero en forma análoga con ondas de sonido aporta elementos de historia de la ciencia al trabajo de laboratorio. Una gran diferencia entre los dos interferómetros es el tipo de desfase que se produce en la interferencia de las ondas. En el interferómetro de Michelson la interferencia es resultado de un desfase espacial, mientras que en el interferómetro acústico el desfase que se observa es temporal. Este desfase lo producen los ventiladores, los cuales modifican el camino acústico de las ondas. En la Tabla 2, se pueden observar algunas preguntas propuestas por el docente encargado del laboratorio, y el análisis que se realizó con los estudiantes.

TABLA 2
Preguntas para la fase de orientación.

Preguntas	Análisis de las preguntas
¿Qué tipo de interferencia se puede observar en este dispositivo?	En este dispositivo se observa una interferencia en la fase temporal de la onda. A diferencia del interferómetro de Michelson y Morley donde el desfase es espacial.
¿Cómo debería afectar la rotación del triángulo la interferencia? ¿Mover el triángulo afecta la diferencia de fase temporal o espacial entre las ondas?	El cambio angular del triángulo afecta la fase temporal con una proporcionalidad directa con el seno del ángulo de rotación. Se pueden ver detalles de esta demostración en Bernal et al. (2017).
¿Se espera que la diferencia de fase entre las ondas sea simétrica a partir de un ángulo determinado?	Sin demasiado análisis se puede observar que a los 45° la geometría del diseño permite que ambos caminos acústicos sean iguales.
¿Qué es una cavidad resonante y qué función cumple en este problema experimental?	La cavidad juega un papel fundamental en el ajuste de las dos ondas que interfieren dentro de este dispositivo. Regulando la longitud de la cavidad no solo se puede modificar la intensidad de la onda sino también se puede cambiar la fase.
¿Qué estimación rápida se puede realizar para determinar el desfase temporal máximo en el interferómetro? Al mismo modo de la realizada en el trabajo de Michelson y Morley.	Cuando el eje del interferómetro forma un ángulo perpendicular con la dirección del viento, se alcanza el desfase máximo.

Esta fase de orientación ayuda a identificar los conceptos relevantes necesarios para iniciar un trabajo de investigación que involucra al dispositivo. Esta etapa permite a los estudiantes integrar el conocimiento teórico del tema para luego pensar nuevos experimentos a realizar. En esta instancia del proceso la participación del docente es fundamental.

Fase de Conceptualización

En esta fase se espera que los estudiantes hagan preguntas e inicien la indagación. Sin embargo, el docente también puede generar una pregunta que sirva de disparador para otros interrogantes. En esta oportunidad se presentó la siguiente cuestión:

"¿Qué otros posibles experimentos se pueden llevar adelante con este dispositivo?"

El proceso de generar preguntas de investigación es fundamental antes de iniciar un trabajo práctico. En este caso la atención de la investigación se encontraba en el dispositivo, del cual ya sabían el objetivo para el cual fue construido. Pero ante esta pregunta los estudiantes deben pensar cómo realizar modificaciones o agregar elementos que permitan realizar nuevas experiencias.

El proceso de generar hipótesis sobre el problema declarado también es fundamental en esta etapa. Los estudiantes tenían un marco teórico basado en la ondulatoria elemental, que recibieron en el curso correspondiente de física. Esta actividad forma parte de los trabajos prácticos de laboratorio en el desarrollo de la materia. En particular, en este artículo, seleccionamos dos grupos de estudiantes que trabajaron en equipo durante el ciclo 2018 y 2019. Los llamaremos Grupo A y Grupo B.

Grupo A

Este grupo planteó la siguiente hipótesis de investigación:

“La técnica de medición de la velocidad del sonido propuesta por el profesor por medio del tubo de resonancia no permite una precisión aceptable. Proponemos otro método donde la onda de ultrasonido se refleje contra una placa metálica y esperamos alcanzar mayor o igual precisión en la medición de la velocidad del sonido”

