



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
Eléctrica – Instrumentación

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN POLARÍMETRO DE STOKES PARA OBTENCIÓN DE
IMÁGENES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
IVÁN MONTES GONZÁLEZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. NEIL CHARLES BRUCE DAVIDSON, ICAT-UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX. JUNIO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. García Valenzuela Augusto

Secretario: Dr. Avendaño Alejo Maximino

Vocal: Dr. Bruce Davidson Neil Charles

1^{er.} Suplente: Dr. Rodríguez Herrera Oscar G.

2^{do.} Suplente: Dr. Qureshi Naser

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ciencia Aplicada y Tecnología, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. NEIL CHARLES BRUCE DAVIDSON

NOMBRE

FIRMA

Agradecimientos

Agradezco a mis padres y el resto de mi familia, que estuvieron brindándome su apoyo y tiempo, durante los últimos dos años. A mi novia que, con su apoyo, compañía y amor, ha sido parte de esto.

Al Dr. Neil Bruce por guiarme durante la realización de esta tesis, además de todos los consejos y la confianza recibida. Al Dr. Oscar Rodríguez y al Dr. Naser Qureshi, por la ayuda recibida durante todo mi proyecto de maestría. Al Dr. Maximino Avendaño y al Dr. Augusto Valenzuela, por sus aportaciones y comentarios, para realizar un mejor trabajo.

Al posgrado de ingeniería de la UNAM por el apoyo económico recibido para poder asistir al congreso SPIE Photonics Europe 2018. A CONACYT le agradezco la beca para poder realizar mis estudios de maestría, durante estos dos años.

Investigación realizada gracias a la DGAPA a través del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la UNAM dentro del proyecto IT100417.

Resumen

En esta tesis se presenta el desarrollo teórico y experimental de un Polarímetro de Stokes de imagen. Como parte del desarrollo teórico se propone un método nuevo de calibración para polarímetros de Stokes. La ventaja del método de calibración propuesto es que el sistema no necesita estar optimizado, ya que en algunos casos es más fácil o rápido trabajar con polarímetros no optimizados. Por ejemplo, si queremos obtener imágenes polarimétricas para varias longitudes de onda, el polarímetro no podrá estar optimizado simultáneamente para todas las longitudes de onda. Si usamos el método propuesto, podremos realizar las mediciones simultáneamente de una manera precisa.

Para la parte de polarimetría, el analizador de estados de polarización utiliza dos retardadores variables de cristal líquido (RVCL) y un polarizador lineal para la medición de los cuatro parámetros del vector de Stokes. Se utilizó un método que se basa en la aplicación de un conjunto de valores de retardancias aplicados en cada RVCL para medir las intensidades para polarización lineal horizontal, lineal vertical, lineal a $+45^\circ$ y -45° , y circular derecha e izquierda. Se utilizó el método de Bickell and Bailey para extraer los parámetros del vector de Stokes de estas mediciones de intensidad. Como paso intermedio se caracterizaron los RVCL, para tener un mejor control de la polarización. Con este método se puede medir el vector de Stokes completo de un haz incidente.

Debido a que en este tipo de dispositivos existen errores experimentales, es necesaria una calibración. Se realizó una calibración para calcular los errores en el montaje experimental, en esta se toman las mediciones de intensidad experimentales y se ajustan a valores teóricos de un polarímetro con errores. En este caso los errores calculados incluyen los errores en los ejes ópticos de los elementos del PSA, así como el error en los valores de retardancia aplicados a los RVCL.

Para la adquisición de las imágenes polarimétricas, se utilizó un arreglo telescópico, un analizador de estados de polarización (PSA) y se formaron las imágenes sobre una cámara CCD, se intentó realizar el mismo método de calibración en cada uno de los píxeles.

El método fue verificado obteniendo el vector de Stokes de polarizadores, y placas retardadoras a distintos ángulos y comparándolas con la predicción de los modelos de polarización. Al hacer mediciones del polarímetro de Stokes, se pudo observar que en todos los casos los resultados tuvieron una mejoría después de la calibración. Al obtener las imágenes polarimétricas y realizar el proceso de calibración en cada pixel, se encontraron grandes diferencias, por lo que se mencionan algunas sugerencias para tomar en cuenta en futuros trabajos.

