



*Facultad
de
Ciencias*

Diseño de un polarímetro de Jones para caracterizar muestras no despolarizantes

(Design of a Jones polarimeter for
non-depolarizing samples characterization)

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN FISICA

Autor: Izan Calderón Vázquez

Director: Fernando Moreno
Gracia

Co-director: Saul Antonio
Rosales Mendoza

Febrero 2024

A mi abuelo Paco.

Un agradecimiento a mi familia por el apoyo en el estrés que suponen los estudios y por haber ahorrado para pagar lo que debería ser gratis. Un agradecimiento también a mis amigos que me aguantan cada día y me sacan de casa de vez en cuando, que sino sería poco más que un hongo.

Resumen

Este trabajo se centra en el diseño, desarrollo, y validación experimental de un polarímetro de Jones simplificado para caracterizar muestras no despolarizantes. Mediante simulaciones que avanzan progresivamente en dificultad hasta alcanzar una simulación general dentro de la aproximación utilizada y una adecuada experimentación, se construyó un polarímetro computacional que, a través de algoritmos de optimización, analiza los datos experimentales para determinar los parámetros ópticos de las muestras. Se demostró la capacidad del dispositivo para analizar diversas muestras con precisión del 1% para los coeficientes de transmisión y de $\pm 1^\circ$ para los parámetros angulares, aunque se identificaron limitaciones en ciertas aplicaciones específicas, como la caracterización de soluciones de azúcar, sugiriendo la necesidad de optimización y calibración futuras.

Summary

This work focuses on the design, development, and experimental validation of a simplified Jones polarimeter to characterise non-depolarising samples. By means of simulations that progressively advance in difficulty until a general simulation within the approximation used and a suitable experimentation, a computational polarimeter was built that, through optimisation algorithms, analyses the experimental data to determine the optical parameters of the samples. The ability of the device to analyse various samples with an accuracy of 1 % for the transmission coefficients and $\pm 1^\circ$ for the angular parameters was demonstrated, although limitations were identified in certain specific applications, such as the characterisation of sugar solutions, suggesting the need for future optimisation and calibration.

Índice

Índice	I
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
2 Marco teórico	3
3 Métodos	9
3.1 Simulaciones	10
3.2 Polarímetro computacional	13
3.3 Experimental	15
4 Resultados	19
4.1 Simulación general	19
4.2 Polarímetro	19
5 Conclusiones	27
Bibliografía	29
Apéndice	31
Índice de Figuras	45
Índice de Tablas	49

1

Introducción

1.1 Motivación

En física, la rama de la óptica es uno de sus campos de con más aplicaciones prácticas en distintos ámbitos, ya sean industriales, médicos, de telecomunicaciones etc. Teniendo en cuenta esta variedad de aplicaciones, algunas aun en exploración, la motivación de este proyecto aparece por el interés que suscita la versatilidad de este campo. En particular, en este trabajo se ha tratado de profundizar en aspectos relativos a la propiedad inherente de las ondas electromagnéticas que es su capacidad de polarizarse, y en este sentido cómo afecta a esta propiedad la interacción con medios materiales. Entre las herramientas matemáticas más usadas para tratar estos problemas, cuando no se da el fenómeno de despolarización, se encuentra el álgebra matricial de Jones, técnica de gran valor matemático debido a su robustez a la hora de calcular cómo se transmite la polarización de una onda electromagnética a través de un medio material no despolarizante. La polarización puede sufrir alteraciones al interaccionar con un determinado medio, de las cuales se puede extraer información tanto de su composición como de su estructura. Desde el punto de vista experimental, los cambios sufridos por la polarización de una onda electromagnética cuando interacciona con un sistema material, se determinan a partir de instrumentos conocidos como elipsómetros, y en su forma más general como polarímetros.

Encompasando los intereses de este proyecto, parecería lógico llegar a la conclusión de que el tema que tiene que tratar este trabajo sea la polarimetría para la caracterización de parámetros ópticos de distintos elementos ópticos. Estos parámetros pueden llegar a ser esenciales para el montaje de sistemas ópticos para los que se necesita saber con precisión los parámetros de sus componentes individuales para poder calcular correctamente el desempeño final del sistema. Esta caracterización de muestras ya se usa en contextos industriales [1] o para la caracterización de tecnologías visuales [2] además de utilizarse en campos médicos y biológicos tanto para distinción de tejidos biológicos [3] como para identificación de tejido canceroso [4]. Esta rama biomédica es más un estudio

activo que una tecnología asentada lo que hace la investigación en este campo más interesante debido a sus posibles futuras aplicaciones.

1.2 Objetivos

La disposición normal de un polarímetro consta de 6 elementos, el sistema de emisión de luz, un polarizador que permita obtener luz linealmente polarizada, una lámina retardadora que permita obtener estados elípticos de polarización y la misma disposición anterior cambiando la fuente de luz por un medidor de luz.

El carácter de este trabajo es estudiar un polarímetro simplificado a 4 elementos eliminando las láminas retardadoras de la disposición. Este estudio se intenta hacer mediante la programación de un simulador de resultados de ese polarímetro con su posterior comparación con los resultados obtenidos de manera experimental con un polarímetro de esas características en el laboratorio.

2

Marco teórico

La luz es una onda electromagnética, lo que significa que es una perturbación ondulatoria formada por campos eléctricos y magnéticos que se propagan de forma coordinada a través del espacio regidos por las leyes de Maxwell. Dada una dirección de propagación de la luz, los campos eléctrico y magnético oscilan en direcciones perpendiculares a la dirección de propagación. Cuando no se puede determinar estas direcciones, la luz se denomina natural o despolarizada.

La polarización de la luz es una propiedad de las ondas electromagnéticas que se refiere a la orientación específica de las oscilaciones del campo eléctrico asociado. A diferencia de las ondas no polarizadas, en la luz polarizada la forma de oscilar de sus campos eléctrico y magnético está completamente determinada. Si esta forma es lineal, se dice que la luz está polarizada linealmente. En este caso, la oscilación del vector campo eléctrico (y del magnético) sigue una dirección rectilínea perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Si esta oscilación se puede descomponer en forma de dos lineales perpendiculares entre sí y con un desfase constante, se tiene luz polarizada elípticamente. Para el caso particular de que el desfase sea de 90° y ambas oscilaciones se den con la misma amplitud en cuyo caso se dice que la luz está polarizada circularmente.

Usualmente, el concepto de polarización está ligado a la orientación del campo eléctrico por lo que resulta innecesario mencionar el campo magnético asociado ya que éste es siempre perpendicular al campo eléctrico para toda onda electromagnética propagante. La relación entre el campo eléctrico E y la inducción magnética B es la siguiente

$$B = \frac{E}{c} \quad (2.1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío. El vector de poynting representa la intensidad instantánea de la luz que fluye a través de un área perpendicular a la propagación y se describe de la siguiente forma

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{B} \Rightarrow |S| = \frac{1}{\mu} E \cdot B \sin \theta \quad (2.2)$$

donde μ es la permeabilidad magnética del medio y θ el ángulo entre vectores.

A partir de las ecuaciones 2.1 y 2.2 para el caso de una onda plana se tiene que la intensidad es proporcional a $\frac{E^2}{c}$.

La luz polarizada se puede representar matemáticamente de diferentes maneras, una de las más utilizadas y la que se usará y explicará en este trabajo es la representación matricial. Dentro de esta hay distintos tipos de matrices utilizadas en polarimetría: los vectores de Jones, el vector de polarización y los parámetros de Stokes.

1. Los vectores de Jones: válidos en la representación de un frente de onda plano y monocromático que se propaga a lo largo de un eje arbitrario y normalmente asociado al eje Z y consiste de dos componentes complejas perpendiculares entre sí y al eje de propagación que contienen la información de la polarización. Los cambios en la polarización asociados a la interacción de la luz con un sistema material se representan mediante una matriz de dimensión 2x2 denominada matriz de Jones que actuando sobre el vector de Jones de la luz incidente nos proporciona matemáticamente el vector de Jones de la luz después de la interacción.
2. Los vectores de polarización: válidos para representar un frente de onda monocromático en una dirección arbitraria. Están compuestos por 3 elementos complejos que contienen la información de la polarización de la luz. Los cambios en la polarización asociados a la interacción de la luz con un sistema material se representan mediante una matriz de dimensión 3x3 denominada matriz de rayos con polarización, que funciona análogamente a la matriz de Jones.
3. Los parámetros de Stokes: válidos para la representación de luz incoherente en su dirección del campo eléctrico en una dirección arbitraria normalmente asociada al eje z como en el caso de Jones. Consisten en 4 elementos reales que contienen información de la polarización de la luz. Los cambios en la polarización asociados a la interacción de la luz con un sistema material se representan mediante una matriz de dimensión 4x4 denominada matriz de Mueller que actúa de forma análoga a la matriz de Jones.

Cabe destacar que cuando se habla de luz monocromática se está utilizando un ideal matemático ya que no existe la luz completamente monocromática dado que hasta las fuentes de emisión estrecha como una fuente láser tiene una anchura espectral asociada a su pico de emisión. Aun así a efectos de las fuentes de luz utilizadas, la luz puede tomarse como monocromática.

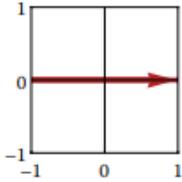
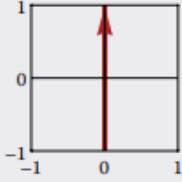
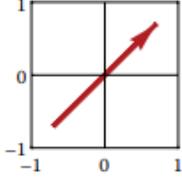
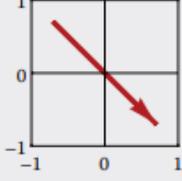
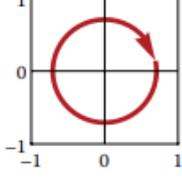
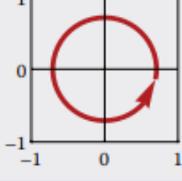
La representación sobre la que se profundizará en este trabajo es la asociada al método matricial de Jones.

La óptica de Jones al asumir la propagación sobre el eje Z puede obviar la componente eléctrica en este eje ya que el campo eléctrico nunca es paralelo al eje de propagación. Esto permite a los vectores de Jones alejarse de la repre-

sentación de los vectores de polarización facilitando así el trabajo matemático al eliminar una dimensión para todo el cálculo matricial. Un vector de Jones general para representar un determinado estado de polarización viene dado por

$$J = e^{-i\cdot\phi_x} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \cdot e^{-i\cdot\phi} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

La figura 2.1.

Polarization State	Jones Vector	Polarization Ellipse
Horizontal, 0°	$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	
Vertical, 90°	$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	
45°	$45 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$	
135°	$135 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$	
Right circular	$\mathbf{R} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$	
Left circular	$\mathbf{L} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$	

The orientation is measured from horizontal x -axis and increasing counterclockwise.

Figura 2.1: Representación de Jones de alguno de los estados de polarización de la luz más interesantes con su representación vectorial así como una representación gráfica. Es importante recalcar que el criterio de signos utilizado a lo largo de todo este trabajo es el indicado en la figura y por ende se considera que la dirección creciente de la polarización es la antihoraria.

representa ciertos casos particulares interesantes.

Además de estos estados básicos de polarización es importante tener en cuenta que a cualquier estado de polarización se le puede aplicar un giro de un ángulo θ con la siguiente matriz de rotación

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

En general, la interacción de una onda electromagnética polarizada con un sistema material puede producir sobre la polarización de la luz incidente 3 efectos principales: La diatenuación, el retardo y la despolarización.

1. La diatenuación, que denotaremos D , tiene que ver con el paso de la luz a través de sistemas dicroicos cuya respuesta óptica es dependiente de la polarización de la luz dejando así pasar la luz polarizada en una dirección y atenuando la luz polarizada en la dirección perpendicular. Este fenómeno es en el que se fundamentan muchos de los polarizadores lineales. Aunque muchas veces se toma los polarizadores lineales como polarizadores ideales ($D = 1$), esto no es así ya que rara vez un polarizador tiene tal eficacia que elimina del todo una componente. Por este motivo el factor D puede tener valores entre 0 y 1 y viene definido por la siguiente ecuación.

$$D = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} + T_{min}} \quad (2.5)$$

donde T_{max} es el coeficiente de transmisión del eje con mayor transmisión y T_{min} el coeficiente de transmisión del eje con menor transmisión.