Esta hipótesis surge ante los problemas que observó el grupo cuando el profesor mostró la forma en que los creadores del dispositivo medían anteriormente la velocidad del sonido. Esta técnica consistía en ir moviendo el pistón del tubo resonador y observar en el osciloscopio las variaciones de la intensidad del ultrasonido detectadas por el sensor. Básicamente, esta técnica es igual al experimento denominado Tubo de Kundt. El tubo resonador presenta problemas para determinar sus máximos con exactitud, y éste fue un hecho que llamó la atención al grupo. Por lo tanto su hipótesis fue orientada a encontrar un método más preciso, y comparar los resultados. La propuesta de esta nueva técnica surgió al ver que si dejaban fijo el pistón del tubo resonador, la variación de la intensidad era observada al acercar las manos por los costados del triángulo. Claramente este efecto era producido por la gran reluctancia que tienen las ondas de ultrasonido sobre cualquier superficie sólida.

Grupo B

Este otro grupo planteó una hipótesis muy interesante cuando se les pidió que pensara en un nuevo uso que se le podía dar al dispositivo. En base a esta consigna el grupo se propuso medir la velocidad del sonido en otro medio. Básicamente plantearon que el interferómetro acústico dispone de dos ramas, el sonido puede viajar por una de ellas a través del aire y por la otra introducir una longitud de camino diferente modificando el medio. En un principio, pensaron si existía la posibilidad de calcular la velocidad del sonido en agua, pero esto trajo aparejados algunos inconvenientes técnicos que no pudieron resolver. La hipótesis fue la siguiente:

“Si se introduce un medio donde el sonido pueda viajar a otra velocidad en uno de los brazos del interferómetro, entonces se debería detectar un corrimiento en las fases de las ondas. Si el espesor d del nuevo medio se pudiese variar, entonces podríamos obtener la velocidad del nuevo medio.”

Realizaron las cuentas para el agua y la longitud de camino sonoro para producir un desfase observable es del orden de los milímetros. Por lo tanto se descartó la posibilidad de utilizar el agua como medio. Otra razón por la cual se dejó de lado fue porque debía estar contenida en un recipiente sólido el cual produciría rebotes considerables. Observando una tabla de velocidades de sonido se encontró que el aire a menor temperatura podría ser una opción, y se trabajó con este medio para lograr observar el desfase medible.

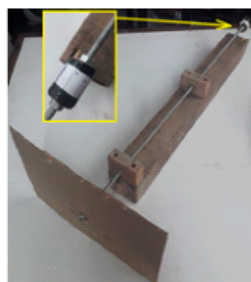
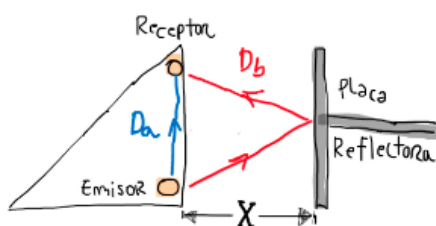
A partir de las hipótesis generadas por cada grupo se profundizó en nuevos saberes. El profesor de laboratorio introdujo nuevos conceptos desde el marco de la ondulatoria elemental.

Fase de Investigación

Investigar implica que se realice el experimento y se obtengan datos para dar respuesta a las preguntas. El proceso de diseñar y realizar un experimento para probar una hipótesis no es tarea sencilla para estudiantes del ciclo básico de formación en ciencias. Tiene que quedar claro para ellos que este proceso permitirá obtener datos, pero que estos no son la finalidad del trabajo. Por el contrario luego habrá que darle una interpretación si queremos sintetizar nuevo conocimiento.

Es importante que los estudiantes desarrollen de antemano un plan de acción. Los recursos y los instrumentos disponibles deben ser tales que aseguren la posibilidad de abordar las preguntas que se realizaron. Para ello es indispensable que los estudiantes conozcan los recursos que hay en el pañol del laboratorio. El docente o ayudante de laboratorio juega aquí un papel muy importante, asesorando y proveyendo el material necesario. En las Figuras 3 y 4 a continuación, se muestran esquemas de los diseños experimentales y planteos teóricos de los grupos. El contenido de estas Figuras son extractos textuales extraídos de los informes escritos por cada grupo.

"Como se puede ver en la figura para esta práctica se busca realizar una interferencia entre el haz de sonido que viaja directamente del emisor a uno de los receptores y otro haz cuyo camino es mayor ya que se refleja contra una placa reflectora que se puede mover por medio de una varilla roscaada (tornillo 5/16 - 18 filetes por pulgada).



