



---

# Universidad de Valladolid

Máster de profesorado de Educación Secundaria Obligatoria y  
Bachillerato Formación Profesional y Enseñanza de Idiomas

**Trabajo de fin de máster**

Curso 2022-2023

**DISEÑO Y ELABORACIÓN DE UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO  
PARA LA ENSEÑANZA DE FÍSICA EN SECUNDARIA O  
BACHILLERATO**

**Alumno: Marcos García Casado**

**Tutores: Marco Antonio Gigosos**

**Gabriel Pérez Callejo**

**14/06/23**

## Resumen

El presente trabajo tiene como principal objetivo el diseño y la elaboración de una práctica de laboratorio, relativa al contenido de óptica del curso de 2º de Bachillerato. Para ello, se pretende llevar a cabo una pequeña revisión bibliográfica acerca de la situación actual de la didáctica de las experiencias de laboratorio, sus características y ventajas de cara al aprendizaje. Posteriormente se describe de forma detallada la práctica diseñada, los contenidos que abarca y los aspectos didácticos necesarios para su desarrollo.

## Palabras clave

Física. Ciencias experimentales. Didáctica. Laboratorio. Óptica

## Abstract

This project aims to design and develop a Lab based learning experience, destined to be applied in the second year of Bachillerato, relative to the optics block of content. First a brief bibliographic review will be made, concerning the current situation of Lab based learning, its characteristics, and benefits towards learning. Then, the lab experience will be described, as well as the specific contents it works with and the didactical approach it requires.

## Keywords

Physics. Experimental sciences. Didactics. Lab based learning. Optics.

# Índice de contenidos

1. Introducción .....	1
1.1. Justificación.....	1
1.2. Motivación personal .....	3
2. Marco teórico y contextual .....	4
2.1. Marco teórico .....	4
2.2. Marco contextual.....	7
2.3. Objetivos .....	15
3. Aspectos didácticos .....	15
3.1. Temporalización.....	16
4. Descripción de la práctica.....	21
4.1. Fundamento teórico .....	22
4.2. Materiales .....	29
4.3. Montaje del sistema .....	29
4.4. Funcionamiento del sistema.....	32
5. Descripción de la segunda práctica .....	36
5.1. Fundamento teórico .....	36
5.2. Materiales.....	40
5.3. Montaje del sistema .....	40
5.4. Funcionamiento del sistema.....	41
6. Resultados y conclusiones de la práctica .....	46
6.1. Resultados relativos a la primera parte.....	46
6.2. Resultados y conclusiones de la segunda parte .....	48
7. Conclusiones.....	49

## Índice de tablas

**Tabla 1:** Contenidos relativos al bloque C. “Vibraciones y ondas” para el curso de Física de 2º de Bachillerato.

**Tabla 2:** Contenidos relativos al bloque C. “Química orgánica” para el curso de Química de 2º de Bachillerato.

**Tabla 3:** Contenidos relativos a los bloques B. “Reacciones químicas” y C. “Química orgánica” para el curso de Física y Química de 1º de Bachillerato.

**Tabla 4:** Competencias específicas para el curso de Física de 2º de Bachillerato.

**Tabla 5:** Criterios de evaluación y descriptores de salida para cada una de las competencias específicas establecidas para el curso de Física de 2º de Bachillerato.

**Tabla 6:** Rúbrica de calificación relativo al informe de prácticas individual requerido al alumnado. Se indica el peso relativo (respecto a un total de 100 puntos) recomendado para cada uno de los aspectos evaluables.

**Tabla 8:** Índices de refracción de varios fluidos medidos con el sistema descrito. Comparación con datos bibliográficos.

**Tabla 9:** Datos relativos a los ángulos medidos para cada disolución y para la muestra de refresco. Índices de refracción calculados para cada uno de ellos.

## Índice de figuras

**Figura 1:** Representación de la aproximación a un rayo.

**Figura 2:** Ilustración del principio de Huygens para una onda plana (izquierda) y una esférica (derecha). En este caso, el desplazamiento del frente de ondas toma un valor  $c \Delta t$  debido a que las ondas viajan a la velocidad de la luz.

**Figura 3:** Representación de los fenómenos de reflexión y refracción sobre una capa de vidrio.

**Figura 4:** Representación del fenómeno de la refracción entre dos medios. Los arcos que pasan por D y C corresponden a los trenes de onda de Huygens emitidos por los rayos 1 y 2 respectivamente.

**Figura 5:** Trazado de rayos incidente y refractado del sistema.

**Figura 6:** Trazado de rayos correspondiente a la refracción de un haz de luz desde un medio con  $n_1 = 1.52$  a un segundo medio con  $n_2 = 1.00$ . Ángulo de incidencia  $\theta_1 = 30^\circ$ . Se ha omitido el rayo reflejado.

**Figura 7:** Trazado de rayos correspondiente a la reflexión interna total de un haz de luz sobre la superficie que separa un medio con  $n_1 = 1.52$  y un segundo medio con  $n_2 = 1.00$ . Ángulo de incidencia  $\theta_1 = 80^\circ$ .

**Figura 8:** Trazado de rayos correspondiente a la incidencia de un rayo con ángulo crítico sobre la superficie que separa un medio con  $n_1 = 1.52$  y un segundo medio con  $n_2 = 1.00$ .

**Figura 9:** Trazado de rayos incidentes sobre una cubeta semicilíndrica. Incidencia con un ángulo menor al ángulo crítico (azul). Incidencia con ángulo crítico (verde). Incidencia con ángulo mayor al crítico (rojo).

**Figura 10:** Trazado de rayos sobre la superficie plana de la cubeta.

**Figura 11:** Representación de los índices de refracción calculados para cada disolución respecto a su concentración. Recta de ajuste por mínimos cuadrados de estos datos

## Índice de imágenes

**Imagen 1:** Sistema experimental para la medida del índice de refracción diseñado

**Imagen 2:** Planchas de goma, cartón o madera tamaño DIN-A4. Disco de Hartl y lengüetas (ver anexo I).

**Imagen 3:** Azúcar de mesa (izquierda) y agua desionizada (opcional, derecha).

**Imagen 4:** Comedero de aves domésticas (derecha). Cubeta semicilíndrica (izquierda) elaborada a partir de un comedero de aves domésticas.

**Imagen 5:** Puntero láser rojo (izquierda), pegamento blanco y chinchetas (derecha).

**Imagen 6:** Resultado del paso 1: Lámina de goma con el disco de Hartl.

**Imagen 7:** Disco de Hartl con su eje de giro resultado del paso 2. Anverso (derecha) y reverso (izquierda) del disco.

**Imagen 8:** lengüetas, recortadas y dobladas. Resultado del paso 4.

**Imagen 9:** Sistema experimental completamente montado.

**Imagen 10:** Sistema experimental en funcionamiento. Desplazamiento del disco de  $0^\circ$ .

**Imagen 11:** Sistema experimental en funcionamiento. Desplazamiento del disco de  $58^\circ$ .  
Agua destilada en la cubeta.

**Imagen 12:** Reflexión interna total entre el material de la cubeta empleada y el aire con un ángulo de incidencia de unos  $50^\circ$ .

**Imagen 13:** Sistema experimental empleado por la práctica anterior

**Imagen 14:** Cinta de papel de dimensiones  $29.7 \times 3.0$  cm

**Imagen 15:** Montaje experimental empleado para la presente práctica.

**Imagen 16:** Paso 1. Calibrado del haz de luz.

**Imagen 17:** Paso 2. Disposición de la cubeta.

**Imagen 18:** Paso 3. Rotación del disco con un ángulo de  $40^\circ$ . Se observa tanto el rayo refractado como el reflejado.

**Imágenes 19 – 20:** Desaparición del haz de luz refractado entre un ángulo inicial de  $46^\circ$  (izquierda) y un ángulo final de  $48^\circ$  (derecha).

# 1. Introducción

## 1.1. Justificación

Las disciplinas de ciencia y tecnología tienen gran relevancia en gran parte de los aspectos del mundo contemporáneo. Su influencia no se limita únicamente al paradigma científico o industrial, sino que incide directamente sobre aspectos sociales, económicos, culturales, políticos y educativos, entre otros. Debido a esto juegan un papel crucial en el desarrollo de las sociedades, particularmente en el contexto de creciente expansión y globalización actual (contexto sobre el que, a su vez, incide directamente el desarrollo científico-tecnológico). Debido a esto, es imperativo que el conjunto de la ciudadanía cuente una serie de conocimientos básicos relativos a estas disciplinas con independencia de si sus proyecciones académicas o profesionales futuras están o no directamente relacionadas con estas disciplinas STEM (Vázquez y Manassero, 2012).

Este proceso de *alfabetización científica* supone al conjunto de la ciudadanía la adquisición de unos conocimientos científico-tecnológicos básicos y esenciales para su vida cotidiana, por lo que la necesidad de la alfabetización científica se justifica en base a su relevancia para la formación integral de ciudadanos autónomos, con capacidad crítica, capaces de tomar parte en el desarrollo social mediante la toma de decisiones de interés público relacionadas con la ciencia y la tecnología (DeBoer, 2000).

Este proceso, sin embargo, no debe limitarse únicamente a la adquisición de conocimientos propios directamente relacionados con la ciencia y la tecnología, sino que debe abarcar también conocimientos relativos sobre los que estas disciplinas inciden directamente (en esencia el entorno político, social, histórico, filosófico y económico de estas); así como de las vías procedimentales por las cuales se desarrollan nuevas líneas de investigación y se infieren nuevos conocimientos en estas áreas del saber.

A este respecto, la alfabetización científica comprende dos aspectos: por un lado, el ya mencionado conocimiento **de** la ciencia, el cual comprende los conocimientos directamente relacionados con las ciencias y la tecnología (cultura científica general

acerca de hechos, teorías e hitos en CyT) y por otro, el conocimiento **sobre** la ciencia y la tecnología, el cual abarca los conocimientos transversales mencionados y que también debe tener relevancia en la didáctica de estas disciplinas de forma que el público general adquiera una perspectiva holística al respecto (Abd-El-Khalick, Bell, y Lederman 1998).

De forma paralela a la implantación de didácticas eficaces para la alfabetización científica, es imprescindible que se desarrollen líneas de investigación acerca de estos procedimientos didácticos, encargadas de evaluar, coordinar, clasificar y mejorar los esfuerzos y estrategias didácticas que se implementen para ello (McComas y Olson, 1998).

A pesar de los continuos esfuerzos que se han llevado a cabo para por alcanzar estos objetivos, la realidad educativa observada respecto a la didáctica de la ciencia y la tecnología es completamente distinta. Las encuestas realizadas al alumnado de educación secundaria indican que el interés por el conjunto de disciplinas STEM no deja de decrecer a lo largo de la formación académica de los jóvenes en España. Los motivos de desinterés detallados por estas encuestas, aunque variados, siguen una tendencia general. Los encuestados aluden que estas disciplinas son “aburridas y difíciles” (70.8%) y a que se imparten de forma muy teórica y con escasez de recursos prácticos (85.5 %). Además, cuando se les pregunta acerca de los temas relacionados con las ciencias y la tecnología que les podrían despertarles interés, un 29.2 % señala la falta de aspectos amenos, un 16.7 % se ve atraído por las posibles aplicaciones prácticas y un 54.2% indica directamente su interés por las prácticas de laboratorio (Solbes et al., 2007).

Además de las ya mencionadas, se señalan como causas adicionales del desinterés por las áreas de conocimiento STEM:

- La falta de contextualización de los contenidos, que se perciben como una imposición de datos e ideas dogmáticas desvinculadas con la realidad y sin componente práctico.



- Una metodología de evaluación completamente cuantitativa que, a menudo, premia la capacidad memorística o mecanística en lugar de la capacidad lógica o deductiva.
- La carencia de una perspectiva histórica y social de las ciencias y la tecnología y del impacto que su desarrollo y aplicación tiene en la sociedad.

Otro de los motivos que llevan a la progresiva desvinculación de la población académica con las áreas relativas a ciencia y tecnología, es la precepción de que estos conocimientos, debido a su percibida dificultad, solo son accesibles a personas de especial inteligencia (Dunbar, 1999), creencia que ha ganado popularidad en las últimas décadas debido al impacto de diversos contenidos audiovisuales que refuerzan la idea de que los conocimientos STEM están reservados para genios y no son accesibles para el público general (Retzbach et al, 2013).

Estas circunstancias, entre otras, radican en un desinterés progresivo y generalizado por las ciencias y la tecnología que influye, a su vez, en el sistema educativo, donde la proporción del alumnado que opta por cursar itinerarios educativos relacionados con estas disciplinas no deja de decrecer año tras año, reduciéndose desde un 57.2 % en el año 1996 a un 37.7 % en el año 2012 (Solbes, 2011; Esteve, Solves, 2017).

Para solventar estos problemas se han planteado nuevos enfoques didácticos destinados a disminuir el desinterés general por la ciencia y la tecnología (Vázquez, Manassero, Acevedo, Acevedo, 2007). Uno de estos enfoques, es la implantación de metodologías activas, como el desarrollo de prácticas de laboratorio.

## 1.2. Motivación personal

Desde el punto de vista personal, considero que las prácticas de laboratorio no son solo imprescindibles para asegurar la formación integral del alumnado, sino que además son la llave que permite a este alumnado conectar directamente tanto con los propios conocimientos científicos como con las vías de desarrollo y verificación de estos conocimientos (que es, en muchos casos, el trabajo experimental).

Esta familiarización con el “trabajo científico” es esencial para que sean capaces de comprender la realidad de la investigación científica y les permita tomar decisiones acerca de su futuro profesional.

Sin embargo, la realidad de estas prácticas en el sistema educativo contrasta con esta necesidad y en muchos casos no se llevan a cabo experiencias significativas (por falta de tiempo, de recursos o de motivación por parte del docente). Como esta precisamente fue mi propia experiencia en el sistema educativo, no fue hasta que accedí a la formación universitaria que pude conocer de primera mano el trabajo experimental (que hubiera sido sin duda un factor de motivación adicional de haber estado presente en la época de educación secundaria).

Por ello considero como uno de mis objetivos personales en mi futura carrera docente el desarrollo de prácticas de laboratorio que supongan al alumnado una herramienta para la adquisición de conocimientos significativos que contribuyan a su formación como ciudadanos críticos.

## 2. Marco teórico y contextual

### 2.1. Marco teórico

#### 2.1.1. Aprendizaje por descubrimiento

Desde su proposición en la década de los 60, el modelo de aprendizaje por descubrimiento pretende situar al alumnado en el centro de la experiencia educativa, pasando de ser un mero receptor pasivo de información por parte del docente, como ocurre en los modelos didácticos de transmisión/recepción (en esencia, cualquier modelo basado en la imposición de clases magistrales) (Bruner, 1961). De esta forma, se fomenta el desarrollo de un aprendizaje significativo, sustituyendo el aspecto memorístico por el comprensivo (Arias y Huerta, 2014). Por ello, este modelo de enseñanza aprendizaje pretende situar las experiencias empíricas, así como la búsqueda activa de información, como medios esenciales para el desarrollo del aprendizaje del alumnado.

Esta metodología, sin embargo, no está exenta de críticas. Ausubel propone que este modelo no conduce necesariamente a un aprendizaje más significativo y que sus métodos no son los más eficaces para la enseñanza si no se cuenta con una supervisión directa, por parte del docente, del acto del aprendizaje del alumnado (Ausubel, Novack y Hanesian, 1976). Debido a esto, el papel del docente en este modelo (en contraposición al modelo por transmisión/recepción donde el docente asume el papel de emisor único de información) es el de proporcionar al alumnado las herramientas y destrezas necesarias para llevar a cabo esta labor de descubrimiento y acompañarlo a lo largo de este proceso para asegurar que el aprendizaje se lleva a cabo de forma adecuada.

Por otro lado, se critica la dificultad de adaptar este modelo a las exigencias de los sistemas educativos, ya que el aprendizaje por descubrimiento (por sus características) lleva más tiempo y, a menudo, se ve afectado por limitaciones de presupuesto y por las exigencias de los programas educativos. Además, algunas experiencias requieren de interpretaciones complejas de las experiencias empíricas observadas y que solo pueden ser enseñadas directamente por el docente (Bombien, 2005).

Por todo ello, se entiende que este modelo no es el idóneo para el desarrollo de la totalidad de una asignatura compleja y cargada de contenidos y competencias que habitualmente suponen problemas de comprensión y asimilación por parte del alumnado como es Física y Química, pero que resulta óptimo, por la naturaleza del aprendizaje que propone, para el desarrollo de experiencias y prácticas de laboratorio que sirvan de complemento didáctico a esta asignatura.

### 2.1.2. Prácticas de laboratorio

El trabajo de laboratorio es una de las piedras angulares para el desarrollo del conjunto de las ciencias experimentales, siendo un elemento indispensable en el desarrollo de muchos de los avances científicos y tecnológicos que plantean estas disciplinas. Por ello, es esencial transmitir su importancia al alumnado mediante la realización de pequeñas experiencias de laboratorio coordinadas con la docencia de los aspectos más teóricos

de la asignatura. Además de ejemplificar la labor de las ciencias experimentales y la importancia de estas disciplinas, las prácticas de laboratorio satisfacen otros objetivos para el alumnado:

- Son un factor de motivación general para el alumnado: Las encuestas indican que la ausencia de estas prácticas es un factor desmotivante (Solbes et al., 2007).
- Permiten aplicar los ya mencionados modelos pedagógicos en contraposición a las limitaciones que suelen imponer las clases puramente teóricas.
- Permiten enseñar al alumnado el manejo básico del material, los equipos y las técnicas básicas de un laboratorio.
- Sirven para que el alumnado pueda aplicar el método científico de forma práctica, y se refuercen actitudes científicas deseables como la capacidad crítica o la objetividad (Hodson, 1994).

A pesar de que se reconoce su relevancia en la formación científico-tecnológica del alumnado, la situación de la implantación de este tipo de metodologías está lejos de ser ideal. En particular, se devalúa el trabajo en el laboratorio y su relevancia para la formación de los jóvenes en España, bien por la asignación de una escasa carga lectiva a las asignaturas donde pueden llevarse a cabo, o por la falta de consenso en la administración pública educativa para introducirlas de forma explícita en el currículum (López, Lupión y Mirabent, 2005). Además de la escasez (o total ausencia) de las prácticas de laboratorio en los currículums educativos, se alude a la habitual deficiencia de relevancia de las prácticas concretas que se llevan a cabo, siendo puramente demostrativas o demasiado lúdicas, sin dar pie a la reflexión, la deducción y la inferencia de aprendizajes y conclusiones útiles para la formación del alumnado el cual debería ser objetivo último de este tipo de prácticas educativas (Merino y Herrero, 2005).