2. El retardo es un fenómeno que está normalmente asociado a la birrefringencia del material del que está hecho el sistema y que aparece cuando dicho material presenta anisotropía óptica. Este fenómeno se utiliza principalmente para fabricar láminas retardadoras. Una vez más los retardadores no suelen ser ideales, la luz que atraviesa un retardador real suele sufrir pérdidas por transmisión y a veces una pequeña diatenuación.
3. La despolarización es un fenómeno que sufre la luz al encontrarse con algunos materiales que la dispersan de tal forma que a pesar de que la luz incidente tenga un estado de polarización perfectamente definido, tras la interacción con el sistema, la polarización de onda resultante no queda perfectamente determinada y pasa a ser luz despolarizada o parcialmente polarizada. Este fenómeno no se puede describir numericamente con el formalismo de Jones y se requiere de un método más general como el de la representación matricial de Mueller.

A parte de estos efectos, es importante introducir el concepto de elipticidad. Este describe cómo un material interactúa con diferentes polarizaciones, esencialmente indicando la preferencia estructural por una polarización sobre otra. Matemáticamente, se asocia con los autovectores de la matriz de Jones, definiendo cómo el material afecta a los estados de polarización incidentes. Más que alterar la polarización incidente en sí, la elipticidad, junto con la orientación de los ejes principales, determina qué estados de polarización permanecen inalterados, afectando únicamente su amplitud y fase global pero no la fase relativa

entre componentes. Cada matriz de Jones posee un par de estos parámetros, esenciales para entender la interacción de la luz con materiales a través de cambios en la polarización. Esta propiedad es menos común pero no por ello menos interesante ya que es la causante de distintos fenómenos como puede ser la «actividad óptica», que por ejemplo presenta una disolución acuosa de azúcar. Este sistema cambia la dirección de polarización de un haz polarizado linealmente incidente sin atenuar su intensidad [11]. Este efecto suele tener relación con materiales quirales (aquellos cuya imagen especular no da como resultado ellos mismos) y está también relacionado a la anisotropía de los materiales y en algunos casos puede ser inducido mediante la aplicación de campos eléctricos o magnéticos [12].

El efecto de la despolarización se puede ver en muchos materiales distintos, por ejemplo, en aquellos compuestos por muchas fibras entrelazadas en direcciones aleatorias o más concretamente, en casos importantes como pueden ser las muestras biológicas. Este efecto no puede ser representado con el álgebra de Jones por lo que su matriz característica no existe, siendo el álgebra de Mueller la apropiada cuando se presenta este efecto y que en este trabajo no abordaremos.

La diatenuación se ve bien representada en los comunes polarizadores lineales o más correctamente diatenuadores lineales. Su matriz general característica es la siguiente

$$DL(\theta, T_1, T_2) = \begin{bmatrix} T_1 \cdot \cos^2(\theta) + T_2 \cdot \sin^2(\theta) & (T_1 - T_2) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \\ (T_1 - T_2) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) & T_1 \cdot \sin^2(\theta) + T_2 \cdot \cos^2(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Dónde θ es el ángulo de inclinación del diatenuador, T_1 es el coeficiente de transmisión del eje principal y T_2 el coeficiente de transmisión del eje secundario, perpendicular al anterior. El caso del polarizador lineal ideal sería aquél que tiene unos coeficientes $T_1 = 1, T_2 = 0$ para una inclinación arbitraria de forma que sólo se permite el paso de luz por el eje al que se quiere polarizar esa luz y no se inducen pérdidas en ese eje.

Para el caso del retardo se tiene como ejemplo común una lámina retardadora cuya matriz general característica es la siguiente

$$RL(\delta, \theta) = \begin{bmatrix} e^{-i\frac{\delta}{2}} \cdot \cos^2(\theta) + e^{i\frac{\delta}{2}} \cdot \sin^2(\theta) & -i \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \sin(2\theta) \\ -i \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \sin(2\theta) & e^{i\frac{\delta}{2}} \cdot \cos^2(\theta) + e^{-i\frac{\delta}{2}} \cdot \sin^2(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Donde δ representa el retardo de la lámina y θ su inclinación. Los casos más comunes e interesantes son aquellos que tienen un valor de retardo de $\delta = \frac{\pi}{2}$ teniendo así una lámina retardadora $\frac{\lambda}{4}$ o el caso $\delta = \pi$ para una lámina retardadora $\frac{\lambda}{2}$.

El elemento que combina todos los factores(excluyendo la despolarización) sería una lámina retardadora elíptica real, cuya matriz de Jones característica viene dada por [?].

$$J(T_1, T_2, \theta, \delta, \Psi) =$$

$$\begin{bmatrix} T_1 \cdot \cos^2(\theta) \cdot e^{-i \cdot \frac{\delta}{2}} + T_2 \cdot \sin^2(\theta) \cdot e^{i \cdot \frac{\delta}{2}} & (T_1 \cdot e^{-i \cdot \frac{\delta}{2}} - T_2 \cdot e^{i \cdot \frac{\delta}{2}}) \cdot \sin(\theta) \cos(\theta) e^{-i \cdot \Psi} \\ (T_1 \cdot e^{-i \cdot \frac{\delta}{2}} - T_2 \cdot e^{i \cdot \frac{\delta}{2}}) \cdot \sin(\theta) \cos(\theta) e^{i \cdot \Psi} & T_1 \cdot \sin^2(\theta) \cdot e^{-i \cdot \frac{\delta}{2}} + T_2 \cdot \cos^2(\theta) \cdot e^{i \cdot \frac{\delta}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

donde T_1, T_2, δ, θ son los parámetros explicados para las láminas retardadoras y los diatenuadores lineales y Ψ es la elipticidad. Con esta matriz de Jones se puede obtener la matriz de cualquier componente óptica individual variando los valores de los parámetros. La obtención de la matriz de una componente óptica compuesta por distintos elementos no tiene por que ser el resultado de modificar los valores de parámetros de la matriz dada por 2.

Para tener una matriz para cualquier tipo elemento óptico o sistema formado por diferentes elementos ópticos hay que recurrir a la matriz general de Jones

$$J = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

donde a, b, c y d son constantes complejas con amplitud y fase.

El problema de utilizar matrices de Jones generales es lo poco intuitivo de sus parámetros ya que no tienen una traducción directa a efectos normalmente manejados, evitando así poder simular a placer un elemento con facilidad.

3

Métodos

El sistema polarimétrico estudiado en este trabajo es el que se puede ver en la figura 3.1 donde se ve que se han eliminado las láminas retardadoras de la configuración normal de 6 elementos simplificando el sistema a 4 elementos más la muestra.



Figura 3.1: Esquema de la disposición del polarímetro estudiado.

En la figura se puede ver también que ambos polarizadores giran, el analizador con distinta velocidad angular que el polarizador de entrada. El giro se usa para el estudio del efecto de la muestra sobre distintas direcciones de polarización de la luz incidente. Al tomar unos polarizadores en rotación con una razón de giro de valor 5 (necesario que sea un número entero para obtener un ciclo), se tiene que después de un giro de 180° del polarizador de entrada, el sistema se encuentra en la situación inicial. Al resultado de la medición de la intensidad en uno de estos barridos angulares se le llama ciclo de Fourier, dado su comportamiento periódico.

La programación tanto de las simulaciones como del polarímetro computacional (término utilizado para denominar a la parte del programa encargada de darle los valores a los parámetros de una muestra medida) se ha hecho en python y los módulos de código externos utilizados a lo largo de todo el trabajo son los mostrados en el código del apéndice 1.

Las representaciones gráficas se han hecho utilizando distintas funciones del módulo *matplotlib* de python [5].

3.1 Simulaciones

Antes de abordar la parte experimental de este trabajo, un estudio del problema a abordar mediante herramientas de simulación computacional puede ayudar a entender el problema y a facilitar la puesta en marcha del experimento. De esta forma, uno de los objetivos de este trabajo es poder simular el resultado obtenido de una única muestra cuyos parámetros hayan sido introducidos en la simulación. Para hacer esto se han intentado simular primero muestras sencillas y se han ido añadiendo nuevos parámetros hasta obtener la simulación general del retardador elíptico real.

Para comenzar se hizo una simulación con la matriz identidad $J = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ para probar el cálculo matricial e introducir las funciones del polarizador de salida del sistema y del cálculo de la intensidad una vez atravesado el sistema. La función del polarizador de salida es la representada en el código del apéndice 2 y consiste en la definición de una matriz nula de tamaño 2x2 y la posterior definición de sus elementos de matriz dependiendo en este caso del ángulo de inclinación θ .

La función del cálculo de intensidad en cambio es la representada en el código del apéndice 3. Esta función simula el paso de la luz a través del polarímetro haciendo los cálculos del estado de la luz elemento a elemento mediante cálculo matricial, primero a través de una muestra y luego a través de un polarizador de salida (analizador), estos cálculos vienen dados por

$$E_f = P_2 \cdot J \cdot E_i = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{i1} \\ E_{i2} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

donde P_2 representa la matriz de Jones del analizador con sus elementos de matriz, J representa la matriz de Jones de la muestra con sus elementos de matriz, E_i representa el vector de Jones de la luz incidente con sus elementos de matriz y E_f representa el estado final de la luz.

La intensidad del haz de salida tras atravesar todo el sistema se obtiene derivada de este cálculo ya que E_f es un vector columna del que se puede obtener la intensidad con el siguiente cálculo

$$I = |E_{f1}|^2 + |E_{f2}|^2 \quad (3.2)$$

Esta primera simulación se ha hecho con una luz E_i con una polarización vertical como se representa en la figura 2.1 y sólo se ha introducido rotación en el analizador. El resultado, como cabía esperar, representa a la perfección la ley

de Malus [6] como se puede ver en la figura 3.2. En el caso representado se comienza con los dos polarizadores cruzados.

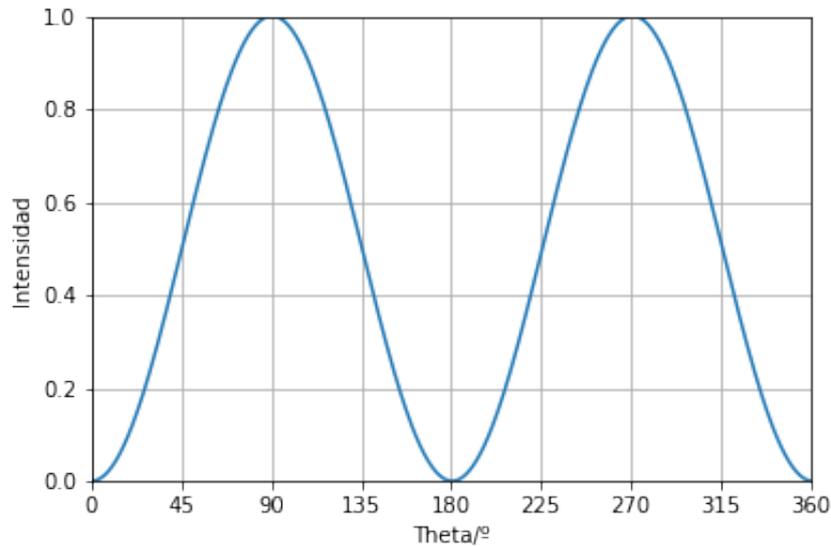


Figura 3.2: Simulación de la intensidad de salida de una muestra de aire o vacío a través del polarímetro en función del ángulo de giro del analizador

La representación se ha obtenido con un sencillo bucle que recorre 360° y calcula con la función del apéndice 3 la intensidad de salida cambiando la orientación del analizador para cada grado.