La diferencia de camino acústico (DCA) de estos dos frentes de onda (azul y rojo en el dibujo) debe ser:

$$(E.1) \quad DCA = Db - Da$$

Se espera que el receptor detecte un máximo de interferencia en la intensidad del ultrasonido cada vez que la onda directa y la onda reflejada interfieran constructivamente, de tal forma que:

$$(E.2) \quad DCA = 2\sqrt{\left(\frac{Da}{2}\right)^2 + X^2} - Da = \sqrt{Da^2 + 4X^2} - Da$$

La DCA coincide con un número entero (n) de longitudes de onda (λ).

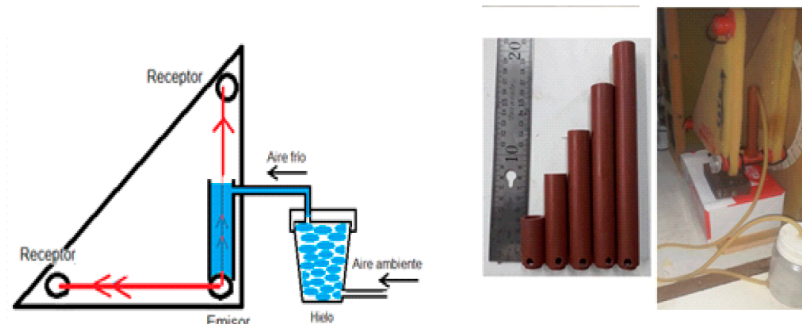
$$DCA = \lambda n$$

$$(E.3) \quad \sqrt{Da^2 + 4X^2} - Da = \lambda n$$

entonces se detecta un aumento en la intensidad de las ondas que se suman. Finalmente, si movemos la placa reflectora a distintas distancias X cada vez que encontramos un aumento de intensidad en el receptor, entonces podemos graficar el número de ordenes n en función de $\sqrt{Da^2 + 4X^2}$, obteniendo una relación lineal donde la pendiente es la longitud de onda. Conociendo la frecuencia del ultrasonido (en nuestro caso, 40 kHz) calculamos la velocidad del sonido con la expresión: $c = \lambda \cdot f$. Donde c es la velocidad del sonido y f es la frecuencia."

FIGURA 3
Investigación Grupo A

“Para apoyar nuestra hipótesis de trabajo vamos a realizar una experiencia donde el camino sonoro de uno de los recorridos esté interrumpido por un tubo vertical por el cual se sopla aire frío. Mientras que la otra onda continúa su viaje por el aire, la segunda onda tiene que atravesar un medio donde viaja lentamente. En un principio, nos disponemos a calcular el espesor de los tubos para poder lograr un desfase de un periodo.



Conociendo una estimación de la velocidad del sonido en el aire frío a 0°C (v) y en el aire a temperatura ambiente de $21,5^{\circ}\text{C}$ (c) podemos calcular el espesor necesario para obtener un desfase como máximo de un periodo entre las dos ondas.

$$(E-4) \quad \Delta t = \frac{d}{c} - \frac{d}{v}$$

Luego despejando queda,

$$(E-5) \quad d = \frac{\Delta t c v}{v - c}$$

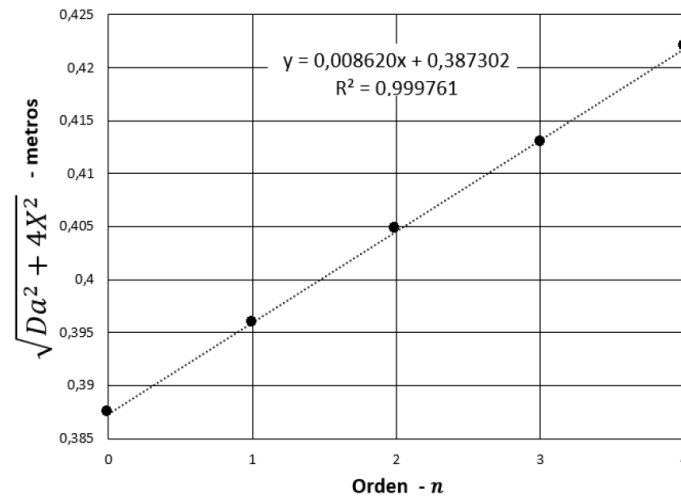
La velocidad del sonido con el aire ambiente ($21,5^{\circ}\text{C}$) es de $344,5 \text{ m/s}$, y de $331,4 \text{ m/s}$ cuando el aire tiene una temperatura de 0°C . Si estimamos un periodo en la onda de ultrasonido de $25 \mu\text{s}$, obtenemos un valor d de $21,8 \text{ cm}$. A tal fin, se construyeron cinco tubos de PVC (variando cada 4 cm) dentro de los cuales se puede soplar aire frío. El arreglo fue ubicado en forma vertical para que el aire frío se deposite en la parte baja del tubo, cubriendo la longitud del tubo de abajo hacia arriba. El aire frío se genera haciendo pasar el aire ambiente por un recipiente lleno de escamas de hielo.”