Por ello, la prominencia de estas prácticas en España es, desgraciadamente, mucho menor que en otros países como Alemania (Tárraga, Bechtold y De Pro, 2007)

## 2.2. Marco contextual

### 2.2.1. Contenidos

La práctica de laboratorio diseñada por el presente trabajo está diseñada para ser impartida en la etapa educativa de Bachillerato debido a los contenidos y competencias que pretende trabajar. En concreto, trata principalmente el contenido relacionado con la óptica y la naturaleza de la luz el cual, si bien se trabaja de forma superficial en cursos anteriores, solo se aborda de forma explícita en la asignatura de Física de 2º de Bachillerato, dentro del bloque “C. Vibraciones y ondas”, tal como indica el Boletín Oficial de Castilla y León Núm. 190 viernes, 30 de septiembre de 2022:

#### **C. Vibraciones y ondas**

- *Movimiento oscilatorio: variables cinemáticas de un cuerpo oscilante y conservación de energía en estos sistemas.*
- *Movimiento ondulatorio, magnitudes que le caracterizan y tipos de ondas: gráficas de oscilación en función de la posición y del tiempo, ecuación de onda que lo describe y relación con el movimiento armónico simple. Distintos tipos de movimientos ondulatorios en la naturaleza.*
- *Energía de propagación de una onda. Potencia asociada a un movimiento ondulatorio. Intensidad de una onda y fenómenos de atenuación y absorción.*
- *Propagación de las ondas. Fenómenos ondulatorios, reflexión, refracción, difracción*
- *Naturaleza de la luz: controversias y debates históricos. La luz como onda electromagnética. Espectro electromagnético. Reflexión y refracción. Leyes de Snell. Ángulo límite, reflexión total y la fibra óptica. Estudio de la lámina de caras planas y paralelas. Estudio cualitativo de la dispersión.*

- Formación de imágenes en medios y objetos con distinto índice de refracción. Sistemas ópticos: dioptrio plano, lentes delgadas, espejos planos y curvos y sus aplicaciones. El ojo humano y defectos de la visión. Aplicaciones a instrumentos ópticos como la lupa, la cámara fotográfica, el microscopio, y el telescopio.

Tabla 1: Contenidos relativos al bloque C. "Vibraciones y ondas" para el curso de Física de 2º de Bachillerato y contenidos que trabaja directamente la práctica de laboratorio elaborada (marcado en fuente azul). Fuente: Boletín Oficial de Castilla y León Núm. 190 viernes, 30 de septiembre de 2022 Pág. 49851-49852.

A pesar de esto, la práctica diseñada tiene cierto carácter interdisciplinar, por lo que aborda varios temas de forma indirecta o transversal, correspondientes a las asignaturas de Química de 2º de Bachillerato y/o Física y Química de 1º de Bachillerato:

En la asignatura de Química de 2º de Bachillerato podría aludir a las siguientes partes del bloque "C. Química orgánica":

### **C. Química orgánica**

- Isomería - Fórmulas moleculares y desarrolladas de compuestos orgánicos. Diferentes tipos de isomería estructural. - Modelos moleculares o técnicas de representación 3D de moléculas. Isómeros espaciales de un compuesto y sus propiedades.
- Reactividad orgánica - Principales propiedades químicas de las distintas funciones orgánicas. Comportamiento en disolución o en reacciones químicas. - Principales tipos de reacciones orgánicas. Productos de la reacción entre compuestos orgánicos y las correspondientes ecuaciones químicas.
- Polímeros - Proceso de formación de los polímeros a partir de sus correspondientes monómeros. Estructura y propiedades. - Clasificación de los polímeros según su naturaleza, estructura y composición. Aplicaciones, propiedades y riesgos medioambientales asociados.

Tabla 2: Contenidos relativos al bloque C. "Química orgánica" para el curso de Química de 2º de Bachillerato. Contenidos que podría trabajar indirectamente la práctica de laboratorio elaborada (marcado en fuente azul). Fuente: Boletín Oficial de Castilla y León Núm. 190 viernes, 30 de septiembre de 2022 Pág. 50207.

En cuanto a la asignatura de Física y Química de 1º de Bachillerato, la práctica podría abarcar contenidos correspondientes a los bloques de contenido “B. Reacciones químicas” y “C. Química orgánica”:

### **B. Reacciones químicas**

- Leyes fundamentales de la química (leyes ponderales, ley de los volúmenes de combinación, hipótesis de Avogadro). Relaciones estequiométricas en las reacciones químicas y en la composición de los compuestos. Resolución de cuestiones cuantitativas relacionadas con la química en la vida cotidiana.
- Clasificación de las reacciones químicas: relaciones que existen entre la química y aspectos importantes de la sociedad actual como, por ejemplo, la conservación del medioambiente o el desarrollo de fármacos.
- Cálculo de cantidades de materia en sistemas fisicoquímicos concretos, como gases ideales y sus leyes o disoluciones (expresando su concentración en porcentaje en masa, porcentaje en volumen, g/L y fracción molar) y sus propiedades. Variables mesurables propias del estado de los mismos en situaciones de la vida cotidiana.
- Estequiometría de las reacciones químicas: aplicaciones en los procesos industriales más significativos de la ingeniería química.

### **C. Química orgánica**

- Propiedades físicas y químicas generales de los compuestos orgánicos a partir de las estructuras químicas de sus grupos funcionales: generalidades en las diferentes series homólogas y aplicaciones en el mundo real.
- Reglas de la IUPAC para formular y nombrar correctamente algunos compuestos orgánicos mono- y polifuncionales (hidrocarburos, compuestos oxigenados y compuestos nitrogenados).

*Tabla 3: Contenidos relativos a los bloques B. “Reacciones químicas” y C. “Química orgánica” para el curso de Física y Química de 1º de Bachillerato. Contenidos que podría trabajar indirectamente la práctica de laboratorio elaborada (marcado en fuente azul). Fuente: Boletín Oficial de Castilla y León Núm. 190 viernes, 30 de septiembre de 2022 Pág. 49862.*

Los contenidos señalados para estas asignaturas, sin embargo, requerirían de un desarrollo adicional de la práctica propuesta, por ello y en cuanto a lo que a este trabajo respecta, quedan fuera de alcance de la experiencia descrita. Por ello, la asignatura escogida como objetivo para el desarrollo de la practica descrita es Física de 2º de Bachillerato.

### 2.2.2. Competencias específicas

En el Boletín Oficial de Castilla y León Núm. 190 viernes, 30 de septiembre de 2022 Pág. 49851-49852 se indican una serie de competencias específicas para la asignatura de Física de 2º de Bachillerato. Estas competencias específicas reúnen las aptitudes, habilidades y experiencia que el alumnado debe obtener para considerar que la asignatura ha sido impartida correctamente (recogidas en la tabla 4):

#### **Competencias Específicas**

- 1. Utilizar las teorías, principios y leyes que rigen los procesos físicos más importantes, considerando su base experimental y desarrollo matemático en la resolución de problemas, para reconocer la física como una ciencia relevante implicada en el desarrollo de la tecnología, la economía, la sociedad y de la sostenibilidad ambiental.*
- 2. Adoptar los modelos, teorías y leyes aceptados de la física como base de estudio de los sistemas naturales y predecir su evolución para inferir soluciones generales a los problemas cotidianos relacionados con las aplicaciones prácticas demandadas por la sociedad en el campo tecnológico, industrial y biosanitario.*
- 3. Utilizar el lenguaje de la física con la formulación matemática de sus principios, magnitudes, unidades, ecuaciones, etc., para establecer una comunicación adecuada entre diferentes comunidades científicas y como una herramienta fundamental en la investigación.*



4. *Utilizar de forma autónoma, eficiente, crítica y responsable recursos en distintos formatos, plataformas digitales de información y de comunicación en el trabajo individual y colectivo para el fomento de la creatividad mediante la producción y el intercambio de materiales científicos y divulgativos que faciliten acercar la física a la sociedad como un campo de conocimientos accesible.*
  
5. *Aplicar técnicas de trabajo e indagación propias de la física, así como la experimentación, el razonamiento lógico-matemático y la cooperación, en la resolución de problemas y la interpretación de situaciones relacionadas, para poner en valor el papel de la física en una sociedad basada en valores éticos y sostenibles.*
  
6. *Reconocer y analizar el carácter multidisciplinar de la física, considerando su relevante recorrido histórico y sus contribuciones al avance del conocimiento científico como un proceso en continua evolución e innovación, para establecer unas bases de conocimiento y relación con otras disciplinas científicas.*

*Tabla 4: Competencias específicas para el curso de Física de 2º de Bachillerato. Fuente: Boletín Oficial de Castilla y León Núm. 190 viernes, 30 de septiembre de 2022 Pág. 49846-49848.*

A su vez, en esta misma orden, se indican una serie de descriptores de salida y criterios de evaluación asociados a estas competencias, cuyo objetivo es definir y orientar los aspectos docentes necesarios para satisfacerlas (tabla 5):

<i>Competencia</i>	<i>Criterios de evaluación</i>	<i>Descriptores de salida</i>
<i>Competencia específica 1</i>	<i>1.1 Reconocer la relevancia de la física en el desarrollo de la ciencia, la tecnología, la economía, la sociedad y la sostenibilidad ambiental, empleando adecuadamente los fundamentos científicos relativos a esos ámbitos</i>	<i>STEM2</i>

	<i>1.2 Resolver problemas de manera experimental y analítica, utilizando principios, leyes y teorías de la física.</i>	<i>STEM1, STEM2, STEM3, CD5</i>
<i>Competencia específica 2</i>	<i>2.1 Analizar y comprender la evolución de los sistemas naturales, utilizando modelos, leyes y teorías de la física.</i>	<i>STEM2, CC4</i>
	<i>2.2 Inferir soluciones a problemas generales a partir del análisis de situaciones particulares y las variables de que dependen.</i>	<i>STEM2, STEM5, CPSAA2</i>
	<i>2.3 Conocer aplicaciones prácticas y productos útiles para la sociedad en el campo tecnológico, industrial y biosanitario, analizándolos en base a los modelos, las leyes y las teorías de la física.</i>	<i>STEM2, STEM5, CC4</i>
<i>Competencia específica 3</i>	<i>3.1 Aplicar los principios, leyes y teorías científicas en el análisis crítico de procesos físicos del entorno, como los observados y los publicados en distintos medios de comunicación, analizando, comprendiendo y explicando las causas que los producen.</i>	<i>CCL1, CCL2, STEM4</i>
	<i>3.2 Utilizar de manera rigurosa las unidades de las variables físicas en diferentes sistemas de unidades, empleando correctamente su notación y sus equivalencias, así como la elaboración e interpretación adecuada de gráficas que relacionan variables físicas, posibilitando una comunicación efectiva con toda la comunidad científica.</i>	<i>CCL1, STEM1, STEM4, CD3</i>
	<i>3.3 Expresar de forma adecuada los resultados, argumentando las soluciones obtenidas, en la resolución de los ejercicios y problemas que se plantean, bien sea a través de situaciones reales o ideales.</i>	<i>CCL1, CCL5, STEM1, STEM4</i>
<i>Competencia específica 4</i>	<i>4.1 Consultar, elaborar e intercambiar materiales científicos y divulgativos en distintos formatos con</i>	<i>CCL3, CP1, STEM3, CD1, CD2,</i>

	<i>otros miembros del entorno de aprendizaje, utilizando de forma autónoma y eficiente plataformas digitales.</i>	<i>CD3, CPSAA4</i>
	<i>4.2 Usar de forma crítica, ética y responsable medios de comunicación digitales y tradicionales como modo de enriquecer el aprendizaje y el trabajo individual y colectivo.</i>	<i>CCL3, CP1, STEM5, CD1, CD3, CPSAA4</i>
<i>Competencia específica 5</i>	<i>5.1 Obtener relaciones entre variables físicas, midiendo y tratando los datos experimentales, determinando los errores y utilizando sistemas de representación gráfica.</i>	<i>STEM1, STEM4</i>
	<i>5.2 Reproducir en laboratorios, reales o virtuales, determinados procesos físicos modificando las variables que los condicionan, considerando los principios, leyes o teorías implicados, generando el correspondiente informe con formato adecuado e incluyendo argumentaciones, conclusiones, tablas de datos, gráficas y referencias bibliográficas.</i>	<i>CCL1, STEM1, CPSAA3.2, CE3</i>
	<i>5.3 Valorar la física, debatiendo de forma fundamentada sobre sus avances y la implicación en la sociedad, desde el punto de vista de la ética y de la sostenibilidad.</i>	<i>CCL1, STEM4, CPSAA3.2, CC4, CE3</i>
<i>Competencia específica 6</i>	<i>6.1 Identificar los principales avances científicos relacionados con la física que han contribuido a la formulación de las leyes y teorías aceptadas actualmente en el conjunto de las disciplinas científicas, como las fases para el entendimiento de las metodologías de la ciencia, su evolución constante y su universalidad.</i>	<i>STEM2, STEM5, CPSAA5, CE1</i>
	<i>6.2 Reconocer el carácter multidisciplinar de la ciencia y las contribuciones de unas disciplinas en otras, estableciendo relaciones entre la física y la química, la biología, la geología o las matemáticas.</i>	<i>CPSAA5</i>

Tabla 5: Criterios de evaluación y descriptores de salida para cada una de las competencias específicas establecidas para el curso de Física de 2º de Bachillerato. Se señalan (marcados en azul) los criterios que se consideran directamente relacionados con la práctica propuesta. Fuente: *Boletín Oficial de Castilla y León Núm. 190 viernes, 30 de septiembre de 2022 Pág. 49848-49849.*

Tal como se indica en la tabla anterior, existe una relación directa entre algunos de los criterios de evaluación señalados y la práctica propuesta. En concreto, se establece que la práctica diseñada establece como uno de sus objetivos principales el servir al alumnado de ejemplo acerca de cómo se pueden usar los conceptos físicos adquiridos en el aula para tratar de resolver un problema determinado de forma experimental, aplicando las leyes y principios físicos para inferir soluciones en base a la observación empírica (criterios 1.2 y 2.2). También se señala la relevancia de los criterios asociados a la tercera competencia específica (3.1, 3.2 y 3.3), que remarcan la relevancia de la aplicación de estos principios físicos, así como, la correcta interpretación, tratamiento y presentación de los derivados de ello, actividades esenciales para el desarrollo de cualquier experiencia de laboratorio. Los criterios 5.1 y 5.2 reiteran estos conceptos, señalando además la necesidad de que los informes presentados cuenten con ciertas características y elementos (formato adecuado, argumentaciones, conclusiones, tablas de datos, gráficas y referencias bibliográficas).

Por otra parte, es inevitable señalar que el desarrollo de la práctica propuesta alude también (en mayor o en menor medida) al resto de los criterios descritos. Esto es debido a que cualquier intervención efectiva en el aula, aporta al alumnado una percepción más general de la física y las ciencias en su conjunto. De esta forma, una buena acción docente le supone a dicho alumnado una visión holística que, a su vez, le permite reconocer y valorar la relevancia de la física en el desarrollo de la ciencia, la tecnología, la economía, la sociedad y la sostenibilidad ambiental, permitiéndole debatir acerca de sus avances y su implicación en la sociedad (criterios 1.1 y 5.3). Además, debido a la multitud de contenidos que abarca directa e indirectamente, la práctica diseñada permite reconocer el creciente carácter multidisciplinar que caracteriza a la ciencia y la tecnología (criterio 6.2). Por su parte, los criterios 4.1 y 4.2 (asociados a la competencia específica 4) son inevitablemente trabajados por el alumnado durante la realización del informe de la práctica, ya que la mayoría, suele optar por realizar el tratamiento de datos, así como la redacción y envío de estos informes mediante el uso de tecnologías de la información y la comunicación.

### 2.3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de fin de máster es el desarrollo de una práctica de óptica que pueda ser llevada a cabo, a modo de intervención en el aula, en la asignatura de Física de 2º de Bachillerato. Para ello se describirá, inicialmente, los aspectos didácticos y educativos (organización, material didáctico requerido, temporalización, metodología, evaluación) necesarios para que dicha práctica pueda ser implantada correctamente. Posteriormente, se desarrollará el contenido más técnico de esta práctica, señalando su fundamentación teórica, sus objetivos concretos de cara al alumnado, así como un guion donde se detalle como debe ser llevada a cabo.

Por otro lado, se pretende que la práctica sea relevante para el alumnado, favoreciendo su aprendizaje, por lo que se establecen como objetivos secundarios:

- Que la práctica tenga una carga didáctica real y esté directamente relacionada con la adquisición de parte de los contenidos y competencias que marca la asignatura, en lugar de ser una experiencia puramente demostrativa o lúdica.
- Que permita al alumnado resolver un determinado problema, de forma más o menos autónoma, realizando observaciones efectivas e infiriendo soluciones en base a las leyes y principios físicos
- Que sirva a modo de ejemplo acerca de cómo el método científico puede ser aplicado a situaciones reales y cotidianas
- Que permita al alumnado familiarizarse con la toma de datos, así como el procesamiento y presentación de datos y figuras y el tratamiento de los errores experimentales.
- Que suponga a dicho alumnado un ejercicio de análisis crítico, permitiéndoles extraer conclusiones acerca de sus observaciones.

### 3. Aspectos didácticos

Cualquier actividad o intervención didáctica en el aula, debe estar correctamente contextualizada para poder satisfacer los objetivos que se propone. Esta

contextualización debe incluir información detallada acerca de la temporalización de esta intervención (número de sesiones necesarias, duración de cada una de ellas, tiempo estimado de trabajo autónomo...), la organización del alumnado en la clase, la metodología que se pretende emplear, así como la evaluación requerida, ya sea de forma simultánea al desarrollo de la intervención o posterior a ella. A continuación, se detallan los aspectos didácticos más relevantes en relación con la práctica desarrollada. (Estos aspectos deben ser entendidos como recomendaciones metodológicas en base a la práctica descrita. Por ello pueden ser modificados en función de las circunstancias del alumnado, el docente o el centro)

### **3.1. Temporalización**

Teniendo en cuenta que la duración habitual de las sesiones en un centro de educación secundaria es de 50 minutos, se estima que la experiencia descrita requiere de un mínimo de 3 sesiones y media.

#### **Sesión 0 - Introducción**

En esta primera sesión, se llevará a cabo una pequeña descripción de la práctica de cara al alumnado. Para ello, se utilizarán los últimos 25 minutos de una sesión habitual de aula (idealmente de la sesión inmediatamente anterior a la realización de la parte experimental de la práctica). Se expondrá al alumnado los objetivos de la práctica, así como su metodología y los resultados que se les pedirán al respecto. También se les proporcionará un guion de laboratorio que contenga, de forma más detallada, todos estos aspectos (recogido en el Anexo I)

La duración de esta sesión podría ser reducida o eliminada en el caso de que el alumnado se preste dispuesto a leer el guion antes de la sesión en el laboratorio (por lo que suele ser conveniente mantenerla).

#### **Sesión 1 – Parte experimental I**

A lo largo de esta primera sesión se llevará a cabo el montaje del sistema experimental necesario para tomar las medidas de la práctica. Para ello, se desplazará al alumnado al laboratorio del centro (si lo tuviera) y se les situará en las mesas previamente preparadas

y provistas del material necesario. Después se les recordará brevemente la metodología, el diseño y las precauciones que deben tomar para su montaje. Tras esto el alumnado realizará una serie de observaciones y mediciones, a modo de control, de varias muestras proporcionadas por el docente para verificar que cada uno de los sistemas es operativo y es capaz de tomar las medidas deseadas para la práctica. El docente, por su parte, supervisará este proceso, asistiendo al alumnado que encuentre dificultades o presente dudas al respecto.