Una vez analizado el correcto comportamiento de este primer caso elemental, se introdujo un elemento óptico distinto del vacío y por ende con diferente matriz de Jones. Este elemento es una lámina retardadora ideal $\lambda/4$ orientado a 45° con respecto a la posición vertical (posición de inicio del polarizador de entrada) como la de la ecuación 2.7 con los valores adecuados para cada parámetro $\theta = 45^\circ, \delta = \pi/2$. Las funciones utilizadas son las mismas que en la simulación anterior.

El resultado de esta simulación es el mostrado en la figura 3.3.

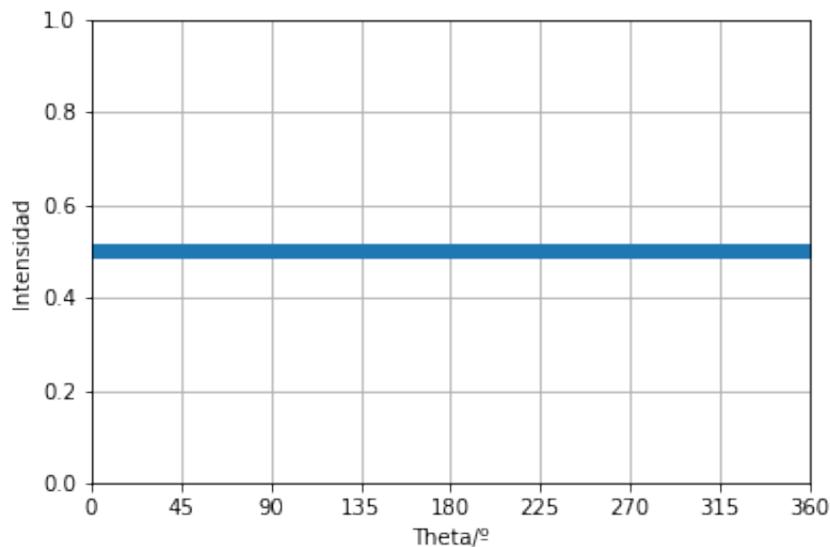


Figura 3.3: Simulación de la intensidad de salida con una muestra de un retardador $\lambda/4$ ideal orientado a 45° con el eje vertical en función del ángulo de giro del analizador.

Cuando una lámina retardadora $\lambda/4$ recibe luz linealmente polarizada a 45° , desfasa una componente de esa luz un cuarto de longitud de onda dando como resultado una luz circular, dando como resultado final la mitad de la intensidad de luz inicial al perderse una componente de polarización en el analizador.

Los resultados anteriores muestran que el formalismo de Jones empleado funciona con lo que el siguiente paso consiste en introducir el giro sincronizado del polarizador de entrada con el de salida. La razón de giro utilizada ha sido 5 durante todo el trabajo ya que es lo que se tenía programado para el montaje experimental. Primero se introdujo el giro en base a la definición con una función de la matriz de rotación pero al final se cambió de opinión y se redefinió la luz después del primer polarizador E_i de forma que dependiese del ángulo de inclinación ϕ del primer polarizador $E_i = \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{bmatrix}$. De esta forma el giro del analizador se define multiplicando el ángulo ϕ por la razón de giro utilizada (5 en todos los casos).

Una vez introducido el giro se probó el programa introduciendo distintas matrices de Jones para comprobar el efecto individual de cada uno de los parámetros del retardador elíptico real. Para hacer esto se simulaban distintas láminas retardadoras, tanto ideales como elípticas con distintos valores de elipticidad, retardo e inclinación. También se introdujeron coeficientes de transmisión en un diatenuador lineal. Finalmente se combinaron todos los parámetros y se refinó el código para poder simular el retardador elíptico real (con el que al modificar los valores de los parámetros se pueden simular todos los elementos anteriormente mencionados).

Para obtener este simulador general se aumentó la precisión asumiendo que el polarizador de salida no sería ideal aunque sí de gran calidad al ser comercial

y se sustituyó el código del apéndice 2 por el código del apéndice 4 en el que se introdujeron los coeficientes de transmisión del eje principal y del secundario. Además de este cambio también se introdujo una función que define la matriz de Jones de la muestra a analizar. Esta función se puede ver en el código del apéndice 5 y se introdujo para no tener que cambiar el cuerpo del código cada vez que se quisiese simular un elemento distinto. A su vez cualquier elemento mencionado anteriormente se puede simular con esta matriz de Jones como la de la ecuación 2 con lo que es más conveniente tenerla definida y cambiar los valores de los parámetros en la compilación final del código, en este caso llamada *main*. Finalmente se introdujo una función *Resultado* vista en el código del apéndice 6 que calcula la intensidad de salida del sistema para todos los ángulos simulados. Esta función se introdujo tanto por comodidad como por previsión de la entonces futura programación del polarímetro computacional.

Finalmente se define el *main* de la simulación en el que se introducen los valores de los parámetros, se definen los ángulos sobre los que se hace la simulación, se representan los datos y se guardan tanto los datos en formato csv, como la representación gráfica en formato png. En este *main* se hace la simulación tanto de los datos de calibración como de los datos de la muestra, los datos de calibración se han de obtener introduciendo datos de la muestra equivalentes al vacío, véase la matriz de Jones identidad. Este *main* se puede ver con sus debidas anotaciones en el código del apéndice 7.

3.2 Polarímetro computacional

Habiéndose probado la robustez de la simulación del sistema polarimétrico, se puede utilizar este trabajo previo para intentar ajustar automáticamente el ciclo de Fourier de una simulación con el ciclo de Fourier medido en el laboratorio para que coincidan y determinar así los parámetros de la muestra real ya que deben de coincidir con los de la simulación.

Para determinar los parámetros de la muestra sin necesidad de tener conocimientos en polarimetría, se ha definido una función de mérito a minimizar de forma que cuando esta función tenga valor "0", se tendrá una coincidencia entre el ciclo medido y el simulado. Esta función se puede ver en la ecuación 3.3 y será usada para todos los métodos de minimización utilizados.

$$\varepsilon = \overline{[M - S]^2} \quad (3.3)$$

Donde ε es la función de mérito (no confundir con la constante dieléctrica), M son las intensidades experimentales y S las intensidades simuladas.

Para conseguir un polarímetro computacional hay varios caminos, los utilizados en este trabajo son: la optimización mediante funciones de código o el barrido de todos los valores posibles y la correspondiente elección del resultado que coincida con la medida.

La primera forma utilizada fue el barrido en valores de cada parámetro de la función de calibrado. Este método también se usó después para la obtención de los parámetros de la muestra. Teóricamente una función de barrido debería de obtener el resultado exacto dentro de la sensibilidad usada en el barrido siempre y cuando la simulación de los resultados funcione correctamente. El barrido para el calibrado se puede ver en el código del apéndice 8 donde *lista1* son los valores angulares de la medición y *lista 2* los valores en intensidad de la medición. *t1p0*, *t2p0* y *offset0* son las horquillas de datos sobre las que se tiene que hacer el barrido y *tol_off* y *tol_t* la anchura de cada paso que se haga en el barrido.

La función de barrido no garantiza la precisión exacta en la determinación de parámetros debido a su naturaleza individual. Se requiere asumir valores iniciales para aquellos parámetros no barridos, como en la función del apéndice 8, donde se presuponen valores para *t1p* y *t2p*. Aunque esto no representa un problema mayor para el calibrado, asumiendo valores cercanos a lo ideal y con menos variables, para muestras reales estas suposiciones pueden ser erróneas y afectar la precisión. Para mejorar esto, se sugiere un barrido pentadimensional como el del código del apéndice 11, que ofrece mayor exactitud pero incrementa significativamente el costo computacional.

Viendo el pobre desempeño del uso de barridos se decidió prescindir de esta aproximación y se cambió a la optimización mediante funciones de código. Con este objetivo se utilizó la función *minimize* del submódulo *optimize* del módulo *scipy* de python [7]. El uso de estas funciones se puede ver en el código del apéndice 9 para el calibrado del sistema y en el código del apéndice 10 para la obtención de los parámetros de Jones de la muestra. Como se puede observar es un conjunto de código más compacto. Además es significativamente más rápido que la función de barrido. No por eso es instantáneamente mejor ya que la minimización depende de los valores iniciales dados y puede encontrar mínimos locales para ciertas combinaciones de parámetros.

En la minimización de la muestra ha sido necesario definir el método utilizado(Nelder Mead)[8] dado que se han probado distintos métodos proporcionados por la librería de la función y ese ha demostrado ser el más adecuado. También es el método de la librería más similar al método "Simplex"[9] utilizado en algunas minimizaciones en matlab que se sabe que es adecuado para este propósito ya que evita el uso de derivadas y así es más propenso a no dar como resultado mínimos locales. Es importante definir los límites sobre los que el programa puede buscar el mínimo ya que podría encontrar un resultado fuera del rango que se quiere inspeccionar de no ser así. Esto tampoco sería un error serio ya que al ser parámetros angulares, los efectos de estos son periódicos. Ese es el motivo por el que sólo se mira hasta los 180° ya que a partir de ahí sería repetir el ciclo de Fourier.

La minimización tiene el problema de los valores iniciales ya que no se llega a un resultado óptimo sin definirlos correctamente. A este problema se le han encontrado dos soluciones, la observación de las intensidades obtenidas con la muestra y su correspondiente estimación de valores iniciales, para lo que se ne-

cesita tener cierto conocimiento del comportamiento de los parámetros, o el uso del barrido general del apéndice 11 con una precisión menor a la requerida como resultado final, que si bien tiene un coste temporal significativamente mayor al de la minimización, es un coste asumible para la mayoría de situaciones. El problema del uso del barrido es que al bajar tanto la precisión el riesgo de saltarse el mínimo global y tomar como valores iniciales una combinación de valores cercana a un mínimo local aumenta significativamente dando así lugar a un resultado final erróneo. Por este motivo en el trabajo se ha decidido utilizar la estimación visual de la muestra nunca dejando de tener en cuenta la posibilidad del barrido.

Una vez definidas todas las funciones a utilizar queda programar un lector de datos y el *main* del polarímetro. La parte de la lectura de datos se puede ver en el código del apéndice 12. Esta parte realmente está incompleta ya que lee los datos de la simulación pero cuando se leen los datos experimentales falta introducir un factor de corrección en la intensidad ya que esta no se mide normalizada.

El *main* del polarímetro computacional se puede ver en el código del apéndice 13 donde se aúnan todos los métodos utilizados y se definen los límites de búsqueda de resultado y los valores iniciales para la minimización para finalmente obtener los parámetros de calibra y de Jones de la muestra. Después se representan gráficamente tanto los datos experimentales como la simulación con los parámetros obtenidos para comprobar que el resultado coincide.

3.3 Experimental

Para preparar el montaje experimental se alinearon los dispositivos a mano de forma iterativa de tal manera que se fueron colocando los dispositivos en distintas posiciones hasta que se encontraron las posiciones adecuadas.

La fuente de luz utilizada para todas las medidas es un láser supercontinuo que se puede ver en la figura 3.4 cuyo haz se pasa por una fibra óptica multimodo para que pierda la coherencia y tener luz «natural» con comportamiento completamente despolarizado. Ese nuevo haz de luz se pasa por un monocromador para seleccionar una parte estrecha en torno a una longitud de onda con la que se quiere trabajar, normalmente la longitud que mayor respuesta da el medidor. Este monocromador está dentro de una caja que impide la interferencia con el mismo ya que es altamente sensible y una pequeña interferencia podría ocasionar cambios en las condiciones de este sistema. Esta caja con el monocromador se puede ver en la figura 3.5. La anchura espectral aproximada del filtro monocromador es de unos 50nm. Este haz «monocromático» despolarizado se pasa por otra fibra óptica para llevarlo hasta el montaje donde se colima y pasa a ser óptima para la medición.

Las primeras medidas que se hicieron se tomaron a mano sin utilizar el sistema de medida automática. Esto se hizo tanto para familiarizarse con el montaje, co-

mo para tener un grupo de medidas de control. El montaje utilizado para estas medidas se puede ver en la figura 3.6.

La selección de longitud de onda central se hizo con distintos valores para las medidas automáticas y las manuales. Para las mediciones manuales se utilizó una longitud de onda central de 600nm y la respuesta obtenido fue de $154\mu\text{W}$. El valor de la intensidad obtenido es necesario para encompasar las medidas de intensidad entre los valores 1 y 0.

