



*Facultad de Ciencias*

**Variantes de los Experimentos de Óptica. Parte 2:  
Experimentos de Propagación.**

(Variants of Optics Experiments.

Part 2: Propagation Experiments)

*Trabajo de Fin de Grado  
para obtener el*

**Grado de Física**

Autor: César Pérez Gil de Gómez

Director: Jose María Saiz Vega

Co-Directora: Maria Dolores Ortiz Márquez

Curso 2023 - 2024

# Índice general

<i>Agradecimientos</i>	1
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>1. Transmitancia espectral de filtros de color</b>	<b>4</b>
1.1. Experimento previo . . . . .	4
1.1.1. Fundamento teórico . . . . .	4
1.1.2. Dispositivo y procedimiento experimental . . . . .	4
1.1.3. Resultados y análisis . . . . .	5
1.2. Variante del experimento . . . . .	7
1.2.1. Linealidad del circuito . . . . .	8
1.2.2. Problema de la anchura espectral FWHM . . . . .	11
1.3. Discusión . . . . .	13
<b>2. Medida de la dispersión en un medio</b>	<b>15</b>
2.1. Experimento previo . . . . .	15
2.1.1. Fundamento teórico . . . . .	15
2.1.2. Dispositivo y procedimiento experimental . . . . .	17
2.1.3. Resultados y análisis . . . . .	18
2.2. Variante del experimento . . . . .	19
2.2.1. Dispositivo experimental . . . . .	19
2.2.2. Agua . . . . .	20
2.2.3. Aceite . . . . .	21
2.2.4. Glicerina . . . . .	22
2.3. Discusión . . . . .	23
<b>3. Medida de la velocidad de la luz</b>	<b>25</b>
3.1. Experimento previo . . . . .	25
3.1.1. Fundamento teórico . . . . .	25
3.1.2. Dispositivo y procedimiento experimental . . . . .	25
3.1.3. Resultados y análisis . . . . .	26
3.2. Variante del experimento . . . . .	27
3.3. Velocidad de la luz en agua . . . . .	27
3.4. Discusión . . . . .	29
<b>4. Producción y análisis de luz polarizada</b>	<b>31</b>
4.1. Experimento previo . . . . .	31
4.1.1. Fundamento teórico . . . . .	31
4.1.2. Dispositivo y procedimiento experimental . . . . .	32
4.1.3. Resultados y análisis . . . . .	33

4.2.	Variante del experimento . . . . .	35
4.2.1.	Luz circularmente polarizada . . . . .	35
4.2.2.	Caracterización de láminas retardadoras . . . . .	36
4.3.	Discusión . . . . .	38
<b>5.</b>	<b>Medida de la focal de una lente</b>	<b>39</b>
5.1.	Experimento previo . . . . .	39
5.1.1.	Fundamento teórico . . . . .	39
5.1.2.	Dispositivo y procedimiento experimental . . . . .	40
5.1.3.	Resultados y análisis . . . . .	41
5.2.	Variante del experimento . . . . .	42
5.2.1.	Ecuación de la lente delgada . . . . .	42
5.2.2.	Método de Bessel . . . . .	43
5.3.	Discusión . . . . .	44
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>45</b>

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, por haberme ayudado a convertirme en la persona que soy y por siempre creer en mí. Sin ellos, esto no sería posible.

## Abstract

In this project, several classical optics experiments have been adapted and/or modified with the aim of addressing new objectives. Each proposal involves a review of the theoretical foundations of the original experiment, its reproduction, and then the description of the new variant and its experimental verification. Specifically, this work has focused on a set of 5 practices based on incoherent optics, i.e., phenomena of propagation and image formation: spectral transmittance of colour filters, measurement of medium dispersion, measurement of the speed of light, production and analysis of polarised light, and finally, focal length measurement of a lens.

**Keywords:** Transmittance, wavelength, dispersion, refractive index, speed of light, focal length.

## Resumen

En este trabajo se han revisado y/o modificado varios experimentos clásicos de óptica con el propósito de orientarlos a nuevos objetivos. Cada una de las propuestas implica una revisión de los fundamentos teóricos del experimento original, su reproducción y, a continuación, la descripción de la nueva variante y su verificación experimental. En concreto, este trabajo se ha centrado en un conjunto de 5 prácticas basadas en óptica incoherente, es decir, en fenómenos de propagación y formación de imágenes: transmitancia espectral de filtros de color, medida de la dispersión de un medio, medida de la velocidad de la luz, producción y análisis de luz polarizada y, por último, medida de la focal de una lente.

**Palabras clave:** Transmitancia, longitud de onda, dispersión, índice de refracción, velocidad de la luz, distancia focal.

# Introducción

Este trabajo tiene como objetivo revisar y/o modificar experimentos clásicos de óptica relacionados con la propagación de luz y formación de imágenes, es decir, óptica incoherente. Para ello, se comienza realizando un estudio teórico exhaustivo de cada dispositivo óptico, revisando los fundamentos necesarios para comprender su funcionamiento y plantear las posibles mejoras o variantes que se pueden introducir. A continuación, se pretende verificar experimentalmente estas propuestas, asegurando que las modificaciones no solo sean teóricamente válidas, sino también prácticas y reproducibles en el laboratorio.

Cada propuesta incluye un análisis riguroso de los fundamentos teóricos, una metodología detallada y un cálculo preciso de los posibles errores experimentales. Este enfoque integral me ha permitido no solo adquirir conocimientos técnicos avanzados, sino también desarrollar habilidades cruciales como la planificación experimental y el análisis crítico de los resultados obtenidos.

El conjunto de prácticas basadas en óptica incoherente estudiado en este proyecto incluye 5 experimentos sobre propagación de luz y formación de imágenes:

1. **Transmitancia espectral de filtros de color:** En este experimento se analizan las curvas de transmitancia espectral de varios filtros de color y un filtro interferencial. Se han justificado las discrepancias del experimento original y se ha estudiado el funcionamiento del sistema de detección.
2. **Medida de la dispersión de un medio:** En esta práctica, se analiza la curva de dispersión de un vidrio y se extiende el uso del montaje a líquidos, proporcionando una comprensión más profunda de cómo la luz interactúa con diferentes medios y la relación con el índice de refracción.
3. **Medida de la velocidad de la luz:** Este experimento permite medir la velocidad de la luz en el aire y en el agua, y estudiar la propagación de la luz en ambos medios. Se validan los principios teóricos con observaciones experimentales.
4. **Producción y análisis de luz polarizada:** En esta práctica, se verifican diferentes leyes fundamentales relacionadas con la polarización de luz y se caracterizan varias láminas desfasadoras mediante la producción de luz circular y elípticamente polarizada.
5. **Medida de la distancia focal de lentes:** En este experimento, se mide la distancia focal de lentes convergentes y divergentes utilizando la ecuación de una lente delgada y el método de Bessel. Se ha evaluado la precisión y aplicabilidad de cada método en contextos prácticos.

# Capítulo 1

## Transmitancia espectral de filtros de color

En esta práctica se pretende obtener las diferentes curvas de transmitancia para diferentes filtros de color a lo largo de todo el visible. Se ha analizado un filtro rojo, un filtro verde, la superposición de ambos y un filtro interferencial. La ampliación de la práctica ha consistido en la comprobación de la linealidad del sistema de detección y la verificación del resultado obtenido para curva de transmitancia espectral del filtro interferencial.

### 1.1. Experimento previo

#### 1.1.1. Fundamento teórico

La transmitancia espectral es la relación entre la intensidad de luz que atraviesa un sistema y la intensidad incidente sobre él para cada valor de longitud de onda dentro del espectro estudiado.

$$T = I_i/I_0 \tag{1.1}$$

Donde  $T$  es la transmitancia del objeto,  $I_i$  es la intensidad de luz que atraviesa el sistema e  $I_0$  representa la intensidad incidente. De esta forma, los valores de la transmitancia podrán variar entre 0 y 1. En las curvas de transmitancia espectral, se representa la transmitancia en función de la longitud de onda de la luz incidente.

#### 1.1.2. Dispositivo y procedimiento experimental

El dispositivo utilizado para analizar las curvas de transmitancia de diferentes filtros se describe en la figura 1.1. Los elementos principales son: una fuente policromática, es decir, que emita en todo el espectro visible y un monocromador, cuya principal función será seleccionar una longitud de onda concreta y regulable. El monocromador está formado por una serie de lentes, espejos y rendijas, seguidos por una red de difracción de reflexión que actuará como elemento separador del dispositivo. Este último será el elemento clave para conseguir un haz monocromático. Al girar este elemento, se varía la longitud de onda del haz emitido por la rendija de salida. Por último, será necesario un fotodetector en la salida del monocromador conectado a un voltímetro, que nos permitirá medir la intensidad de salida del haz monocromático generado. Entre la rendija de salida y el detector queda un espacio en el que se puede colocar un filtro. Realizando el cociente del valor de la

intensidad con y sin filtro, se obtendrá el valor de transmitancia correspondiente a cada longitud de onda concreta para ese filtro.

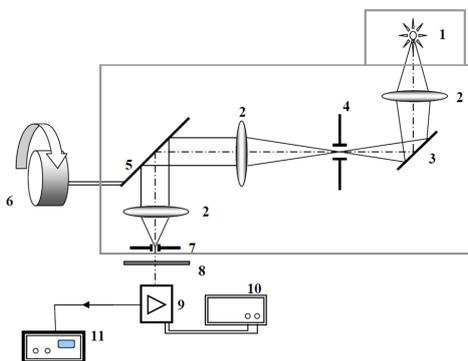


Figura 1.1: Dispositivo experimental formado por: 1) fuente policromática; diferentes elementos del monocromador: 2) lentes, 3) espejo, 4) y 7) rendija de entrada y de salida, 5) red de difracción, controlada por 6) el selector, 8) filtro, 9) fotodetector, 10) fuente, 11) voltímetro. [1]

El procedimiento experimental comenzará realizando las primeras medidas sin ningún filtro, obteniendo así  $V_0$ , que será proporcional al valor de  $I_0$ . Las medidas de voltaje se obtendrán a lo largo de todo el espectro visible cada 20 nm. Al igual que esta medida de  $V_0$  se realizarán las medidas de  $V_i$  que será el voltaje medido correspondiente al haz de luz al situar cada uno de los filtros de colores delante del detector. En este caso, un filtro rojo, otro verde y la superposición de ambos.

También se analizará un filtro interferencial, para el cual el procedimiento será ligeramente diferente ya que será un análisis en un intervalo de solo 30 nm de longitud de onda en torno a su valor nominal de transmisión (530 nm-560 nm). El filtro interferencial tiene un CWL (Center wavelength) de fábrica, que será el centro de nuestro rango de medidas. Se tomarán medidas cada 2 nm desde el valor de CWL-15 nm hasta CWL+15 nm. Se hará el mismo procedimiento para ese intervalo con y sin filtro para poder realizar el cociente de los valores obtenidos.

### 1.1.3. Resultados y análisis

Se ha analizado, como se ha anunciado previamente, un filtro verde, uno rojo y ambos superpuestos para el caso de los filtros de colores. Para ello, se ha realizado un barrido en el que se ha obtenido los valores de  $V_0$  a lo largo de todo el visible (Ver figura 1.2).

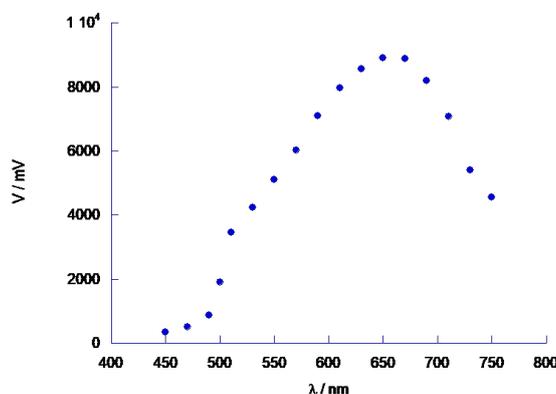


Figura 1.2: Valor de voltaje obtenido sin ningún filtro ( $V_0$ ) para todo el visible.

Una vez se han medido los valores  $V_0$ , ya se podrá calcular la transmitancia de los filtros de color a partir de las curvas  $V_i$  correspondientes a cada filtro. La figura 1.3 muestra las transmitancias obtenidas para los filtros rojo y verde individualmente.

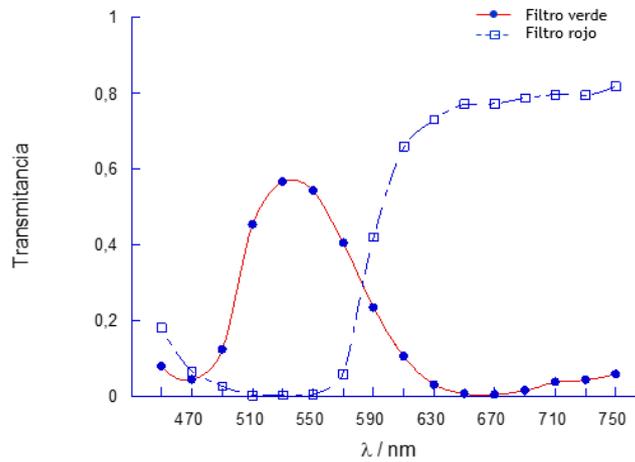


Figura 1.3: Transmitancia del filtro verde (puntos llenos) y rojo (puntos huecos).

Se trata de curvas con zonas amplias de transmisión y variaciones relativamente suaves, como corresponde a los filtros de color en lo que las anchas bandas de transmisión de los pigmentos colorantes determinan la forma de la curva. En este caso, se ve claramente cómo los valores mayores de transmitancia se producen en la longitud de onda correspondiente al color aparente del filtro; en el caso del verde se encuentra el pico sobre los 530 nm mientras que con el filtro rojo empieza a aumentar transmitancia antes de alcanzar los 600 nm.

La transmitancia conjunta de los filtros se puede obtener de dos formas:

a) Experimentalmente, colocando los dos filtros superpuestos en la salida del monocromador y midiendo los valores a lo largo del rango de longitudes de onda correspondiente.

b) Teóricamente, multiplicando ambas curvas, ya que el producto de las transmitancias individuales es igual a la transmitancia conjunta.

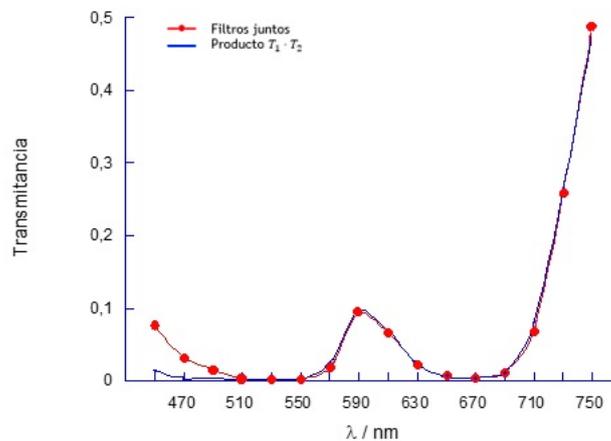


Figura 1.4: Transmitancia de los filtros superpuestos a la salida del monocromador (rojo) y el producto de las transmitancias por separado (azul).

El valor obtenido con el producto de las transmitancias se ajusta muy bien al experimental excepto en la zona del azul, que los filtros superpuestos dejan pasar más luz de la esperada. Esta discrepancia entre los valores nos plantea la necesidad de estudiar la causa, que debería estar ligada al propio proceso de medida, ya que en ambas curvas solo se utilizan datos experimentales.