## **Sesión 2 – Parte experimental II**

Durante esta sesión se desarrollará el grueso de la práctica, correspondiente a la parte experimental de la misma. El alumnado será dirigido al laboratorio o al aula donde va a tener lugar el desarrollo de la práctica. Posteriormente, se les recordará brevemente la metodología necesaria para la medición, así como los objetivos de la práctica. Tras esto el alumnado realizará las observaciones y mediciones que requiere la práctica de forma autónoma. Al igual que en la sesión anterior, el docente tiene el papel de supervisar y asistir al alumnado que lo necesite, resolviendo dudas y posibles dificultades. Para finalizar, se les indicará como deben recoger y limpiar el material empleado.

## **Sesión 3 – Procesamiento de los datos obtenidos**

Una vez realizada la parte experimental, se realizará en una última sesión, el tratamiento de los datos obtenidos por el alumnado. Para ello se les proporcionará acceso a los ordenadores del centro (ya sea en el aula de TIC o mediante el uso de PCs portátiles). En esta sesión el docente les explicará cómo deben procesar los datos obtenidos. En el caso de la práctica propuesta:

- Representación de los datos experimentales obtenidos en una gráfica de dispersión.
- Ajuste de los datos representados a una recta, utilizando el método de mínimos cuadrados.
- Interpolación en la recta de los datos asociados a una muestra problema.
- Estimación y propagación de errores experimentales.

A modo de sugerencia, se recomienda que estas explicaciones no se centren únicamente en la utilización de recursos digitales, ya que resulta igualmente interesante explicar al alumnado en qué consisten estos métodos y cuál es su finalidad utilizando medios analógicos, a pesar de que posteriormente utilicen medios digitales para presentarlos. Finalmente, se le dará al alumnado una serie de recomendaciones acerca del formato y los contenidos del informe que deberán presentar.

### **Trabajo posterior**

Por último, el alumnado deberá presentar sus observaciones, datos obtenidos, gráficas, figuras, imágenes y conclusiones acerca de la práctica realizada mediante la entrega de un informe escrito al docente. Este informe será redactado de forma autónoma e individual y entregado en una fecha pactada. La duración de este trabajo autónomo por parte del estudiante no está definida y dependerá del interés y esfuerzo que esté dispuesto a depositar en su elaboración, por lo que influirá directamente sobre la calificación obtenida.

### **3.2. Organización**

En cuanto a la organización del alumnado para la realización de la parte experimental de esta actividad (sesión 1), se recomienda realizar grupos de 2 o 3 estudiantes. De esta forma, el trabajo de montaje, preparación del material y toma de datos se reparte entre los integrantes de un grupo, ya que sería demasiada carga de trabajo si se realizase de forma individual. Por otro lado, grupos mayores (más de 3 estudiantes) podrían suponer una carga de trabajo demasiado escasa para cada uno de los miembros del grupo y, a su vez, derivar en una mayor distracción y alboroto del aula.

Esta organización es, por supuesto, modificable en función de las circunstancias y el contexto de aplicación de la práctica, como por ejemplo el material disponible, el espacio físico del laboratorio o el aula donde se lleve a cabo.

En cuanto a la organización de la sesión introductoria y de la tercera sesión, se realizarán en formato de gran grupo, de forma que las explicaciones del docente, así como las



posibles intervenciones del alumnado, se lleven a cabo de forma general y se haga partícipe de ellas a todo el alumnado.

La elaboración del informe de prácticas, por su parte, se realizará de forma individual para asegurar que cada uno de los estudiantes tenga oportunidad de trabajar y reflexionar acerca de los conceptos acerca de los que trata la práctica.

### 3.3. Evaluación

Una vez se lleva a cabo la práctica, es necesario evaluar el desempeño del alumnado en cada una de las partes de la actividad realizada. A continuación, se detallan las recomendaciones, relativas a la práctica propuesta, de cara al acto de evaluación y calificación.

Generalmente, el peso relativo de cada una de las partes (parte experimental, controles parciales, control global, evaluación continua...) de la asignatura, viene determinado por el departamento que la gestiona (en nuestro caso el de Física y Química). La metodología concreta para la evaluación de cada una de estas partes suele venir determinada por el docente que imparta la asignatura. A continuación, se propone una metodología para la evaluación de la práctica:

- **Desempeño e interés:** se tendrá en cuenta el grado de atención por las explicaciones en el aula, así como la participación en la parte experimental. Se puntuará en base a las observaciones y anotaciones por parte del docente en una escala de 1 al 10 y supondrá un 30% de la calificación relativa a la parte experimental que establezca el departamento.
- **Informe presentado:** Como el informe requerido a cada uno de los estudiantes, debe hacer referencia a cada una de las partes de la práctica, se le asigna la mayor parte del peso de la calificación, suponiendo un 70% de esta. Este informe, debe contener, al menos, las siguientes partes:
  - **Portada:** Debe incluir el título de la práctica llevada a cabo, el nombre del estudiante, su curso y grupo y la fecha de entrega.

- **Introducción:** Donde se detalle el marco teórico al que hace referencia la práctica, así como sus objetivos y el material empleado para llevarla a cabo.
- **Metodología:** Debe detallar el procedimiento experimental llevado a cabo, incluyendo observaciones, datos tomados y posibles incidentes o problemas encontrados.
- **Resultados:** Se deben presentar los datos obtenidos y los cálculos y/o gráficas procedentes de estos.
- **Resolución de preguntas:** Se deben responder a las cuestiones o preguntas que realiza el guion. Estas están relacionadas con los métodos empleados o los resultados obtenidos
- **Conclusiones:** Deben presentar conclusiones apropiadas acerca de la práctica realizada, su utilidad, la validez de los métodos que utiliza y de los resultados que obtiene.

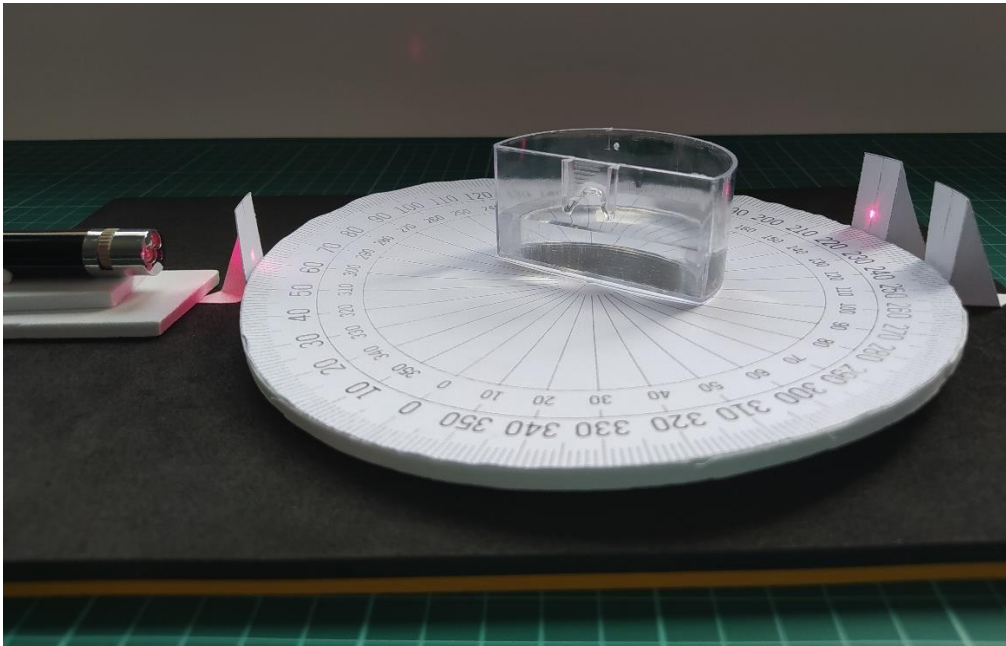
La calificación de esta parte de la evaluación se llevará a cabo mediante la siguiente rúbrica:

	Presentación	Redacción	Material, procedimiento y objetivos	Datos	Gráficas	Resultados	Conclusiones	Preguntas	Calificación final
Peso relativo	10	15	10	10	10	15	10	20	100
Estudiante 1									
Estudiante 2									
(...)									
Estudiante n									

Tabla 6: Rúbrica de calificación relativo al informe de prácticas individual requerido al alumnado. Se indica el peso relativo (respecto a un total de 100 puntos) recomendado para cada uno de los aspectos evaluables.

#### 4. Descripción de la primera parte de la práctica.

La práctica diseñada, se divide en dos partes diferenciadas, ya que cada una de ellas tiene como objetivo la medida de diferentes parámetros, por lo que requieren de sistemas experimentales ligeramente diferentes. La primera parte de la práctica que se ha desarrollado en el presente trabajo tiene como objetivos diseñar y realizar un montaje experimental sencillo que permita medir el índice de refracción de varios fluidos y, posteriormente, utilizar este sistema para determinar cómo varía este parámetro a medida que aumenta la concentración de una sustancia (sacarosa o azúcar de mesa) en agua para finalmente poder determinar, utilizando este sistema, la concentración de azúcar de una muestra problema como un refresco.



*Imagen 1: Sistema experimental para la medida del índice de refracción diseñado*

Cada uno de los grupos del alumnado establecidos, llevará a cabo el montaje de un sistema similar al anterior y lo utilizará para medir el índice de refracción de una serie de disoluciones de sacarosa de concentración conocida (preparadas previamente por un curso anterior en una de sus prácticas de laboratorio). Posteriormente, representarán los datos obtenidos y realizarán un ajuste lineal de los mismos para obtener una recta de calibrado, que permita relacionar el índice de refracción medido para cualquier

disolución de sacarosa y su concentración de esta sustancia. En el caso de esta práctica, estimarán el contenido de azúcar de varios refrescos y discutirán los datos obtenidos.

## 4.1. Fundamento teórico

### 4.1.1. Naturaleza de la luz

Posiblemente uno de los debates más complejos e históricamente extensos que han tenido lugar durante el desarrollo de la física moderna es el correspondiente a la naturaleza de la luz. Una de las primeras concepciones acerca de la luz fue propuesta por Newton, quien defendió que la luz estaba conformada por partículas procedentes de los sistemas luminosos y cuyo impacto con los sistemas estructurales del ojo permitía la visión. Gracias a este modelo consiguió explicar fenómenos como la reflexión y la refracción, sin embargo, llegó a dudar de esta concepción, proponiendo que la luz presentaba también cierto carácter ondulatorio.

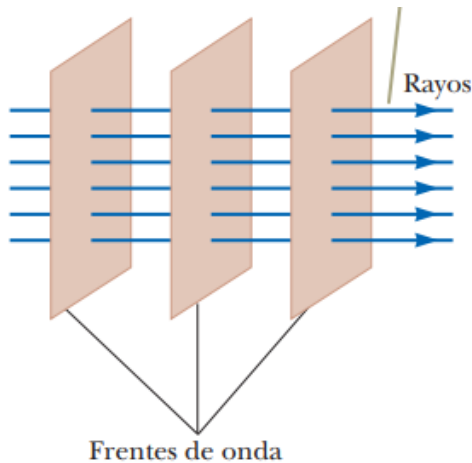
No fue hasta 1678, que Huygens propuso un modelo capaz de explicar estos fenómenos, la reflexión y la refracción, a partir de una teoría que considerara la luz como un fenómeno ondulatorio. Sin embargo, esta concepción no fue universalmente aceptada hasta que en 1801 Thomas Young demostró, con su famoso experimento, como los fenómenos luminosos debían ser explicados a partir de su aparente carácter ondulatorio. Posteriormente Maxwell propuso que la luz era en efecto una onda electromagnética, lo que llevó a la aceptación generalizada de la luz como onda.

Este debate, relativo a la naturaleza de la luz, se volvió a abrir a principios del siglo XX debido a que aparecieron nuevas evidencias de que la luz podía dar lugar a una serie de fenómenos (como el efecto fotoeléctrico o el efecto Compton) que solo podían ser explicados si se consideraba que esta, estaba conformada por partículas. La reapertura de este debate fue uno de los hitos que marcaron el nacimiento de la teoría cuántica.

Actualmente se acepta que la luz tiene un carácter dual, fruto de su naturaleza cuántica, presentando características y, por tanto, dando lugar a fenómenos propios de ondas y de partículas.

### 4.1.2. Aproximación a un rayo

Para los propósitos del presente trabajo, se considerará que la luz tiene un carácter exclusivamente ondulatorio y, además, se realizará una pequeña aproximación de esta. Habitualmente, en óptica geométrica, se utiliza la denominada aproximación de un rayo. En esta aproximación, se asume que la luz viaja en línea recta y con dirección y sentido



constantes en cualquier medio homogéneo, solo cambiando de dirección cuando cambia de un medio a otro. Además, se representan las ondas lumínicas como líneas rectas, unidimensionales, perpendiculares al frente de transmisión de la onda, simplificando la representación de una onda que se propaga en un espacio tridimensional. Tal como indica la figura de la izquierda.

Figura 1: Representación de la aproximación a un rayo.

### 4.1.3. Principio de Huygens Fresnel

El principio de Huygens Fresnel es una herramienta ampliamente utilizada en óptica geométrica cuyo objetivo es poder determinar la posición que tendrá un frente de ondas tras un tiempo  $\Delta t$  conociendo la posición de dicho frente en un instante inicial.

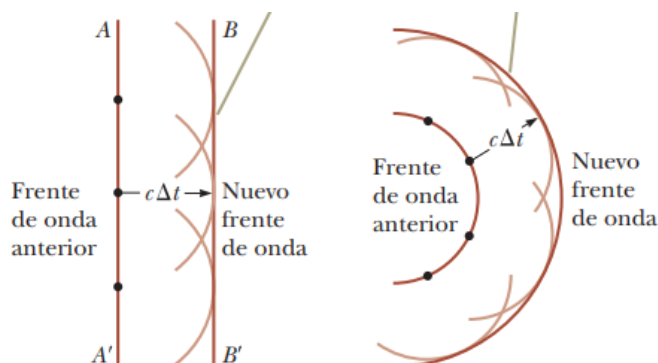


Figura 2: Ilustración del principio de Huygens para una onda plana (izquierda) y una esférica (derecha). En este caso, el desplazamiento del frente de ondas toma un valor  $c \Delta t$  debido a que las ondas viajan a la velocidad de la luz.

Este principio se basa en que, dada la posición inicial de un frente de ondas, podemos suponer que cada uno de los puntos de su superficie emite a su vez una serie de *miniondas* esféricas (cuya velocidad de propagación depende del medio en el que se encuentren), a partir de las cuales se puede determinar

el nuevo frente de ondas, transcurrido un tiempo  $\Delta t$ , como la curva tangente a cada una de las nuevas posiciones de estas miniondas, transcurrido ese mismo intervalo de tiempo.

Si bien este principio es simplemente un artilugio geométrico (la emisión de miniondas por parte del frente de una onda mayor no es un fenómeno real), permite explicar multitud de fenómenos ondulatorios y al mismo tiempo demostrar las relaciones matemáticas que definen estos fenómenos (Serway, R. A., & Jewett, J. W., 2009).

#### 4.1.4. Reflexión y refracción de las ondas

Un rayo de luz que se propaga con una velocidad  $v_1$  a través de un medio, producirá dos fenómenos característicos al incidir (con un ángulo  $\vartheta_1$  respecto a la normal) sobre la superficie que separa el medio por el que viaja y un segundo medio:

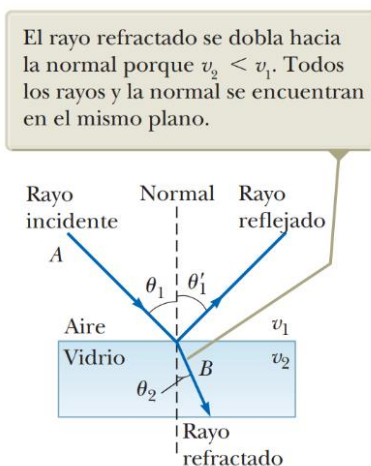


Figura 3: Representación de los fenómenos de reflexión y refracción sobre una capa de vidrio.

Una parte del rayo sufrirá un fenómeno de **reflexión** y será devuelto al medio inicial con un ángulo  $\vartheta'_1 = \vartheta_1$ .

Otra parte de este rayo, sin embargo, se transmitirá con una velocidad  $v_2$  por el nuevo medio, formando un ángulo  $\vartheta_2$  respecto a la normal, diferente de al ángulo de incidencia  $\vartheta_1$ .

El ángulo de propagación  $\vartheta_2$ , varía respecto al ángulo inicial debido a la diferencia en la velocidad de transmisión del rayo entre el medio de origen y el nuevo medio de transmisión. Podemos aplicar el método de

Huygens visto anteriormente para determinar la relación concreta que guardan los ángulos de los rayos incidente y refractado con su velocidad en cada uno de los medios.

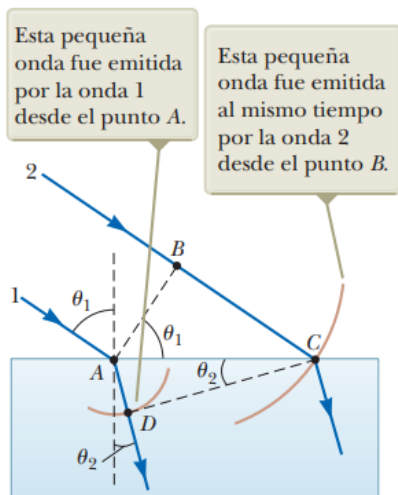


Figura 4: Representación del fenómeno de la refracción entre dos medios. Los arcos que pasan por D y C corresponden a los frentes de onda de Huygens emitidos por los rayos 1 y 2 respectivamente.

Supongamos dos rayos 1 y 2 pertenecientes a un mismo frente de ondas. Cuando el rayo 1 incide sobre la superficie en el punto A, emite una *minionda* de Huygens (marcada en la figura de la izquierda con el arco que pasa por D) y se refracta por el nuevo medio con un ángulo  $\vartheta_2$  respecto a la normal. En este mismo instante el rayo 2, que no ha alcanzado la superficie del nuevo medio y se encuentra en el punto B, emite también una *minionda* (marcada como el arco que pasa por C). Siguiendo el principio de Huygens, el frente de ondas (inicialmente la superficie perpendicular a los rayos 1 y 2, marcada en la imagen como la línea punteada

que pasa por A y B) se encuentra ahora definido por la superficie que contiene a los puntos C y D y es perpendicular a los rayos que se propagan por el nuevo medio.

Como estas *miniondas* se emiten a la vez, viajan un mismo intervalo de tiempo  $\Delta t$ , pero debido a que se transmiten por medios diferentes, su velocidad de propagación es diferente. Podemos usar estas velocidades junto al intervalo de tiempo  $\Delta t$  para determinar el radio de estas miniondas (Serway, R. A., & Jewett, J. W., 2009).