En el caso de la medición automática se hizo un barrido en el espectro visible y se vio que la mayor respuesta del fotodetector se da para la longitud de onda central de 542nm indicada por el monocromador y su espectro se puede ver en la figura 3.7.



Figura 3.4: Láser supercontinuo utilizado en el montaje



Figura 3.5: Caja conectada al láser supercontinuo, contiene la fibra óptica multimodo y el monocromador.

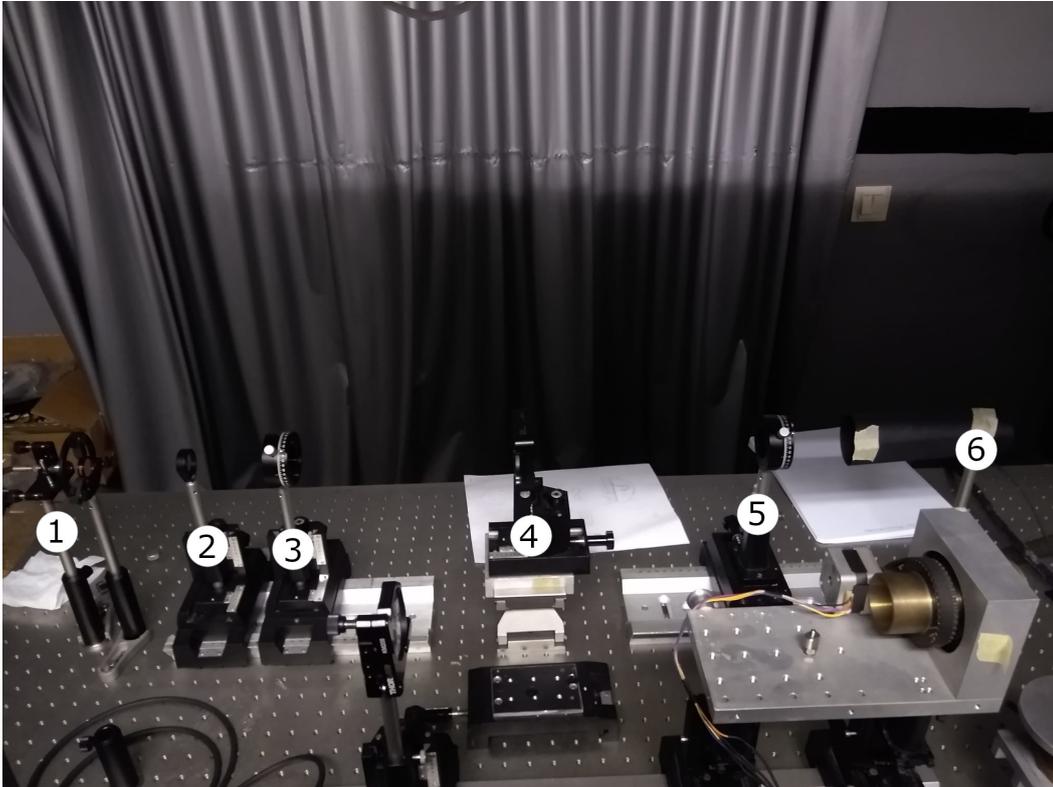


Figura 3.6: Montaje experimental para las primeras medidas, el elemento número 1 corresponde a la fuente de luz(fibra proveniente de la caja de la figura 3.5), el elemento número 2 corresponde a la lente colimadora, el elemento número 3 corresponde al polarizador de entrada del sistema, el elemento número 4 corresponde al soporte donde se posicionan las muestras, el elemento número 5 corresponde a el polarizador de salida(analizador) y el elemento número 6 corresponde al fotodetector, al que se le puso un cono de cartón negro para eliminar el ruido por luz ambiente.

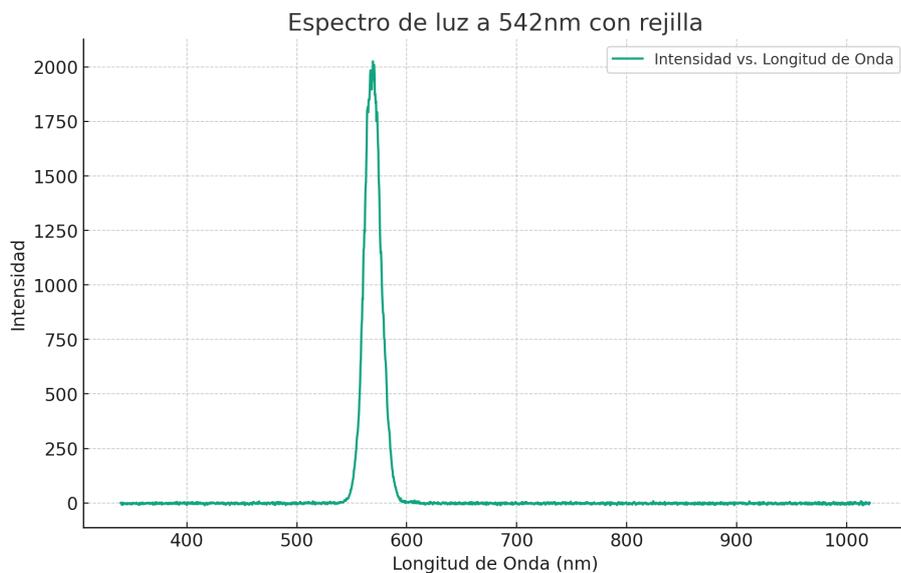


Figura 3.7: Respecta del fotodetector respecto a la longitud de onda para un valor de onda central del monocromador de 542nm.

Los elementos que se midieron a mano fueron: el vacío(aire) para tener la cali-

bración del sistema, una lámina retardadora, dos polarizadores que se pueden observar en la figura 3.8 y el analizador utilizado en el sistema de medición automática.

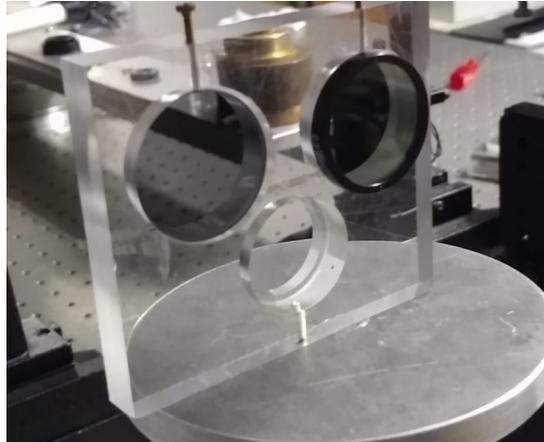


Figura 3.8: Polarizadores utilizados en la medición manual del polarímetro.

Teniendo el grupo de medidas de control se procedió a cambiar de sistema y empezar con la medición en el sistema automático. Este sistema es igual en disposición con la diferencia de que ambos polarizadores tienen dos motores que automatizan el mecanismo de medida haciendo los giros correspondientes y tomando medidas para los ángulos indicados.

Con el sistema automático se tomaron medidas de elementos cuyo comportamiento es menos claro que el de los elementos comerciales utilizados con anterioridad. Los elementos medidos fueron: capas de celofán, que se sabe que en su construcción sufren estiramientos unidireccionales generando así una anisotropía inducida en el material obteniéndose así un retardo [10] (este fenómeno se conoce como fotoelasticidad). Se midió también un tubo de 20cm de largo relleno con agua con azúcar en disolución en distintas concentraciones para comprobar la anteriormente mencionada actividad óptica [11] y finalmente se midió un polarizador circular de una cámara para comprobar los límites del sistema ya que se sabe que este elemento está compuesto por dos subelementos, un polarizador y una lámina retardadora a 45° de inclinación con el polarizador para obtenerse con esta combinación luz circular. Pevio a todas las medidas obviamente se midió el sistema sin muestra para tener el sistema calibrado ya que los polarizadores para la medición manual y automática son distintos.

4

Resultados

4.1 Simulación general

Después de varias iteraciones y un avance de complejidad paulatino se ha conseguido una simulación capaz de obtener el resultado de la intensidad de una medición de cualquier muestra única con su matriz de Jones caracterizada como un retardador elíptico real para un polarímetro de doble rotación. No se han encontrado fallos en la simulación más allá de no poder dar lugar al resultado de la intensidad de un sistema compuesto por varios elementos sin ser esto un problema ya que no es el propósito de este trabajo.

El funcionamiento final de esta simulación se lleva a cabo sin un gran coste computacional y consecuentemente a gran velocidad.

4.2 Polarímetro

Antes de proceder al análisis de las muestras medidas en el laboratorio se han probado los límites de análisis del polarímetro utilizando datos generados con la simulación general. Esto se debe a que con la simulación se pueden probar todo tipo de situaciones específicas con valores para cada parámetro a placer y en un tiempo muy reducido. De esta manera se han determinado los límites del polarímetro.

Probando con distintas combinaciones se ha observado que el polarímetro es poco preciso para los valores límite de los parámetros angulares, por ejemplo, para offsets de $\pm 90^\circ$ en el calibrado el programa intenta invertir el resultado de las transmisiones y da valores erróneos para el offset. Esto ocurre también para todos los parámetros angulares de la muestra y es independiente del valor inicial dado. El motivo de este fallo probablemente se deba a que al medirse ciclos de Fourier, el ciclo se repetiría a partir de ese valor por lo que el programa no sabe si dar el valor máximo de inclinación o el mínimo. También se puede deber a que

al estar la minimización limitada a un rango de valores, el programa no puede comprobar el resultado de la simulación para valores que superan el límite. Esta limitación no es muy grande ya que ese límite que en cuanto el valor del offset se aleja 2° del límite, el programa vuelve a encontrar el valor adecuado.

La precisión del polarímetro se ha estimado en $\pm 1^\circ$ para los parámetros angulares de la muestra, $\pm 0.1^\circ$ para el offset y $\pm 0,01$ para los coeficientes de transmisión. El programa suele acertar con el número específico una vez se redondea el valor obtenido a los decimales buscados pero ya que el método de minimización por código no tiene limitación de decimales, este trabaja con muchos más decimales de los buscados y por ello puede encontrar soluciones iguales variando los parámetros en decimales normalmente no contemplados. Esto es una fuente de error del programa que no suele suponer un problema ya que el resultado normalmente buscado se hace con una tolerancia igual a la precisión del programa.

La tolerancia del programa a los valores iniciales es alta, especialmente para los coeficientes de transmisión ya que puede llegar a soportar una discrepancia entre el valor inicial del valor real de la mitad del rango de búsqueda. Para los parámetros angulares la sensibilidad aumenta y a mayor es la discrepancia de los valores iniciales al valor real mayor es el error cometido en la obtención del resto de parámetros, esto es así hasta un umbral indeterminado en el que se deja de encontrar una solución aceptable. Cuando se alcanza este umbral se suele ver que en la gráfica de comparación los datos experimentales y los simulados no coinciden con un margen visual notable. Este margen visual es un indicativo de que se deberían de cambiar los valores iniciales y hacer otra iteración al análisis de parámetros. Los coeficientes de transmisión son los más identificables ya que tienen una relación directa y clara con los máximos de la gráfica por lo que determinar un valor inicial para los mismos es sencillo, el resto de variables requieren de más intentos y entendimiento de su funcionamiento aunque cabe recalcar que la elipticidad es un parámetro relativamente poco común y sus efectos se ven en un desplazamiento lateral de las intensidades en función del ángulo respecto a la medida de calibrado.

Otro efecto que tiene el programa en ocasiones es el cambio de orden entre coeficientes de transmisión. Esto nunca debería ser así dado que por definición el coeficiente de transmisión mayor es el equivalente al eje preferente y este eje es sobre el que se toman las inclinaciones. Este problema tiene solución sencilla ya que los resultado numéricos no son erróneos por lo que sólo hay que redefinir cual de los dos ejes es el preferente. El suceso ocurre porque el programa no tiene ninguna limitación que diga que el eje T1 sea el preferente.