Por último, se ha medido un filtro interferencial que permite el paso únicamente de un pequeño rango determinado de longitudes de onda. El funcionamiento de estos filtros está basado en los recubrimientos, ocasionando que algunas longitudes de onda no deseadas sufran interferencia destructiva, mientras que otras, experimentarán interferencia constructiva. En el caso del filtro interferencial utilizado, su longitud de onda central (CWL), es decir, donde su transmitancia es máxima, es 543,5 nm (ya que está diseñado para seleccionar una línea específica del láser He-Ne). Teniendo esto en cuenta, se ha realizado un barrido centrado en el CWL del filtro.

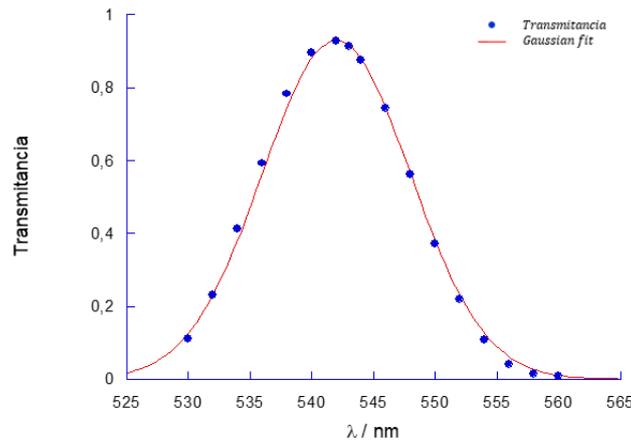


Figura 1.5: Transmitancia del filtro interferencial de CWL = 543,5 nm. Se realiza un ajuste a una gaussiana (línea roja) de parámetros  $A = 2860V$ ,  $\mu = 542,25nm$ ,  $\sigma = 6,1nm$ , FWHM = 14,36nm (Ver ecuación 1.6)

Se comprueba que, efectivamente, la transmitancia máxima del filtro interferencial se encuentra cerca del valor CWL indicado y cómo disminuye su transmitancia a medida que la longitud de onda se aleja del mismo de manera drástica. La discrepancia del valor central es de 1 nm, aproximadamente, y se puede atribuir a un error de calibrado (un error no muy grande para este tipo de instrumentos). Sin embargo, el fabricante no solo marca el CWL del filtro sino también su FWHM (Full Width at Half Maximum), es decir, la anchura de la curva de la transmitancia del filtro. Esta anchura representa el ancho del rango de longitudes de onda en el que la transmitancia del filtro es mayor al 50 % de su valor máximo. El filtro a analizar tiene un FWHM = 10 nm según indica el fabricante; sin embargo, se obtiene un valor de FWHM = 14,36 nm. Esta discrepancia se justificará en el siguiente apartado.

## 1.2. Variante del experimento

En esta ampliación de experimento, se ha indagado en primer lugar sobre el funcionamiento del sistema de detección, tratando de comprobar si realmente ofrece una respuesta lineal. En segundo lugar, se ha explicado y justificado el aumento aparente del rango de longitudes de onda en la transmitancia del filtro interferencial. Veremos que esta discrepancia también está causada por una característica específica del sistema de medida.

### 1.2.1. Linealidad del circuito

Para comprobar la linealidad del sistema es importante conocer el funcionamiento del sistema de detección y el circuito que incorpora.

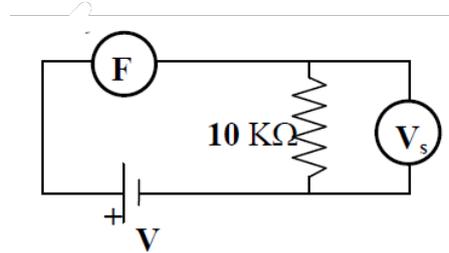


Figura 1.6: Circuito del sistema de detección del experimento. Formado por un fotodetector (F), el voltímetro ( $V_s$ ), una resistencia de  $10\text{k}\Omega$  y la fuente V [1]

El fotodetector es una fotorresistencia de semiconductor, conectada en serie con una segunda resistencia ( $10\text{k}\Omega$ ) y el voltaje en esta última es medido con un voltímetro (Ver figura 1.6 ). El circuito está alimentado por una fuente de unos 38 V. Cuanto mayor sea la intensidad luminosa que incide en el detector, menor será la resistencia que imponga la fotorresistencia y mayor valor  $V_s$  mostrará el voltímetro sobre la segunda resistencia.

Para comprobar la linealidad del circuito experimentalmente, se ha realizado un barrido para un amplio rango de intensidades, y se han medido los valores obtenidos de voltaje para cada longitud de onda.

Para medir el voltaje para bajas intensidades de luz, se han colocado entre la fuente policromática y el dispositivo una serie de filtros neutros de diferente densidad óptica (Figura 1.7).

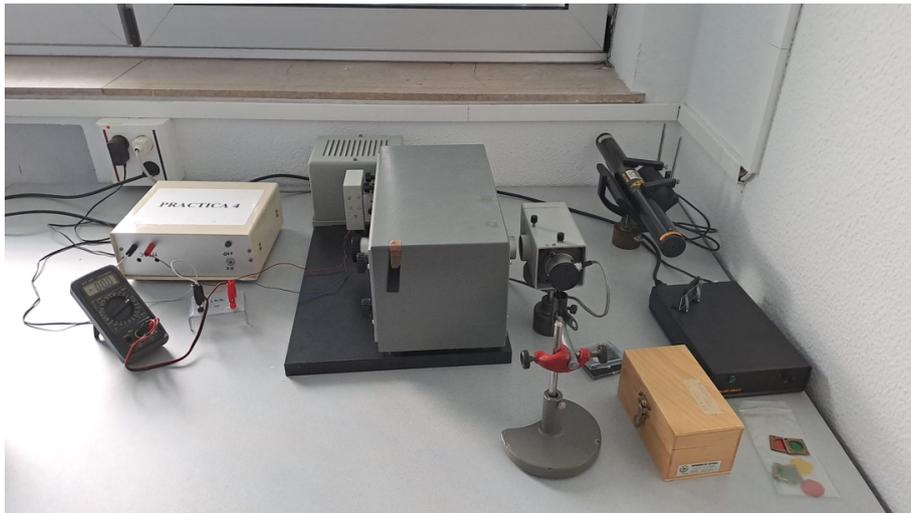


Figura 1.7: Dispositivo utilizado para variar las intensidades, interponiendo filtros de diferente densidad óptica para modificar la intensidad.

Con este método, se ha medido la respuesta (voltajes) para una intensidad menor que la del experimento inicial para todas las longitudes de onda.

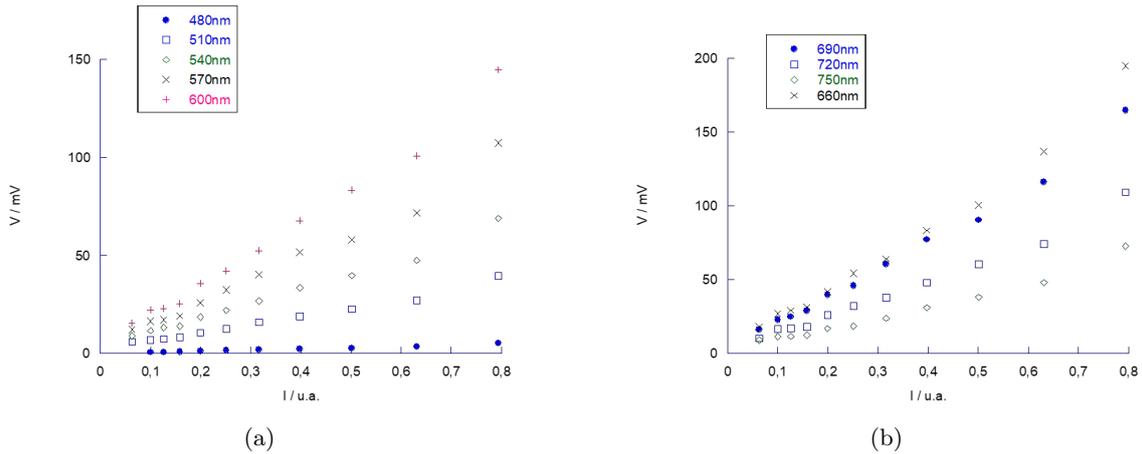


Figura 1.8: Voltaje obtenido para diferentes intensidades para diversas longitudes de onda.  
a)  $\lambda=480\text{nm}-600\text{nm}$ ; b)  $\lambda=660\text{nm}-750\text{nm}$

En la figura 1.8 se observa una clara linealidad a simple vista en los valores obtenidos a medida que aumenta la intensidad. Cabe destacar que, si nos fijamos en la zona más cercana al origen, la mayoría de ajustes no pasarían por el (0,0) cuando en teoría, cabe esperar que el voltaje sea nulo si no hay intensidad incidente. Esto puede haber sido generado por un ruido o fondo externo que, si nos fijamos en el dispositivo experimental, podría tener una explicación: mientras que en el primer dispositivo la lámpara estaba directamente unida al monocromador, en esta disposición se ha separado ligeramente con el objetivo de interponer los filtros de densidad óptica. Esto podría haber generado un ruido en las mediciones ya que la habitación no estaba completamente oscura y puede atravesar el dispositivo hasta el detector. Por lo tanto, luz externa podría haber generado un débil fondo en las mediciones explicando este hecho.

Por otro lado, la longitud de onda azul ( $\lambda = 450 \text{ nm}$ ) ha sido analizada de forma individual debido al comportamiento que se había mostrado en la figura 1.4 donde la transmitancia obtenida es mayor a lo esperado para ambos filtros de colores.

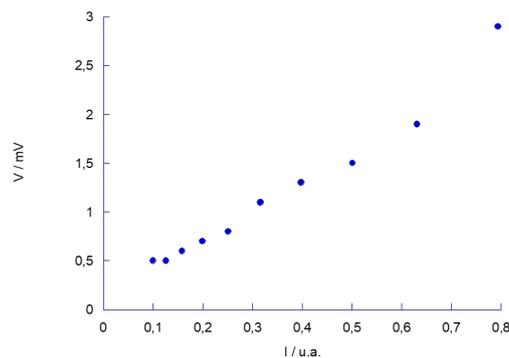


Figura 1.9: Valores de voltaje obtenidos para varios valores de intensidad incidente para la longitud de onda correspondiente al azul ( $\lambda = 450 \text{ nm}$ ).

Pese a que el valor de la transmitancia era mayor de lo esperado, el comportamiento del voltaje obtenido para varias intensidades parece similar al del resto de longitudes de onda. Esto hace pensar que este exceso de transmitancia podría haber sido generado por imperfecciones en los filtros.

El siguiente paso es analizar cómo se comporta el sistema para altas intensidades. La fuente policromática no nos será útil en este caso, ya que la intensidad espectral no es suficiente para llevar al límite el sistema. Por ello, se ha utilizado un láser verde (helio-neón) de longitud de onda conocida incidiendo en el monocromador; al igual que en el proceso anterior, se han utilizado filtros neutros de diferente densidad óptica para variar la intensidad incidente (Figura 1.10).



Figura 1.10: Dispositivo utilizado para el análisis del sistema con altas intensidades.

La intensidad incidente directamente del láser era demasiado alta, por ello se coloca un vidrio de tal forma que el haz que se refleja pase a través de los filtros de densidad óptica y entre en el monocromador.

Con este dispositivo se han alcanzado valores de hasta 26 V en el voltímetro. (Ver figura 1.11)

Para analizar esta respuesta hay que analizar el circuito de detección, que podrá resolverse de forma aproximada para comparar el resultado experimental con lo esperado según la teoría. Para ello hay expresar la relación entre la resistencia producida por F ( $R_F$ ) y la irradiancia, que será aproximadamente, inversamente proporcional:

$$R_F = k/I \quad (1.2)$$

Donde  $k$  es una constante e  $I$  es la irradiancia incidente.

Sin embargo, esta dependencia supone resistencia infinita en ausencia de luz, por lo que se propone la más realista:

$$R_F = (k_0 I + k_1)^{-1} \quad (1.3)$$

Al resolver el circuito, se obtiene la siguiente relación entre el voltaje detectado en el voltímetro y la irradiancia.

$$V_s = \frac{V \cdot R}{\frac{1}{k_0 I + k_1} + R} \quad (1.4)$$

Donde  $V_s$  es el voltaje detectado por el voltímetro,  $V$  el voltaje conocido de 38V,  $R$  será la segunda resistencia, también conocida, de 10k $\Omega$  y  $k_0$  y  $k_1$  son constantes desconocidas del sistema, que debemos ajustar, obteniendo:  $k_0 = 3 \times 10^{-4} \frac{m^2}{W \cdot \Omega}$  y  $k_1 = 1 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ .

Tras haber resuelto el sistema, se comparan los valores obtenidos del voltaje en función de la intensidad para todo el rango de intensidades medido con la ecuación ajustada del sistema.

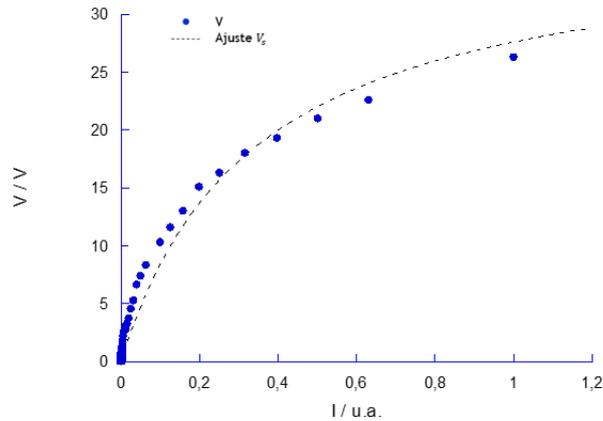


Figura 1.11: Voltaje obtenido para diferentes valores de intensidad, ajustado por la ecuación del sistema (Ecuación 1.4)

Se ve claramente como, a medida que se aumenta la intensidad, el sistema deja de ser lineal y pasa a ser asintótico para altas intensidades. El ajuste del sistema cuadra bastante bien con los valores obtenidos del voltaje medido experimentalmente. (Ver figura 1.11).

Por tanto, se puede afirmar que para bajas intensidades, el sistema se comporta de manera prácticamente lineal, mientras que al aumentar la intensidad, el sistema empieza a tener una forma asintótica y dejará de ser lineal.

### 1.2.2. Problema de la anchura espectral FWHM

El experimento inicial con el filtro interferencial nos deja una incógnita por resolver: experimentalmente, el filtro interferencial deja pasar mayor rango de longitudes de onda del que el fabricante indica. Esto se traduce en que se obtiene un valor de FWHM mayor del esperado. En el caso del filtro interferencial analizado, se obtiene un valor de FWHM = 14,36 nm frente a los 10 nm que se esperan. Una diferencia bastante considerable de casi el 50 % del valor. Al investigar sobre la solución a ese exceso de amplitud de la curva de transmitancia, aparecen varios factores que pueden generar errores en la medición:

- Filtro mal colocado en la salida del monocromador.
- Filtro defectuoso o dañado.
- Filtro sometido a un cambio brusco de temperatura.
- Función aparato que modifica la anchura del FWHM.

Todos ellos son posibles factores de alteración de la medida del filtro interferencial. Sin embargo, si el filtro estuviese mal colocado no se obtendrían valores coherentes, se observarían errores de medición más notables. Además la zona de colocación del filtro no estaba sometida a ninguna variación notable de temperatura. Además, si se rota un poco el filtro para que el haz impacte en otro lugar, se ve que el comportamiento del filtro no cambia. Por lo tanto, el filtro no está dañado. La opción más plausible es que la función

aparato, al convolucionar con la función del filtro, produce un aumento en la anchura de la medida del filtro.