Desde el punto A, la primera minionda tiene un radio  $r_1$ :

$$r_1 = AD = v_2 \cdot \Delta t \tag{1}$$

Siendo  $v_2$  la velocidad de la luz en el medio de refracción. Por su parte, el radio de la minionda que se propaga desde B es:

$$r_2 = BC = v_1 \cdot \Delta t \tag{2}$$

Donde  $v_1$  es la velocidad de la luz en el medio de origen. Como no conocemos las distancias AD y BC, podemos usar la definición de la función seno en los triángulos ABC y ADC para relacionar estas distancias entre sí, así como con los ángulos  $\vartheta_1$  y  $\vartheta_2$ :

$$\text{Sen}\theta_1 = \frac{BC}{AC} \quad ; \quad \text{Sen}\theta_2 = \frac{AD}{AC} \quad (3.1 \text{ y } 3.2)$$

Si despejamos la distancia AC en cada una de estas relaciones y las igualamos, obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{BC}{\text{Sen}\theta_1} = \frac{AD}{\text{Sen}\theta_2} \quad (4)$$

Donde podemos sustituir las distancias BC y AD por las expresiones de las ecuaciones 1 y 2 respectivamente:

$$\frac{v_1 \cdot \Delta t}{\text{Sen}\theta_1} = \frac{v_2 \cdot \Delta t}{\text{Sen}\theta_2} \quad (5)$$

Que podemos expresar como:

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{\text{Sen}\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (6)$$

#### 4.1.5. Índice de refracción

Con frecuencia, en lugar de utilizar las velocidades de propagación de la luz en los diferentes medios, se utiliza una magnitud derivada y adimensional; el **índice de refracción**. Esta magnitud se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío,  $c$  y la velocidad de la luz en un medio determinado,  $v$ :



$$n \equiv \frac{c}{v}; \quad c = 299792458 \text{ m/s} \quad (7)$$

Debido a que la velocidad de la luz es siempre menor o igual a  $c$ , el índice de refracción, toma un valor unitario únicamente en el vacío, siendo menor a 1 en cualquier otro medio. Este parámetro depende principalmente del medio a través del cual se propague la luz. También depende de la temperatura, la presión y la frecuencia de la luz que se propague ya que todos estos factores influyen sobre esta velocidad de propagación. A continuación, se incluye (a modo de ejemplo) una tabla con índices de refracción propios de varios medios de propagación:

Sustancia	Índice de refracción	Sustancia	Índice de refracción
<i>Sólidos a 20 °C</i>		<i>Líquidos a 20 °C</i>	
Circonio cúbico	2.20	Benceno	1.501
Diamante (C)	2.419	Disulfuro de carbono	1.628
Fluorita (CaF <sub>2</sub> )	1.434	Tetracloruro de carbono	1.461
Cuarzo fundido (SiO <sub>2</sub> )	1.458	Alcohol etílico	1.361
Fosfato de galio	3.50	Glicerina	1.473
Vidrio, sin plomo	1.52	Agua	1.333
Vidrio, con plomo	1.66		
Hielo (H <sub>2</sub> O)	1.309	<i>Gases a 0 °C, 1 atm</i>	
Poliestireno	1.49	Aire	1.000 293
Cloruro de sodio (NaCl)	1.544	Dióxido de carbono	1.000 45

Tabla 7: Índices de refracción de varios sólidos, líquidos y gases. Se toma una luz con longitud de onda de 589 nm en el vacío (Serway, R. A., & Jewett, J. W., 2009).

Cómo el índice de refracción del aire es de  $n_{\text{aire}} = 1.0003$ , se aproxima mucho al valor unitario, se entiende que para los propósitos de este trabajo este índice es exactamente 1.

#### 4.1.6. Ley de refracción Snell

Si tomamos la expresión 6 obtenida anteriormente y expresamos las velocidades  $v_1$  y  $v_2$  en función de los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ , obtenemos lo siguiente:

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{\text{Sen}\theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (8)$$

Esta expresión se escribe habitualmente como:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (9)$$

Esta ecuación corresponde a la denominada **ley de refracción de Snell** y, al igual que la expresión 6, relaciona los ángulos de los rayos incidente y refractado con la velocidad de la luz en cada uno de los medios, utilizando sus índices de refracción en lugar de sus velocidades (Serway, R. A., & Jewett, J. W., 2009).

#### 4.1.7. Variación del índice de refracción de disoluciones con la concentración

El agua pura, tiene un índice de refracción de  $n = 1.333$  a 20°C (Serway, R. A., & Jewett, J. W., 2009), sin embargo, a medida que se disuelve cualquier sustancia en ella, este índice de refracción aumenta debido a nuevas interacciones entre la luz y la nueva sustancia introducida.

A partir de observaciones experimentales, se puede determinar que el índice de refracción de las disoluciones acuosas aumenta de forma lineal y directamente proporcional a la concentración de sustancias iónicas, sustancias covalentes polares y sustancias covalentes apolares (Tan y Huang, 2015).

Por ello, si se miden los índices de refracción de varias disoluciones de concentración conocida, se puede cuantificar la relación entre estos dos parámetros y usar esta relación para medir la concentración de una muestra problema (Belay A, Assefa G, 2018). Siendo este uno de los objetivos principal de la práctica propuesta.

## 4.2. Materiales

A continuación, se detallan los materiales necesarios para llevar a cabo el montaje experimental de la práctica propuesta:

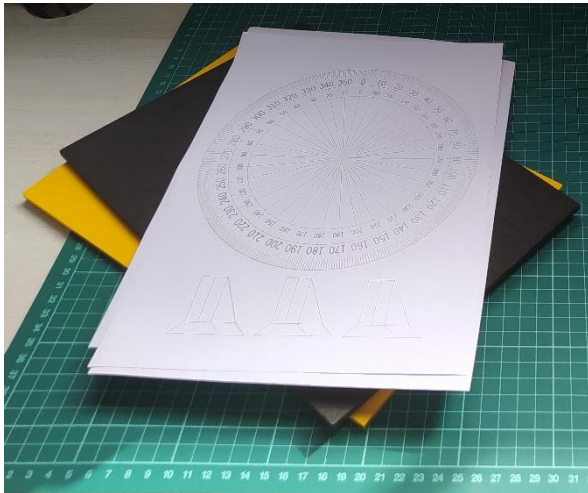


Imagen 2: Planchas de goma, cartón o madera tamaño DIN-A4. Disco de Hartl y lengüetas (ver anexo I).



Imagen 3: Azúcar de mesa (izquierda) y agua desionizada (opcional, derecha).



Imagen 4: Comedero de aves domésticas (derecha). Cubeta semicilíndrica (izquierda) elaborada a partir de un comedero de aves domésticas.



Imagen 5: Puntero láser rojo (izquierda), pegamento blanco y chinchetas (derecha).

## 4.3. Montaje del sistema

El montaje del sistema es realmente sencillo, sin embargo, es necesario cierto nivel de precisión en alguna de sus pasos ya que un buen funcionamiento del sistema se reflejará

más adelante en la obtención de medidas precisas y fiables. Para ello, se deberán seguir los siguientes pasos:



1. Recortar y adherir la plantilla con el disco de Hartl a una de las láminas de cartón utilizando el pegamento. Recortar cuidadosamente la lámina siguiendo el contorno del disco.

Imagen 6: Resultado del paso 1: Lámina de goma con el disco de Hartl.

2. Perforar el disco recortado con un punzón o alfiler (de forma que tengamos una referencia de la posición del centro del disco por ambos lados de este) y adherir una chincheta en su parte posterior. Este es un paso muy delicado, ya que la chincheta es la que define el eje de giro del disco y una mala disposición de esta implicaría un mal giro del disco y un error sistemático de los ángulos medidos

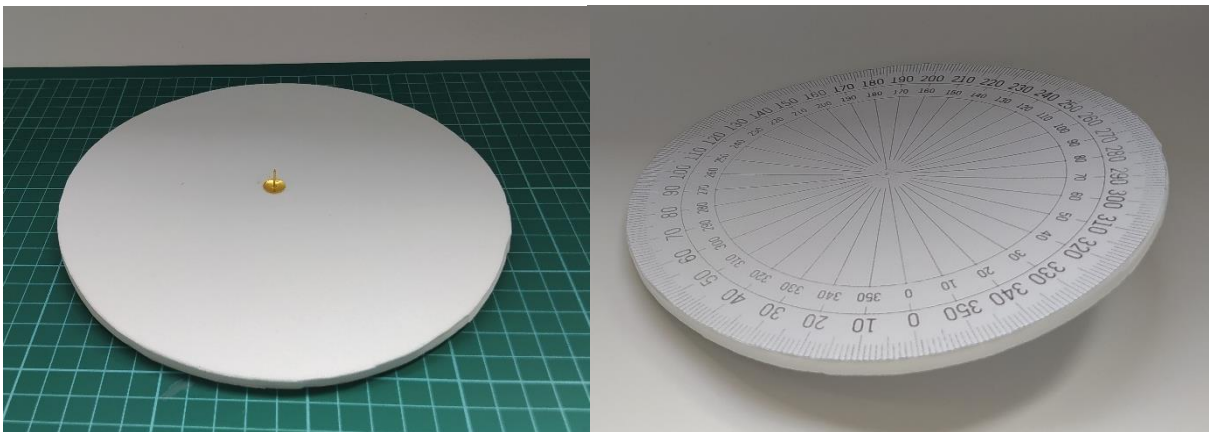


Imagen 7: Disco de Hartl con su eje de giro resultado del paso 2. Anverso (derecha) y reverso (izquierda) del disco.

3. Situar el disco sobre una segunda lámina de cartón o goma y comprobar que gira correctamente.
4. Recortar las lengüetas de la plantilla, cortar las ranuras centrales y doblar por las marcas, tal como se ve en la imagen.



Imagen 8: lengüetas, recortadas y dobladas. Resultado del paso 4.

5. Pegar las lengüetas en la lámina con la mayor precisión posible. Una de ellas debe quedar alineada con la marca de  $0^\circ$  del disco, otra de ellas, debe ser opuesta a la primera (en la marca de  $180^\circ$ ) y la última debe formar un ángulo de  $20^\circ$  con la segunda lengüeta, por lo que se colocará en la marca de  $160^\circ$ .

6. El montaje terminado, será similar a este:

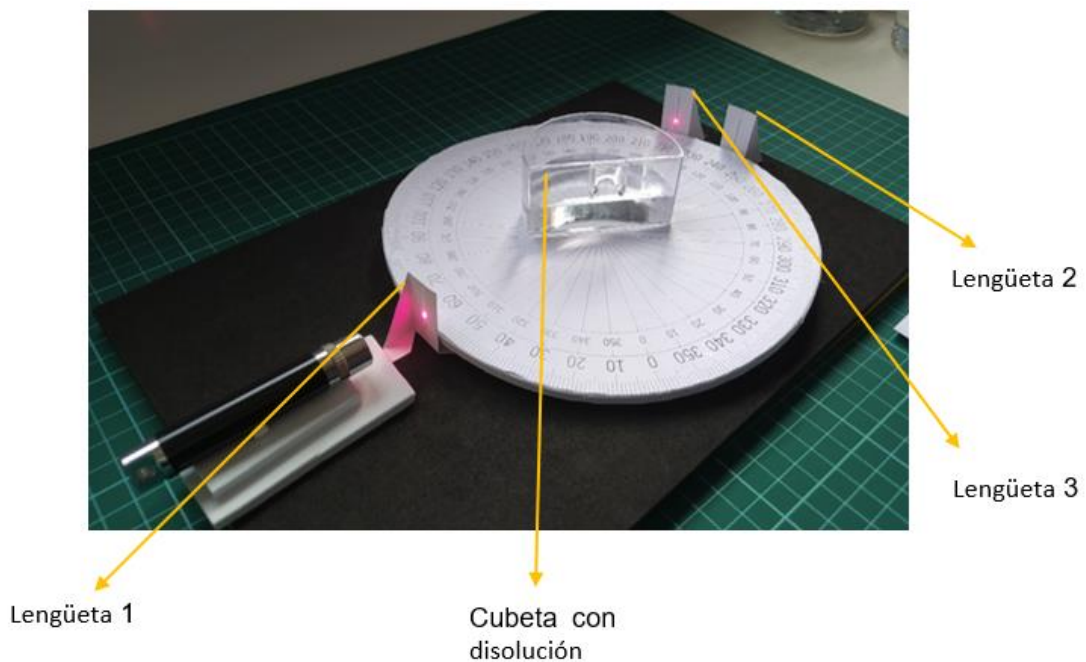


Imagen 9: Sistema experimental completamente montado.

#### 4.4. Funcionamiento del sistema

El sistema montado permite calcular índices de refracción a partir de la medida del ángulo que debe girar el disco, de forma que el haz del láser se desvíe lo suficiente como para, pasando por la lengüeta número 1, incidir en la lengüeta número 3. El ángulo de giro del disco, medido respecto a la ranura de la lengüeta 1, corresponde al ángulo entre el rayo incidente y el eje normal de la cubeta por lo que, conociendo también el ángulo  $\theta_2$  que forma el rayo refractado con este eje normal y el índice de refracción del aire ( $n_{\text{aire}} \approx 1$ ) podemos calcular el índice de refracción del fluido de la cubeta.

##### 4.4.1. Medida de los ángulos de los rayos incidente y refractado

El manejo del sistema experimental diseñado es muy sencillo, pero requiere algo de precisión para que los resultados obtenidos de este sean confiables.

En primer lugar, debemos encender y colocar el puntero láser de forma que pase sin complicaciones por las lengüetas 1 y 2. Tras esto, situamos la cubeta con una de las disoluciones que queremos medir de forma que quede perpendicular al haz del láser y la parte plana de la cubeta se alinee con eje del disco que va de  $90^\circ$  a  $270^\circ$ . Comprobamos que el haz del láser sigue pasando por la rendija de  $180^\circ$ , tras atravesar la cubeta, tal como indica la siguiente imagen:

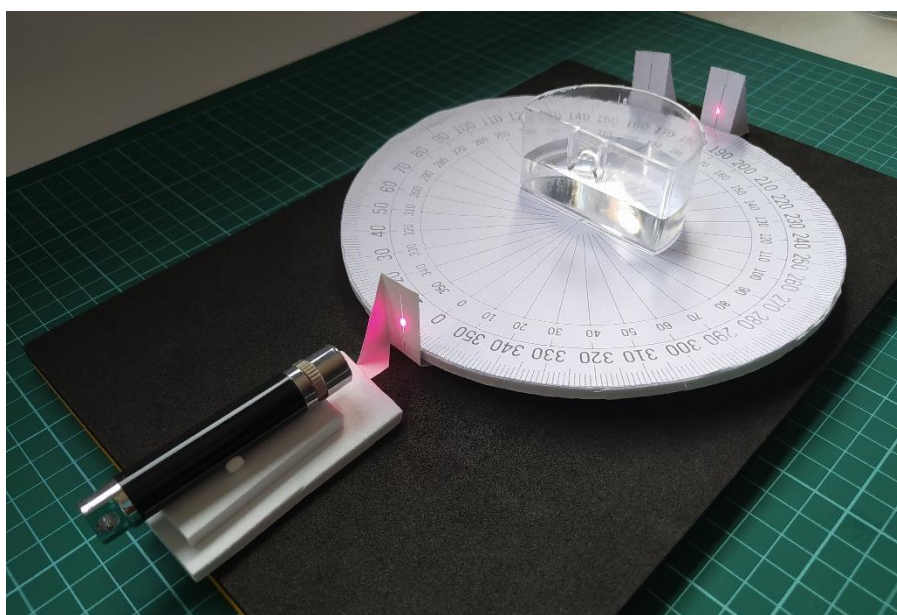


Imagen 10: Sistema experimental en funcionamiento. Desplazamiento del disco de  $0^\circ$ .



A continuación, se debe girar cuidadosamente el disco y la cubeta en sentido antihorario (hacia ángulos positivos en el disco). El haz del láser empezará a desviarse en el sentido de giro del disco. Detenemos el giro del disco cuando el haz de luz pase por la rendija de la tercera lengüeta. Medimos y anotamos el ángulo que ha girado el disco para satisfacer esta condición, tal como se ve en la siguiente imagen:

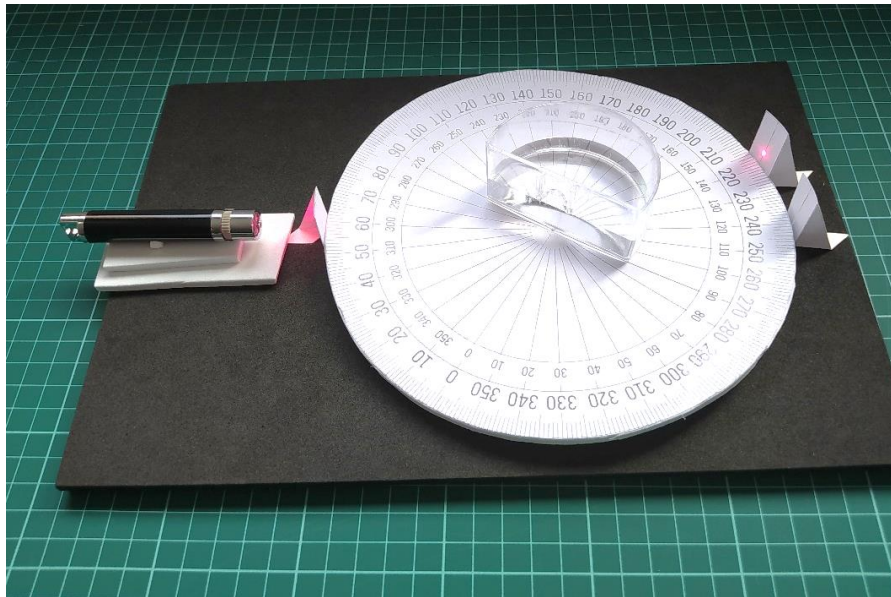


Imagen 11: Sistema experimental en funcionamiento. Desplazamiento del disco de  $58^\circ$ . Agua destilada en la cubeta.

#### 4.4.2. Cálculo del ángulo $\theta_2$ :

Mientras que el ángulo entre el rayo incidente y el eje normal de la cubeta,  $\theta_1$ , se puede medir tomando como referencia la primera lengüeta y el disco graduado, el cálculo del ángulo entre el rayo refractado y la normal  $\theta_2$  no resulta tan evidente.

Debido a que las lengüetas se mantienen en posiciones fijas, y que la lengüeta 2 se sitúa inicialmente en la marca de  $180^\circ$  y la tercera lengüeta en la de  $160^\circ$ , podemos deducir que, independientemente del giro del disco, estas dos lengüetas se van a encontrar siempre a una distancia angular de  $20^\circ$ . Además, como hemos impuesto como condición para medir  $\theta_1$ , que el haz de luz pase por la rendija 3, podemos establecer que el ángulo entre el eje que forma el rayo incidente y el rayo refractado va a tomar también el valor  $20^\circ$  (debido a la disposición fija de las rendijas).