Las primeras medidas llevadas a cabo como se explicó con anterioridad fueron el calibrado del sistema (medida con el aire como muestra), y la medición con una lámina retardadora como muestra sin utilizarse los motores para la medición automática y con un espaciado entre medidas de 5° . Esta comparación se puede ver en la figura 4.1 donde después de utilizar el programa se han obtenido los parámetros vistos en la tabla 4.1. Los valores del calibrado son los mismos para todas las medidas sin sistema de automatización ya que no se modificó el

sistema entre medidas.

	T1	T2	$\theta/^\circ$	$\delta/^\circ$	$\Psi/^\circ$	t1p	t2p	offset/°
Lámina retardadora	0,95	0,99	50	82	11	0,78	0,0	-6,5

Tabla 4.1: Conjunto de datos obtenidos para la lámina retardadora y para el calibrado del sistema con el ajuste del polarímetro.

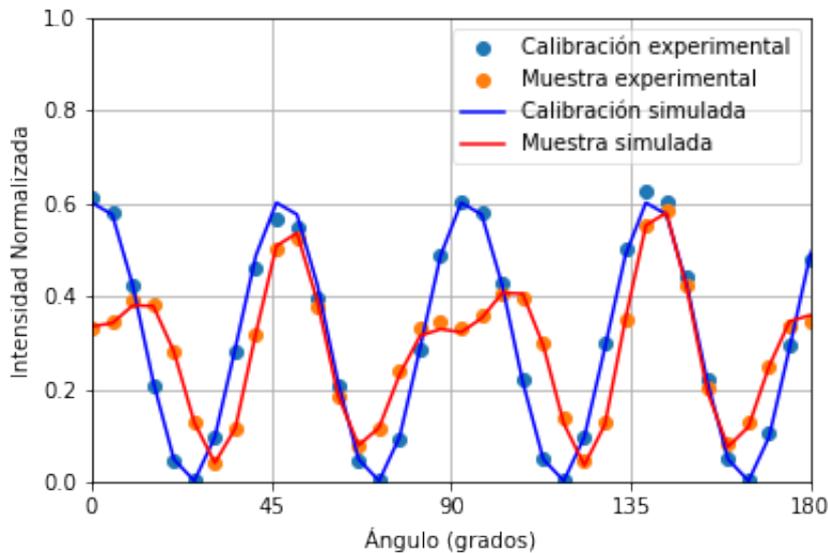


Figura 4.1: Representación gráfica de la comparación de la intensidad de salida del sistema con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado y una lámina retardadora como muestra.

En los resultados de la medición de la lámina retardadora de la figura 4.1 se puede ver la gran utilidad que tiene el programa ya que anterior a su uso no se habría supuesto que una lámina retardadora como la medida posee elipticidad y por ende se podría haber introducido un elemento mal caracterizado en un sistema impidiendo su correcto funcionamiento.

Las dos medidas posteriores son en las que se usan los polarizadores de la figura 3.8 como muestra. La representación de ambos resultados se puede ver en las figuras 4.2 y 4.3. Los parámetros obtenidos son los vistos en la tabla 4.2. Estos resultados prueban una vez más la solidez del programa ya que de antemano se sabía que ambos polarizadores tenían las mismas características y estaban a 90° de inclinación el uno del otro.

	T1	T2	$\theta/^\circ$	$\delta/^\circ$	$\Psi/^\circ$
Derecha	0,81	0,0	103	0	0
Izquierda	0,81	0,0	11	0	0

Tabla 4.2: Conjunto de datos obtenidos para los polarizadores de la figura 3.8 con el ajuste del polarímetro.

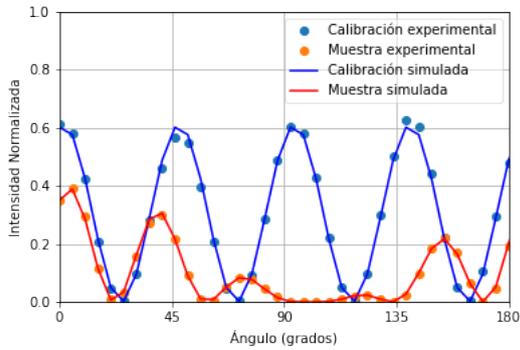


Figura 4.2: Representación gráfica de la comparación de la intensidad de salida del sistema con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado y el polarizador de la derecha de la figura 3.8 como muestra.

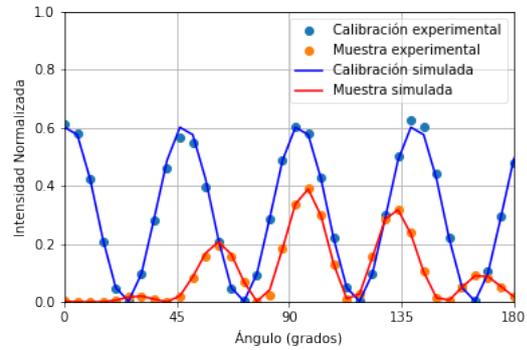


Figura 4.3: Representación gráfica de la comparación de la intensidad de salida del sistema con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado y el polarizador de la izquierda de la figura 3.8 como muestra.

Para finalizar con la medición manual se caracterizó el analizador del sistema automático ya que ambos sistemas utilizan distinto analizador. La representación gráfica de resultados para este polarizador se puede ver en la figura 4.4 de la que se obtuvieron los valores de los parámetros de la tabla 4.3. Los resultados relevantes a la hora de la calibración del sistema automático son los coeficientes de transmisión y el seguro de que el diatenuador no tiene retardo ni elipticidad.

	T1	T2	$\theta/^\circ$	$\delta/^\circ$	$\Psi/^\circ$
Derecha	0,81	0,0	103	0	0
Izquierda	0,81	0,0	11	0	0

Tabla 4.3: Conjunto de datos obtenidos para el polarizador de salida utilizado en el sistema de medición automático con el ajuste del polarímetro.

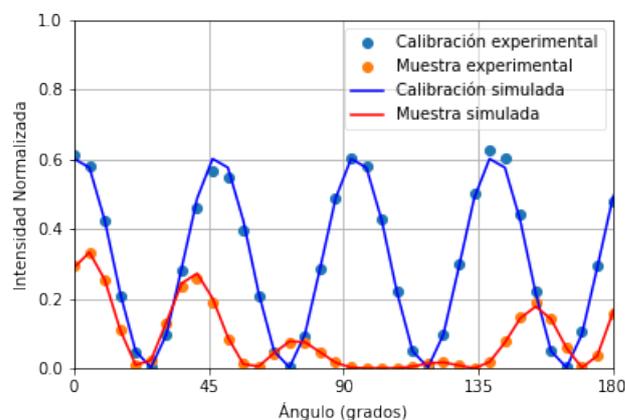


Figura 4.4: Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema manual y el analizador del sistema automático como muestra.

A la hora de hacer las mediciones automáticas se tomaron todas las medidas hechas con un paso entre medidas de $2,25^\circ$. Después de revisar las medidas y notar discrepancias entre valores esperados en los resultados se vio tomando otra medida del vacío que se había producido un offset inexistente en la primera medida probablemente causado porque en algún momento durante la medida el motor causó algún deslizamiento con los polarizadores.

Para corregir este error se midió el offset del calibrado inicial y el del calibrado final y se dividió entre las medidas tomadas en el proceso (8 en ese momento). Asumiendo que el offset añadido es constante en cada medida se utilizó esta corrección para obtener los valores adecuados para cada medida. Aun con la corrección, este problema en la calibración puede llevar a errores inesperados en los valores de los parámetros de cada muestra medida con este sistema automático. Los offset medidos fueron de $9,4^\circ$ para la última medida y de $0,5^\circ$ para la primera.

Para comenzar se midieron 3 ciclos de Fourier consecutivos cambiando la muestra de, primero 1 capa de celo a 2 y 3 respectivamente, los parámetros obtenidos para estas medidas son los vistos en la tabla 4.4. Las representaciones gráficas de estas comparaciones se pueden ver en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7.

	T1	T2	$\theta/^\circ$	$\delta/^\circ$	$\Psi/^\circ$
1 capa	0,68	0,68	123	17	95
2 capas	0,5	0,5	110	20	101
3 capas	0,39	0,39	103	26	89

Tabla 4.4: Conjunto de datos obtenido para distintas capas de celo en el ajuste del polarímetro.

En los resultados se puede ver que hay una disminución de los coeficientes de transmisión a medida que se pone más material dado que absorbe o dispersa más luz. También se puede ver un aumento del retardo entre medidas aunque este no tiene un comportamiento lineal. El resto de parámetros también varía erráticamente. Esto se puede deber a que cada vez que se ha hecho una medida se ha tenido que modificar la muestra pudiendo haber causado pequeñas modificaciones evitando así llegar a conclusiones sólidas más allá de haber comprobado el efecto retardador del celo.

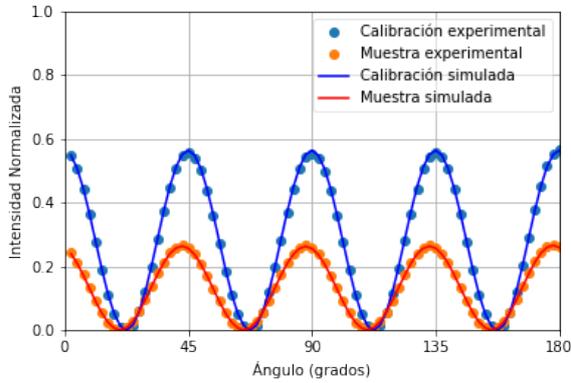


Figura 4.5: Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y 1 capa de celo como muestra.

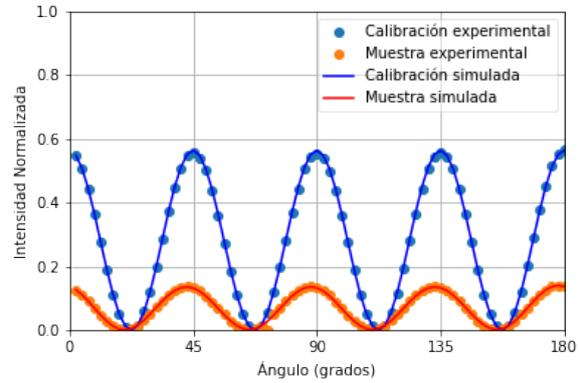


Figura 4.6: Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y 2 capas de celo como muestra.

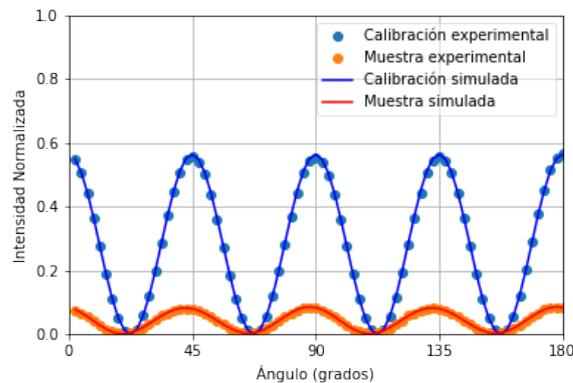


Figura 4.7: Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y 3 capas de celo como muestra.

Las siguientes medidas tomadas son de disoluciones acuosas de azúcar a distintas concentraciones para comprobar la anteriormente mencionada actividad óptica. Las representaciones gráficas de estas mediciones con su comparación con la simulación se pueden ver en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10. Los parámetros obtenidos para estas mediciones son los vistos en la tabla 4.5.

	T1	T2	$\theta/^\circ$	$\delta/^\circ$	$\Psi/^\circ$
5%	0,61	0,60	36	9	104
10%	0,55	0,51	41	28	91
20%	0,56	0,52	43	63	85

Tabla 4.5: Conjunto de datos obtenido para distintas concentraciones de solución acuosa de azúcar con el ajuste del polarímetro.