FIGURA 4
Investigación Grupo B

Fase de Conclusión

El proceso de extraer conclusiones de los datos para apoyar a las preguntas e hipótesis es la idea en esta instancia del trabajo. Los datos tienen que ser refinados y analizados bajo el lente de la teoría ondulatoria. Aquí se ve que los modelos que los estudiantes aprendieron en las clases de teoría se usaron como herramientas de investigación en el trabajo del laboratorio. En esta etapa es el estudiante quien tiene que evaluar si la explicación que está dando se encuentra a la altura de una explicación científica. Emitir un juicio o una respuesta basados en los datos es el desafío que se pretende que un estudiante alcance en su formación como profesor o licenciado. Tiene que poder evaluar y asegurar que está generando un nuevo conocimiento para él y su grupo de estudiantes. En las Figuras 5 y 6 se puede encontrar las conclusiones que los estudiantes de cada grupo escribieron en sus respectivos trabajos.

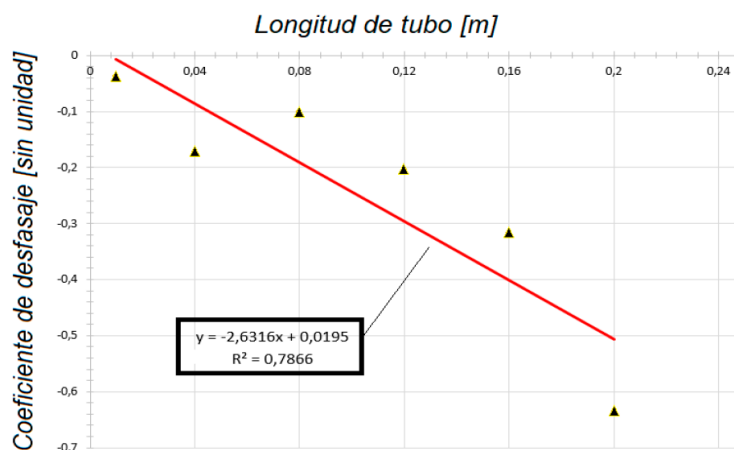
"Se pudieron obtener varias posiciones (X) de la placa, las cuales fueron detectadas por los distintos máximos en el osciloscopio. Estos datos no son lineales. En esta etapa se discutió sobre qué tipo de gráfico realizar para poder obtener un valor de la velocidad del sonido. Un gráfico lineal posible que facilitaría la tarea final de obtener un valor de c sería el de graficar la variable: $\sqrt{Da^2 + 4X^2}$ en función del orden n de máximo encontrado. El gráfico obtenido es el siguiente:



El valor de la pendiente es una medida de la longitud de onda, por lo que se puede multiplicar por la frecuencia y así obtener un valor de c . En este caso se obtuvo un valor de 344,8 m/s para la velocidad del sonido en el aire a una temperatura aproximada de 21°C."

FIGURA 5
Conclusión Grupo A

“Al realizar la toma de datos se midió el desfase temporal producido por cada tubo y la introducción de aire frío en el camino acústico de una de las ondas. El resultado se llevó al siguiente gráfico, donde además de las medidas obtenidas (triángulos negros y amarillos) también se incluyó la línea de tendencia (línea roja). La pendiente de la línea roja permitió saber el valor de la velocidad de sonido en aire frío introducido en los tubos y la temperatura estimada del aire. En la gráfica se observa el largo de los tubos de PVC utilizados y el coeficiente de desfase temporal. Por ejemplo, si el coeficiente de desfase es uno (-1) entonces la onda que viaja por la rama con aire frío está retrasada en un periodo completo respecto de la onda que viaja por la rama de aire a temperatura ambiente.