Debido a esto, podemos relacionar el ángulo entre el rayo refractado y la normal  $\theta_2$  con el rayo medido  $\theta_1$ . En la siguiente figura se ve esta relación con mayor claridad:

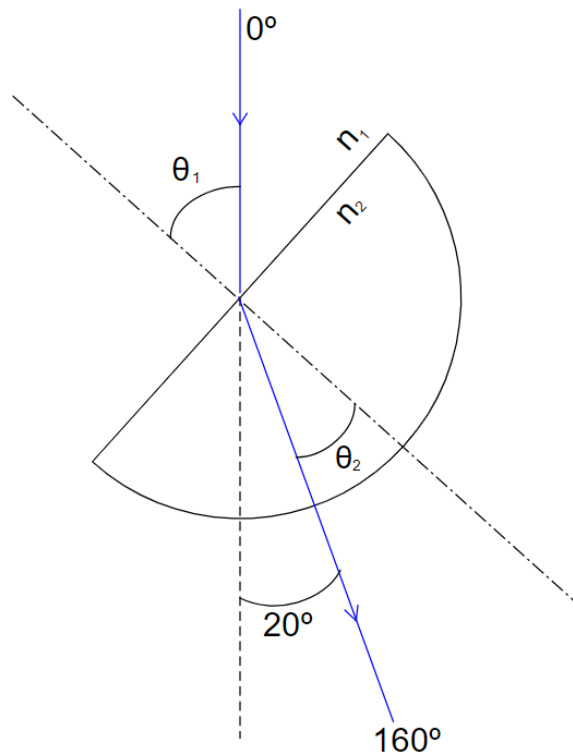


Figura 5: Trazado de rayos incidente y refractado del sistema.

Como los ángulos opuestos entre las dos líneas punteadas (los ejes normales de la cubeta antes y después del giro) deben ser iguales, podemos establecer la siguiente relación:

$$\theta_1 = \theta_2 + 20^\circ \Rightarrow \theta_2 = \theta_1 - 20^\circ \quad (10)$$



#### 4.4.3. Cálculo del índice de refracción del fluido de la cubeta

El sistema experimental, así como los objetivos de esta práctica, se fundamentan en la Ley de refracción de Snell. Esta ley relaciona la desviación de un haz de luz al pasar de un medio a otro con los denominados índices de refracción de dichos medios:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (11)$$

A partir de esta ecuación, podemos calcular el índice de refracción del segundo medio (nuestra muestra) como:

$$n_{\text{muestra}} = n_2 = \frac{n_{\text{aire}} \text{sen} \theta_1}{\text{sen} \theta_2} \quad (12)$$

Sustituyendo el valor del índice de refracción del aire ( $n_{\text{aire}} \approx 1$ ) y la expresión de  $\theta_2$  obtenida en el apartado anterior obtenemos la ecuación que nos permite calcular el índice de refracción a partir de la medida de un único ángulo  $\theta_1$ .

$$n_{\text{muestra}} = n_2 = \frac{\text{sen} \theta_1}{\text{sen}(\theta_1 - 20^\circ)} = \frac{\text{sen} \theta_1}{\text{sen}(\theta_1 - \frac{\pi}{9})} \quad (13)$$

## 5. Descripción de la segunda parte de la práctica

El sistema montado para la práctica descrita inicialmente es realmente versátil, ya que puede adaptarse fácilmente para ilustrar otros conceptos similares cambiando el contenido, la forma o la posición de la cubeta. A continuación, se propone una segunda práctica destinada a ampliar, a partir de una modificación del sistema llevado a cabo, el contenido que trabaja la práctica anterior.

### 5.1. Fundamento teórico

Debido a su semejanza, la mayor parte del fundamento teórico de la práctica anterior es aplicable a la presente práctica. Sin embargo, es necesario ampliar este marco teórico para que abarque también los fenómenos que se pretenden observar en esta nueva experiencia.

#### 5.1.1. Reflexión interna total. Ángulo crítico

Cuando un rayo de luz que viaja por un medio con un índice de refracción  $n_1$  se transmite a un segundo medio con un índice de refracción  $n_2$ , se ve sometido al fenómeno de la refracción. La magnitud de este fenómeno depende de los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ , así como del ángulo de incidencia del rayo,  $\vartheta_1$ , de acuerdo con la ya mencionada Ley de Snell:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (9)$$

Supongamos que dicho rayo se propaga inicialmente a través de un medio con un índice de refracción  $n_1 = 1.52$  (como, por ejemplo, un vidrio) y que se transmite a un segundo medio con un índice de refracción  $n_2 = 1.00$  (como el vacío o el aire) con un ángulo de incidencia de  $\vartheta_1 = 30^\circ$  respecto a la normal. Según la Ley de Snell, este rayo se refractará al pasar al nuevo medio, formando un ángulo de refracción,  $\vartheta_2$ , mayor al ángulo de incidencia:

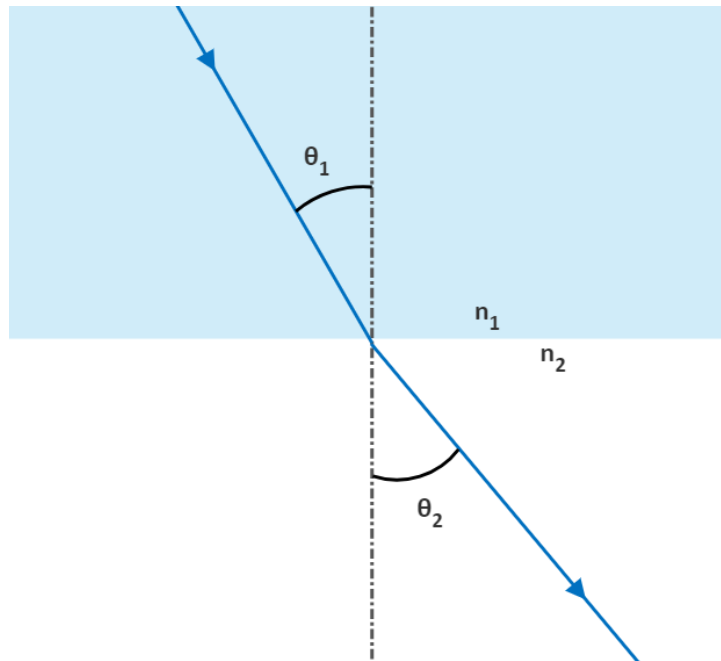


Figura 6: Trazado de rayos correspondiente a la refracción de un haz de luz desde un medio con  $n_1 = 1.52$  a un segundo medio con  $n_2 = 1.00$ . Ángulo de incidencia  $\vartheta_1 = 30^\circ$ . Se ha omitido el rayo reflejado.

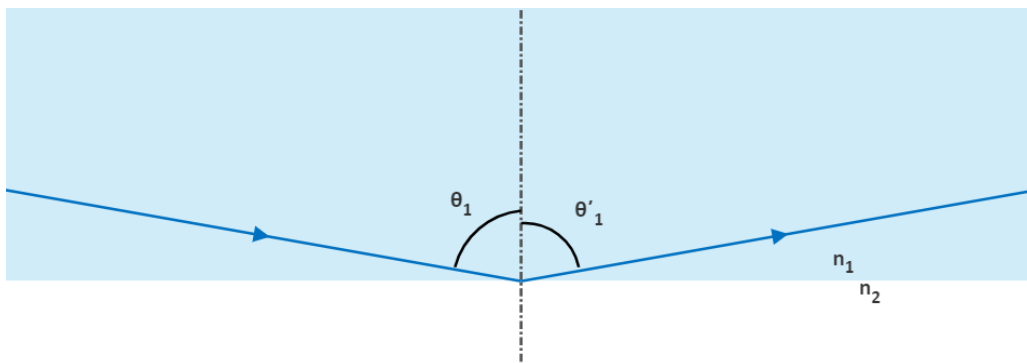
$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (9)$$

$$\theta_2 = \text{arcsen} \theta_2 = \text{arcsen} \left( \frac{n_1 \text{sen} \theta_1}{n_2} \right) = \text{arcsen} \left( \frac{1.52 \cdot \text{sen}(30^\circ)}{1.00} \right) = 49.5^\circ \quad (14)$$

Supongamos ahora que un nuevo rayo incide con un ángulo algo mayor, de  $\vartheta_1 = 80^\circ$ . En este caso se esperaría obtener una situación análoga a la anterior, obteniendo un ángulo  $\vartheta_2$  entre el rayo refractado y la normal numéricamente mayor (debido a un mayor valor del ángulo de incidencia). Lo que se obtiene al aplicar la Ley de Snell, sin embargo, es lo siguiente:

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{n_1 \text{sen}\theta_1}{n_2} = \frac{1.52 \cdot \text{sen}(80^\circ)}{1.00} = 1.50 \quad (15)$$

Lo cual, como sabemos, no es posible, ya que la función seno solo puede tomar valores comprendidos entre 1 y -1. ¿Significa esto que, en ciertas condiciones, la Ley de Snell falla al explicar el fenómeno de la refracción debido a las limitaciones de su formulación matemática? En absoluto; la razón por la que no se puede calcular el ángulo que forma el rayo refractado con la normal es porque, en estas condiciones, no se produce refracción, por lo que no existe un rayo refractado. Si replicáramos esta situación de forma práctica observaríamos como, a partir de cierto ángulo de incidencia, el rayo refractado desaparece y, de forma simultánea, aumenta la intensidad del rayo reflejado por la superficie.



*Figura 7: Trazado de rayos correspondiente a la reflexión interna total de un haz de luz sobre la superficie que separa un medio con  $n_1 = 1.52$  y un segundo medio con  $n_2 = 1.00$ . Ángulo de incidencia  $\vartheta_1 = 80^\circ$ .*

Este fenómeno, se conoce como reflexión interna total y el ángulo mínimo necesario para que se produzca, en unas condiciones determinadas, se denomina ángulo crítico.

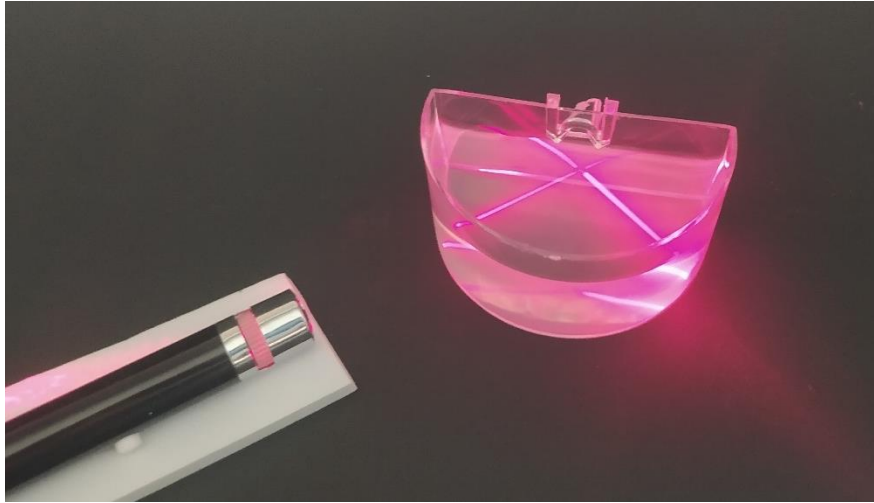


Imagen 12: Reflexión interna total entre el material de la cubeta empleada y el aire con un ángulo de incidencia de unos  $50^\circ$ .

Se puede obtener una expresión que permita calcular este ángulo crítico,  $\theta_c$ , a partir de la ley de Snell, teniendo en cuenta que cuando un rayo incide con este ángulo, el rayo refractado forma un ángulo recto con la normal:

$$n_1 \text{sen} \theta_c = n_2 \text{sen}(90^\circ) \quad (16)$$

$$\theta_c = \text{arcsen}(\text{sen} \theta_c) = \text{arcsen}\left(\frac{n_2 \text{sen}(90^\circ)}{n_1}\right) = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (17)$$

En el ejemplo propuesto, el ángulo crítico toma el valor  $\theta_c = 41.1^\circ$

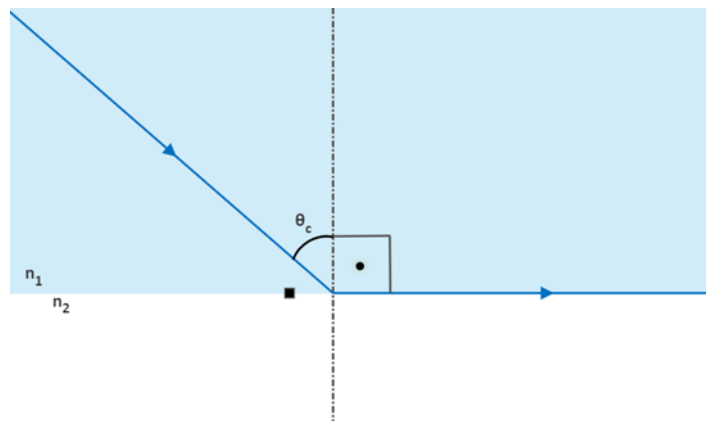


Figura 8: Trazado de rayos correspondiente a la incidencia de un rayo con ángulo crítico sobre la superficie que separa un medio con  $n_1 = 1.52$  y un segundo medio con  $n_2 = 1.00$ .

Gracias a esta propiedad, podemos estimar el índice de refracción de un medio midiendo experimentalmente el ángulo crítico a partir del cual se produce el fenómeno de la reflexión interna total (Serway, R. A., & Jewett, J. W., 2009).

## 5.2. Materiales

Para esta segunda práctica se necesitarán los siguientes materiales:

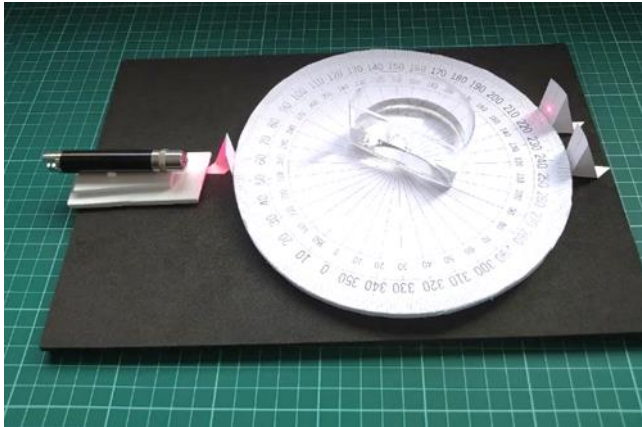


Imagen 13: Sistema experimental empleado por la práctica anterior

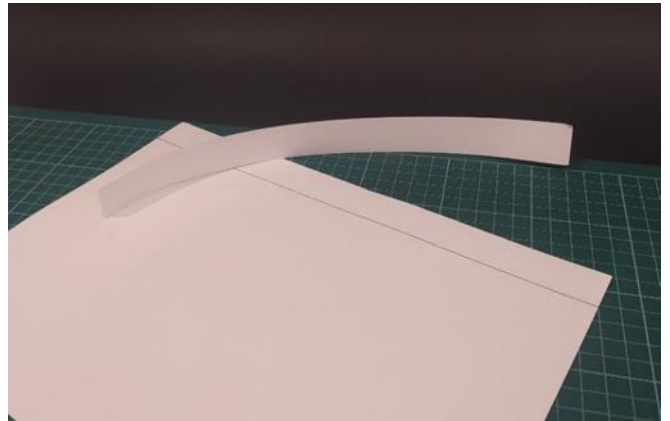


Imagen 14: Cinta de papel de dimensiones 29.7 x 3.0 cm.

## 5.3. Montaje del sistema

Debido a que esta práctica parte del sistema montado en la práctica anterior, solamente es necesario realizar alguna pequeña modificación. En primer lugar, la colocación de la cubeta es diferente ya que, como se comentará más adelante, se pretende medir un fenómeno diferente al que mide la primera práctica. Por este mismo motivo, es necesario adherir al disco una cinta de papel que permita ver tanto el rayo refractado como el rayo reflejado con el objetivo de determinar a partir de que ángulo deja de producirse refracción. Para ello, se colocará la cinta sobre el tramo de circunferencia del disco que va de la marca de  $180^\circ$  a la marca de  $0^\circ$  y se fijará su posición relativa al disco con algún tipo de adhesivo, tal como indica la siguiente imagen:



Imagen 15: Montaje experimental empleado para la presente práctica.

## 5.4. Funcionamiento del sistema

### 5.4.1. Medida del ángulo crítico

Para medir el ángulo crítico del sistema se sigue un procedimiento similar al de la práctica anterior. El primer paso es calibrar el sistema. Para ello, colocamos el puntero láser de tal forma que el haz de luz pase por las ranuras situadas a  $0^\circ$  y  $180^\circ$ .

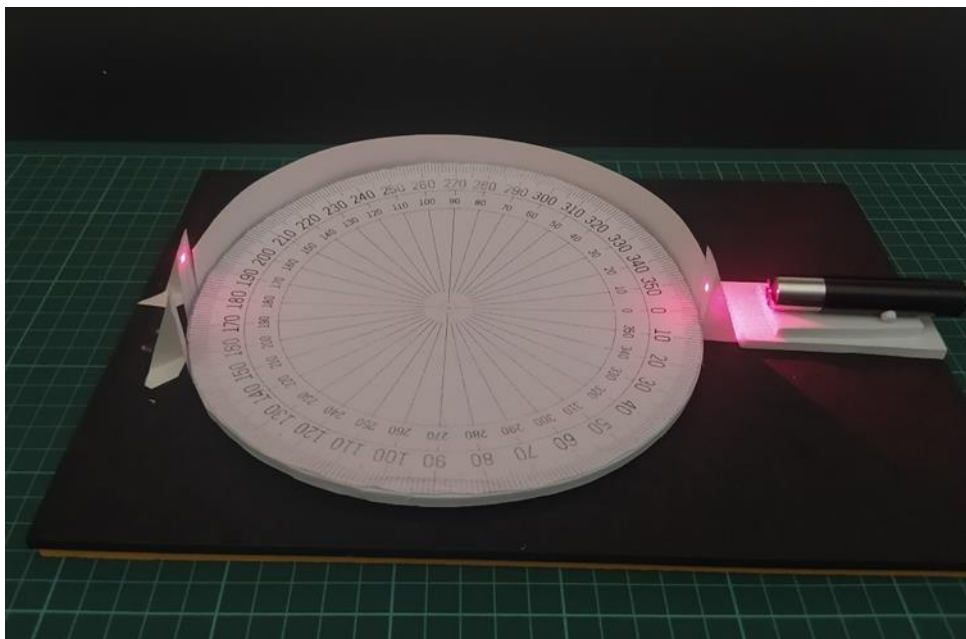
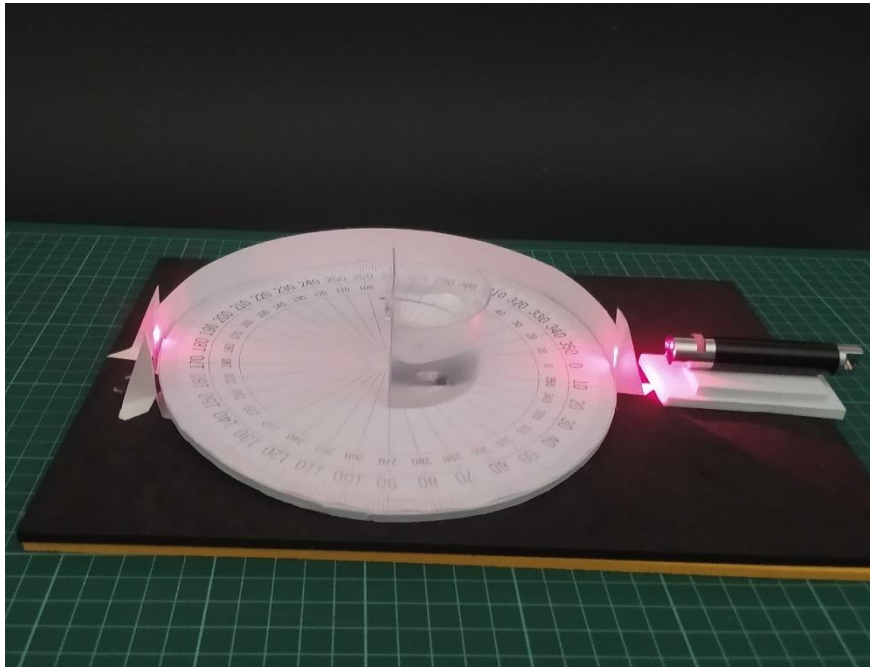


Imagen 16: Paso 1. Calibrado del haz de luz.