La convolución de dos funciones viene descrita por la siguiente expresión:

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau \quad (1.5)$$

La convolución es una operación matemática que une dos funciones para producir una tercera, que representa una versión combinada de las dos originales.[2]

En este caso, las funciones que se habrían convolucionado serían la función aparato dada por la rendija de salida y la curva de la transmitancia del filtro.

Se ha medido la función aparato de la rendija de salida del monocromador haciendo pasar por el instrumento un haz láser (extremadamente monocromático) y variando la selección de la  $\lambda_0$  de salida. La función de salida tiene una anchura muchísimo mayor que la del haz, por lo que se toma esa función como función aparato. (Respuesta a una delta, idealmente). Además se ha ajustado el resultado a una gaussiana, para facilitar las operaciones. (Figura 1.12 )

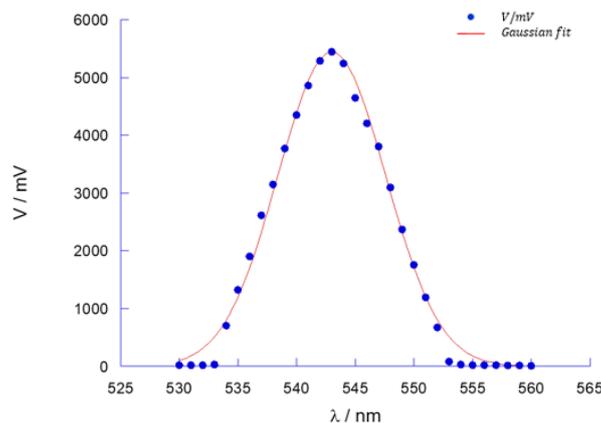


Figura 1.12: Función aparato de la rendija del monocromador ajustada a una función gaussiana

Se han aproximado los puntos de la función aparato a una función gaussiana de la siguiente forma:

$$f(x) = A \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.6)$$

Donde  $A$  es la amplitud de la función gaussiana, que es el valor máximo de la función;  $\mu$  representa el valor esperado de la distribución, que es el punto donde la función alcanza su valor máximo;  $\sigma$  es la desviación estándar de la distribución.

Los parámetros de la función aparato son los siguientes:

$$A = 5442V, \mu = 543nm, \sigma = 4,6nm, \text{FWHM} = 10,83nm$$

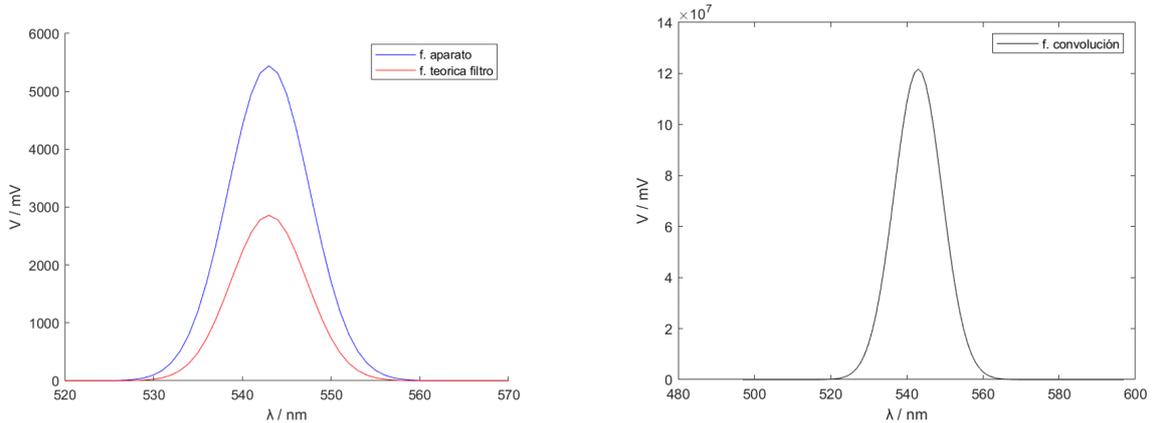
Además, también se ha ajustado la función del filtro obtenida inicialmente que se correspondería a la convolución de dos funciones. Los parámetros son los siguientes:

$$A = 2860V, \mu = 542,25nm, \sigma = 6,1nm, \text{FWHM} = 14,36nm$$

Por último, se ha creado la función que debería corresponder al filtro interferencial según el fabricante, con el mismo voltaje máximo alcanzado pero con una FWHM=10nm. Sus parámetros serán los siguientes:

$$A = 2860V, \mu = 543nm, \sigma = 4,25nm, FWHM = 10nm$$

Una vez se han definido estas tres funciones, se puede simular una convolución entre la supuesta función del filtro interferencial de FWHM=10nm con la función aparato y ver si se obtiene una función compatible con la obtenida experimentalmente del filtro interferencial.



(a) Función aparato y una función de la misma intensidad que la función del filtro pero con FWHM = 10 nm.

(b) Convolución de la función aparato y la que sería la función del filtro interferencial según el fabricante.

Figura 1.13: Convolución de la función aparato y la función del filtro interferencial.

Tras simular la convolución, se obtiene una gaussiana cuyo voltaje máximo es mucho mayor. Sin embargo, lo que interesa tiene que ver con la anchura de la función, que no se verá afectada por el voltaje máximo. Se obtiene una FWHM = 14,71 nm frente a los 14,36 nm que se habían obtenido experimentalmente en el experimento original.

Por lo tanto, sería más que razonable que la función aparato sea la principal causa de este aumento del rango de longitudes de onda que el filtro interferencial permite pasar. Si la rendija fuese mínima, un delta de Dirac, sería de esperar que en ese caso al medir la función del filtro si se obtuviese un FWHM de 10 nm, pero en ese experimento la luminosidad se reduciría a cero, y no habría señal que medir.

### 1.3. Discusión

En la ampliación de esta práctica, se ha investigado sobre las discrepancias que se encontraban sistemáticamente en el experimento.

Por un lado, se ha justificado el aumento del ancho del pico de transmitancia del filtro interferencial con la convolución entre las dos funciones del experimento, la del propio filtro, que sí que tiene FWHM = 10 nm, y la función aparato de la rendija de salida que provoca este aumento de FWHM debido a la convolución entre las dos funciones. Es importante que al realizar esta práctica no se termine con la conclusión de que la etiqueta del filtro es errónea, esta dañado o que han realizado una mala medición. Es imprescindible que se tenga en cuenta no solo la precisión del aparato sino también cómo el dispositivo puede

modificar las medidas que tomamos.

En conclusión, el filtro interferencial no es defectuoso sino que se ha justificado de forma teórica como la anchura del filtro se ve afectada por la función aparato.

Por otro lado, se ha analizado la linealidad del sistema de detección, ya que en el experimento original se da por sentada esta linealidad a la hora de realizar los cálculos. Sin embargo, pese a que sí que se podría afirmar que a bajas intensidades se comporta de forma casi lineal, está bien indagar y conocer más el circuito de medida para darse cuenta que es inviable que sea infinitamente lineal. Lo lógico es, conociendo el circuito, que efectivamente la respuesta del sistema sature, hacia una asíntota. Esto puede justificar la discrepancia entre valores obtenidos superponiendo dos filtros (muy baja intensidad) y productos de transmitancias de un filtro, obtenidos con intensidades más moderadas.

## Capítulo 2

# Medida de la dispersión en un medio

El objetivo de este experimento es obtener la curva de dispersión de un vidrio (variación del índice de refracción en un intervalo de longitudes de onda). También se estimará el número de Abbe correspondiente al material, que está directamente relacionado con la dispersión del mismo.

En la ampliación del experimento, se ha obtenido el índice de refracción, curva de dispersión y número de Abbe de 3 líquidos diferentes, agua, aceite y glicerina, aplicando el mismo método utilizado con el vidrio.

### 2.1. Experimento previo

#### 2.1.1. Fundamento teórico

El índice de refracción de un medio está relacionado con la velocidad a la que la luz se propaga por dicho material. Viene definido por:  $n = c/v$  siendo  $n$  el índice de refracción,  $c$  la velocidad de la luz y  $v$  la velocidad de propagación de la luz a través del medio. Por ello, es de esperar que el índice de refracción sea un valor superior a 1, ya que la luz no irá más rápido a través del material estudiado que la velocidad de la luz en el vacío.

La dispersión de la luz es un fenómeno por el cual un haz de luz blanca, al atravesar un medio, experimenta una variación en su velocidad diferente para cada una de las longitudes de onda que la componen. Como resultado, diferentes longitudes de onda de un haz de luz refractarán de forma diferente al cambiar de medio y se desviarán en direcciones diferentes.

Dicho de otra manera, cada material tiene un índice de refracción que depende de la longitud de onda (relación de dispersión). Sin embargo, esta dependencia varía considerablemente entre diferentes materiales. Algunos materiales poseen una fuerte dependencia, lo que significa que las diferentes longitudes de onda viajan a velocidades muy distintas a través de ellos. Otros, en cambio, muestran una dependencia más débil, permitiendo que todas las longitudes de onda viajen a velocidades similares. Esta variación se traduce en la existencia de materiales poco dispersivos y materiales altamente dispersivos. Cuando se trata de vidrios, los más dispersivos reciben el nombre de "flint" (F) y nos referimos a los menos dispersivos como vidrios tipo crown" (K).

La relación de dispersión introduce una modificación en la ecuación que describe el índice de refracción, reflejando su dependencia de la longitud de onda:

$$n(\lambda) = \frac{c}{v(\lambda)} \quad (2.1)$$

La dependencia del índice de refracción con la longitud de onda del haz que incide en el material viene dada por la curva de dispersión del material. Por lo general, esta curva tiene una tendencia descendente a lo largo del visible (ver figura 2.1) y para longitudes de onda bajas, el valor de  $n$  es más elevado.

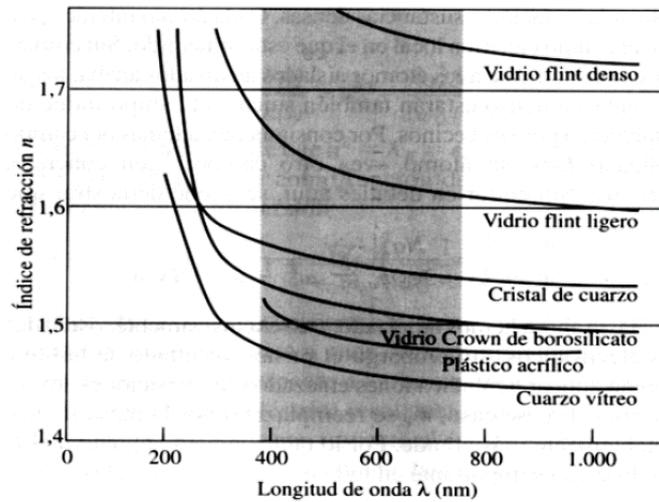


Figura 2.1: Curva de dispersión de varios materiales.[3]

Una forma de modelar analíticamente esta relación viene dada por la ecuación de Cauchy:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{D}{\lambda^4} \quad (2.2)$$

En esta ecuación resulta práctico, como aproximación, quedarse con los dos primeros términos  $A + \frac{B}{\lambda^2}$ . Por lo tanto, dos puntos serían suficientes para calcular los coeficientes  $A$  y  $B$ , correspondiente a un material.

El último objetivo del experimento trata de estimar el número de Abbe, que describirá cuan dispersivo es el material que se está tratando. El número de Abbe viene dado por la siguiente expresión:

$$V = \frac{n_d - 1}{n_f - n_c} \quad (2.3)$$

Los valores  $n_d$ ,  $n_f$  y  $n_c$  representan el índice de refracción para un valor de longitud de onda concreto.

$$\lambda_d = 5876 \text{ \AA}; \lambda_f = 4861 \text{ \AA}; \lambda_c = 6563 \text{ \AA}$$

A continuación, se describirá la teoría del principal método utilizado para medir índices de refracción en vidrios; que, como veremos, puede ser utilizado también en el caso de líquidos.

La desviación mínima experimentada por un haz al atravesar un prisma del material a analizar está relacionada con su índice de refracción. Esta relación se expresa como:

$$n = \frac{\text{sen}((\alpha + \delta_m)/2)}{\text{sen}(\alpha/2)} \quad (2.4)$$

Donde  $\delta_m$  representa la desviación mínima provocada por el prisma, que se conseguirá variando el ángulo de incidencia  $\varepsilon_1$  hasta obtenerla y  $\alpha$  el ángulo del vértice del prisma (ver figura 2.2).

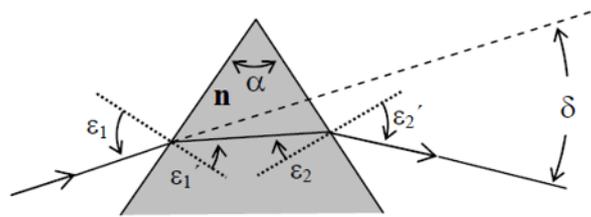


Figura 2.2: Esquema de la refracción de un haz de luz al atravesar un prisma triangular.  $\alpha$  es el ángulo que forma el vértice del prisma ( $\alpha = 60^\circ$ ),  $\delta$  es el ángulo de desviación del haz.  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  representan los ángulos de incidencia en cada una de las caras del prisma y  $n$  el índice de refracción del material.[3]

### 2.1.2. Dispositivo y procedimiento experimental

Para medir el índice de refracción del vidrio se hace pasar un haz de luz a través de un prisma. Al atravesarlo, el haz se refracta en sus dos caras produciendo una desviación del mismo que será mínima para una posición concreta del prisma. Esta desviación mínima está relacionada con el índice de refracción del material (ver ecuación 2.4). Se observarán, en el goniómetro, diferentes líneas espectrales de varias longitudes de onda que han sido desviadas distinto ángulo por la dispersión del material del prisma.

En este experimento (Figuras 2.3 y 2.4) se ha utilizado una fuente espectral de sodio de la que se conocen las características de sus líneas de emisión en el rojo, naranja y verde.

$$\lambda_r = 6161 \text{ \AA}; \lambda_n = 5893 \text{ \AA}; \lambda_v = 5685 \text{ \AA}$$

Para la medida del ángulo de desviación es necesario un goniómetro, que estará formado por un colimador, que estará fijo, un soporte donde se colocará el prisma a analizar y un antejo que gira con una precisión de un minuto. Tras la alineación del goniómetro y el enfoque, se coloca el prisma de vidrio en el soporte, se nivela y centra el sistema.



Figura 2.3: Dispositivo experimental. Formado por una lámpara de sodio y un goniómetro. En la plataforma del goniómetro se coloca el prisma.

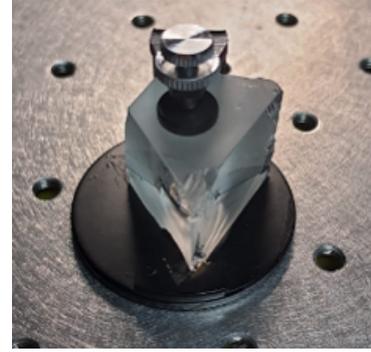


Figura 2.4: Prisma de vidrio utilizado en el experimento.

A continuación, se procede con la medida del ángulo de desviación mínima del haz, colocando el prisma con una cara en diagonal con el haz incidente. Se busca el ángulo mínimo con el anteojo girando el prisma hasta que se produzca un cambio de sentido. Se anotará la posición del anteojo en la desviación mínima y se hará lo mismo hacia el lado contrario. En el anteojo se debe observar una línea naranja más intensamente, acompañada por una verde y otra roja menos intensas. Se repetirá el proceso de medición 5 veces para obtener los valores más precisos posibles para las 3 líneas que se observan.