El coeficiente de desfase fue obtenido tomando la diferencia temporal entre la onda que viaja por el aire a temperatura ambiente y la onda que viaja por la rama del interferómetro con aire frío, y dividiendo dicha diferencia por el periodo de la onda 25 μ s. A pesar de la dispersión de las medidas se observa una tendencia decreciente en los valores. A través de la pendiente del gráfico se obtuvo que la velocidad del sonido del medio frío es 336,87 m/s lo que permite determinar que el aire inyectado en el tubo tenía una temperatura cercana a los 9 °C. Este es un resultado bastante razonable considerando que el aire inyectado antes de pasar por el hielo es cerca de los 22 °C o más y al pasar por las escamas de hielo pudo haber descendido sin llegar al 0°C.”

FIGURA 6
Conclusión Grupo B

Fase de Discusión

Esta fase consiste en una discusión interna y debe estar signada por el debate y la generación de nuevas preguntas. La actividad de laboratorio habitualmente finaliza con la entrega de un informe escrito. En esta ocasión preferimos que los grupos expusieran los resultados en una presentación oral, además de una presentación escrita. El proceso de exponer los hallazgos de fases particulares o de todo el ciclo de indagación requiere de comunicación con los otros integrantes y reflexionar respecto a todo el proceso de aprendizaje.

En la presentación de los resultados a compañeros y profesores alguien debe ocuparse de recopilar los comentarios y discusiones que surjan en esta fase. En esta etapa se debe apuntar a una crítica constructiva entre grupos. Se deben rever las instancias de evaluación y discusión de todo el ciclo de investigación. Luego del trabajo de socialización, los estudiantes generaron una lista de nuevas preguntas sobre el trabajo que se puede observar en Tabla 3 y Tabla 4.

TABLA 3
Preguntas para la fase de discusión del Grupo A

Preguntas	Análisis de las preguntas
¿Qué se observa en el osciloscopio cuando la placa reflectora se desplaza perpendicularmente a la línea emisor-receptor? ¿Qué ocurriría si el desplazamiento fuera paralelo?	Un movimiento perpendicular garantiza que se cumpla la relación (Cuadro 1, E-3), mientras que el movimiento paralelo no debería producir efecto alguno. Sin embargo si el movimiento es en la misma línea que forma emisor – receptor se debería hallar una nueva expresión de interferencia y esperar rebotes no controlados contra otras superficies.
¿Qué incertezas deben propagarse para determinar la velocidad del sonido?	La determinación de D_a y de X con sus errores y sus posteriores propagaciones, identificando las auténticas fuentes de error a primer orden. Dada la gran correlación lineal que tiene la recta se obtiene el error del cálculo por mínimos cuadrados.
La inclinación de la placa reflectora, ¿acarrea incertezas en primer o segundo orden sobre la determinación de la velocidad del sonido?	Dado que el emisor no genera frentes de onda planos, sino esféricos o cilíndricos, se espera que la recepción sea también de ondas esféricas. Por lo tanto su diferencia de fase no se ve afectada, y se espera que las incertezas sean funciones a primer orden de las expresiones obtenidas.
¿El uso de gráficas logarítmicas hubiera permitido determinar la velocidad del sonido con la misma facilidad con que se hizo en este caso?	Linealizar la relación entre los datos es una habilidad a desarrollar en los estudiantes. En este caso por medio de gráficas logarítmicas no se hubiera podido observar una recta.