Posteriormente, colocamos la cubeta de tal forma que la parte plana coincida con el eje del disco que va de  $90^\circ$  a  $270^\circ$ , pero esta vez, la parte convexa de la cubeta debe quedar situada sobre la parte superior del disco, de forma que el haz del láser atraviese la superficie curva antes de incidir sobre la superficie plana de la cubeta. Tras esto, llenamos la cubeta de agua destilada y comprobamos que el haz de luz sigue pasando por las rendijas de  $0^\circ$  y  $180^\circ$ .



*Imagen 17: Paso 2. Disposición de la cubeta.*

El último paso es girar lentamente el disco, observando como el rayo refractado se desplaza por la tira de papel. Llegado a cierto punto, este haz refractado se empieza a elongar y a difuminar parcialmente para desaparecer por completo tras un pequeño incremento en la rotación del disco, tal como se puede ver en las siguientes imágenes.



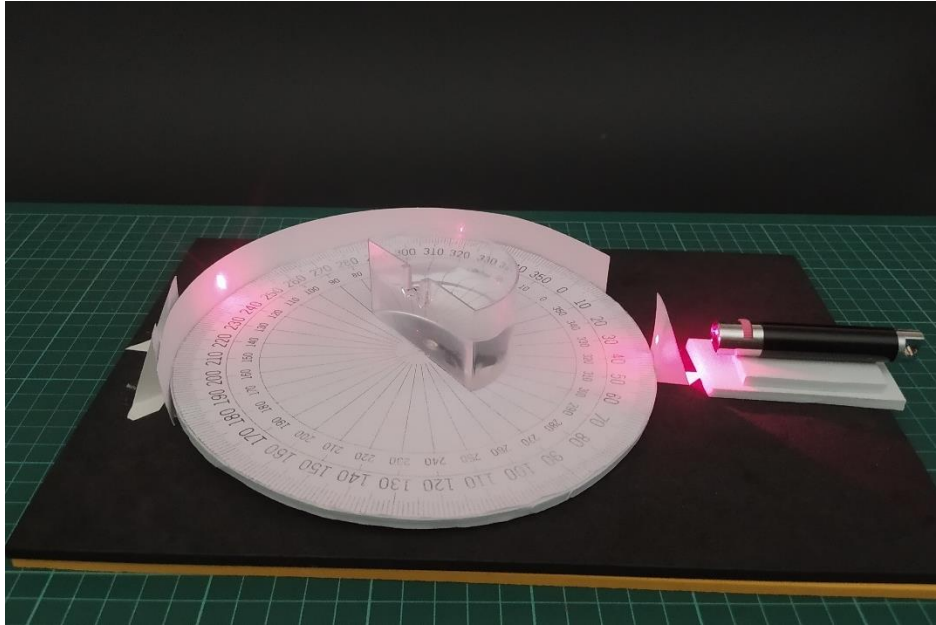
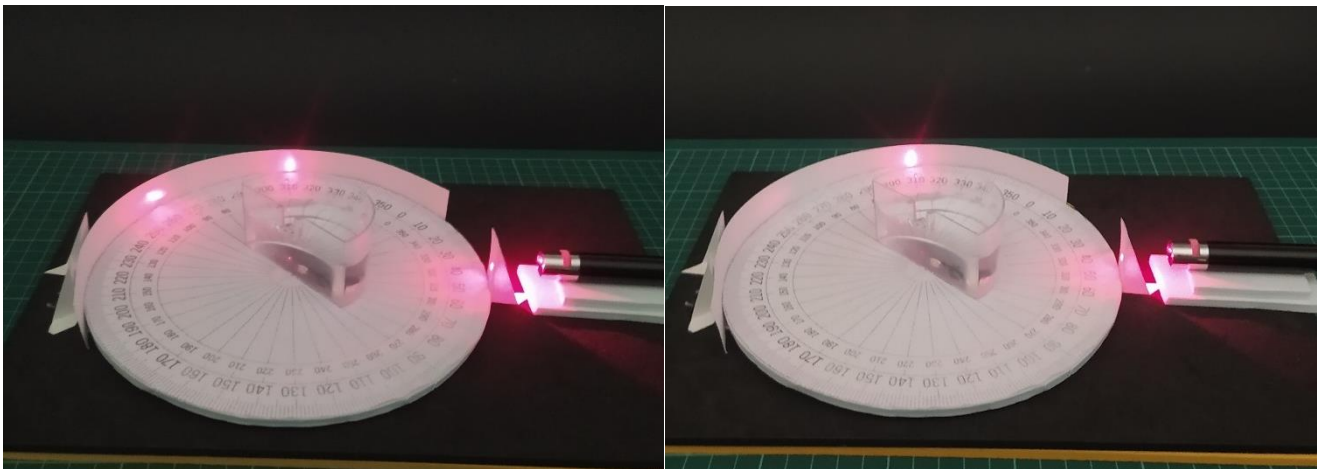


Imagen 18: Paso 3. Rotación del disco con un ángulo de  $40^\circ$ . Se observa tanto el rayo refractado como el reflejado.



Imágenes 19 y 20: Desaparición del haz de luz refractado entre un ángulo inicial de  $46^\circ$  (izquierda) y un ángulo final de  $48^\circ$  (derecha).

Se obtiene un pequeño intervalo en lugar de un único ángulo crítico debido a que el sistema experimental no es perfecto, ya que las superficies de la cubeta no son totalmente planas y esto puede producir pequeñas distorsiones debido al efecto de borde.

### 5.4.2. Cálculo del índice de refracción del agua destilada

Debido a la forma semicircular de la cubeta, cualquier haz que entre sobre su lado curvo lo hará de forma perpendicular a la dicha superficie, por lo que los fenómenos de refracción o reflexión interna total ocurrirán sobre la superficie plana.

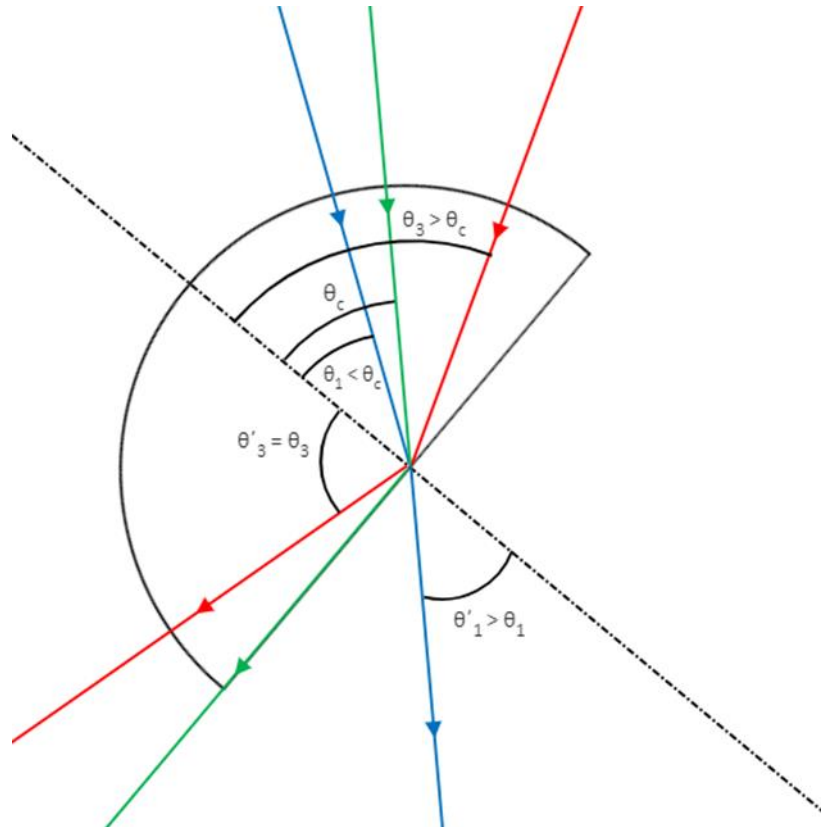


Figura 9: Trazado de rayos incidentes sobre una cubeta semicilíndrica. Incidencia con un ángulo menor al ángulo crítico (azul). Incidencia con ángulo crítico (verde). Incidencia con ángulo mayor al crítico (rojo).

El fenómeno de reflexión interna total que se produce en el sistema diseñado ocurre en la interfase entre la superficie exterior del lado plano de la cubeta y el aire, sin embargo, debido a que el contenido de la cubeta (agua destilada, en este caso) también produce refracción, el ángulo medido es, en la práctica, el ángulo que forma el rayo refractado por el agua con la superficie de la cubeta, tal como se muestra en la siguiente figura:

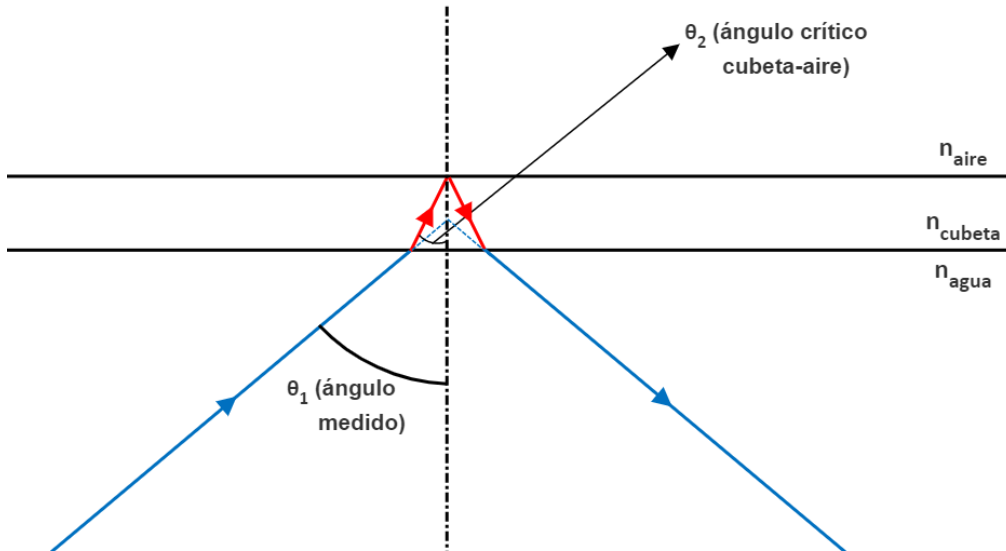


Figura 10: Trazado de rayos sobre la superficie plana de la cubeta.

Por ello, podemos estimar el índice de refracción del contenido de la cubeta a partir de este ángulo, tal como indica la ecuación 19:

$$n_{\text{agua}} \text{sen} \theta_1 = n_{\text{cubeta}} \text{sen} \theta_c = n_{\text{aire}} \text{sen}(90^\circ) \quad (18)$$

$$n_{\text{agua}} = \frac{n_{\text{aire}} \text{sen}(90^\circ)}{\text{sen} \theta_1} = \frac{1}{\text{sen} \theta_1} \quad (19)$$

Como el “ángulo crítico” medido se toma como un intervalo, podemos calcular también el índice de refracción del agua como a partir de los límites superior e inferior de este intervalo. Posteriormente se puede expresar este resultado de la siguiente forma:

$$n_{agua} = \left( \frac{n_{superior} + n_{inferior}}{2} \right) \pm \left( \frac{n_{superior} - n_{inferior}}{2} \right) \quad (20)$$

De esta forma, se puede ilustrar al alumnado acerca de las incertidumbres que acompañan a las medidas experimentales a partir de un ejemplo realmente ilustrativo (ya que físicamente, no se puede determinar un ángulo crítico singular) y sin necesidad de entrar en detalles acerca de las incertidumbres de las medidas y su propagación.

## 6. Resultados y conclusiones de la práctica

### 6.1. Resultados relativos a la primera parte

Para comprobar la viabilidad de la primera práctica propuesta se llevaron a cabo una serie de medidas, a modo de prueba, de varios líquidos de índice de refracción conocido, obteniendo los siguientes resultados

muestra	$\theta 1/^\circ$	$\theta 1/rd$	$\theta 2/^\circ$	$\theta 2/rd$	$\text{sen}(\theta 1)$	$\text{sen}(\theta 2)$	$n_{exp}$	$n_{teo}$
Agua destilada	58	1,01	38	0,66	0,85	0,62	1,377	1,333*
Glicerina	50	0,87	30	0,52	0,77	0,50	1,532	1,473*
Aceite de girasol	51	0,89	31	0,54	0,78	0,52	1,509	1,466**
Etanol 96%	57	0,99	37	0,65	0,84	0,60	1,394	1,362***

Tabla 8: índices de refracción de varios fluidos medidos con el sistema descrito. Comparación con datos bibliográficos.  
\* Serway, R. A., & Jewett, J. W., 2009; \*\* Salaheldeen, M. 2019; \*\*\* Vázquez-Guardado, et al. 2019.

Tal como se indica en la tabla anterior, el sistema diseñado es capaz de medir de forma aproximada varios índices de refracción. Sin embargo, parece arrojar datos con un cierto error al alza, ya que todos los índices calculados son algo mayores que los valores de las referencias bibliográficas, debido seguramente a algún tipo de error sistemático. Esto no supone un gran problema para la primera parte de práctica diseñada, ya que lo que se pretende determinar es la *variación* de este parámetro a medida que aumenta la concentración de una disolución, por lo que si este error sistemático es constante (no es proporcional al índice de refracción) la medida de la relación índice-concentración no se verá afectada. Además, un pequeño error en las medidas puede resultar provechoso para la experiencia didáctica, ya que el alumnado tiene la oportunidad, tanto de

comprobar que el trabajo experimental suele ir acompañado de varios tipos de error, como de discutir y estimar a que pueden deberse estos errores.

Posteriormente, se llevó a cabo el conjunto de medidas propias de la práctica descrita. Se obtuvieron los siguientes resultados:

% sacarosa (m/m)	$\theta_1/^\circ$	$\theta_1/\text{rads}$	$\theta_2/^\circ$	$\theta_2/\text{rads}$	$\text{sen}(\theta_1)$	$\text{sen}(\theta_2)$	n
0	58	1,01	38	0,66	0,85	0,62	1,38
5	57	0,99	37	0,65	0,84	0,60	1,39
15	55	0,96	35	0,61	0,82	0,57	1,43
25	54	0,94	34	0,59	0,81	0,56	1,45
50	51	0,89	31	0,54	0,78	0,52	1,51

Muestra de refresco	$\theta_1/^\circ$	$\theta_1/\text{rads}$	$\theta_2/^\circ$	$\theta_2/\text{rads}$	$\text{sen}(\theta_1)$	$\text{sen}(\theta_2)$	n
Muestra de refresco	57	0,99	37	0,65	0,84	0,60	1,39

Tabla 9: Datos relativos a los ángulos medidos para cada disolución y para la muestra de refresco. Índices de refracción calculados para cada uno de ellos.

A continuación, se representan los datos obtenidos (índices de refracción obtenidos frente a concentración de sacarosa) en un gráfico de dispersión. Estos datos se ajustan por mínimos cuadrados, obteniendo la siguiente figura:

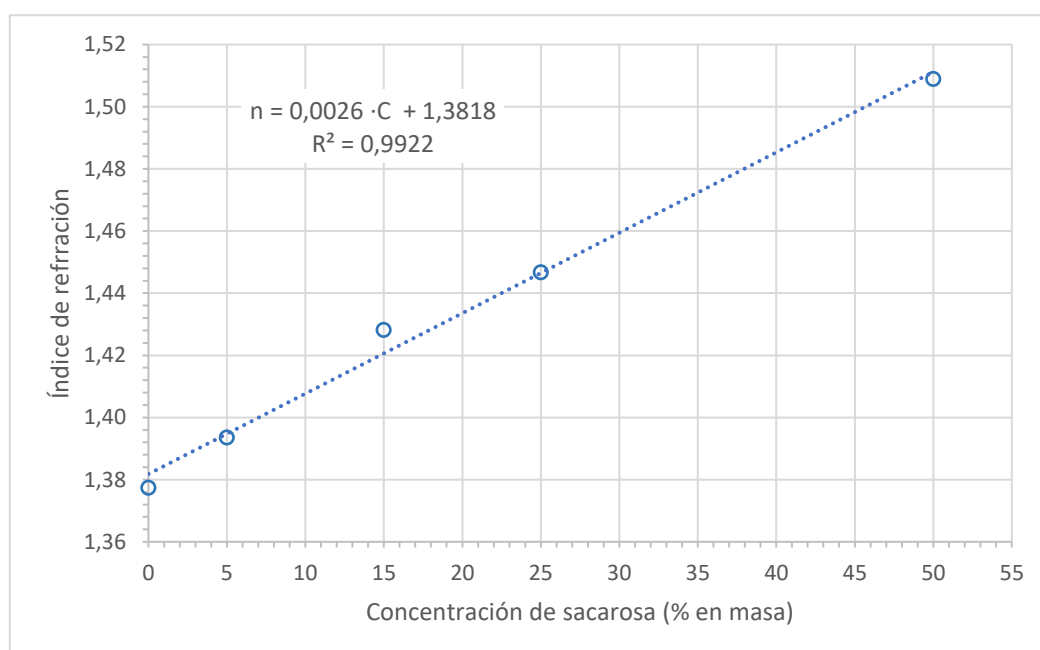


Figura 11: Representación de los índices de refracción calculados para cada disolución respecto a su concentración. Recta de ajuste por mínimos cuadrados de estos datos

A partir de la recta de ajuste lineal calculada:

$$n = 0.0026 \cdot C(\text{sacarosa}) + 1.3818 \quad (21)$$

Podemos calcular la concentración de azúcar en uno de los refrescos medidos:

$$C(\text{sacarosa})_{\text{refresco}} = \frac{n_{\text{refresco}} - 1.3818}{0.0026} = \frac{1.39 - 1.3818}{0.0026} \quad (22)$$

$$C(\text{sacarosa})_{\text{refresco}} = 3.15\% \text{ sacarosa en masa}$$

El valor de la concentración de sacarosa en el refresco interpolado en la recta fue de  $C_{\text{refresco}} = 3.15\% \text{ sacarosa en masa}$ . En la etiqueta, sin embargo, figuraba que el porcentaje de azúcares que contenía era del 4.5% en masa. Esta discrepancia puede deberse a múltiples errores (sistemáticos o aleatorios) cometidos durante la toma de los datos. No obstante, es un valor lo suficientemente preciso como para que la práctica propuesta pueda llevarse a cabo y permite además al alumnado la discusión de esta discrepancia en su informe de prácticas.