La desviación mínima será calculada de la forma:

$$\delta_m = (\delta_1 - \delta_2)/2 \quad (2.5)$$

Siendo  $\delta_1$  y  $\delta_2$  las posiciones del goniómetro en los puntos de desviación mínima en cada uno de los lados.

Con estos resultados, se podrá calcular el índice de refracción para cada longitud de onda. Además, basándonos en la ecuación de Cauchy 2.2 se podrán calcular los coeficientes A y B de la curva de dispersión y el número de Abbe del vidrio estudiado.

### 2.1.3. Resultados y análisis

Se ha medido la desviación mínima para las líneas verde, naranja y roja del sodio y se ha calculado su índice de refracción mediante la ecuación 2.4 tomando el valor del prisma  $\alpha = 60$  como conocido y exacto. El error de los valores se ha obtenido mediante propagación del error estadístico para las cinco medidas del índice de refracción y su desviación típica.

$$n_n = 1,62008 \pm 0,00010$$

$$n_v = 1,62209 \pm 0,00014$$

$$n_r = 1,61798 \pm 0,00006$$

Con los valores de  $n_r$  y  $n_v$  se pueden calcular los coeficiente de la ecuación 2.2 con su error.

$$A = 1,5945 \pm 7 \cdot 10^{-4}; B = (9 \pm 2) \cdot 10^5 \text{ \AA}^2$$

Con estos valores, ya se puede representar la curva de dispersión del vidrio (Figura 2.5) y comprobar que el valor obtenido experimentalmente para la línea naranja, es compatible con esta función creada a partir de los valores de las líneas verde y roja.

Para  $\lambda_n = 5893 \text{ \AA}$  la curva indica un valor de  $n_n = 1,6201 \pm 0,0002$  que es compatible con el valor obtenido experimentalmente de la línea espectral naranja del sodio.

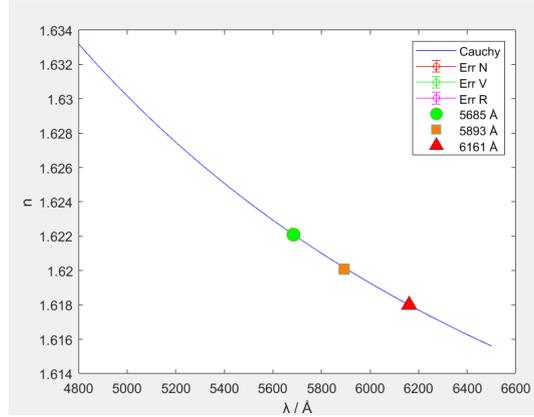


Figura 2.5: Curva de dispersión del vidrio obtenida experimentalmente a partir de la ecuación de Cauchy2.2 con los valores de A y B indicados

Para la obtención del número de Abbe correspondiente al vidrio que se está analizando, se calcularán los valores de  $n_d$ ,  $n_f$  y  $n_c$  mediante sus respectivas longitudes de onda en la ecuación 2.2.

Para el vidrio estudiado, se obtienen los valores:

$$n_d = 1,6203 \pm 0,0003; n_f = 1,6323 \pm 0,0004; n_c = 1,618 \pm 0,0003$$

Los errores se obtienen a partir de la incertidumbre de los coeficientes A y B que rigen el ajuste, realizando las derivadas de la función de Cauchy respecto a cada una de las variables y se evalúan las derivadas parciales en los puntos de interés. A partir de estos valores, se obtiene un valor del número de Abbe:

$$V = 36 \pm 1$$

## 2.2. Variante del experimento

La variante de experimento que se propone, consiste en la adaptación del dispositivo para la medida del índice de refracción, la curva de dispersión y el número de Abbe para tres líquidos diferentes: agua, aceite y glicerina. Como comprobación adicional, se han medido los índices de refracción de los líquidos utilizados obtenidos con un refractómetro de Abbe.

### 2.2.1. Dispositivo experimental

El dispositivo se conformará de un goniómetro y un prisma, al igual que en el experimento inicial. Sin embargo, al analizar materiales líquidos, el prisma a utilizar se trata de un prisma hueco que se llenará del líquido a analizar. El procedimiento a seguir es similar, midiendo el ángulo de desviación mínimo.

En el prisma de vidrio, el ángulo del vértice  $\alpha$  era un valor conocido dado por el fabricante ( $60^\circ$ ). Sin embargo, en el caso del prisma hueco no se aseguraba su equilateralidad. Tras obtener algunos resultados inesperados, se ha realizado una medición de sus ángulos con ayuda del propio goniómetro, midiendo los ángulos de reflexión del haz cuando se

apunta directamente al vértice del prisma. Se realizan varias medidas con el objetivo de disminuir el error.

Durante toda esta variante de la medida de la dispersión de un medio, se ha utilizado el mismo vértice, marcado para evitar errores. El valor obtenido del vértice que se utilizará para la realización del experimento es el siguiente:

$$\alpha = (58,185 \pm 0,019)^\circ$$

Los resultados para los otros vértices son  $\alpha_2 = (60,68 \pm 0,03)^\circ$  y  $\alpha_3 = (61,16 \pm 0,02)^\circ$ . Como era de esperar y como comprobación de una correcta medición, los ángulos de los tres vértices suman  $180,025^\circ$ , con un error asumible en comparación con los  $180^\circ$  que suman los vértices de un triángulo, teniendo en cuenta los errores obtenidos en la medida de los ángulos del prisma.

Este valor del ángulo  $\alpha$  tendrá que aplicarse en la ecuación 2.4 para calcular el índice de refracción correspondiente a cada desviación mínima.

### 2.2.2. Agua

Una vez se ha caracterizado la nueva pieza del experimento, el prisma hueco, se llena de agua y se procederá a encontrar los ángulos mínimos no solo de la línea espectral naranja, roja y verde, sino también de la línea azul ( $\lambda_a = 4981 \text{ \AA}$ ) que nos permitirá obtener resultados más precisos.

Los resultados de índice de refracción obtenidos para cada línea espectral son los siguientes:

$$n_n = 1,33343 \pm 0,00015$$

$$n_v = 1,33401 \pm 0,00015$$

$$n_r = 1,33256 \pm 0,00013$$

$$n_a = 1,3370 \pm 0,0002$$

Al contar con un valor más de líneas espectrales, es posible hacer el ajuste de la ecuación de Cauchy completa (Ecuación 2.2), es decir, considerando los 3 términos.

Por tanto, con los valores de  $n_v$ ,  $n_r$  y  $n_a$  se calculan los coeficientes de la ecuación de Cauchy A, B y D.

$$A = 1,3242 \pm 9 \cdot 10^{-4}; B = (3,2 \pm 1,0) \cdot 10^5 \text{ \AA}^2; D = (1 \pm 0,1) \text{ \AA}^4$$

Estos valores, permitirán la obtención de la curva de dispersión del agua (Figura 2.6) y el cálculo de los valores  $n_d$ ,  $n_f$  y  $n_c$  necesarios para la determinación del número de Abbe.

$$n_d = 1,3334 \pm 0,0003; n_f = 1,3376 \pm 0,0003; n_c = 1,3316 \pm 0,0003$$

Con estos valores, se puede obtener un valor aproximado del número de Abbe del agua analizada.

$$V_{\text{agua}} = 56 \pm 4$$

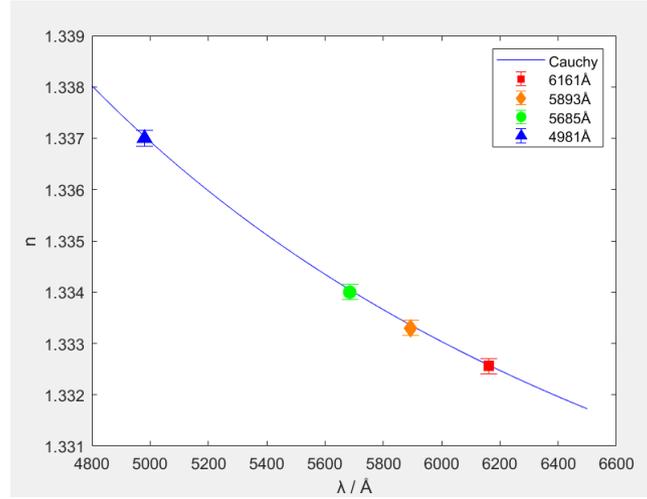


Figura 2.6: Curva de dispersión del agua obtenida experimentalmente a partir de la ecuación de Cauchy 2.2 con los valores de A, B y C indicados. Se representan los índices de refracción de las líneas azul, verde, naranja y roja.

### 2.2.3. Aceite

Se realizará el mismo procedimiento llenando el prisma hueco con aceite (aceite comercial para piel de bebé, de índice similar a algunos aceites de inmersión), obteniendo las desviaciones mínimas de las líneas azul, verde, naranja y roja.

Los resultados de índice de refracción obtenidos para cada línea espectral son los siguientes:

$$n_n = 1,4676 \pm 0,0003$$

$$n_v = 1,4685 \pm 0,0002$$

$$n_r = 1,4665 \pm 0,0003$$

$$n_a = 1,4728 \pm 0,0005$$

Contando de nuevo con el tercer término de la ecuación de Cauchy, se pueden calcular los coeficientes de la ecuación con los valores de las líneas azul, verde y roja.

$$A = 1,4545 \pm 1,1 \cdot 10^{-3}; B = (4,5 \pm 1,0) \cdot 10^5 \text{\AA}^2; D = (1 \pm 0,1) \text{\AA}^4$$

De nuevo, con estos valores se obtiene la curva de dispersión (Figura 2.7), en este caso del aceite. Esta curva permitirá obtener los valores de índice de refracción para las longitudes de onda implicadas en el número de Abbe.

$$n_d = 1,4676 \pm 0,0003; n_f = 1,4737 \pm 0,0004; n_c = 1,4651 \pm 0,0003$$

Con estos valores, ya se puede obtener un valor aproximado del número de Abbe del aceite analizada.

$$V_{\text{aceite}} = 54 \pm 3$$

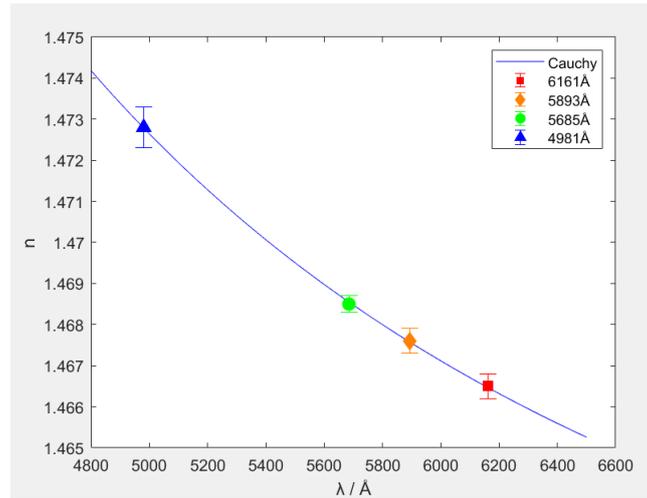


Figura 2.7: Curva de dispersión del aceite obtenida experimentalmente a partir de la ecuación de Cauchy 2.2 con los valores de A, B y C indicados. Se representan los índices de refracción de las líneas azul, verde, naranja y roja.

#### 2.2.4. Glicerina

Por último, se analizará la dispersión de la glicerina ( $C_3H_8O_3$ ) siguiendo el mismo procedimiento que con los dos líquidos anteriores.

Los resultados de índice de refracción obtenidos para cada línea espectral son los siguientes:

$$n_n = 1,4730 \pm 0,0001$$

$$n_v = 1,47393 \pm 0,00007$$

$$n_r = 1,4715 \pm 0,0002$$

$$n_a = 1,4775 \pm 0,0003$$

Una vez más, con la ecuación de Cauchy, se podrán calcular los coeficientes que nos darán los índices de refracción para el cálculo del número de Abbe.

$$A = 1,4576 \pm 1,4 \cdot 10^{-3}; B = (4,5 \pm 1,1) \cdot 10^5 \text{\AA}^2; D = (1 \pm 0,1) \text{\AA}^4$$

Estos coeficientes definirán la curva de dispersión que caracteriza a la glicerina estudiada (Figura 2.8). El número de Abbe se obtiene a partir de los siguientes índices de refracción.

$$n_d = 1,4730 \pm 0,0004; n_f = 1,4800 \pm 0,0004; n_c = 1,4699 \pm 0,0003$$

El número de Abbe obtenido para la glicerina es:

$$V_{\text{glicerina}} = 47 \pm 4$$

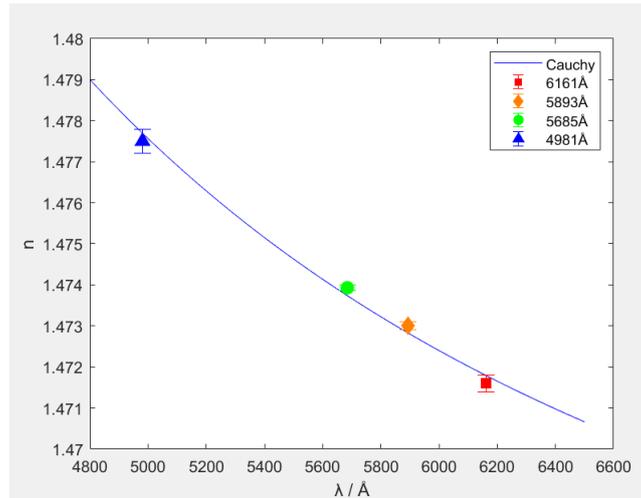


Figura 2.8: Curva de dispersión de la glicerina obtenida experimentalmente a partir de la ecuación de Cauchy 2.2 con los valores de A, B y C indicados. Se representan los índices de refracción de las líneas azul, verde, naranja y roja.

### 2.3. Discusión

En total, se ha obtenido experimentalmente el índice de refracción, la curva de dispersión y el número de Abbe de un vidrio conocido, agua, un aceite transparente de uso común y glicerina.

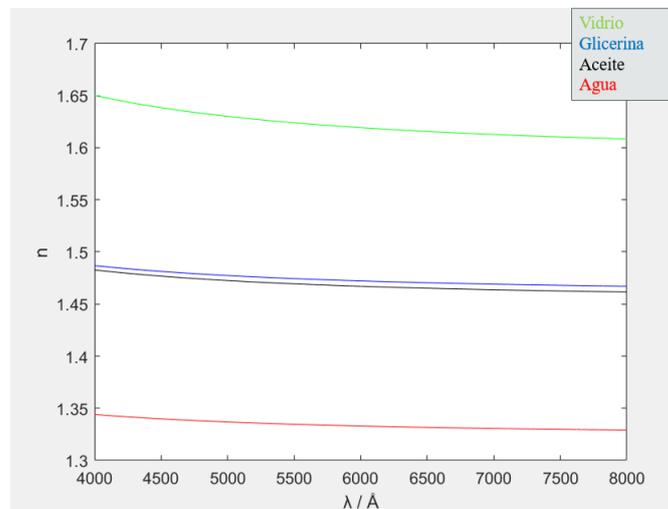


Figura 2.9: Curvas de dispersión obtenidas para los materiales analizados

Se puede apreciar en la figura 2.9, que la curva más alta pertenece al vidrio, con el índice de refracción más alto, mientras que la más baja es el agua. El aceite y la glicerina tienen curvas de dispersión similares, aunque bien diferenciadas.