TABLA 4
Preguntas para la fase de discusión del Grupo B

Preguntas	Análisis de las preguntas
Los puntos graficados no parecen seguir una recta. El valor de R^2 de la regresión es desfavorable. Sin embargo la pendiente del ajuste permitió obtener un valor de la velocidad del sonido coherente con la temperatura del medio. ¿Cómo se podría explicar?	La variable en juego es la longitud del tubo de PVC y en estas variaciones puede haber factores no contemplados. Por ejemplo, el factor debido a una dinámica de fluidos (el aire frío descendiendo) que generaría comportamientos no previstos. Las variaciones en el coeficiente de desfase son sensibles a factores ambientales.
¿Medir la temperatura del aire dentro de los tubos de PVC, ayudaría a mejorar los objetivos del experimento?	La determinación de la temperatura sería útil para poder confirmar el resultado de la temperatura del medio. El instrumento de medición utilizado para este fin debería ser del tipo de termopar o similar, para obtener un resultado inmediato de la temperatura. Un instrumento que tenga inercia térmica baja, ya que la temperatura ambiente fue determinada con un termómetro de mercurio.
¿Es posible usar el interferómetro para medir la velocidad del sonido solo usando un pulso único y midiendo el tiempo que tardó en llegar del emisor al receptor?	Con este interferómetro hacer una experiencia de este tipo es imposible de forma práctica. La causa es que el tiempo que tarda el sonido en recorrer un brazo del interferómetro equivale a varias decenas de veces la propia longitud de onda, lo que introduce una incerteza importante al momento de comparar la onda emitida con la onda recibida. Para que la diferencia entre las ondas sea del mismo orden que el periodo ($25\mu\text{s}$) sus brazos deberían ser de algunos milímetros.
¿De qué manera se podría proceder para determinar un margen de error en la medición de v en este experimento?	En la experiencia realizada por los estudiantes del Grupo B los errores cometidos con el instrumental (osciloscopio y regla) fueron inferiores a las variaciones estadísticas que tienen las medidas del coeficiente de desfase. Para lograr un ajuste de margen de error adecuado, las mediciones se deberían repetir varias veces y dar un valor medio y la desviación estándar de la media.

REFLEXIONES SOBRE LAS DISTINTAS FASES

Sobre la Fase de Orientación. La propuesta general de la experiencia didáctica fue trabajar sobre un artefacto previamente construido, lo cual puede generar dudas sobre la legitimidad de la problemática. Muy por el contrario, en el trabajo científico real donde la construcción de un equipo demanda muchísimo esfuerzo, tiempo y presupuesto, una de las preguntas más comunes es ¿podemos modificar este artefacto para responder otras preguntas? Los autores de este trabajo consideran que el uso de arreglos experimentales ya manufacturados, ya sea por los mismos estudiantes, docentes o por empresas de enseñanza de la física, también pueden ser objeto de un trabajo de indagación dentro del aula universitaria.

El potencial que tienen estos dispositivos para este tipo de aprendizaje es muy grande. Solo requieren un trabajo extra del docente en el diseño de una estrategia realmente estimulante para los estudiantes. Esto no quita que el armado de un diseño experimental desde cero sea la opción que más competencias

involucra cuando se trata de aprendizaje por indagación. Aun así, la posibilidad de trabajar sobre un diseño experimental ya manufacturado también tiene un gran desafío de creatividad e interpretación.

Sobre la Fase de Conceptualización. El hecho de poder definir un problema o identificarlo con una pregunta válida es un gran paso para el desarrollo de este trabajo por indagación. Es en esta etapa donde se alcanzan los objetivos esperados. Por un lado, decidir si la pregunta de investigación es válida requiere una autoevaluación, fundamental en la formación de los estudiantes de grado. Las preguntas y planteo de hipótesis son tanto o más importantes que la manera de resolver el problema. Durante nuestra experiencia, el grupo debió evaluar si existía un contexto material que le permitiera dar respuesta a la pregunta. Debieron encontrar el modelo matemático dentro del marco teórico y poner en juego la capacidad de experimentar para realizar una predicción y verificarla.

Sobre la Fase de Investigación. Los estudiantes tuvieron que desarrollar la capacidad de observar activamente un fenómeno. Esto significa poder encontrar un patrón o los detalles que permitirán dar respuesta a las preguntas. Es parte de esta etapa la observación activa para poder evaluar la validez de los datos, analizar la validez del proceso de medición y poder estimar si los resultados sirven de apoyo o refutan las hipótesis planteadas.