## 6.2. Resultados y conclusiones de la segunda parte

De forma análoga a la parte anterior, se llevaron a cabo las medidas descritas por la segunda experiencia propuesta.

Se observó que la desaparición del haz refractado por la superficie plana de la cubeta se produjo entre  $46^\circ$  y  $48^\circ$ , por lo que podemos calcular el índice de refracción del agua destilada de acuerdo con las ecuaciones 19 y 20:

$$n_{\text{agua}} = \frac{n_{\text{aire}} \text{sen}(90^\circ)}{\text{sen}\theta_1} = \frac{1}{\text{sen}\theta_1} \quad (19)$$

$$n_{\text{agua}_{\text{inferior}}} = \frac{1}{\text{sen}(48^\circ)} = 1.34 \quad (23)$$

$$n_{agua\_superior} = \frac{1}{\text{sen}(46^\circ)} = 1.39 \quad (24)$$

$$n_{agua} = \left( \frac{n_{superior} + n_{inferior}}{2} \right) \pm \left( \frac{n_{superior} - n_{inferior}}{2} \right) \quad (20)$$

$$n_{agua} = 1.365 \pm 0.025 \quad (25)$$

El valor obtenido mediante este método se acerca en mayor medida al valor bibliográfico de 1.33 (Serway, R. A., & Jewett, J. W., 2009) que el resultado que se obtiene en la primera parte de la práctica. Sin embargo, sigue sobreestimando de forma sistemática los índices de refracción de cualquier fluido que se introduzca en la cubeta, ya que no solo ocurre con el agua destilada, sino también con el resto de las muestras que se evalúan en la primera parte de esta experiencia. Estos resultados parecen indicar que se comete algún tipo de error sistemático en el desarrollo de la práctica.

## 7. Conclusiones

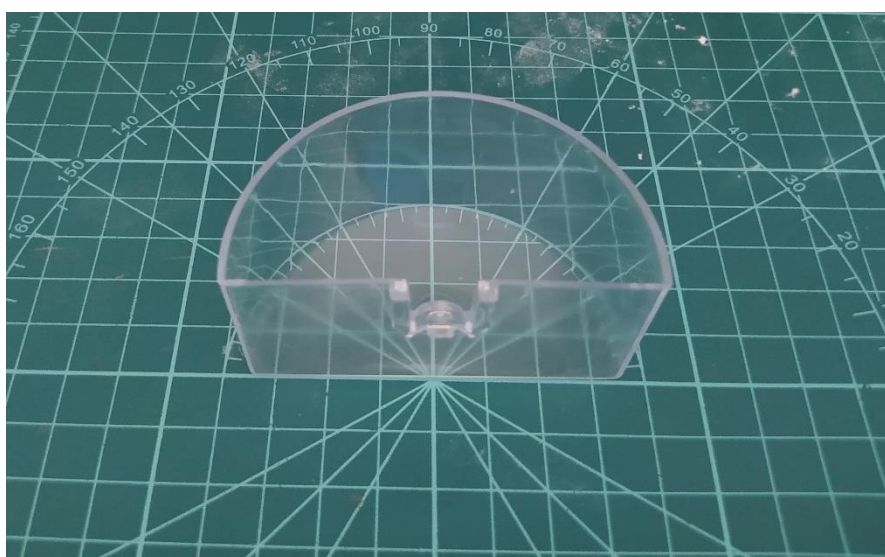
Para concluir el presente trabajo se pretende comentar que, si bien la práctica diseñada no supone un estado del arte para la medida experimental de los parámetros establecidos, parece ser adecuada para, en primer lugar, cubrir una pequeña parte del temario de segundo de Bachillerato desde un punto de vista práctico. En segundo lugar, supone una breve introducción al trabajo científico y permite al alumnado familiarizarse con el trabajo experimental.

Además, la práctica utiliza para su desarrollo, materiales económicos y fácilmente accesibles y requiere un montaje previo del sistema experimental, así como de una toma de medidas completamente analógica, por lo que resulta interesante aplicarla en el contexto actual de creciente abstracción digital.

Por ello, en mi opinión, es un buen ejemplo de cómo las dificultades encontradas para el desarrollo de prácticas de laboratorio no se encuentran ni en las limitaciones del sistema educativo en términos de presupuesto o recursos, ni en la complejidad del proceso de enseñanza-aprendizaje que entraña este tipo de experiencias sino que, en último término, se encuentran en la voluntad del docente para diseñar, desarrollar y evaluar este tipo de experiencias, las cuales (aplicadas correctamente) pueden suponer al alumnado el ser protagonistas de un aprendizaje significativo y activo, basado en la adquisición de una serie de competencias científicas esenciales para su competencia en un paradigma profesional cada vez más exigente.

## Nota para el lector

Posteriormente a la realización del presente trabajo, se observó que la cubeta empleada en el sistema experimental no era exactamente semicilíndrica, sino que estaba algo elongada en su centro.



*Imagen 21: Cubeta empleada sobre un semicírculo de igual altura. Se observa como el radio real de la cubeta es menor de lo que correspondería a su altura.*

Por este motivo, los rayos entrantes (o salientes) a la superficie curva de esta cubeta (a excepción del centro) sufren una pequeña refracción, lo cual supone un pequeño error sistemático en las medidas llevadas a cabo. Este error podría ser el responsable de que los índices calculados sean algo mayores que los que se indican en la bibliografía.



De cara a futuras experiencias, se adjunta un enlace web donde se puede adquirir una cubeta similar, pero con las proporciones adecuadas. Desafortunadamente, no fue posible adquirirla para repetir las medidas realizadas debido a lo ajustado del tiempo.

<https://www.ibdciencia.com/es/accesorios-de-optica-para-laboratorio/7386-cubeta-semicircular-r-35mm.html>

## Bibliografía

Arias Gallegos, W. L., & Oblitas Huerta, A. (2014). Aprendizaje por descubrimiento vs. Aprendizaje significativo: Un experimento en el curso de historia de la psicología. *Boletim Academia Paulista de Psicologia*, 34(87), 455-471.

Ausubel, D.; Novack, J. D. y Hanesian, H. (1976). *Psicología educativa desde un punto de vista cognoscitivo*. México, D. F.: Trillas.

Belay A, Assefa G (2018) Concentration, Wavelength and Temperature Dependent Refractive Index of Sugar Solutions and Methods of Determination Contents of Sugar in Soft Drink Beverages using Laser Lights. *J Laser Opt Photonics* 5: 187. doi: 10.4172/2469-410X.1000187.

Bombien, F. (2005). *Aprendizaje de las Ciencias Experimentales*.

Bruner, J. S. (1968). *El proceso de la educación*. México: Unión Tipográfica Editorial HispanoAmericana.

DeBoer, G. E. (2000). Scientific literacy: another look at its historical and contemporary meanings and its relationship to science education reform. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(6), 582-601.

Dunbar, R. (1999). *El miedo a la ciencia*. Madrid: Alianza.

Esteve, A. R., y Solves, J. (2017). El desinterés de los estudiantes por las Ciencias y la Tecnología en el Bachillerato y los estudios universitarios. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 573-578.

Hodson (1994). Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. *Enseñanza de las Ciencias*, Vol 12, Nº 3, pp. 299- 313.

López, J., Lupión, T. y Mirabent, A. (2005). Situación actual de la enseñanza de la Física y de la Química en la educación secundaria: "Estado crítico". *Didáctica de la Física y la Química en los distintos niveles educativos*. Ed. ETSII UPM. Madrid

McComas, W. F., y Olson, J. K. (1998). The nature of science in international science education standards documents. En W. F. McComas (Ed.), *The nature of science in science education: rationales and strategies* (pp. 41-52). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Merino, J.M. y Herrero F. (2007). Resoluciones experimentales de Química, una alternativa a las prácticas tradicionales. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*. Vol. 6, Nº 3, pp. 630- 648

Retzbach et al (2013). Effects of Repeated Exposure to Science TV Shows on Beliefs About Scientific Evidence and Interest in Science. *Journal of Media Psychology Theories Methods and Applications*. 25. 3-13. 10.1027/1864-1105/a000073.

Salaheldeen, M. (2019). Storage and thermal behavior of some cooking oils consumed from the local market of Sudan.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2009). *Física: Para ciencias e ingeniería con Física Moderna* (7a. ed.--). México D.F.: Cengage.

Solbes Matarredona, J., Montserrat, R., & Furió Más, C. J. (2007). El desinterés del alumnado hacia el aprendizaje de la ciencia: implicaciones en su enseñanza. *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*.

Solves, J. (2011) ¿Por qué disminuye el alumnado de ciencias? *Alambique – didáctica de las ciencias experimentales*, 67, 53-61.

Tan, C. Y., & Huang, Y. X. (2015). Dependence of refractive index on concentration and temperature in electrolyte solution, polar solution, nonpolar solution, and protein solution. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 60(10), 2827-2833.

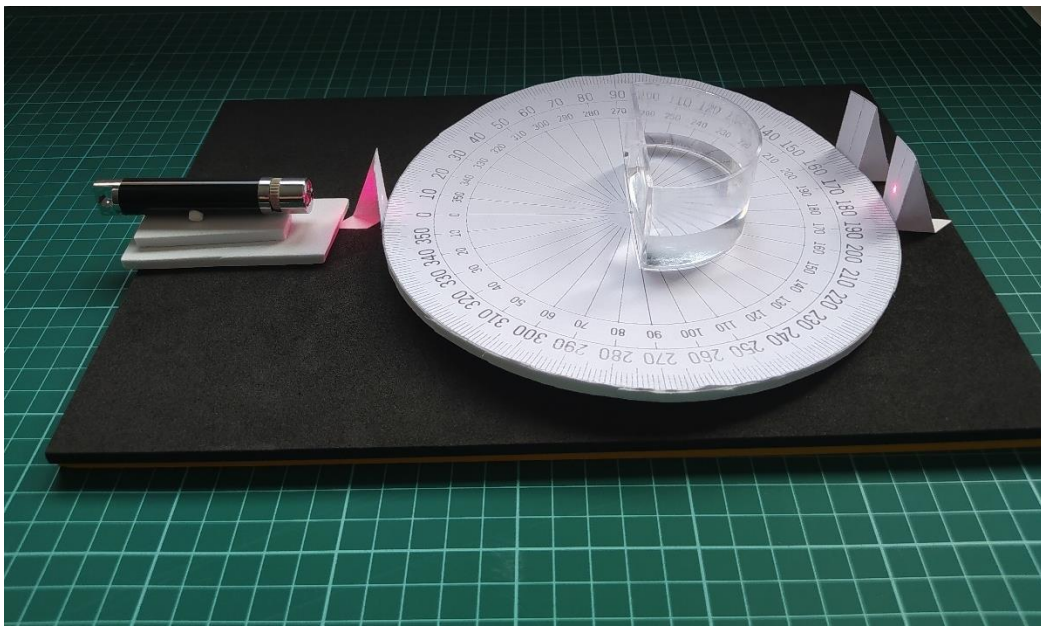
Tárraga, P., Bechtold, H. y De Pro, A. (2007). El uso de las prácticas de laboratorio en Física y Química en Física y Química en dos contextos educativos diferentes: Alemania y España. *Educatio Siglo XXI*, nº 25, p. 145-166.

Vázquez, A., Manassero, MA., Acevedo, JA. y Acevedo, P. (2007). Consensos sobre la naturaleza de la Ciencia: la comunidad tecnocientífica. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 6(2), 331-363.

Vázquez-Guardado, A., Ramirez-Flores, J. A., Lopez-Galmiche, G., Escobedo-Alatorre, J. J., & Sánchez-Mondragón, J. J. (2019). Detection of Ethanol Concentration using a Generic Optical Sensor Platform. *Computación y Sistemas*, 23(1), 27-31.

## Anexo I - Guion para el alumnado

# Guion de prácticas: Medida de la concentración de sacarosa mediante la ley de refracción de Snell. Medida de ángulos críticos.



**Centro:**

**Curso: 2º Bachillerato**

**Docente: Marcos García Casado**

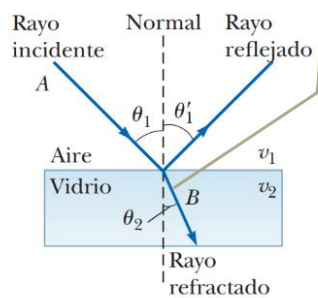
**Curso: 2022/23**

# 1. Fundamento teórico

## Reflexión y refracción de las ondas

Un rayo de luz que viaja a través del espacio producirá dos fenómenos característicos al incidir con un ángulo  $\theta_1$  (respecto a la normal) sobre una superficie plana: Una parte del rayo sufrirá reflexión y será devuelto al medio inicial con un ángulo  $\theta'_1 = \theta_1$ .

El rayo refractado se dobla hacia la normal porque  $v_2 < v_1$ . Todos los rayos y la normal se encuentran en el mismo plano.



Otra parte de este rayo, sin embargo, se transmitirá en el nuevo medio, formando un ángulo  $\theta_2$  respecto a la normal, diferente de al ángulo de incidencia  $\theta_1$ .

El ángulo de propagación  $\theta_2$  en el segundo medio varía debido a que la velocidad de la luz en este medio es diferente de la velocidad de la luz en el medio de origen.

Los ángulos de incidencia y refracción se relacionan con

la velocidad de la luz de los dos medios mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\text{sen}\theta_2}{\text{sen}\theta_1} = \frac{v_2}{v_1} \quad (1)$$

Donde  $v_1$  y  $v_2$  son las velocidades de la luz en los medios 1 y 2 respectivamente. La velocidad de propagación de la luz en diferentes fluidos y materiales depende de varios factores (composición del material, su densidad, temperatura, de la longitud de onda incidente), pero por lo general, se considera característica de cada material o fluido.

## Índice de refracción

A menudo, esta velocidad se expresa mediante una magnitud denominada **índice de refracción**. Esta magnitud adimensional se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío,  $c$  y la velocidad de la luz en un medio determinado,  $v$ :

$$n \equiv \frac{c}{v}; \quad c = 299792458 \text{ m/s} \quad (2)$$

Como la velocidad de la luz en cualquier medio siempre es menor que en el vacío, el índice de refracción va ser siempre mayor que la unidad (excepto en el vacío que toma

el valor  $n = 1$ ). El índice de refracción del aire, se aproxima mucho al valor unitario, por lo que se suele tomar  $n_{\text{aire}} = 1$ .

### Ley de Snell

Las expresiones 1 y 2 se pueden relacionar mediante la denominada **ley de refracción de Snell**. Esta ecuación, al igual que la ecuación 1, relaciona los ángulos de los rayos incidente y refractado con la velocidad de la luz en cada uno de los medios, esta vez utilizando sus índices de refracción en lugar de sus velocidades (Serway, R. A., & Jewett, J. W., 2009):

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (3)$$

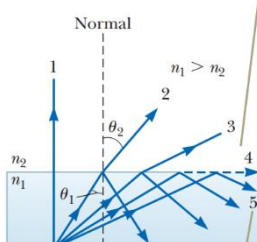
### Variación del índice de refracción de disoluciones con la concentración

El agua pura, tiene un índice de refracción de  $n = 1.333$  a  $20^\circ\text{C}$  (Serway, R. A., & Jewett, J. W., 2009), sin embargo, a medida que al agua disuelve gases o sales, este índice de refracción suele aumentar.

Se puede determinar que el índice de refracción de varias disoluciones acuosas aumenta de forma lineal con la concentración. Por ello, si se miden los índices de refracción de varias disoluciones de concentración conocida, se puede cuantificar la relación entre estos dos parámetros y usar esta relación para medir la concentración de una muestra problema (Belay A, Assefa G, 2018).

### Reflexión interna total. Ángulo crítico.

Cuando el ángulo de incidencia aumenta  $\theta_1$ , el ángulo de refracción  $\theta_2$  aumenta hasta que  $\theta_2$  es de  $90^\circ$  (rayo 4). La línea discontinua indica que no hay energía que se propague en esta dirección.



Cuando un rayo de luz se propaga desde un medio con un determinado índice de refracción,  $n_1$ , a otro medio con índice de refracción menor,  $n_2$ , se puede producir un fenómeno característico. Si este rayo, incide con el ángulo adecuado, se observa como se refleja completamente por la superficie que separa ambos medios y no se produce

transmisión al segundo medio. Este fenómeno se conoce como reflexión interna total, y se produce a partir de un cierto ángulo crítico, el cual provoca que el rayo se propague por la interfase de los dos medios, formando un ángulo de 90°. Si expresamos esto en la ecuación de la Ley de Snell, obtenemos lo siguiente:

$$n_{agua} \text{sen} \theta_1 = n_{cubeta} \text{sen} \theta_c = n_{aire} \text{sen}(90^\circ) \approx 1 \quad (4)$$

## 2. Objetivos de la práctica

Los objetivos de esta práctica son los siguientes:

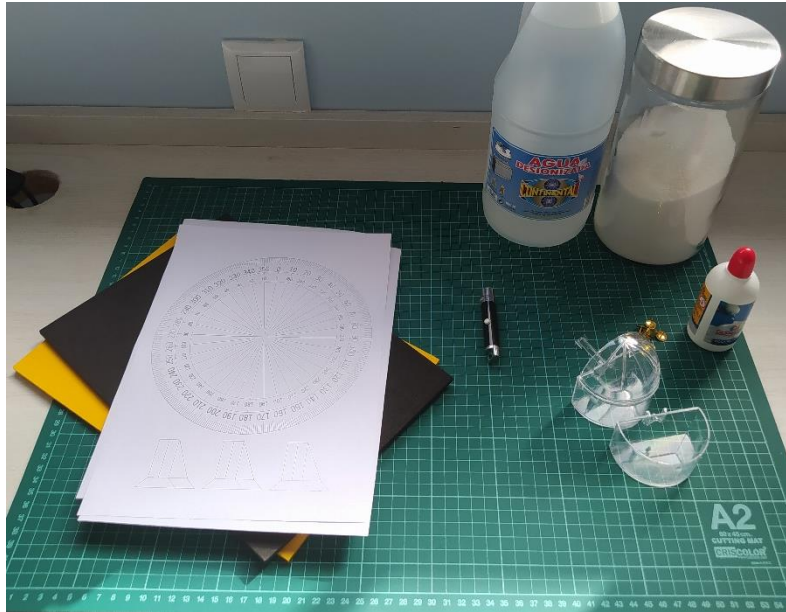
- La construcción de un montaje experimental que permita medir índices de refracción de fluidos.
- El uso de este montaje para medir el índice de refracción de varias disoluciones de sacarosa de diferente concentración.
- El estudio de la variación del índice de refracción de estas disoluciones con su concentración.
- Aplicar los datos obtenidos a la medida de la concentración de sacarosa en un refresco.
- La adaptación del montaje anterior para medir el ángulo crítico entre la cubeta y el aire.
- Calcular, a partir del ángulo crítico medido, el índice de refracción del agua destilada.