Si hablamos del número de Abbe, este será menor cuanto mayor sea la pendiente de la curva. Se puede apreciar como la perteneciente al vidrio flint es la que más pendiente tiene, y cómo la glicerina tiene algo más de pendiente que el aceite.

Los valores de los índices de refracción de los materiales se han obtenido de manera muy precisa. Para comprobar los valores de los líquidos, se ha medido el índice de refracción

de los tres con un refractómetro de Abbe, que permite obtener el índice para una longitud de onda intermedia (línea  $\lambda_d$  aproximadamente), con los cuales se podrán comparar los valores obtenidos mediante el goniómetro.

En el caso del vidrio, es un vidrio F2 (vidrio Flint). Para el cual se puede comprobar su índice de refracción y número de Abbe tabulados. [4] [5].

<b>Material</b>	$n_{exp}$	$n_{ref}$	$V_{exp}$	$V_{teo}$
Vidrio F2	$1,62008 \pm 0,00010$	1,62004	$36 \pm 1$	36,27
Agua	$1,33343 \pm 0,00015$	$1,334 \pm 0,003$	$56 \pm 4$	55,78
Aceite	$1,4676 \pm 0,0003$	$1,468 \pm 0,003$	$54 \pm 3$	40-60
Glicerina	$1,47302 \pm 0,00010$	$1,473 \pm 0,003$	$47 \pm 4$	40-50

Tabla 2.1: Valores del índice de refracción ( $n_d$ ) y número de Abbe ( $V$ ). Las columnas  $n_{exp}$  y  $V_{exp}$  corresponden a los valores experimentales obtenidos para  $\lambda_d$  con las medidas del prisma. La columna  $n_{ref}$  corresponde a los valores del índice obtenidos con el refractómetro, que corresponden aproximadamente a  $\lambda_d$ . La columna  $V_{teo}$  corresponde a los valores encontrados en la bibliografía para el número de Abbe de cada material.[6][5]

Se aprecia que los resultados obtenidos para el vidrio analizado son consistentes con la teoría, además de ser considerablemente precisos gracias a la exactitud del goniómetro. En el caso de los fluidos, todos los resultados son compatibles con los valores obtenidos en el refractómetro de Abbe. Respecto al número de Abbe, se obtienen valores dentro del rango esperado. En el caso del aceite, al desconocer sus características, el rango de posibles valores del número de Abbe es más amplio.

En conclusión, se han obtenido resultados muy precisos del índice de refracción para todos los materiales, lo que nos muestra un método relativamente sencillo y muy válido para la obtención de un índice de refracción de cualquier líquido transparente, superando la precisión del refractómetro de Abbe.

Por su parte, los números de Abbe nos muestran como material más dispersivo el vidrio, seguido de la glicerina y el aceite, y el menos dispersivo sería el agua. Estos valores, sin embargo, pueden estar sujetos a cierta variabilidad en relación con la temperatura del líquido.

## Capítulo 3

# Medida de la velocidad de la luz

El objetivo de este experimento es medir la velocidad de la luz en el aire, conociendo la distancia que recorre y midiendo el tiempo que tarda en recorrerla utilizando un osciloscopio capaz de registrar la señal que produce la llegada de un pulso de luz. En la ampliación del experimento, se ha medido la velocidad de la luz en el agua.

### 3.1. Experimento previo

#### 3.1.1. Fundamento teórico

La velocidad de la luz en el vacío es una constante universal, ya conocida, que no solo se define a sí misma, sino que a partir de ella se definen medidas, como el metro, desde que fue incluida oficialmente en el Sistema Internacional de Unidades en 1983. En ese momento, se pasó a conocer la definición del metro como "la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de  $1/299792458$  de segundo" [7]. En ese momento, pasó a ser la constante de referencia para la ciencia. También tiene una estrecha relación con la definición de índice de refracción, que vendrá dado por el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y en el medio por el que viaja la luz.

La forma más intuitiva y sencilla de medir la velocidad de un objeto, es medir el tiempo que tarda en recorrer una distancia conocida. Para la realización de este experimento, este es el método que se utiliza para la medida de la velocidad de la luz en el aire. Se medirá a través de la ecuación:

$$v = x/t \tag{3.1}$$

Donde  $v$  representa el valor de la velocidad de la luz en el medio,  $x$  la distancia recorrida y  $t$  el tiempo que tarda en recorrerla. La velocidad de la luz dependerá del medio en el que se mida de la siguiente manera:

$$v = c/n \tag{3.2}$$

Siendo  $n$  el índice de refracción del medio. En el caso del aire, la velocidad de la luz será aproximadamente  $c = x/t$  ya que  $n \approx 1$ .

#### 3.1.2. Dispositivo y procedimiento experimental

Medir la velocidad de la luz no es una tarea sencilla debido a la magnitud de esta constante en relación con las distancias que entran en juego en un experimento.

El elemento que facilita esta tarea es el osciloscopio, que se encarga de registrar las pequeñas diferencias de tiempo que tarda un haz de luz en viajar de un punto a otro. La precisión de este elemento es de 0,2 ns.

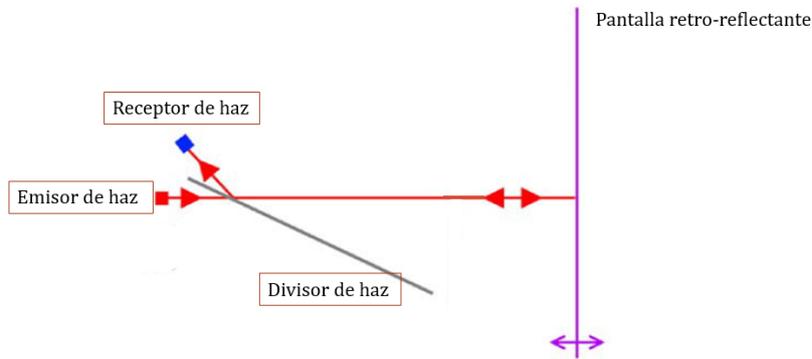


Figura 3.1: Esquema del dispositivo emisor-receptor y pantalla retro-reflectante.[8]

El dispositivo (Figura 3.1), constará de un elemento emisor y receptor de pulsos de luz, conectado a un osciloscopio que mostrará los picos de luz que se reciben. El haz llegará hasta una pantalla retro-reflectante donde el haz se verá reflejado de vuelta hacia la dirección de origen (el dispositivo emisor-receptor). Durante el camino, se puede alargar la trayectoria del haz utilizando espejos, que además, facilitarán la reproducción de este experimento en una habitación.

En el dispositivo emisor-receptor, un LED se encarga de la emisión del pulso de luz, un divisor de haz desvía el haz recibido hacia un fotodetector (receptor de haz).

El procedimiento es el siguiente: primeramente se coloca la pantalla inmediatamente después de la salida del emisor de luz. Esta posición constituye el origen de distancias. Se anota un pico de intensidad en el osciloscopio debido al haz recibido tras haber recorrido 0m. Esta será nuestra referencia equivalente al origen de tiempos. Posteriormente, se hará viajar el haz durante la distancia deseada hasta la pantalla retro-reflectante y se generará otro pico en el osciloscopio, para el cual, si se sustrae el delta de tiempo que indicaba en la referencia  $x = 0$ , se obtendrá la diferencia de tiempo que necesita la luz para viajar una distancia conocida (correspondiente al doble de la distancia emisor-pantalla).

### 3.1.3. Resultados y análisis

Para calcular la velocidad de la luz con este método, se realizan varias medidas variando la distancia que recorre la luz. En este caso se toman medidas para 0 (origen), 2, 4 y 6 metros recorridos. Con estos valores se puede realizar una gráfica y relacionar la pendiente con la velocidad de la luz, tal como se muestra en la figura 3.2

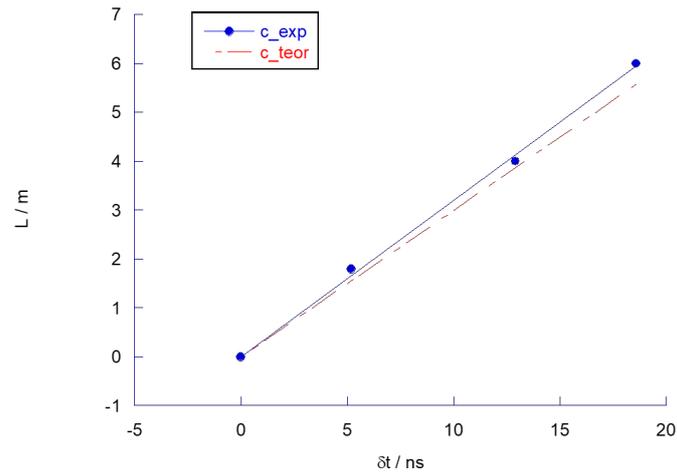


Figura 3.2: Valores de delta de tiempo con respecto a la distancia recorrida por el haz (ajuste rojo). Se compara con el valor conocido de la constante  $c$  (ajuste azul).

Se obtiene un valor de:

$$c = (3,06 \pm 0,05)10^8 m/s$$

Se obtiene un valor ligeramente mayor al conocido de la velocidad de la luz, pero razonablemente próximo como para considerar correcto el experimento realizado. Hay que tener en cuenta que se ha medido la velocidad de la luz haciéndola viajar escasos metros, lo cuál implica un intervalo de tiempo muy pequeño. Con estos valores además, el error relativo asociado a la precisión en las distancias y en los tiempos es importante. Se podría mejorar añadiendo más puntos, pero no es el objetivo.

### 3.2. Variante del experimento

En esta variación del experimento original, se propone medir la velocidad de la luz en un medio diferente al aire, en este caso agua. A partir de este valor, se puede obtener el índice de refracción del medio.

### 3.3. Velocidad de la luz en agua

La velocidad de la luz en el agua se ve reducida por la interacción con el medio ocasionando un retardo en su propagación, esto produce que el índice de refracción del agua sea mayor que 1. Calculando la velocidad también se podrá estimar su índice de refracción.

Para llevar a cabo esta ampliación, se cuenta con un tanque transparente (Figura 3.3) lleno de agua, a través del cual se dirigirá el haz de luz. Dependiendo de la disposición del sistema, el haz atravesará el agua 2 o 4 veces.

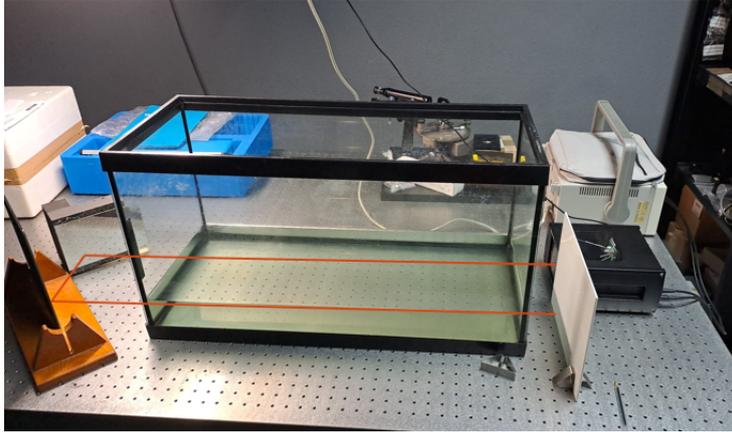


Figura 3.3: Dispositivo para la medida de la velocidad de la luz en el agua.

Se puede observar como el haz se genera en el dispositivo emisor-receptor, atraviesa el tanque de agua, refleja en los espejos, vuelve a atravesar el tanque y llega a la pantalla retro-reflectante. Hará el camino inverso en la vuelta al dispositivo receptor. En esta disposición, el haz pasa hasta 4 veces por el tanque, pero podría colocarse de tal manera que solo pase 2 veces.

Para evitar que el vidrio del tanque afecte a los resultados, en cada medida en la que intervenga el tanque, se realiza una medida con el tanque vacío, y se comparará con el valor obtenido con el tanque lleno. Esto genera una diferencia de tiempo que será la que esté directamente relacionada con el trayecto en el que el haz atraviesa agua en vez de aire.

Para el caso en el que el agua realiza 2 pasos por el tanque, la velocidad de la luz en el agua vendrá dada por la ecuación:

$$c_{agua} = \left(\frac{n-1}{n}\right) \frac{2 \cdot l}{t_{lleno} - t_{vacío}} \quad (3.3)$$

Donde  $l$  es la longitud del tanque, en este caso 73 cm, de forma que  $2l$  será el camino total recorrido por el haz a través del agua,  $t_{lleno}$  representa el tiempo que tarda el haz en realizar el recorrido con el tanque lleno, y  $t_{vacío}$  con el tanque vacío.

Si el haz recorre la longitud del tanque 4 veces:

$$c_{agua} = \left(\frac{n-1}{n}\right) \frac{4 \cdot l}{t_{lleno} - t_{vacío}} \quad (3.4)$$

Para el cálculo del índice de refracción del agua, también dependerá de la cantidad de pasos del haz por el agua de la siguiente manera,  $\Delta n$  será  $n-1$  y  $\Delta t$  será  $t_{lleno} - t_{vacío}$

Para 2 pasos:

$$\Delta n = \frac{c \cdot \Delta t}{2l} \quad (3.5)$$

Mientras que para 4 pasos:

$$\Delta n = \frac{c \cdot \Delta t}{4l} \quad (3.6)$$

Tras realizar las medidas pertinentes en ambos procesos (2 y 4 pasos), se obtienen varios picos de intensidad.

En el caso de 2 pasos por el tanque vacío, se registró un pico a los 28,4 ns, mientras que al llenarlo, el pico se observó a los 30,0 ns. Esto genera un  $\Delta t = 1,6$  ns.

Para el dispositivo configurado para 4 pasos, se obtuvo un pico de intensidad a los 28,0 ns con el tanque vacío y a los 31,2 ns con el tanque lleno de agua, resultando en un  $\Delta t = 3,2$  ns.

Conociendo la longitud del tanque (73 cm) y la diferencia de tiempo que se genera en el paso del haz por el agua, es posible calcular los valores de  $\Delta n$  en el agua mediante las ecuaciones 3.5 y 3.6, que nos proporcionan la diferencia del índice de refracción entre el aire y el agua, por lo que será necesario sumar el índice de refracción del aire. Los valores obtenidos se muestran en 3.1.

Pasos por el tanque	$c_{agua}$ (m/s)	$n_{agua}$
2	$(2,3 \pm 0,3)10^8$	$1,33 \pm 0,02$
4	$((2,26 \pm 0,17)10^8$	$1,329 \pm 0,010$

Tabla 3.1: Valores obtenidos de la velocidad de la luz en agua e índice de refracción del agua para 2 y 4 pasos del haz por el tanque.

### 3.4. Discusión

El objetivo de este experimento era medir la velocidad de la luz en el aire y en el agua mediante un osciloscopio. Los resultados obtenidos nos permitirán evaluar la precisión del método comparando los valores obtenidos con la teoría.

En la medida de la velocidad de la luz en el aire, se obtiene un valor experimental de  $c = (3,06 \pm 0,05)10^8 m/s$  frente al valor conocido de la velocidad de la luz que es de  $c = (2,9979 \cdot 10^8 m/s)$ . Existe una ligera discrepancia entre valores que pueden deberse a errores experimentales. Sin embargo, el valor es lo suficientemente próximo como para validar la efectividad del experimento.