Se puede ver que en los resultados hay más variación de la esperada en los parámetros θ y Ψ , especialmente en el resultado para la concentración del 5% ya que se esperaría un valor de $\theta = 45^\circ$ y $\Psi = 90^\circ$ ya que se sabe que esta disolución actúa en estados circulares. Esto impide conformar un sacarímetro de alta precisión con este dispositivo aunque sí se ha comprobado la actividad óptica de la disolución y el polarímetro se podría utilizar como sacarímetro de baja precisión. La variación en los coeficientes de transmisión probablemente se deba a la disposición del cilindro respecto al centro del haz de luz.

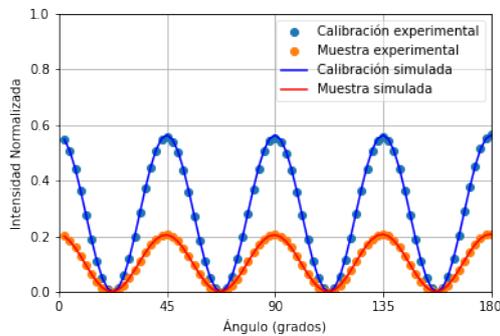


Figura 4.8: Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y un cilindro de 20cm de largo con solución acuosa de azúcar al 5% como muestra

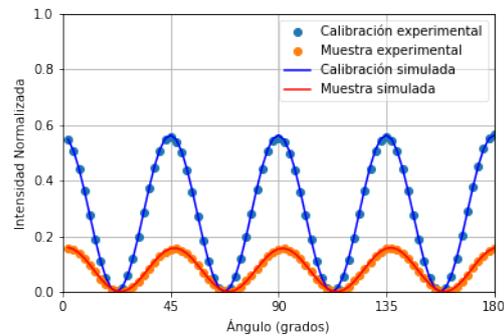


Figura 4.9: Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y un cilindro de 20cm de largo con solución acuosa de azúcar al 10% como muestra

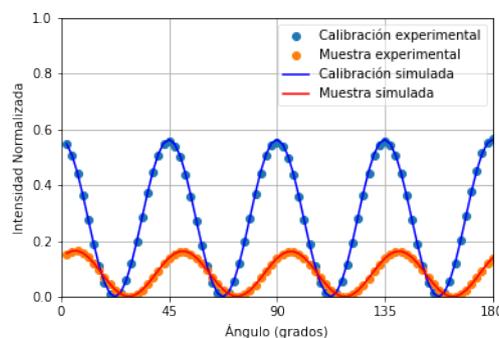


Figura 4.10: Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y un cilindro de 20cm de largo con solución acuosa de azúcar al 20% como muestra.

Para finalizar con las mediciones automáticas se utilizó como muestra un polarizador circular de una cámara fotográfica. Este polarizador está formado por dos elementos y prueba, como se puede ver en las figuras 4.11 y 4.12, los límites de la aproximación de la muestra a un retardador elíptico real. En este caso da igual la elección de valores iniciales o incluso parámetros en la simulación dado que el programa no es capaz de simular el resultado obtenido en la medición experimental.

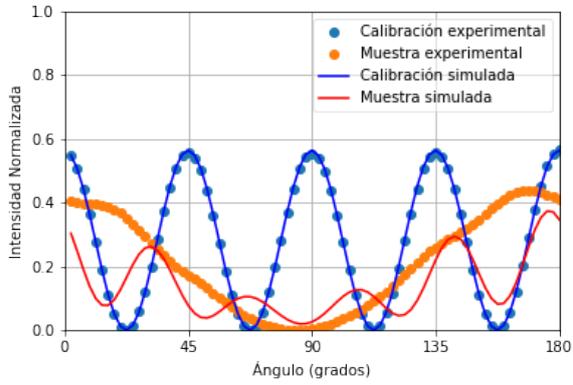


Figura 4.11: Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y un polarizador circular de cámara fotográfica como muestra

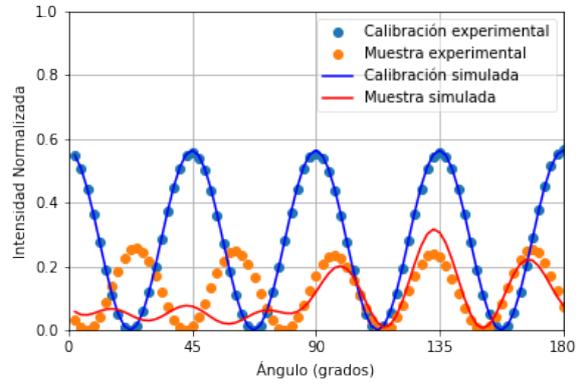


Figura 4.12: Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y polarizador circular de cámara fotográfica dado la vuelta como muestra

5

Conclusiones

En este trabajo se ha programado una simulación de resultados de mediciones polarimétricas. Esta simulación se ha utilizado después para ajustar parámetros ópticos a muestras medidas en el laboratorio en base a comparar los resultados de la simulación con los resultados experimentales y extraer de esa comparación los parámetros utilizados en la simulación cuando esta coincide con los resultados experimentales.

1. Se ha conseguido entender el funcionamiento de un polarímetro de Jones simplificado permitiendo esto la simulación de resultados de la medición de muestras no despolarizantes.
2. Se ha conseguido un programa capaz de ajustar parámetros ópticos relevantes a muestras medidas en laboratorio.
3. La obtención de parámetros es muy fiable para dispositivos comerciales mientras que se han encontrado problemas al medir muestras más complejas. Requiriéndose así mejoras en la medición para que el polarímetro pueda ser utilizado para distintas funciones como puede ser la sacarimetría.
4. Se ha encontrado el límite en la aproximación de la muestra utilizada comprobando que la matriz de Jones de un retardador elíptico real no es capaz de representar muestras compuestas por varios elementos.
5. La simulación se ha utilizado hasta su límite matemático resaltándose así la necesidad de cambiar de aproximación en la representación de la muestra o de evolucionar el polarímetro al álgebra de Mueller si se quieren caracterizar muestras más complejas.

Bibliografía

- [1] J. Barowski and I. Rolfes, “Ellipsometry based on millimeter wave radar measurements,” *2017 47th European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 934–937, 2017.
- [2] E. Arbabi, S. M. Kamali, A. Arbabi, and A. Faraon, “Full-stokes imaging polarimetry using dielectric metasurfaces,” *ACS Photonics*, vol. 5, pp. 3132–3140, 2018.
- [3] M. S. Yousaf, A. Khurshid, I. Ahmad, R. Mahmood, M. Alam, S. B. Bukhari, J. A. Khan, M. Rafi, and M. Ikram, “Label free characterization of soft tissue with optical polarization technique,” *Laser Physics*, vol. 30, 2020.
- [4] I. Ahmad, M. Ahmad, K. Khan, S. Ashraf, S. Ahmad, and M. Ikram, “Ex vivo characterization of normal and adenocarcinoma colon samples by mueller matrix polarimetry,” *Journal of Biomedical Optics*, vol. 20, no. 5, p. 056012, 2015.
- [5] Matplotlib Development Team, “Matplotlib: Visualization with python.” <https://matplotlib.org>, 2024. Acceso: 16 de Febrero de 2024.
- [6] M. Monteiro, C. Stari, C. Cabeza, and A. Marti, “The polarization of light and malus’ law using smartphones,” *The Physics Teacher*, vol. 55, pp. 264–266, 2016.
- [7] “SciPy documentation: scipy.optimize.minimize.” <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.minimize.html>. Acceso: 16 de Febrero de 2024.
- [8] “SciPy documentation: scipy.optimize.minimize – nelder-mead.” <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/optimize.minimize-neldermead.html>. Acceso: 16 de Febrero de 2024.
- [9] Analytics Vidhya, “Explanation of simplex method for minimization.” <https://medium.com/analytics-vidhya/explanation-of-simplex-method-for-minimization-e32def1ef214>. Acceso: 16 de Febrero de 2024.

- [10] Y. I. H. S. . K. Y. Akihiko Uchiyama, Yuhei Ono, "Copolycarbonate optical films developed using birefringence dispersion control," *Polymer Journal*, 2012.
- [11] Z. T. A. Ameer F. Hammeed, "Determination of glucose concentration by rotation of polarization plane of he-ne laser," *Journal of Education Science*, vol. 24, pp. 69–77, 2011.
- [12] I. Kaminow and E. Turner, "Electrooptic light modulators," *Applied optics*, vol. 5, no. 10, pp. 1612–28, 1966.

Apéndice

Apéndice 1

```
import numpy as np
import math
import cmath
import csv
from mpl_toolkits.mplot3d import axes3d
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
from matplotlib import cm
from scipy.optimize import minimize
```

Listing 1: Imports de módulos de funciones utilizados a lo largo del trabajo.

Apéndice 2

```
def P(Theta):
    # Matriz de polarización
    MP = np.zeros((2, 2), dtype=np.complex128)

    c_theta = math.cos(np.radians(Theta)) # Coseno de ↵
    # Theta
    s_theta = math.sin(np.radians(Theta)) # Seno de ↵
    # Theta

    # Elementos de la matriz de polarización
    MP[0, 0] = c_theta**2
    MP[0, 1] = s_theta * c_theta
    MP[1, 0] = s_theta * c_theta
    MP[1, 1] = s_theta**2
```

```
return MP
```

Listing 2: Función que define la matriz de polarización del polarizador de salida del sistema unicamente dependiente de θ .

Apéndice 3

```
def Intensidad(E_i, J, P_2):
    E_J = np.matmul(J, E_i)
    E_f = np.matmul(P_2, E_J)
    I = np.abs(E_f[0])**2+np.abs(E_f[1])**2
    return I
```

Listing 3: Función utilizada para el cálculo de la intensidad de la luz a la salida del sistema.

Apéndice 4

```
# Definición del polarizador de salida
def P(Theta, T_1, T_2):
    # Matriz de polarización
    MP = np.zeros((2, 2), dtype=np.complex128)

    c_theta = math.cos(np.radians(Theta))
    s_theta = math.sin(np.radians(Theta))

    MP[0, 0] = T_1 * c_theta**2 + T_2 * s_theta**2
    MP[0, 1] = (T_1 - T_2) * s_theta * c_theta
    MP[1, 0] = (T_1 - T_2) * s_theta * c_theta
    MP[1, 1] = T_1 * s_theta**2 + T_2 * c_theta**2

    return MP
```

Listing 4: Función que define la matriz de polarización del polarizador de salida del sistema dependiente de su transmisión del eje principal t_{1p} del eje secundario t_{2p} y de su inclinación Θ .

Apéndice 5

```
def J(T1, T2, theta, delta, Psi):
    # Cálculo de la Matriz de Jones para un retardador ↵
    real general.
    # El eje rápido está orientado al ángulo theta y ↵
    tiene una transmitancia T1 <= 1.
    # El eje lento, que se retarda en una fase igual a ↵
    delta, tiene una transmitancia T2.
    # También se considera una elipticidad Psi de los ↵
    estados eigen.

    MJ = np.zeros((2, 2), dtype=np.complex128)
```

```

c_theta = np.cos(np.radians(theta))
s_theta = np.sin(np.radians(theta))
exp_minus_delta = np.exp(-1j * np.radians(delta) / 2)
exp_plus_delta = np.exp(1j * np.radians(delta) / 2)
exp_minus_psi = np.exp(-1j * np.radians(Psi))
exp_plus_psi = np.exp(1j * np.radians(Psi))

MJ[0, 0] = T1 * c_theta**2 * exp_minus_delta + T2 *
s_theta**2 * exp_plus_delta
MJ[0, 1] = (T1 * exp_minus_delta - T2 *
exp_plus_delta) * s_theta * c_theta *
exp_minus_psi
MJ[1, 0] = (T1 * exp_minus_delta - T2 *
exp_plus_delta) * s_theta * c_theta *
exp_plus_psi
MJ[1, 1] = T1 * s_theta**2 * exp_minus_delta + T2 *
c_theta**2 * exp_plus_delta

return MJ

```

Listing 5: Función que define la matriz de Jones de una muestra general (retardador elíptico real) dependiente de su inclinación θ de las transmisiones de sus ejes T_1 y T_2 de su retardo δ y de su elipticidad Ψ .