## 3. Material necesario

Para realizar esta práctica, es necesario el siguiente material:

- |                                               |                                    |
|-----------------------------------------------|------------------------------------|
| - 1 comedero de pájaros <b>semicilíndrico</b> | -1 Puntero láser rojo              |
| - 3 láminas de cartón o goma                  | - Plantillas imprimibles (Anexo 1) |
| - Chinchetas de cabeza ancha                  | - Pegamento o cola                 |
| - Sacarosa (azúcar de mesa)                   | - Agua (idealmente destilada)      |
| - Refresco(s) azucarado(s)                    | - Cinta de papel de 29 x 3 cm      |





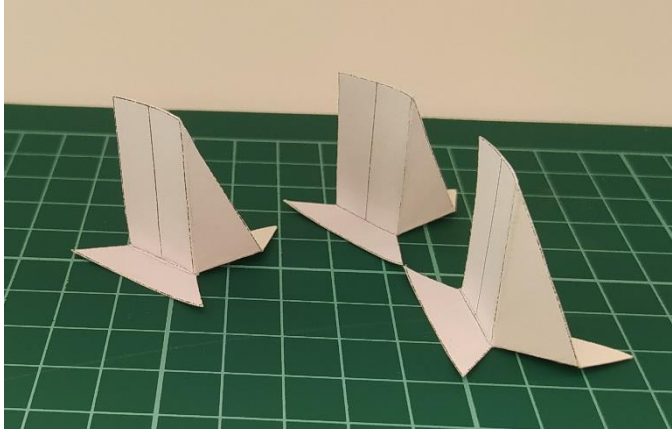
## Parte A: Medida de la concentración de sacarosa mediante la ley de refracción de Snell.

### A.1. Montaje del sistema

El montaje del sistema es realmente sencillo, sin embargo, es necesario cierto nivel de precisión en alguno de las etapas del montaje (tanto el buen “funcionamiento” del sistema como la validez de los datos que se van a obtener depende de ellos, por lo que sed especialmente cuidadosos). Se deberán seguir las siguientes instrucciones:

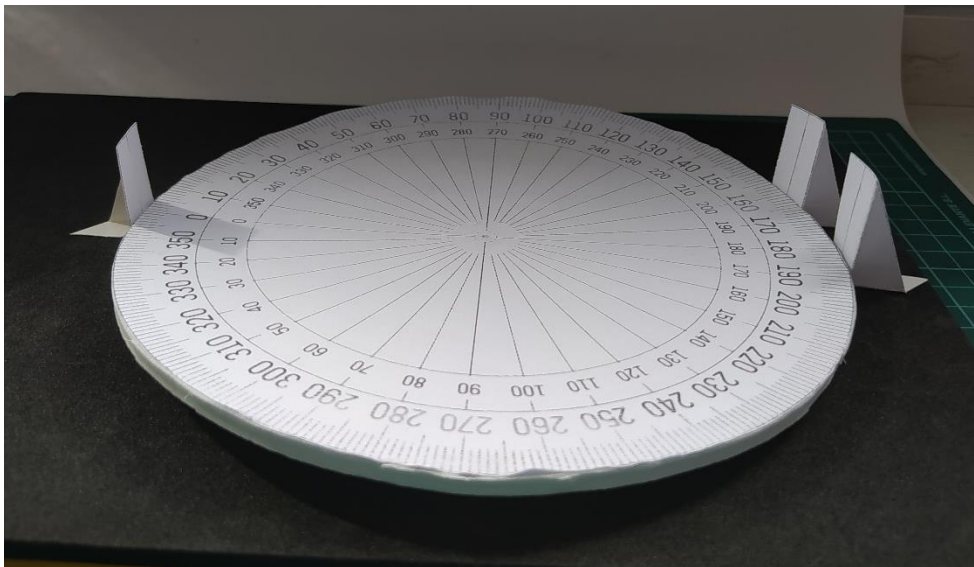
1. Adherir la plantilla con el disco de Hartl a una lámina de cartón-piedra con el pegamento o la cola. Recortar cuidadosamente la lámina siguiendo la plantilla. **Nota:** cuanto más se aleje el disco de un círculo ideal más dificultad de giro tendrá al rozar con las lengüetas.
2. Perforar el disco recortado **en su centro** con un punzón o alfiler (a modo de referencia) y adherir una chincheta en la parte posterior del disco. En este paso es muy importante ser delicados, ya que la chincheta es la que define el eje de giro del disco y una mala disposición de esta implicaría un mal giro del disco y un error en los ángulos medidos

3. Clavar el disco en una segunda lámina de cartón o goma y comprobar que gira correctamente.
4. Recortar las lengüetas de la plantilla, cortar las ranuras centrales y doblar por las marcas, tal como se ve en la imagen:



5. Pegar las lengüetas **en la lámina** con la mayor precisión posible. Una de ellas debe quedar alineada con la marca de  $0^\circ$  del disco, otra de ellas, debe ser opuesta a la primera (en la marca de  $180^\circ$ ) y la última debe formar un ángulo de  $20^\circ$  con la segunda lengüeta, por lo que se colocará en la marca de  $160^\circ$ .

6. El montaje terminado, será similar a este:



## A.2. Descripción del procedimiento experimental

Una vez realizado el montaje, podemos comenzar con el procedimiento experimental (la parte divertida). Para ello, debemos preparar de antemano las disoluciones necesarias, así como la muestra que vamos a medir:

**1. Preparación de las disoluciones de sacarosa:** En vasos de vidrio, pesar la cantidad necesaria de azúcar y agua destilada para preparar las siguientes disoluciones (con 100 g de cada una será suficiente):

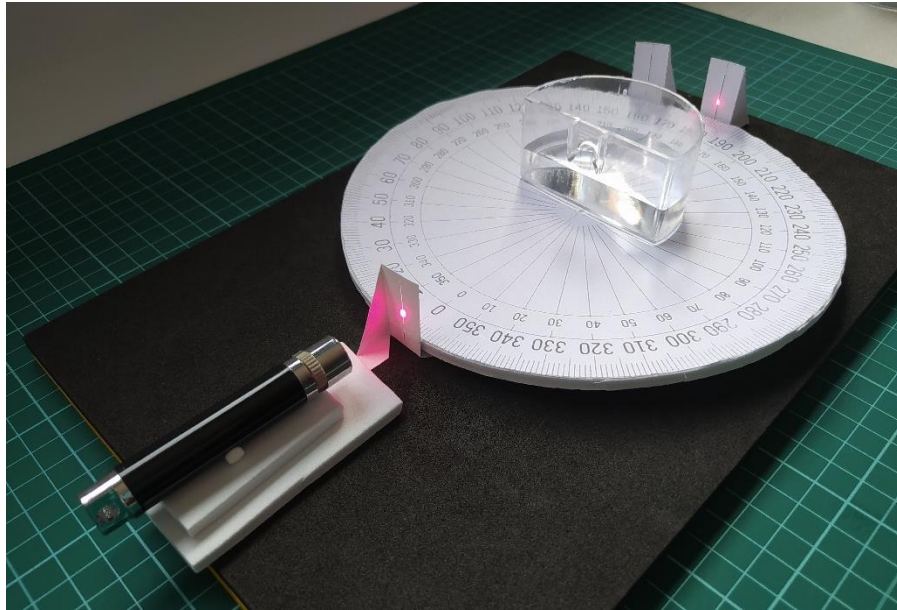
- Sacarosa 0% (m/m): Agua destilada, no hay que preparar nada.
- Sacarosa 5% (m/m): 5.0 g de sacarosa y 95.0 g de agua destilada.
- Sacarosa 15% (m/m): 15.0 g de sacarosa y 85.0 g de agua destilada.
- Sacarosa 25% (m/m): 25.0 g de sacarosa y 75.0 g de agua destilada.
- Sacarosa 50% (m/m): 50.0 g de sacarosa y 50.0 g de agua destilada.

**2. Preparación de la muestra de refresco:** Si el refresco que pretendemos estudiar además de azucarado es carbonatado, debemos eliminar el gas (dióxido de carbono) que contiene, ya que las burbujas pueden interferir con la trayectoria del láser. Podemos dejarlo abierto el día anterior o agitar una parte del refresco en un vaso hasta que deje de desprenderse gas.

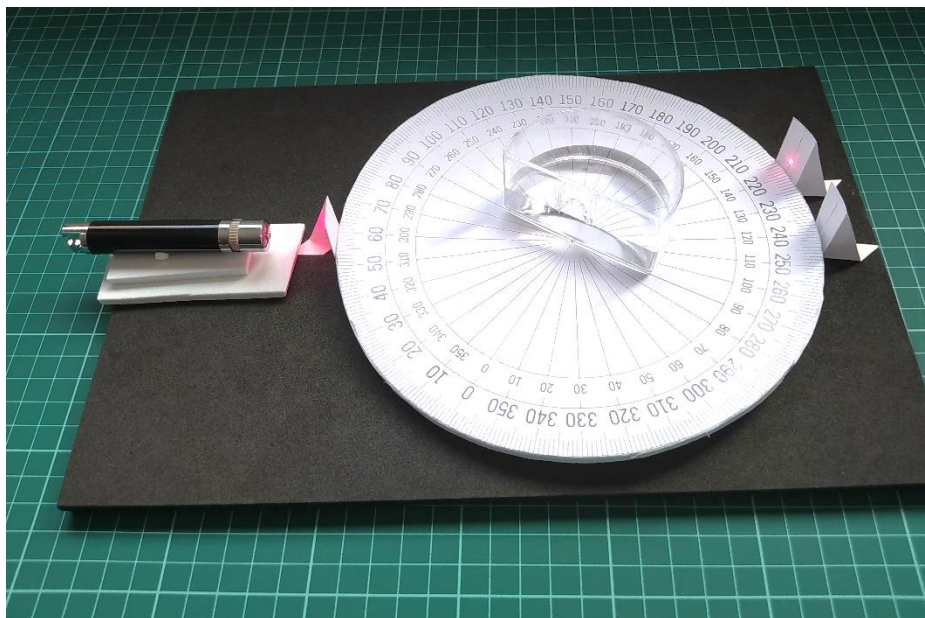
**3. Medida de los ángulos de los rayos incidente y refractado:**

**3.1.** Colocamos el láser de forma que pase simultáneamente por la rendija de  $0^\circ$  y  $180^\circ$ .

**3.2.** Disponemos la cubeta (con una de las disoluciones que queremos medir en su interior) perpendicular al haz del láser, de forma que la parte plana de la cubeta se alinee con la línea del disco que va de  $90^\circ$  a  $270^\circ$ . Comprobamos que el haz del láser sigue pasando por la rendija de  $180^\circ$ .



**3.3.** Giramos el disco con la cubeta en sentido antihorario (hacia ángulos positivos en el disco). El haz del láser empezará a desviarse en el sentido de giro del disco. Continuamos girando hasta que el haz del láser pase por la rendija de la lengüeta inicialmente situada en  $160^\circ$ . Anotamos el ángulo que ha girado el disco para llegar a este punto (nos lo marca la intersección entre la rendija de la primera lengüeta y el propio disco).



**3.4.** Repetimos los pasos anteriores para cada una de las disoluciones preparadas y para la muestra de refresco, apuntando el valor del ángulo medido en cada caso.

### A.3. Cálculos y gráficas que realizar. Cuestiones planteadas.

A partir de los ángulos de giro obtenidos para cada una de las disoluciones o muestras, deberéis elaborar una tabla en algún programa de procesamiento de datos (como Excel) que contenga (como mínimo):

- El ángulo  $\theta_1$  medido.
- El ángulo  $\theta_2$  correspondiente al ángulo entre el rayo refractado y el eje normal de la cubeta. **Pista:** por la disposición fija de las lengüetas, este ángulo depende directamente de  $\theta_1$ .
- El seno de cada uno de estos ángulos (recordad que los procesadores de datos trabajan, por defecto, en radianes).
- La relación entre los ángulos que nos permite calcular el índice de refracción de las muestras según la ley de Snell:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (3)$$

Representad en una gráfica adecuadamente presentada la relación entre el índice de refracción calculado y la concentración de sacarosa, con su ecuación de ajuste lineal.

A partir de la gráfica y la ecuación de la recta anterior, calculad la concentración de azúcar del refresco proporcionado.

#### **Cuestiones:**

1. Cuando se dispone la cubeta con su parte plana completamente perpendicular al haz de luz, el rayo sigue una trayectoria rectilínea. ¿Por qué ocurre esto? ¿no

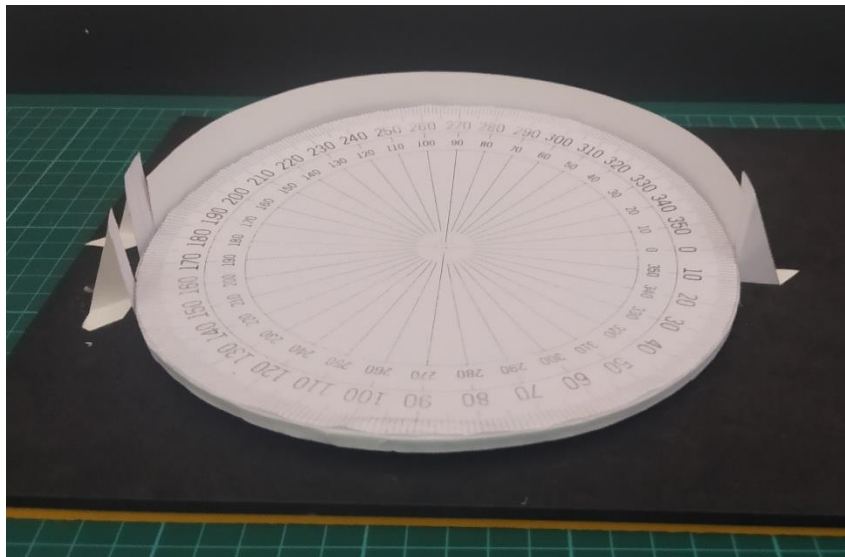
debería cambiar la velocidad de propagación en el medio que contiene la cubeta?

2. ¿Por qué se usa una cubeta con forma semicilíndrica y no una con otra forma?
3. ¿Qué errores se cometen en las medidas realizadas?
4. Propón una forma de mejorar la práctica llevada a cabo.

## **Parte B: Medida del ángulo crítico. Cálculo del índice de refracción del agua destilada.**

### **B.1. Montaje del sistema**

El sistema experimental para esta parte de la práctica es una adaptación del sistema elaborado para la parte A. Solamente es necesario adherir con pegamento o cola la cinta de papel al disco, asegurandonos de que quede en el tramo del disco que va desde  $181^\circ$  a  $359^\circ$ . El resultado final debe ser similar a este:

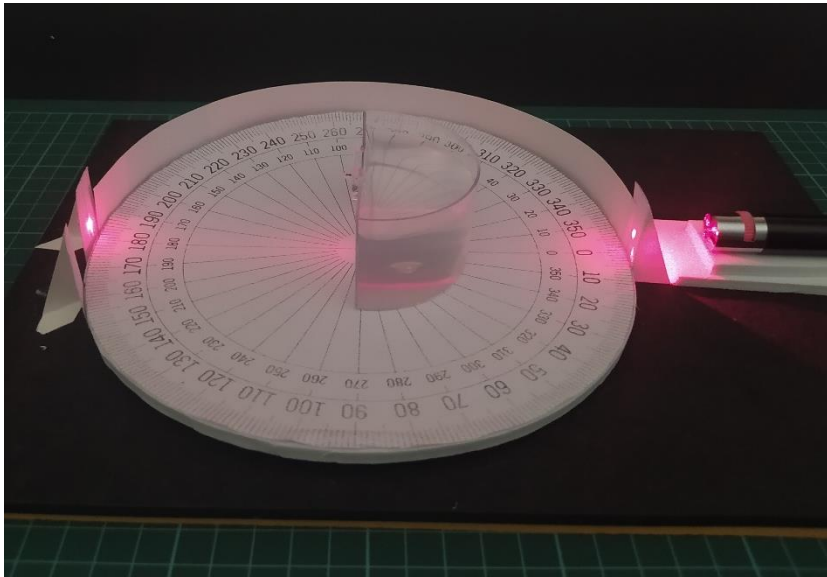


### **B.2. Procedimiento experimental**

Para llevar a cabo esta parte de la práctica, es necesario seguir el siguiente procedimiento experimental:



1. **Calibrado del sistema:** El primer paso es colocar el láser sobre la lámina de tal forma que pase por las ranuras de las lengüetas situadas a  $0^\circ$  y  $180^\circ$ .
2. **Colocación de la cubeta:** A continuación colocamos la cubeta, llena de agua destilada, sobre el disco de Hartl. Para esta parte de la práctica deberá colocarse de forma que su parte plana quede sobre el eje  $90^\circ$ - $270^\circ$ , pero al contrario que en la parte A, el láser debe incidir primero sobre la parte curva de la cubeta:



3. **Determinación del ángulo crítico:** Por último, debemos girar el disco, hasta que se observe como el rayo refractado comienza a difuminarse. Mediremos el ángulo que marca la ranura de la primera lengüeta y continuaremos girando hasta que el haz desaparezca por completo, tomando este punto como ángulo final.

### B.3. Cálculos y cuestiones planteadas

La parte experimental nos aporta dos medidas del ángulo crítico. Esto es debido a que se producen ciertas interferencias en la superficie plana de la cubeta. Por ello, debemos calcular dos índices de refracción, uno para cada ángulo medido, de acuerdo con la ecuación 4. Expresaremos el índice de refracción promedio de la cubeta de la siguiente forma:

$$n_{agua} = \left( \frac{n_{superior} + n_{inferior}}{2} \right) \pm \left( \frac{n_{superior} - n_{inferior}}{2} \right) \quad (5)$$

**Cuestiones:**

1. ¿Por qué cambia la colocación de la cubeta en esta parte de la práctica respecto a la práctica anterior?
2. ¿Podría producirse transmisión interna total entre el agua y la superficie de una cubeta con un índice de refracción de 1.41 ? ¿Y si el fluido que se introduce fuera glicerina,  $n_{glicerol} = 1.47$ ?
3. Compara el resultado obtenido por esta parte de la práctica con el que se obtiene en la parte anterior.



## Anexo II – Disco de Hartl y lengüetas