La medida de la velocidad de la luz en el agua ha permitido no solo la medida del propio valor, sino también una estimación del índice de refracción del material que atraviesa la luz, que está directamente relacionado con la velocidad de la luz. Los valores obtenidos son de  $c_{agua2} = (2,3 \pm 0,3)10^8 m/s$  y  $c_{agua4} = (2,26 \pm 0,17)10^8 m/s$  mientras que el valor conocido de la velocidad de la luz es de  $c_a = 2,249 \cdot 10^8 m/s$ . Estos valores coinciden con el valor teórico perfectamente, encontrándose muy cercanos pese a la elevada incertidumbre del resultado. La consistencia entre las dos mediciones refuerza la fiabilidad de los resultados.

El valor del índice de refracción del agua experimental se ha comparado con el valor medido en el refractómetro de Abbe, en el que se ha obtenido un valor de  $n_a = 1,334 \pm 0,003$ , que es compatible con los valores obtenidos mediante los dos métodos:  $n_{agua2} = 1,33 \pm 0,02$ ;  $n_{agua4} = 1,329 \pm 0,010$ .

Otro método que se valoró para la realización del experimento, es hacer pasar mitad del haz por encima del agua y la otra mitad a través de ella. Idealmente obteniendo dos picos, uno debido a la parte de haz que viaja por aire y el otro el correspondiente al agua. Sin embargo, este método no fue posible debido a la baja intensidad que incidía de vuelta

en el fotodetector, que se camufla con el ruido de fondo. Esto podría ser debido (además de la división de intensidad del haz original en dos caminos), a la absorción del agua, que precisamente es mucho mayor en longitudes de onda correspondientes al rojo que en el resto del visible. [9]

En conclusión, es una variación muy interesante de cara a observar la diferencia de velocidad en función del medio por el que viaja la luz, sin embargo, no es el óptimo para obtener valores precisos de la velocidad de la luz ni índice de refracción debido a las limitaciones de espacio y de precisión del dispositivo.

## Capítulo 4

# Producción y análisis de luz polarizada

El objetivo de esta práctica es estudiar diferentes fenómenos relacionados con la polarización de la luz y verificar leyes fundamentales de la óptica polarizada. En concreto, se va a determinar el ángulo de Brewster en una incidencia aire-vidrio, verificar la ley de Malus y se van a producir diferentes tipos de luz circular y elípticamente polarizada.

En la ampliación experimental, se pretende caracterizar láminas retardadoras a partir de la producción de luz elípticamente polarizada. Además, se intentará justificar de forma teórica el resultado obtenido para la elipticidad de un haz de luz en el experimento original.

### 4.1. Experimento previo

#### 4.1.1. Fundamento teórico

Un polarizador es un dispositivo que permite el paso de las componentes de la luz que oscilan en una dirección específica y bloquea las componentes perpendiculares a esa dirección. Por otro lado, una lámina de cuarto de onda ( $\lambda/4$ ) es un elemento óptico anisótropo que introduce un desfase de  $\pi/2$  (90 grados) entre dos componentes ortogonales del campo eléctrico de la luz que pasa a través de ella, componentes que quedan determinadas por los ejes del medio, conocidos como "líneas neutras".

El ángulo de Brewster es el ángulo de incidencia en el cual la componente del campo eléctrico de un haz de luz contenida en el plano de incidencia, no se refleja, resultando que la luz reflejada está completamente polarizada perpendicularmente al plano de incidencia. Este ángulo se define matemáticamente como:

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (4.1)$$

Donde  $\theta_B$  es el ángulo de Brewster,  $n_2$  es el índice de refracción del segundo medio y  $n_1$  el del primer medio.

Identificar este ángulo permite la alineación y caracterización de un polarizador de manera que su eje de transmisión sea paralelo al plano de incidencia, obteniendo una

polarización controlada del haz de luz en un experimento que necesita la caracterización de la polarización.

La Ley de Malus describe cómo varía la intensidad de un haz de luz al pasar por dos polarizadores en función del ángulo  $\alpha$  entre la dirección de transmisión de los dos polarizadores si  $I_0$  es la intensidad inicial del haz:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (4.2)$$

Un haz de luz circularmente polarizado puede describirse como la suma de dos ondas planas en su campo ortogonal de igual amplitud, y con una diferencia de fase de  $90^\circ$ . La dirección del campo eléctrico rota de manera continua, formando una espiral según avanza el haz. Para ser producido, se coloca una lámina retardadora  $\lambda/4$  en la que incide un haz linealmente polarizado. Esta lámina produce un desfase de  $\pi/2$  entre las componentes ordinaria y extraordinaria de la luz. Si la luz polarizada incide sobre la lámina con su campo formando un ángulo de  $45^\circ$  respecto a una de esas direcciones (las líneas neutras de la lámina), las amplitudes de las componentes serán iguales, resultando en luz circularmente polarizada a la salida.

Para luz polarizada linealmente con su campo formando otros ángulos diferentes a  $45^\circ$ , la lámina  $\lambda/4$  genera luz elípticamente polarizada debido a la diferencia de amplitud entre las componentes ordinaria y extraordinaria. La elipticidad de un haz luz se define como la relación entre los ejes mayor y menor de la elipse de polarización:

$$e = \frac{b}{a} \quad (4.3)$$

siendo  $a$  el eje mayor y  $b$  el eje menor.

Para conseguir una elipticidad específica, hay dos posibles orientaciones del campo eléctrico incidente respecto de las líneas neutras que producen el mismo valor de elipticidad:

$$e = \tan \theta_1 \quad ; \quad e = \cot \theta_2 \quad (4.4)$$

siendo  $\theta_1$  y  $\theta_2$  por tanto ángulos complementarios.

Mediante la rotación del polarizador (o de la lámina  $\lambda/4$ ), se ajusta dicha orientación para lograr la elipticidad deseada. La intensidad máxima y mínima observada al rotar el analizador permite obtener experimentalmente la elipticidad del haz producido:

$$e = \sqrt{\frac{I_{\text{mín}}}{I_{\text{máx}}}} \quad (4.5)$$

#### 4.1.2. Dispositivo y procedimiento experimental

El dispositivo estará formado por un banco óptico en el que se ubicarán los diferentes elementos ópticos: un láser que genera el haz de luz, un polarizador, un prisma de vidrio sobre una plataforma rotatoria, una lámina  $\lambda/4$ , y un fotodetector conectado a un multímetro.

Inicialmente se comprueba la obtención del ángulo de Brewster que será clave en la caracterización del polarizador. El dispositivo estará formado por el láser, seguido de un polarizador y un prisma de vidrio en el que se reflejará el haz. (Figura 4.1 )



Figura 4.1: Dispositivo utilizado en el estudio del ángulo de Brewster.

Se varía el ángulo de incidencia y la orientación del polarizador hasta encontrar la intensidad mínima reflejada, idealmente nula. En este momento el haz solo tiene componente paralela al plano de incidencia, por lo que se obtiene un haz linealmente polarizado. La posición del polarizador será fija a partir de este momento.

En la segunda parte (Figura 4.2), se retira el prisma, y se colocan un segundo polarizador que actúa como analizador, y el fotodetector. Se va rotando el analizador para la comprobación de la Ley de Malus.



Figura 4.2: Dispositivo para la comprobación de la ley de Malus.

Por último, la combinación de un haz de luz monocromático, emitido por un láser, con un polarizador y una lámina  $\lambda/4$  permite generar luz polarizada en diversas formas: lineal, circular y elíptica. Para ello, se coloca una lámina  $\lambda/4$  entre el polarizador y el analizador. (Ver figura 4.3)



Figura 4.3: Dispositivo utilizado para la producción de luz circular y elípticamente polarizada.

Para la producción de luz circular, en ángulo entre polarizador y las líneas neutras de la lámina debe ser de  $45^\circ$ , mientras que el ángulo que deben formar para crear un haz con una elipticidad concreta irá descrita por las ecuaciones 4.4.

### 4.1.3. Resultados y análisis

En la primera parte del experimento se ha realizado la medida del ángulo de Brewster a partir de la ecuación 4.1 obteniendo un valor de  $\theta_B = 56^\circ 17' \pm 15'$ . Este ángulo está relacionado con el índice de refracción del prisma. Teniendo en cuenta que el índice del medio exterior es el del aire ( $n_1 = 1$ ), se obtiene un valor de:  $n_2 = 1,50 \pm 0,02$ , que es un valor típico en vidrios.

Para comprobar la ley de Malus retiramos el prisma, colocamos un segundo polarizador que hace las veces de analizador, y se mide la intensidad final en un fotodetector. (Figura 4.4)

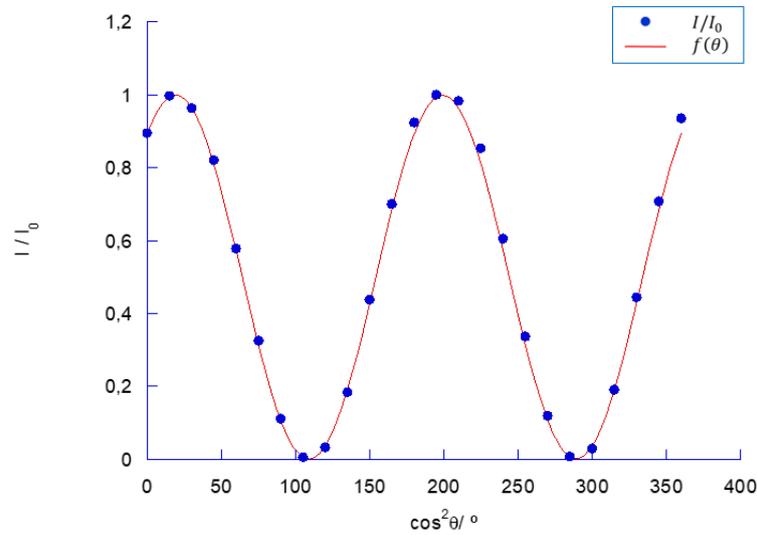


Figura 4.4: Valores de intensidad obtenidos variando el ángulo entre polarizador y analizador. El ajuste es  $f(\theta) = \cos^2(\theta - 19)$

Se obtienen los valores esperados comprobando así la ley de Malus. Se han comenzado las medidas en un ángulo aleatorio entre polarizadores; con el ajuste se ha comprobado que formaban un ángulo de  $19^\circ$  al comenzar las medidas, de tal forma que se obtienen máximos en el momento en el que están alineados ( $0^\circ$ ) y mínimos en el momento que se cruzan ( $90^\circ$ ).

Para la obtención de luz circularmente polarizada, se cruzan polarizador y analizador y se coloca en medio la lámina  $\lambda/4$ , que se debe caracterizar encontrando sus líneas neutras. Una vez conseguido, se giran  $45^\circ$  en ambos sentidos, ya que ambas situaciones corresponden a luz circular. En este punto se toman medidas de la elipticidad. El valor obtenido con el promedio de ambos valores es el siguiente:

$$e = 0,980 \pm 0,008$$

Siendo el valor teórico de elipticidad en luz circular  $e = 1$ .

En el caso del haz elípticamente polarizado, se pretende obtener una elipticidad de (por ejemplo) 0,6. Para ello, a partir de la ecuación 4.4 se obtienen los ángulos que se debe rotar la lámina desfasadora:  $\theta_1 = 30,96^\circ$ ;  $\theta_2 = 59,04^\circ$ . Se pueden rotar estos dos ángulos en ambos sentidos, de forma que se obtienen, en teoría, 4 valores de la elipticidad igual a 0,6. El valor medio final obtenido es de:

$$e = 0,605 \pm 0,007$$

Por lo tanto, el valor obtenido es compatible con lo esperado, que en este caso era una elipticidad de 0,6.

## 4.2. Variante del experimento

En esta variante, el objetivo es caracterizar láminas desfasadoras a partir de la medida de la elipticidad que introducen en un haz de luz linealmente polarizado. Además, se intentará justificar de forma teórica los valores obtenidos en la producción de luz circularmente polarizada (alcanzando típicamente  $e = 0,98$  frente a  $e = 1$  esperado).

### 4.2.1. Luz circularmente polarizada

Las láminas desfasadoras como la  $\lambda/4$  se basan en el fenómeno de la birrefringencia. Esta propiedad óptica de algunos materiales anisótropos genera variaciones en el índice de refracción según la orientación del campo dentro del medio birrefringente. Conduce a la separación del haz de luz en dos componentes: el rayo ordinario, perpendicular al eje óptico del material; y el rayo extraordinario. Este último se verá afectado por las características anisotrópicas del medio, que causará una variación en su velocidad debido a un índice de refracción diferente. En las láminas retardadoras, el eje óptico es paralelo a la superficie, por lo que al incidir luz normalmente, la onda ordinaria y extraordinaria no se desvían pero viajan a velocidades diferentes creando un "retardo" en una componente, y de ahí el nombre.

En el experimento inicial, se ha intentado producir luz circularmente polarizada. Sin embargo, el valor obtenido de la elipticidad es de 0,98, cuando el valor esperado sería de 1 para obtener luz perfectamente circular. Pese a intentar optimizar el dispositivo y las posiciones de los diferentes elementos, no se ha conseguido un valor de elipticidad de 1, a pesar de utilizar la longitud de onda exacta para la que la lámina introduce un desfase de  $\pi/2$ .

En esta ampliación, se intentará justificar esta no obtención de luz circularmente polarizada a través de la birrefringencia del material de la lámina  $\lambda/4$  y de cómo puede afectar a los factores de transmisión dados por las fórmulas de Fresnel. Teóricamente esta propiedad podría afectar a los valores de elipticidad obtenidos debido a que la transmisión del haz del rayo ordinario no sería la misma al del extraordinario, lo que causaría una diferencia en los ejes de la elipse que provoca que no se obtenga  $e = 1$ . (Ver ecuación 4.5).

Para ello, se calcula la diferencia de índice de refracción entre ordinario y extraordinario para producir un desfase  $\delta$  determinado (birrefringencia):  $\Delta n = n_e - n_o$ . Esta relación viene dada por la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} (d \cdot \Delta n) \quad (4.6)$$

Donde  $\delta$  es el desfase que aplica la lámina ( $\pi/2$  en caso de la  $\lambda/4$ ),  $\lambda$  representa la longitud de onda del haz incidente y  $d$  el grosor de la lámina ( $d = 0,5$  mm en nuestro caso). Para una lámina  $\lambda/4$  y  $\lambda = 532$  se obtiene un  $\Delta n = 2,7 \cdot 10^{-4}$ .

Los valores de transmisión vienen dados por las leyes de Fresnel:

$$T_o = \frac{n_o}{n} \cdot (1 - R_o) \quad (4.7)$$

$$T_e = \frac{n_e}{n} \cdot (1 - R_e) \quad (4.8)$$

Siendo  $n_o$  el índice ordinario,  $n_e$  el extraordinario y  $n$  el índice del aire.  $R_e$  y  $R_o$  serán:

$$R_o = \left( \frac{n - n_o}{n + n_o} \right)^2 \quad (4.9)$$

$$R_e = \left( \frac{n - n_e}{n + n_e} \right)^2 \quad (4.10)$$

El valor de interés será la diferencia entre  $T_e$  y  $T_o$ , lo cual indica cómo la birrefringencia de la lámina afecta la diferencia de intensidad entre la componente ordinaria y la extraordinaria

Para el cálculo de los coeficientes de transmisión, se ha estimado un valor de  $n_o = 1.5$ , un valor típico para vidrios. Mientras que el valor del índice extraordinario habrá que añadirle el  $\Delta n$  calculado:  $n_e = 1,50027$ . Se han obtenido unos valores de  $T_e = 0,92160$  y  $T_o = 0,92153$ . La diferencia se traduce en menos de un 0,01 % de amplitud entre componentes por la birrefringencia de la lámina.