Sobre la Fase de Discusión. El proceso de presentar los resultados de una fase de indagación a compañeros y docentes permitió recopilar comentarios y discusiones entre los estudiantes. El proceso de describir, criticar, evaluar y discutir todo el ciclo de investigación o una fase específica es la forma en que los científicos continúan avanzando en sus investigaciones. Aunque los lugares donde esto ocurre sean las publicaciones y los congresos, en esta etapa se trata de emular la misma situación.

A MODO DE CONCLUSIÓN DE LA PROPUESTA

Los autores sugieren que convertir los trabajos prácticos de laboratorio en una metodología basada en la indagación muestra mejores resultados en comparación con un enfoque de laboratorio convencional del tipo recetas. Bajo el formato donde los estudiantes tienen todo el desarrollo asegurado, carecen de motivación. Esto se atribuye particularmente a la noción errónea de que la técnica de laboratorio (saber medir) es más relevante que pensar o resolver problemas de la forma que se plantea en la teoría de las materias de física. Está claro que el laboratorio puede ser más eficaz si se integra con el aprendizaje basado en indagación. Estos resultados son significativos especialmente en términos del desempeño de los participantes para realizar experimentos sistemáticos y precisos. El desempeño de los estudiantes se puede ver significativamente influenciado por este enfoque, dado que permite a los participantes apreciar la importancia y relevancia de la experimentación.

A forma de cierre de esta propuesta cabe la posibilidad de seguir reflexionando sobre las virtudes de la indagación como estrategia para promover las habilidades de orden superior. En un primer punto diremos que ya no puede haber lugar en el ámbito universitario para propuestas pedagógicas orientadas exclusivamente a la memorización y las metodologías algorítmicas. Las propuestas que más habilidades de orden superior ponen en juego son aquellas que se pueden igualar a las del razonamiento científico. En términos de los conceptos que los estudiantes incorporan en las clases teóricas, las actividades propuestas por los docentes deben apuntar a desarrollar la pericia de interpretar nuevas situaciones físicas, y no aquellas que se repiten en el aula y en los libros. Estamos ante una nueva etapa de la enseñanza de la ciencia donde queremos que nuestras disciplinas sean vistas como un cuerpo de conocimientos bajo un proceso dinámico constante, y desde ningún punto de vista como un conocimiento acabado y estático. La formación de profesionales, licenciados y profesores nos presenta el desafío de seguir manteniendo encendida la llama de la duda y de la prueba a través del pensamiento científico.

REFERENCIAS

- Acevedo Díaz J. A., Vázquez Alonso Á., Manassero-Mas M. A., Acevedo-Romero P. (2007) Consensos sobre la naturaleza de la ciencia: fundamentos de una investigación empírica. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 4(1), 42-66.
- Aduriz Bravo A. (2017) Pensar la enseñanza de la física en términos de “competencias”. *Revista de Enseñanza de la Física* 29(2), 21-31.
- Allchin D. (2011) Evaluating knowledge of the nature of (whole) science. *Science Education* 95(3), 518-542.
- Almerich G., Díaz-García I., Cebrián-Cifuentes S., Suárez-Rodríguez J. (2018) Estructura dimensional de las competencias del siglo XXI en alumnado universitario de educación. *Relieve* 24(1), 1-21.
- Bernal L., Insabella M., Ridao S., Schipani F., Cascallares G. y Szigety E. (2017) Un experimento introductorio a la teoría de la relatividad: el interferómetro de Michelson acústico. *Revista de Enseñanza de la Física* 29, 461-471.
- Brown T. J., Kuratko D. F. (2015) The impact of design and innovation on the future of education. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts* 9(2), 147-151.
- Budnyk O., Protas O., Voloshchuk H., Berezovska L., Rusakova O. (2021) Current challenges in the conditions of distance education: Inquiry based learning. *Revista Inclusiones* 8(1), 210-222.
- Caamaño Ros A. (2004) Experiencias, experimentos ilustrativos, ejercicios prácticos e investigaciones: una clasificación útil de los trabajos prácticos. *Alambique* 39(8), 8-19.
- Chinn C. A., Malhotra B. A. (2002) Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education* 86(2), 175-218.
- Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (2006) *Primer acuerdo sobre competencias genéricas* [Conclusiones] 3er. Taller sobre desarrollo de competencias en la enseñanza de la ingeniería argentina. Argentina. Córdoba. Carlos Paz.
- Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (2018) *Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la República Argentina “Libro Rojo de CONFEDI”*. Mar del Plata: Universidad Fasta Ediciones
- Domin D. S. (1999) A review of laboratory instruction styles. *Journal of Chemical Education* 76(4), 543.
- García-Carmona A. (2013) Educación científica y competencias docentes: Análisis de las reflexiones de futuros profesores de Física y Química. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 10, 552-567.
- Gil Pérez D., Valdés Castro P. (1996) La orientación de las prácticas de laboratorio como investigación: un ejemplo ilustrativo. *Enseñanza de las Ciencias* 14(2), 155-163.
- Hodson D. (1994) Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias* 12(3), 299-313.
- Hofstein A., Lunetta V. N. (1982) The role of the laboratory in science teaching: Neglected aspects of research. *Review of Educational Research* 52(2), 201-217.
- Kundt A. (1868) III. Acoustic experiments. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 35(234), 41-48.
- Le Boterf G. (1998) Évaluer les compétences. Quels jugements? Quels critères? Quelles instances. *Education permanente* 135(2), 143-151.
- Le Boterf G. (2002) De quel concept de compétence avons-nous besoin. *Soins Cadres* 41, 1-3.
- Madhuri G. V., Kantamreddi V. S. S. N., Prakash Goteti L. N. S. (2012) Promoting higher order thinking skills using inquiry-based learning. *European Journal of Engineering Education* 37(2), 117-123.
- McDermott L. C., Shaffer P. S. (2002) *Tutorials in introductory physics*. New Jersey: Prentice Hall.
- McDermott L. C., Shaffer P. S., Rosenquist M. L. (1996) *Physics by Inquiry, Volumen I y II*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Michelson A. A., Morley E. W. (1887) On the relative motion of the earth and the luminiferous Ether. *The American Journal of Science* 34(203), 333-343.