Apéndice 6

```

# Definimos una función resultados con la que se
# obtenga el resultado final
def Resultado(Phi, razon, offset, T1, T2, Theta, Delta,
Psi, t1p, t2p):
    R = np.zeros(len(Phi))
    for i in range(len(Phi)):
        E_i = np.array([[np.cos(np.radians(Phi[i]))], [
np.sin(np.radians(Phi[i]))]])
        R[i] = Intensidad(E_i, J(T1, T2, Theta, Delta,
Psi), P(razon*Phi[i]+offset, t1p, t2p))
    return R

```

Listing 6: Función que calcula la intensidad resultante para cada ángulo de giro en la que se introducen los parámetros de la matriz de Jones los parámetros del polarizador de salida los ángulos de giro del polarizador de entrada la razón de giro del polarizador de salida respecto al polarizador de entrada y un offset de giro que pueda tener el polarizador de salida.

Apéndice 7

```

def main():
    # Definición de los parámetros del polarímetro

```

```

# Parámetros del segundo polarizador (sin ←
  considerar la muestra)
razon = 5                                # Razón de giro ←
  del segundo polarizador respecto al primero
Offset = -6.4                            # Offset del ←
  segundo polarizador
t1p = 0.779                              # Transmisión del ←
  segundo polarizador (polarizador de entrada ←
  asumido como ideal)
t2p = 0.017                              # Transmisión del ←
  segundo polarizador

# Parámetros de rotación del primer polarizador
Inic = 0                                  # Ángulo inicial ←
  en grados
Paso = 1                                  # Paso de rotació←
  n (debe ser un entero)
Fin = 180 + Paso                          # Ángulo final en ←
  grados

# Creación de la secuencia de ángulos de rotación
Phi = np.arange(Inic, Fin, Paso).tolist()

# Definición de los parámetros de la muestra
T1 = 0.955                                # Transmisión de ←
  la muestra para el eje rápido
T2 = 0.990                                # Transmisión de ←
  la muestra para el eje lento
Theta = 49.6                              # Inclinación de ←
  la muestra en grados
Delta = 82.3                              # Retardo de la ←
  muestra en grados
Psi = 10.8                                 # Elipticidad de ←
  la muestra en grados

# Cálculo de los Resultados del calibrado
Resultados_cal = Resultado(Phi, razon, Offset, 1, ←
  1, 0, 0, 0, t1p, t2p)

# Cálculo de los Resultados con la muestra
Resultados_J = Resultado(Phi, razon, Offset, T1, T2 ←
  , Theta, Delta, Psi, t1p, t2p)

# Almacenamiento de los datos del calibrado en ←
  formato CSV
guardar_datos_csv("cal.csv", Phi, Resultados_cal)

# Almacenamiento de los datos totales en formato ←
  CSV

```

```

guardar_datos_csv("salida.csv", Phi, Resultados_J)

# Configuración y visualización de los resultados ←
# en un gráfico
plt.figure() # Crea una nueva figura
plt.grid() # Añade una cuadrícula al gráfico
plt.xlim([Phi[0], Phi[-1]]) # Establece los lí←
# mites del eje X
plt.ylim([0, 1]) # Establece los límites del eje Y
plt.plot(Phi, Resultados_cal, "b-", label="←
# Resultados de calibración") # Dibuja la curva de←
# calibración
plt.plot(Phi, Resultados_J, "r-", label="Resultados←
# con la muestra") # Dibuja la curva con la ←
# muestra
plt.xticks(np.arange(min(Phi), max(Phi)+1, 45.0)) ←
# Configura las marcas del eje X
plt.xlabel("ángulo_phi/ ") # Etiqueta del eje X
plt.ylabel("Intensidad") # Etiqueta del eje Y
plt.legend(loc='upper_right', framealpha=0.5) # Añ←
# ade la leyenda con transparencia

# Guardar la figura en un archivo
plt.savefig("simulación.png") # Guarda la imagen ←
# con su nombre
plt.show() # Muestra el gráfico

def guardar_datos_csv(nombre_archivo, phi, resultados):
    """Guarda los datos en formato CSV."""
    filas = [("Phi", "I")] + [(phi[i], resultados[i]) ←
# for i in range(len(phi))]

    with open(nombre_archivo, "w", newline='') as ←
# archivo:
        escritor_csv = csv.writer(archivo)
        escritor_csv.writerows(filas)

```

Listing 7: main de la simulación general aquí se definen los parámetros a utilizar y se guardan los datos en formato csv junto con su representación gráfica en png.

Apéndice 8

```

def f_cal(lista1, lista2, razon, t1p0, t2p0, offset0, ←
# tol_off, tol_t):
    # Inicialización de rangos para la búsqueda de los ←
# parámetros
    t_hack1 = np.arange(t1p0[0], t1p0[len(t1p0)-1], ←
# tol_t) # Rango de valores para t1p
    t_hack2 = np.arange(t2p0[0], t2p0[len(t2p0)-1], ←

```

```

    tol_t) # Rango de valores para t2p
off = np.arange(offset0[0], offset0[len(offset0)-1], tol_off) # Rango de valores para el offset

# Inicialización de los arrays para guardar los errores cuadráticos medios
Epsilon_t1 = np.array([])
Epsilon_t2 = np.array([])
Epsilon_t3 = np.array([])

# Optimización del offset
for i in range(len(off)):
    R1 = Resultado(lista1, razon, off[i], 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0) # Cálculo de Resultado con el valor actual de offset
    Epsilon_t1 = np.append(Epsilon_t1, ((lista2 - R1)**2).mean()) # Cálculo del error cuadrático medio y almacenamiento
min_y = np.argmin(Epsilon_t1) # Encuentra el índice del menor error
offset = round(off[min_y], 3) # Selecciona el valor de offset que corresponde al menor error

# Optimización de t1p
for i in range(len(t_hack1)):
    R2 = Resultado(lista1, razon, offset, 1, 1, 0, 0, 0, t_hack1[i], 0) # Cálculo de Resultado con el valor actual de t1p
    Epsilon_t2 = np.append(Epsilon_t2, ((lista2 - R2)**2).mean()) # Cálculo del error cuadrático medio y almacenamiento
min_y2 = np.argmin(Epsilon_t2) # Encuentra el índice del menor error
tp1 = round(t_hack1[min_y2], 3) # Selecciona el valor de t1p que corresponde al menor error

# Optimización de t2p
for i in range(len(t_hack2)):
    R3 = Resultado(lista1, razon, offset, 1, 1, 0, 0, 0, tp1, t_hack2[i]) # Cálculo de Resultado con el valor actual de t2p
    Epsilon_t3 = np.append(Epsilon_t3, ((lista2 - R3)**2).mean()) # Cálculo del error cuadrático medio y almacenamiento
min_y3 = np.argmin(Epsilon_t3) # Encuentra el índice del menor error
tp2 = round(t_hack2[min_y3], 3) # Selecciona el valor de t2p que corresponde al menor error

```

```

return tp1, tp2, offset # Devuelve los parámetros ←
    optimizados

```

Listing 8: Barrido para la obtención de los parámetros optimizados para los datos del calibrado.

Apéndice 9

```

# Función para calcular el error cuadrático medio entre ←
    la lista de resultados experimentales y los ←
    resultados generados por la función Resultado
def cal_min(parametros, lista1, lista2, razon):
    t1p, t2p, offset = parametros # Desempaqueta los ←
        parámetros (t1p, t2p, offset)
    R = Resultado(lista1, razon, offset, 1, 1, 0, 0, 0, ←
        t1p, t2p) # Calcula los resultados generados ←
        por la función Resultado con los parámetros dados
    epsilon = np.mean((lista2 - R) ** 2) # Calcula el ←
        error cuadrático medio entre lista2 y R
    return epsilon # Devuelve el error cuadrático ←
        medio

# Función para encontrar los parámetros óptimos que ←
    minimizan el error cuadrático medio
def f_calmin(lista1, lista2, razon, iniciales, rango):
    g = lambda parametros: cal_min(parametros, lista1, ←
        lista2, razon) # Define una función lambda que ←
        toma los parámetros y devuelve el error cuadrá←
        tico medio
    resultado_minimize = minimize(g, iniciales, bounds= ←
        rango) # Utiliza la función minimize para ←
        encontrar los parámetros óptimos
    t1p, t2p, offset = resultado_minimize.x # Extrae ←
        los parámetros óptimos del resultado de minimize
    return t1p, t2p, offset, resultado_minimize # ←
        Devuelve los parámetros óptimos y el resultado ←
        completo de minimize

```

Listing 9: Obtención de los parámetros de calibrado del sistema mediante un conjunto de funciones que utilizan la minimización numérica para dar los valores óptimos de cada parámetro.

Apéndice 10

```

# Función para calcular el error cuadrático medio entre ←
    la lista de resultados experimentales y los ←
    resultados generados por la función Resultado
def muestra_min(parametros, lista1, lista2, razon, ←
    offset, t1p, t2p):
    T1, T2, Theta, Delta, Psi = parametros # ←
        Desempaqueta los parámetros relacionados con la ←
        muestra

```

```

R = Resultado(lista1, razon, offset, T1, T2, Theta, ←
    Delta, Psi, t1p, t2p) # Calcula los resultados ←
    generados por la función Resultado con los pará←
    metros dados
epsilon = np.mean((lista2 - R) ** 2) # Calcula el ←
    error cuadrático medio entre lista2 y R
return epsilon # Devuelve el error cuadrático ←
    medio

# Función para encontrar los parámetros óptimos de la ←
    muestra que minimizan el error cuadrático medio
def f_muestramin(lista1, lista2, razon, offset, t1p, ←
    t2p, iniciales, rango):
    # Define una función lambda que toma los parámetros←
    de la muestra y devuelve el error cuadrático ←
    medio
    g = lambda parametros: muestra_min(parametros, ←
        lista1, lista2, razon, offset, t1p, t2p)
    # Utiliza la función minimize para encontrar los ←
    parámetros óptimos de la muestra
    resultado_minimize = minimize(g, iniciales, method=←
        "Nelder-Mead", bounds=rango, options={'maxiter': ←
        1000})
    T1, T2, Theta, Delta, Psi = resultado_minimize.x #←
        Extrae los parámetros óptimos de la muestra del ←
        resultado de minimize
    return T1, T2, Theta, Delta, Psi, ←
        resultado_minimize # Devuelve los parámetros ó←
        ptimos de la muestra y el resultado completo de ←
        minimize

```

Listing 10: Obtención de los parámetros de Jones de la muestra mediante un conjunto de funciones que utilizan la minimización numérica para dar los valores óptimos de cada parámetro.

Apéndice 11

```

def f_muestra_fino(lista1, lista2, razon, offset, t1p, ←
    t2p, T1_h, T2_h, Theta_h, Delta_h, Psi_h, tol_T, ←
    tol_th, tol_de, tol_psi):
    # Creación de rangos para cada parámetro
    T1_hack = np.arange(T1_h[0], T1_h[-1], tol_T)
    T2_hack = np.arange(T2_h[0], T2_h[-1], tol_T)
    Theta_hack = np.arange(Theta_h[0], Theta_h[-1], ←
        tol_th)
    Delta_hack = np.arange(Delta_h[0], Delta_h[-1], ←
        tol_de)
    Psi_hack = np.arange(Psi_h[0], Psi_h[-1], tol_psi)

    # Inicialización del error mínimo a un valor muy ←

```

```

    alto
min_epsilon = float('inf')

# Variables para almacenar los parámetros óptimos
opt_T1, opt_T2, opt_Theta, opt_Delta, opt_Psi = ←
    None, None, None, None, None

# Bucle anidado para iterar a través de todas las ←
    combinaciones de parámetros
for T1 in T1_hack:
    for T2 in T2_hack:
        for Theta in Theta_hack:
            for Delta in Delta_hack:
                for Psi in Psi_hack:
                    R = Resultado(lista1, razon, ←
                                offset, T1, T2, Theta, Delta, ←
                                Psi, t1p, t2p)
                    epsilon = ((lista2 - R)**2). ←
                                mean()

                    # Actualización del mínimo ←
                        error y los parámetros ó ←
                            ptimos
                    if epsilon < min_epsilon:
                        min_epsilon = epsilon
                        opt_T1, opt_T2, opt_Theta, ←
                            opt_Delta, opt_Psi = T1, ←
                            T2, Theta, Delta, Psi

return opt_T1, opt_T2, opt_Theta, opt_Delta, ←
    opt_Psi, min_epsilon

```

Listing 11: Barrido para la obtención de los parámetros óptimos de la matriz de Jones de una muestra.