Un 0,01 % entre la amplitud del rayo ordinario y el extraordinario teniendo en cuenta que  $A_o = A_e \cdot 0,0001$  y que su relación con la elipticidad es la siguiente:

$$\epsilon = \frac{A_o}{A_e} \quad (4.11)$$

La elipticidad producida por los efectos de la birrefringencia en los factores de transmisión es de:

$$\epsilon = 0,9999$$

Lejos del 0,98 obtenido experimentalmente. Por tanto, se puede afirmar que el efecto de la birrefringencia sobre los factores de transmisión no es el causante de la elipticidad  $e = 0,98$  obtenida frente al  $e = 1$  esperado.

#### **4.2.2. Caracterización de láminas retardadoras**

En esta parte de la ampliación, se caracterizan diferentes láminas retardadoras diferencia de camino  $\Delta = (n_e - n_o)$  se desconoce. Para ello, el dispositivo será idéntico al del producción de luz circular, pero en este caso se colocan las láminas a caracterizar en el lugar de la lámina  $\lambda/4$  de 532 nm. Una forma de plantear esa caracterización es suponer que esa lámina puede ser tipo  $\lambda/4$  pero que ignoramos la  $\lambda$  para la que conseguiría exactamente un desfase de  $\pi/2$ . Ambas formas de caracterizar  $\Delta$  ó  $\lambda(\pi/2)$  son equivalentes

En primer lugar, se encuentran las líneas neutras de la lámina colocándola entre los polarizadores cruzados. A continuación, se giran  $45^\circ$  las líneas neutras de la lámina con el polarizador de tal manera que si fuese, como en el experimento original, una lámina  $\lambda/4$  para 532 nm correspondiente al láser que se usa, se generase luz circularmente polarizada.

Se mide la elipticidad del haz tras el paso por la lámina a caracterizar, y se compara con la obtenida en el experimento inicial. Esta diferencia de elipticidad se podrá relacionar con la diferencia de longitud de onda para la cual esa lámina funcionará como una lámina  $\lambda/4$  y formaría luz circularmente polarizada.

La relación entre la elipticidad obtenida para un láser de longitud de onda  $\lambda_0 = 532$  nm y la longitud de onda para la cual una lámina actuaría como  $\lambda/4$  es la siguiente:

$$\lambda = \frac{\lambda_0 \cdot \pi \cdot 0,987}{4 \cdot \arctan e} \quad (4.12)$$

Donde  $e$  es la elipticidad del haz tras pasar por la lámina a estudio. La ecuación se obtiene de [10] sustituyendo las variables con las características de este experimento. En el caso

de la lámina  $\lambda/2$ , la elipticidad equivalente a una lámina  $\lambda/2$  será  $1 - e$ . Por tanto, se sustituye este valor en la ecuación en vez de la elipticidad obtenida.

Se caracterizarán (Figura 4.5) una lámina  $\lambda/4$  de Hg, dos láminas  $\lambda/4$  y  $\lambda/2$  ( $\delta = \pi$ ) correspondientes al verde de diferencia de camino óptico desconocido, y 3 láminas de celo (retardador uniáxico) de desfase desconocido.

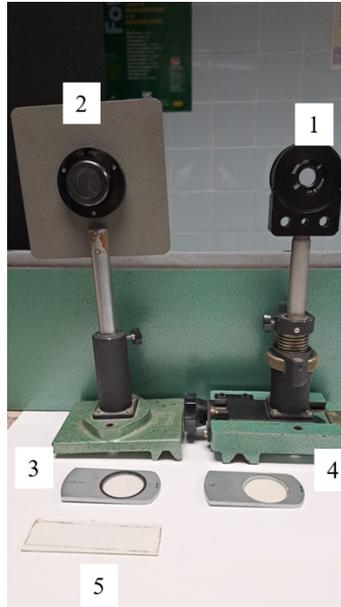


Figura 4.5: Láminas caracterizadas en la ampliación del experimento. 1) Lámina  $\lambda/4$  del experimento inicial (532 nm); 2) Lámina  $\lambda/4$  Hg (546 nm); 3) Lámina  $\lambda/4$  desconocida (en el verde); 4) Lámina  $\lambda/2$  desconocida (en el verde); 5) Lámina de celo.

En la medición de la elipticidad, al desconocer cual de las componentes es mayor, se conocerá el  $\Delta\lambda$  respecto a  $\lambda_0 = 532$  nm. Por ello habrá dos posibles valores de longitud de onda correspondientes a cada lámina desfasadora.

	<b>Elipticidad</b>	<b><math>\lambda</math> (nm)</b>
$\lambda/4$ Hg	$0,930 \pm 0,006$	$(550 \text{ o } 514) \pm 3$
$\lambda/4$ verde	$0,962 \pm 0,002$	$(538 \text{ o } 526) \pm 2$
$\lambda/2$ verde	$0,047 \pm 0,007$	$(542 \text{ o } 522) \pm 3$

Tabla 4.1: Valores obtenidos de elipticidad y longitud de onda para 3 láminas desfasadoras.

Sabiendo que la primera lámina corresponde a mercurio (Hg), se contrastan los valores obtenidos con el valor de la línea de emisión del mercurio:  $\lambda = 546$  nm. Por lo tanto, el valor experimental obtenido que se considera válido es de  $\lambda = (550 \pm 3)$  nm. (Ver tabla 4.1)

Respecto a las láminas correspondientes a un verde desconocido, se espera una longitud de onda similar entre ellas, ya que provienen del mismo fabricante. Efectivamente, se obtienen valores compatibles entre ellos; en ambos casos son valores muy próximos al  $\lambda$  del láser. (Ver tabla 4.1)

Se ha medido igualmente, la elipticidad de una, dos y tres láminas de celo superpuestas (tabla 4.2). El objetivo es observar y analizar experimentalmente como aumenta el desfase

entre componentes para cada capa de celo añadida. Sin embargo, el "phase-wrapping" no permite conocer el desfase exacto que se produce entre las componentes. Esto sucede cuando el desfase sobrepasa el intervalo  $[0, 2\pi]$  y los valores cambian de forma aparentemente aleatoria en lugar de mostrar un aumento continuo.[11]

	<b>Elipticidad</b>	<b><math>\lambda</math> (nm)</b>
1 celo	$0,7231 \pm 0,006$	$(659 \text{ o } 405) \pm 3$
2 celos	$0,2803 \pm 0,0010$	-
3 celos	$0,471 \pm 0,003$	-

Tabla 4.2: Valores obtenidos de elipticidad y longitud de onda para diferentes capas de celo.

El desfase entre componentes que genera el celo es tan grande que no se encuentra un descenso progresivo de elipticidad sino que son 3 valores en los que no se puede asegurar que no se haya producido "phase-wrapping". (Ver tabla 4.2).

### 4.3. Discusión

En la primera parte del experimento se ha caracterizado la dirección de polarización de un polarizador con ayuda del ángulo de Brewster y se ha comprobado experimentalmente la ley de Malus con un ajuste que encaja a la perfección con el obtenido. También se ha producido luz polarizada elípticamente con una elipticidad deseada. En el caso de la luz circular, no se obtiene el esperado valor de  $e = 1$ , sino un valor de 0,98. Esta diferencia se ha intentado justificar teóricamente sin éxito en la ampliación del experimento.

La diferencia de intensidad entre componente ordinaria y extraordinaria causada por la birrefringencia no es suficiente como para justificar en su totalidad la no obtención de luz circular. De hecho, se obtiene que este efecto es prácticamente despreciable en ese orden de magnitud. Por tanto, el resultado de la elipticidad en la producción de luz circular se debe achacar a otra causa que no sea la birrefringencia de la propia lámina retardadora.

En la última parte, se han caracterizado diferentes láminas desfasadoras. Sin embargo, debido al desconocimiento de cuál es la componente mayor y menor en la medida de la elipticidad, solo se conoce la diferencia de longitud de onda entre el  $\lambda_0$  del láser utilizado y la correspondiente a la lámina. En la lámina caracterizada para el mercurio se obtiene un valor cercano al esperado, mientras que en las desconocidas se obtienen dos valores para cada uno, cercanos a  $\lambda_0$ , ambos bastante razonables ya que se encuentran en el verde pero sin resolver la incertidumbre. Por último, en el análisis de las láminas de celo se ha encontrado con el problema de "phase-wrapping" que no permite caracterizar las láminas superpuestas de celo.

## Capítulo 5

# Medida de la focal de una lente

El objetivo inicial de este experimento es medir la distancia focal de una lente convergente realizando la aproximación a lente delgada, mediante dos métodos diferentes: la ecuación de la lente y el método de Bessel. La aproximación a una lente delgada es habitual en óptica geométrica y consiste en suponer que el espesor es nulo, es decir, que las dos superficies que forman la lente cortan al eje en la misma posición.

En la ampliación de la práctica, se aplicarán los mismos métodos y aproximaciones para medir la distancia focal de una lente divergente, algo que requiere de un diseño algo más complejo del experimento.

### 5.1. Experimento previo

#### 5.1.1. Fundamento teórico

La distancia focal de una lente  $f'$ , se puede definir, si se considera una lente delgada, como la distancia desde el centro de la lente hasta el punto donde un haz de rayos paralelos al eje óptico convergen al pasar por la lente. Para calcular este valor se pueden utilizar dos métodos diferentes asumiendo la lente como delgada, esto implica despreciar su grosor, considerando que la refracción ocurre en un único punto:

a) Ecuación de la lente delgada:

En este método, se relaciona la distancia focal de una lente con la posición de un objeto y su imagen:

$$\frac{1}{f'} = -\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \quad (5.1)$$

Donde  $f'$  es la distancia focal de la lente,  $a$  es la distancia de la lente al objeto y  $a'$  la distancia lente-imagen. Se toma como origen de coordenadas la propia lente, por tanto, serán distancias negativas para los elementos que se encuentren a la izquierda de la lente. En caso de una lente convergente, si se tiene un objeto real a la izquierda de la lente más alejada que  $f$  ( $a > -f'$ ), se genera una imagen real a la derecha de la lente,  $a > f'$ . (Figura 5.1)

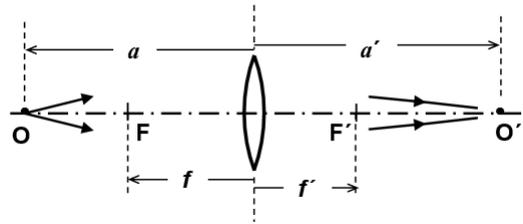


Figura 5.1: Un objeto real  $O$  produce una imagen real  $O'$ .  $a$  es la distancia entre la lente y  $O$ , y  $a'$  entre la lente y la imagen real. Mientras que  $f$  y  $f'$  representan el foco objeto y foco imagen.[12]

b) Método de Bessel, posiciones conjugadas de la lente:

En este segundo método, se mantiene la misma disposición que en la figura 5.1. Ahora, la posición del objeto y de la imagen real del objeto quedan inmóviles y habrá dos posiciones de la lente que cumplan la ecuación 5.2. Esto ocurre para dos posiciones de la lente. A partir de estas dos posiciones se obtiene el valor de  $f'$ . (Figura 5.2).

$$f' = \frac{D^2 - d^2}{4D} \quad (5.2)$$

Donde  $D$  representa la distancia entre  $O$  (objeto) y  $O'$  (imagen real);  $d$  es la distancia entre las dos posiciones de la lente que cumplen la ecuación para ese valor de  $D$ . En el caso de una lente convergente esas dos posiciones de la lente están entre  $O$  y  $O'$ , y se cumple que  $d < D$

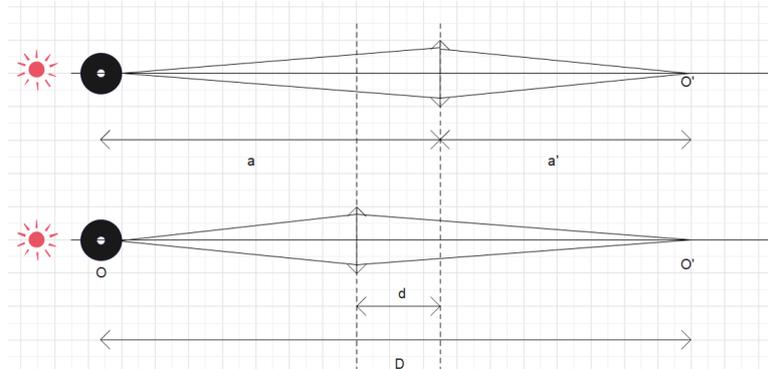


Figura 5.2: Dispositivo con las dos posiciones de la lente para las cuales se genera la imagen en el mismo punto.  $D$  representa la distancia entre  $O$  y  $O'$ ;  $d$  es la distancia entre las dos posiciones de la lente que cumplen la ecuación para ese valor de  $D$ .

### 5.1.2. Dispositivo y procedimiento experimental

El dispositivo experimental estará formado por: un banco óptico de escala milimétrica, donde se colocará una fuente luminosa, seguida de un objeto fuente y una lente convergente con focal desconocida. Se usará un microscopio para observar la imagen del objeto y trasladar su posición al resto de elementos para un buen centrado. La lente utilizada es una lente KPX202, cuya distancia focal nominal se puede encontrar en [13] con un valor de  $f' = 250$  mm.

Para la realización del primer método de la ecuación de la lente, será necesario tomar medidas con el microscopio de las posiciones del objeto, la lente convergente, y la imagen

real del objeto. Con las diferencias entre las posiciones del microscopio, se podrán calcular fácilmente los valores necesarios de  $a$  y  $a'$ . (Figura 5.1)

En el segundo método, con el mismo dispositivo experimental, una vez se obtiene la imagen real del objeto, se fija el microscopio sobre el plano imagen y se desplaza la lente hasta observar en el microscopio una nueva imagen del objeto. (Ver figura 5.2) La distancia entre las dos posiciones de la lente medida en la escala del banco con su propio soporte, permite el cálculo de la focal de la lente a partir de la ecuación 5.2.

Se repiten ambos procesos de medida 5 veces para obtener varios valores de  $f'$  y estimar la precisión de la medida de la focal.

### 5.1.3. Resultados y análisis

a) Ecuación de la lente: Se realizan 5 medidas diferentes de la focal de la lente a partir del primer método. Colocando la lente delgada a diferentes posiciones del objeto y midiendo la distancia a la que se genera la imagen.

	$a$ (cm)	$a'$ (cm)	$f'$ (cm)
1	-46,80	53,40	24,940
2	-42,90	60,35	25,067
3	-41,60	62,70	25,008
4	-59,70	43,00	24,996
5	-49,50	50,60	25,022

Tabla 5.1: Valores obtenidos de la focal de la lente el método de la ecuación de una lente delgada para las 5 repeticiones.

Tras tomar diferentes medidas se obtiene un valor medio con un error calculado a partir de la desviación típica:

$$f' = (25,01 \pm 0,05) \text{ cm}$$

b) Método de Bessel: Para este método, igualmente se coloca la lente a diferentes distancias del objeto. Para cada una se fija el microscopio en el lugar donde se produce la imagen, y se mueve la lente hasta encontrar en el mismo lugar la imagen de nuevo.

	$D$ (cm)	$d$ (cm)	$f'$ (cm)
1	100,20	6,70	24,938
2	103,25	18,10	25,019
3	104,30	21,15	25,003
4	102,70	16,80	24,988
5	100,10	4,30	24,979

Tabla 5.2: Valores obtenidos de la focal de la lente el método de Bessel para las 5 repeticiones.