- Pedaste M., Mäeots M., Leijen Ä., Sarapuu T. (2012) Improving students' inquiry skills through reflection and self-regulation scaffolds. *Technology, Instruction, Cognition and Learning* 9(1-2), 81-95.
- Pedaste M., Mäeots M., Siiman L. A., De Jong T., Van Riesen S. A., Kamp E. T., Manoli C. C., Zacharia Z. C., Tsourlidaki E. (2015) Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educational Research Review* 14, 47-61.
- Perrenoud P. (2008) Construir las competencias, ¿es darle la espalda a los saberes?. *Revista de Docencia Universitaria* 6(2), 1-8.
- Perrenoud P. (2009) Enfoque por competencias, ¿una respuesta al fracaso escolar?. *Pedagogía Social Revista Interuniversitaria* (16), 45-64.
- Petrucci D., Ure J., Salomone H. D. (2006) Cómo ven los trabajos prácticos de laboratorio de física los estudiantes universitarios. *Revista de Enseñanza de la Física* 19,(1), 7-20.
- Saraiva-Neves M., Caballero C., Moreira M. A. (2006) Repasando o papel do trabalho experimental, na aprendizagem da Física, em sala de aula. Um estudo exploratório. *Investigações em Ensino de Ciências* 11 (3), 383-401.
- Sokoloff D. R., Thornton R. K., Laws, P. W. (2011) *RealTime Physics: Active Learning Laboratories, Module 1, 2, 3 y 4*. New York: John Wiley & Sons.
- Sujarittam T., Tanamatayarat J., Kittiravechote A. (2019) Investigating the Students' Experimental Design Ability toward Guided Inquiry Based Learning in the Physics Laboratory Course. *Turkish Online Journal of Educational Technology-TOJET* 18(1), 63-69.
- Tan J. P. L., Koh E., Jonathan C., Yang S. (2017) Learner dashboards a double-edged sword? Students' sense-making of a collaborative critical reading and learning analytics environment for fostering 21st-century literacies. *Journal of Learning Analytics* 4(1), 117-140.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Para citar este artículo: Bernal, L. J., Insabella, R. M., López, J. N., Pérez, G. H., Sánchez, P. A., Tesolin, H. y Szigety, E. G. (2023) El experimento de Michelson y Morley en versión acústica, un trabajo de laboratorio de física universitaria basado en aprendizaje por indagación. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 20(1), 1203. doi: 10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i1.1203