Apéndice 12

```

# Función para leer datos de un archivo CSV y devolver ←
    dos listas
def leer_datos_csv(nombre_archivo):
    lista1, lista2 = [], []
    with open(nombre_archivo, newline='') as archivo:
        lector_csv = csv.reader(archivo)
        next(lector_csv) # Salta la primera fila (←
            encabezados)
        for fila in lector_csv:
            lista1.append(float(fila[0]))
            lista2.append(float(fila[1])) # Normaliza ←
                los datos si es necesario
    return lista1, lista2

```

```

# Leer datos de los archivos CSV
lista1, lista2 = leer_datos_csv('cal.csv') # En caso de
    querer leer otro archivo cambiar nombre
lista1m, lista2m = leer_datos_csv('salida.csv') # En
    caso de querer leer otro archivo cambiar nombre

# Imprime las listas para verificar que los datos se
    hayan leído correctamente
print("Lista_1_(calibración):", lista1)
print("Lista_2_(calibración):", lista2)
print("Lista_1_(muestra):", lista1m)
print("Lista_2_(muestra):", lista2m)

# Configuración y visualización de los resultados en un
    gráfico
plt.figure() # Crea una nueva figura
plt.grid() # Añade una cuadrícula al gráfico
Paso = lista1[1] - lista1[0] # Calcula el paso
x = np.linspace(lista1[0], lista1[-1] + Paso, int((
    lista1[-1] + Paso) / Paso))
plt.xlim([lista1[0], lista1[-1]]) # Establece los lí
    mites del eje X
plt.ylim([0, 1]) # Establece los límites del eje Y
plt.plot(x, lista2, label="Calibración") # Dibuja la
    curva de calibración
plt.plot(x, lista2m, label="Muestra") # Dibuja la
    curva con la muestra
plt.xticks(np.arange(min(x), max(x) + 1, 45.0)) #
    Configura las marcas del eje X
plt.xlabel("Ángulo_(grados)") # Etiqueta del eje X
plt.ylabel("Intensidad_Normalizada") # Etiqueta del
    eje Y
plt.legend(loc='upper_right', framealpha=0.5) # Añade
    la leyenda con transparencia
plt.savefig("resultados.png") # Guarda la figura
plt.show() # Muestra el gráfico

```

Listing 12: Sección de código que lleva a cabo la lectura de datos para su posterior análisis y lo representa gráficamente.

Apéndice 13

```

def main():
    # ----- Calibración del Polarímetro
    # -----
    # Definir los rangos de parámetros para el barrido
    # de calibración
    t1p_inicio, t1p_fin = 0.3, 1

```

```

t2p_inicio, t2p_fin = 0, 0.2
offset_inicio, offset_fin = -90, 89.9
razon = 5 # Razón de giro fija
tol_off, tol_t = 0.1, 0.01 # Tolerancias para ←
    offset y transmisiones

# Definir los rangos para cada parámetro (no se ←
    modifica)
t1p0 = [t1p_inicio, t1p_fin + tol_t]
t2p0 = [t2p_inicio, t2p_fin + tol_t]
offset0 = [offset_inicio, offset_fin + tol_off]

# Valores iniciales y rango para la optimización ←
    con minimize
iniciales = [1, 0.0, 0]
rango = [t1p0, t2p0, offset0]

# Realizar la calibración minimizando la función de ←
    mérito
t1p_min, t2p_min, offset_min, epsilon = f_calmin(←
    lista1, lista2, razon, iniciales, rango)

# Redondear los valores obtenidos para mejor ←
    presentación
t1p_min, t2p_min, offset_min = round(t1p_min, 2), ←
    round(t2p_min, 2), round(offset_min, 1)
print(f"La transmisión del eje principal es: {←
    t1p_min} y la del eje secundario es: {t2p_min}")
print(f"El offset del polarímetro es: {offset_min} ←
    ")

# ----- Análisis de la Muestra ←
    ----- #
# Definir los rangos de parámetros para el análisis ←
    de la muestra
T1_inicio, T1_fin = 0, 1.0
T2_inicio, T2_fin = 0, 1.0
Theta_inicio, Theta_fin = 0, 180
Delta_inicio, Delta_fin = 0, 180
Psi_inicio, Psi_fin = 0, 180
tol_T, tol_th, tol_de, tol_psi = 0.01, 1, 1, 1 # ←
    Tolerancias para los parámetros de la muestra

# Definir los brackets de datos (no cambiar)
T1_h, T2_h, Theta_h, Delta_h, Psi_h = [T1_inicio, ←
    T1_fin], [T2_inicio, T2_fin], [Theta_inicio, ←
    Theta_fin], [Delta_inicio, Delta_fin], [←
    Psi_inicio, Psi_fin]

```

```

# Valores iniciales y rango para la optimización ←
  con minimize
Iniciales_muestra = [0.9, 0.1, 50, 0, 0]
rango_muestra = [T1_h, T2_h, Theta_h, Delta_h, ←
  Psi_h]

# Realizar la optimización para obtener los pará←
  metros de la muestra
T1_optimo, T2_optimo, Theta_optimo, Delta_optimo, ←
  Psi_optimo, Epsilon_optimo = f_muestramin(lista1m←
  , lista2m, razon, offset_min, t1p_min, t2p_min, ←
  Iniciales_muestra, rango_muestra)

# Redondear los valores obtenidos para mejor ←
  presentación
T1_optimo, T2_optimo, Theta_optimo, Delta_optimo, ←
  Psi_optimo = round(T1_optimo, 2), round(T2_optimo←
  , 2), round(Theta_optimo, 1), round(Delta_optimo,←
  0), round(Psi_optimo, 0)
print(f"El valor de T1 del minimize corresponde al ←
  valor: {T1_optimo}")
print(f"El valor de T2 del minimize corresponde al ←
  valor: {T2_optimo}")
print(f"El valor de Theta del minimize corresponde ←
  al valor: {Theta_optimo} ")
print(f"El valor de Delta del minimize corresponde ←
  al valor: {Delta_optimo} ")
print(f"El valor de Psi del minimize corresponde al ←
  valor: {Psi_optimo} ")

# Calcular los resultados de la calibración y de la←
  muestra con los parámetros optimizados
Calicali = Resultado(lista1, razon, offset_min, 1, ←
  1, 0, 0, 0, t1p_min, t2p_min)
Resulresul = Resultado(lista1m, razon, offset_min, ←
  T1_optimo, T2_optimo, Theta_optimo, Delta_optimo, ←
  Psi_optimo, t1p_min, t2p_min)

# ----- Representación Gráfica ←
  ----- #
# Configuración y visualización de los resultados ←
  en un gráfico
plt.figure() # Crea una nueva figura
plt.grid() # Añade una cuadrícula al gráfico
Paso = lista1[1] - lista1[0] # Calcula el paso
x = np.linspace(lista1[0], lista1[-1] + Paso, int(←
  lista1[-1] + Paso) / Paso))
plt.xlim([lista1[0], lista1[-1]]) # Establece los ←
  límites del eje X

```

```

plt.ylim([0, 1]) # Establece los límites del eje Y
plt.plot(x, lista2, "o", label="Calibración experimental") # Dibuja la curva experimental de calibración
plt.plot(x, lista2m, "o", label="Muestra experimental") # Dibuja la curva experimental con la muestra
plt.plot(x, Calicali, "b-", label="Calibración simulada") # Dibuja la curva simulada de la calibración
plt.plot(x, Resulresul, "r-", label="Muestra simulada") # Dibuja la curva simulada con la muestra
plt.xticks(np.arange(min(x), max(x) + 1, 45.0)) # Configura las marcas del eje X
plt.xlabel("Ángulo (grados)") # Etiqueta del eje X
plt.ylabel("Intensidad Normalizada") # Etiqueta del eje Y
plt.legend(loc='upper right', framealpha=0.5) # Añade la leyenda con transparencia
plt.savefig("comparación.png") # Guarda la figura
plt.show() # Muestra el gráfico

```

Listing 13: main del polarímetro computacional aquí se definen los rangos límite sobre los que se permite encontrar un resultado y los valores iniciales de la búsqueda por minimización. También se representa la comparación gráfica de los datos experimentales y la simulación con los datos obtenidos.

Índice de Figuras

2.1	Representación de Jones de alguno de los estados de polarización de la luz más interesantes con su representación vectorial así como una representación gráfica. Es importante recalcar que el criterio de signos utilizado a lo largo de todo este trabajo es el indicado en la figura y por ende se considera que la dirección creciente de la polarización es la antihoraria.	5
3.1	Esquema de la disposición del polarímetro estudiado.	9
3.2	Simulación de la intensidad de salida de una muestra de aire o vacío a través del polarímetro en función del ángulo de giro del analizador	11
3.3	Simulación de la intensidad de salida con una muestra de un retardador $\lambda/4$ ideal orientado a 45° con el eje vertical en función del ángulo de giro del analizador.	12
3.4	Láser supercontinuo utilizado en el montaje	16
3.5	Caja conectada al láser supercontinuo, contiene la fibra óptica multimodo y el monocromador.	16
3.6	Montaje experimental para las primeras medidas, el elemento número 1 corresponde a la fuente de luz(fibra proveniente de la caja de la figura 3.5), el elemento número 2 corresponde a la lente colimadora, el elemento número 3 corresponde al polarizador de entrada del sistema, el elemento número 4 corresponde al soporte donde se posicionan las muestras, el elemento número 5 corresponde a el polarizador de salida(analizador) y el elemento número 6 corresponde al fotodetector, al que se le puso un cono de cartón negro para eliminar el ruido por luz ambiente.	17
3.7	Respecta del fotodetector respecto a la longitud de onda para un valor de onda central del monocromador de 542nm.	17
3.8	Polarizadores utilizados en la medición manual del polarímetro.	18

4.1	Representación gráfica de la comparación de la intensidad de salida del sistema con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado y una lámina retardadora como muestra.	21
4.2	Representación gráfica de la comparación de la intensidad de salida del sistema con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado y el polarizador de la derecha de la figura 3.8 como muestra.	22
4.3	Representación gráfica de la comparación de la intensidad de salida del sistema con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado y el polarizador de la izquierda de la figura 3.8 como muestra.	22
4.4	Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema manual y el analizador del sistema automático como muestra.	22
4.5	Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y 1 capa de celo como muestra.	24
4.6	Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y 2 capas de celo como muestra.	24
4.7	Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y 3 capas de celo como muestra.	24
4.8	Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y un cilindro de 20cm de largo con solución acuosa de azúcar al 5% como muestra	25
4.9	Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y un cilindro de 20cm de largo con solución acuosa de azúcar al 10% como muestra	25
4.10	Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y un cilindro de 20cm de largo con solución acuosa de azúcar al 20% como muestra.	25
4.11	Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y un polarizador circular de cámara fotográfica como muestra	26

-
- 4.12 Representación gráfica de la comparación de intensidad de salida con los parámetros obtenidos con el programa y los resultados experimentales para el calibrado del sistema automático y polarizador circular de cámara fotográfica dado la vuelta como muestra 26

[12]

Índice de Tablas

4.1	Conjunto de datos obtenidos para la lámina retardadora y para el calibrado del sistema con el ajuste del polarímetro.	21
4.2	Conjunto de datos obtenidos para los polarizadores de la figura 3.8 con el ajuste del polarímetro.	21
4.3	Conjunto de datos obtenidos para el polarizador de salida utilizado en el sistema de medición automático con el ajuste del polarímetro.	22
4.4	Conjunto de datos obtenido para distintas capas de celo en el ajuste del polarímetro.	23
4.5	Conjunto de datos obtenido para distintas concentraciones de solución acuosa de azúcar con el ajuste del polarímetro.	24