Se obtiene un valor con un error calculado a partir de la desviación típica:

$$f' = (24,99 \pm 0,03) \text{ cm}$$

Comparando los valores de la focal obtenidos en cada método con el indicado por el fabricante, se comprueba que ambos son compatibles y consistentes con el valor teórico  $f' = 250 \text{ mm}$ .

## 5.2. Variante del experimento

En esta ampliación, el objetivo es extender el procedimiento a la medida de la focal de una lente divergente. La lente divergente utilizada es una lente KPC067, cuya focal nominal se puede encontrar en [14], con un valor de  $f' = -250$  mm.

Se ha medido la focal de una lente divergente a partir de los dos métodos explicados anteriormente:

### 5.2.1. Ecuación de la lente delgada

Manteniendo el dispositivo experimental pero sustituyendo la lente convergente por una divergente, sería imposible la medición dado que la lente divergente no genera una imagen real sino virtual, lo que impide observarla con el microscopio. La solución es generar un objeto virtual cuya posición es fácilmente medible. Para ello se utiliza una lente convergente auxiliar situada delante de la lente problema. (ver figura 5.3)

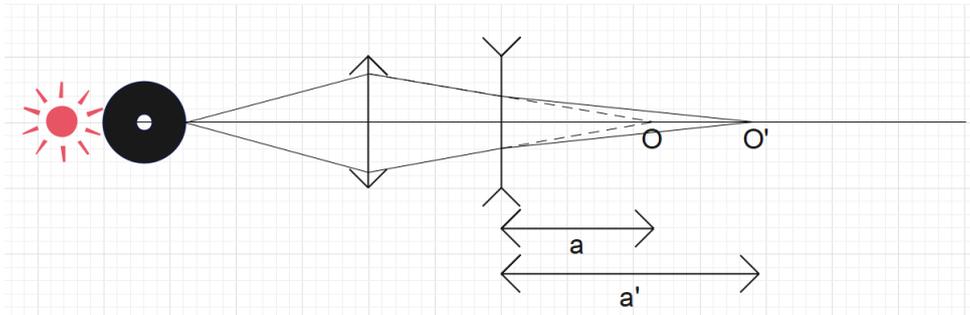


Figura 5.3: Dispositivo utilizado en la medición de la focal de una lente divergente a partir de la ecuación de la lente.

En este caso, se utiliza como objeto la imagen que genera la lente convergente. Por ello, la distancia lente-objeto y lente-imagen serán positivas con  $a' > a$ .

Para la medición, se mantiene fija la posición de la lente convergente (cuya focal no necesitamos conocer) y se varía la de la lente divergente. La posición del objeto se mide fácilmente al retirar la lente divergente.

	$a$ (cm)	$a'$ (cm)	$f'$ (cm)
1	11,80	22,70	-24,574
2	9,20	14,40	25,477
3	5,70	7,40	24,812
4	13,50	29,20	25,108
5	15,20	37,90	25,378

Tabla 5.3: Valores obtenidos de la focal de la lente el método de la ecuación de una lente delgada para las 5 repeticiones en el caso de una lente divergente.

El resultado obtenido obteniendo el error a partir de la desviación típica es el siguiente:

$$f' = (-25,2 \pm 0,3) \text{ cm}$$

### 5.2.2. Método de Bessel

En este caso, se utilizará de igual manera una lente convergente auxiliar para generar la imagen que se utiliza como objeto. Esta se mantiene fija para no variar la posición del objeto. A continuación se coloca la lente divergente como en el caso anterior (Figura 5.4, abajo) para formar la imagen  $O'$  que también se mantendrá fija de acuerdo al método. Es decir, se mantienen fijas las posiciones de  $O$  y  $O'$ . La búsqueda de la segunda posición conjugada no es tan sencilla. Necesitaremos que  $O$  sea real y  $O'$  virtual por lo que se desplaza la lente divergente hasta encontrar el punto en el que se vuelve a generar la imagen en la posición inicial de  $O'$ . Sin embargo, la lente divergente se encuentra a la derecha de  $O'$ , lo cual complica el poder encontrarla (ahora  $d > D$  según la ecuación 5.2). Lo que se hace es añadir una segunda lente convergente auxiliar (cuya focal tampoco necesitamos conocer) que genere una imagen real de  $O'$ , con lo que es irrelevante si  $O'$  es real o virtual. Con el microscopio se puede inspeccionar cómodamente la imagen final y asegurarnos de que la imagen de la lente divergente está en  $O'$ . (Ver figura 5.4)

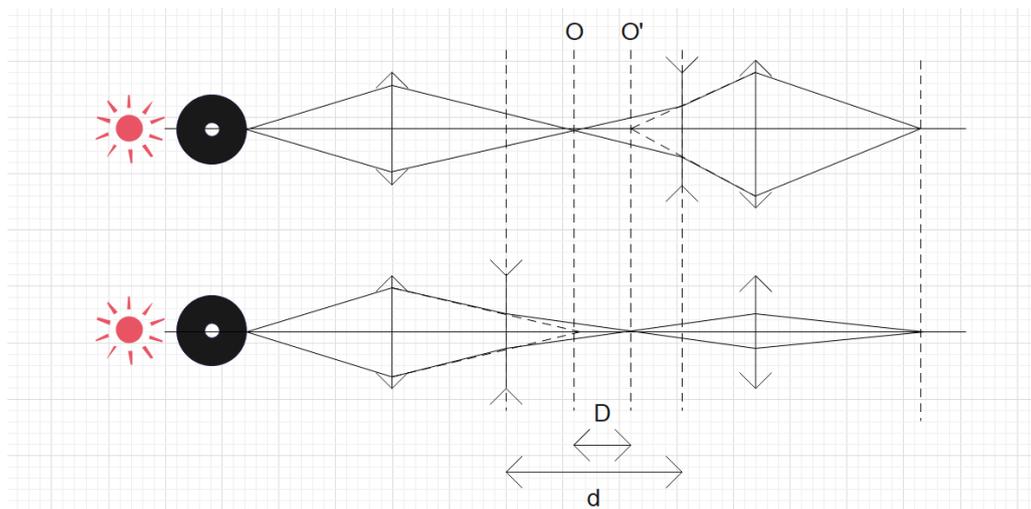


Figura 5.4: Dispositivo utilizado en el método de Bessel para una lente divergente.  $D$  es la distancia entre  $O$  y  $O'$  que se mantiene fija en este método, mientras que  $d$  es la distancia entre las dos posiciones de la lente en las que se cumplen las posiciones de  $O$  y  $O'$ .

Se repite la medida para 5 posiciones diferentes del dispositivo, con lo que se obtiene un valor de la focal de la lente divergente con un error calculado a partir de la desviación típica de:

	$D$ (cm)	$d$ (cm)	$f'$ (cm)
1	13,30	38,50	24,537
2	4,60	22,10	25,394
3	1,90	13,80	24,580
4	4,70	22,10	24,804
5	11,10	35,20	25,130

Tabla 5.4: Valores obtenidos de la focal de la lente el método de Bessel para las 5 repeticiones.

$$f' = (-24,9 \pm 0,2) \text{ cm}$$

Al comparar los valores de la focal de la lente divergente obtenidos con cada método con el indicado por el fabricante, se comprueba la compatibilidad de ambos con el valor teórico  $f' = -250 \text{ mm}$ .

### 5.3. Discusión

En la reproducción del experimento inicial, se ha obtenido el valor de la focal de una lente convergente mediante dos métodos: la ecuación de una lente delgada y el método de Bessel (posiciones conjugadas de la lente). En ambos casos se ha obtenido un valor muy preciso de la focal de la lente, con resultados compatibles entre ellos y con el valor teórico que indica el fabricante.

Por otro lado, se ha modificado el dispositivo experimental para medir la focal de una lente divergente, en el que se han incluido dos lentes convergentes auxiliares para hacer posible la medición. En este caso, se han aplicado igualmente los dos métodos de cálculo de focal de una lente, en los que se han obtenido valores compatibles entre ellos y con el indicado por el fabricante, tal como se muestra en la tabla 5.5 Sin embargo, se obtienen valores menos precisos que en la medida de la focal de una lente convergente debido a la mayor cantidad de elementos implicados que aumentan la incertidumbre del resultado.

Lente	Ec. de la lente	Bessel	Valor nominal
Convergente	$f' = (25,01 \pm 0,05)$ cm	$f' = (24,99 \pm 0,03)$ cm	$f' = 25,0$ cm
Divergente	$f' = (-25,2 \pm 0,3)$ cm	$f' = (-24,9 \pm 0,2)$ cm	$f' = -25,0$ cm

Tabla 5.5: Valores obtenidos de la focal de la lente en cada método utilizado. Los valores teóricos son los proporcionados por el fabricante.

En conclusión, ambos métodos pueden considerarse válidos para la medida de la focal de una lente sea convergente o divergente. Sin embargo, se encuentra más preciso el dispositivo de la medida de la focal de una lente convergente en el que había una única lente implicada.

## Capítulo 6

# Conclusiones

En este trabajo se han revisado y modificado varios experimentos clásicos de óptica para orientarlos hacia nuevos objetivos, principalmente relacionados con la propagación de la luz y la formación de imágenes en el ámbito de la óptica incoherente. A lo largo del desarrollo del proyecto, se han cumplido los objetivos planteados inicialmente, proporcionando una base sólida tanto teórica como experimental para las variantes de los experimentos.

Las tareas realizadas incluyen:

- Realización de un estudio teórico de cada uno de los dispositivos ópticos, revisando los fundamentos necesarios para comprender su funcionamiento.
- Propuesta de posibles mejoras o variantes en los experimentos clásicos, basadas en los principios teóricos revisados.
- Búsqueda de explicaciones a determinados comportamientos experimentales no esperados.
- Verificación experimental de las variantes propuestas, asegurando su validez teórica y su aplicabilidad práctica en el laboratorio.

En cuanto al desarrollo de las variantes de los experimentos, se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- **Transmitancia espectral de filtros de color:** Se ha demostrado la no linealidad del sistema de detección. Pese a que a bajas intensidades funciona prácticamente como lineal, es lógico que tenga un límite para el cual no funcione linealmente debido a la limitación de la fuente del circuito de detección, que es de 38 V. Por lo tanto, se ha dejado claro que, pese a que a bajas intensidades parece dar una respuesta lineal, no lo es para intensidades espectrales más altas como la que puede aportar un láser (He-Ne). Además, se ha justificado el aumento aparente del rango de longitudes de onda en la transmitancia del filtro interferencial, causado por la función aparato. Podemos concluir que este error se puede reducir disminuyendo la anchura de la rendija de salida, sin embargo, nunca será ideal y siempre generará un aumento en el ancho de longitudes de onda para el filtro interferencial. La única forma de no generar este aumento es contando con una rendija que actúe como delta de Dirac; sería tan estrecho que no se podría reproducir el experimento por falta de luminosidad.

- **Medida de la dispersión de un medio:** Se analizó la dispersión en vidrio y se extendió el uso del montaje a líquidos: agua, aceite y glicerina. Con un montaje sencillo, se han medido los índices de refracción de vidrio, agua, aceite y glicerina de manera muy precisa, superando incluso la precisión obtenida en el refractómetro de Abbe con el que se han contrastado los valores experimentales obtenidos (el refractómetro da un valor único para todo el espectro). Igualmente se han obtenido las curvas de dispersión de todos los materiales analizados y el número de Abbe, este último con menor precisión debido al cálculo indirecto de este valor.
- **Medida de la velocidad de la luz:** Se ha medido la velocidad de la luz en aire y en agua. Se han medido para las distancias del laboratorio (escasos metros), lo cual es sorprendente teniendo en cuenta el intervalo de tiempo tan pequeño que se mide. Aun así, se obtienen valores experimentales razonablemente próximos a los conocidos, lo que valida el experimento. De todas formas, este experimento tiene un valor más didáctico, siendo muy útil para comprender cómo varía la propagación de luz según el medio que atraviesa, y no tanto como experimento de precisión. Sería interesante analizar la velocidad de la luz en otros medios líquidos transparentes, aunque implicaría una gran cantidad de líquido en caso de mantener el mismo dispositivo, con los consiguientes problemas de manipulación y limpieza.
- **Producción y análisis de luz polarizada:** Se han verificado experimentalmente leyes de la óptica relativas a la polarización y se caracterizaron diversas láminas desfasadoras mediante la producción de luz circular y elípticamente polarizada. En la medida de la elipticidad de luz circular, se obtiene un máximo de elipticidad de 0,98, el cual se intentó justificar sin éxito a causa de la diferencia en factores de transmisión producida por la propia birrefringencia de la lámina. En cuanto a la caracterización de láminas, se obtienen dos posibles valores de la longitud de onda a la que corresponde cada lámina. Ambigüedad que se podría eliminar realizando el mismo ejercicio con un láser adicional con diferente longitud de onda.
- **Medida de la distancia focal de una lente:** Se midió la distancia focal de lentes convergentes y divergentes utilizando los métodos de la ecuación de la lente delgada y el método de las posiciones conjugadas o de Bessel. La medida de la focal de la lente divergente es menos precisa, ya que se necesita una lente convergente adicional que introduce error en las medidas de las posiciones objeto e imagen.

En conclusión, este trabajo ha demostrado la viabilidad y utilidad de adaptar y modificar experimentos clásicos de óptica para orientarlos a nuevos objetivos. Los resultados obtenidos no solo son válidos teóricamente, sino que también son prácticos y reproducibles en el laboratorio.

# Bibliografía

- [1] University of Cantabria. *P-4. v.2.5 Transmitancia espectral de filtros de color*. Laboratorio de Física III, Grado en Física, UC. Material Aula Virtual. (Cited in pages 5 y 8.)
- [2] Fernando Revilla. *Convolución de dos campanas de gauss*, 2014. (Cited in page 12.)
- [3] University of Cantabria. *Medida de la dispersión en un medio*. Laboratorio de Física III, Grado en Física, UC. Material Aula Virtual. (Cited in pages 16 y 17.)
- [4] Ohara Corporation. Pbm2y optical glass. (Cited in page 24.)
- [5] RefractiveIndex.info. Refractive index database, 2024. (Cited in page 24.)
- [6] National Institutes of Health (NIH). Optical properties of water, 2024. (Cited in page 24.)
- [7] Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM). Resolution 1 of the 17th cgpm (1983). *International Bureau of Weights and Measures (BIPM)*, 81(7):91, 1983. (Cited in page 25.)
- [8] University of Cantabria. *Velocidad de la luz: Retardo de un pulso de luz retrorreflejado a cierta distancia*. Laboratorio de Física III, Grado en Física, UC. Material Aula Virtual. (Cited in page 26.)
- [9] George M. Hale and Marvin R. Querry. Optical constants of water in the 200-nm to 200-mm wavelength region. *Applied Optics*, 12(3):555–563, 1973. (Cited in page 30.)
- [10] Justiniano Casas. *Óptica*. Addison wesley, Madrid, España, 2002. Sección sobre la representación de luz polarizada. (Cited in page 36.)
- [11] Max Born and Emil Wolf. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge University Press, 1999. (Cited in page 38.)
- [12] University of Cantabria. *Determinación de la distancia focal de una lente*. Laboratorio de Física III, Grado en Física, UC. Material Aula Virtual. (Cited in page 40.)
- [13] Kpx202 - plano convex lens,  $\varnothing$  25.4 mm, effective focal length 250 mm, n-bk7. <https://www.newport.com/p/KPX202>. (Cited in page 40.)
- [14] Kpc067 - plano concave lens,  $\varnothing$  25.4 mm, effective focal length -250 mm, n-bk7. <https://www.newport.com/p/KPC067>. (Cited in page 42.)