Índice

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos	2
Capítulo 2: Teoría de polarización	3
2.1 Elipse de Polarización	3
2.2 Formalismo de Stokes	5
2.3 Elementos polarizadores.....	8
Capítulo 3: Polarímetro de Stokes	12
3.1 Caracterización de elementos ópticos	12
3.1.1 Polarizadores Glan-Thompson	12
3.1.2 Retardadores Variables de Cristal Líquido	13
3.2 Medición de los parámetros de Stokes	23
3.2.1 Método de Medición.....	23
3.2.2 Automatización del experimento.....	27
3.2.3 Resultados	29
3.3 Calibración del sistema.....	35
Capítulo 4: Polarimetría de imagen	45
4.1 Diseño Experimental	45
4.2 Imágenes polarimétricas	46
Capítulo 5: Conclusiones	53
5.1 Polarímetro de Stokes	53
5.2 Polarímetro de imagen.....	54
5.3 Trabajo a futuro.....	55

Capítulo 1 Introducción

1.1 MOTIVACIÓN.

Actualmente el estudio de la polarización de la luz y la medición de esta es una de las principales áreas dentro de la Óptica. El análisis del estado de polarización de un haz de luz, y la determinación de los parámetros de Stokes son de gran importancia, por lo que se utiliza una técnica llamada polarimetría, la cual usa métodos estáticos y dinámicos para la determinación del vector de Stokes [1]. La polarimetría es una herramienta de gran ayuda en aplicaciones como espectroscopia atómica [2], en polarimetría de imagen las aplicaciones van desde la percepción remota [3] hasta microscopia [4]. También hay datos experimentales [5-7] que indican que la polarimetría de imagen tiene mayor contraste que las imágenes de intensidad, cuando se utiliza en medios como polvo, humo o niebla.

Para realizar polarimetría existen diversas técnicas [8-11], una de ellas utiliza retardadores variables de cristal líquido (RVCL), estos pueden cambiar su retardancia de acuerdo al voltaje que se les aplica, ayudando a tener un buen control al generar o analizar estados de polarización. Otra ventaja de utilizar estos dispositivos es disminuir los errores debidos al movimiento al manipular los elementos utilizados en otras técnicas. Aunque se pueden reducir algunos errores, los polarímetros siempre presentan errores experimentales, como lo es la posición de los ejes de los elementos o errores al hacer la caracterización de los RVCL. Una medición correcta del vector de Stokes requiere una calibración del polarímetro con muestras ya conocidas, las cuales permiten encontrar posibles errores en el montaje experimental, así como también para evaluar la precisión de los resultados que se pretenden obtener.

En diversas aplicaciones de un polarímetro se encuentran análisis de superficies en transmisión o reflexión, para realizar un análisis punto a punto de estas superficies se realiza polarimetría de imagen [12], la cual es el caso específico de la polarimetría que se dedica al mapeo del estado de polarización sobre una escena de interés. Parte importante al hacer polarimetría de imagen es escoger el mejor método, actualmente existen diversos métodos [13-15] para realizar polarimetría de imagen, también se debe realizar una calibración, para la correcta obtención de imágenes polarimétricas. Aunque ya existen métodos de calibración [16-17] que compensan errores e imperfecciones de los componentes ópticos, en esta tesis se propone un método distinto.

1.2 OBJETIVOS.

Un primer objetivo de esta tesis es establecer un método rápido y eficaz para la medición de los cuatro parámetros de Stokes, de un haz de luz. Debido a lo mencionado en el párrafo anterior, un segundo objetivo es implementar un método para la calibración de este polarímetro de Stokes, que no necesite que el polarímetro este optimizado, así como una técnica para la obtención de imágenes. Para ello se ha diseñado y construido un polarímetro de imagen sin elementos que se tengan que manipular manualmente, este utiliza retardadores variables de cristal líquido, adaptados a un sistema óptico telescópico para la formación de las imágenes, sobre una cámara CCD. Con este sistema y método se lograrán obtener imágenes polarimétricas de Stokes para luz transmitida en distintos medios.

Capítulo 2 Teoría de Polarización

En este capítulo se explican algunos de los conceptos fundamentales sobre polarización, se presenta una breve deducción de la elipse de polarización, una explicación del vector de Stokes, y por último algunos fenómenos y elementos capaces de alterar el estado de polarización de un haz de luz.

2.1 ELIPSE DE POLARIZACIÓN.

La polarización de la luz es una propiedad que tienen todas las ondas transversales, esta tiene que ver con la dirección de vibración del campo eléctrico y su cambio en el tiempo. El campo eléctrico que constituye la luz puede vibrar en cualquier dirección perpendicular a la dirección de propagación, a este comportamiento de la dirección de vibración del campo eléctrico es al que se le llama polarización. Para entender de una mejor manera el comportamiento de la polarización y la propagación del campo eléctrico es necesario describirla como una función de onda y considerar la suma de dos componentes perpendiculares entre si y desfasadas una cierta cantidad, la ecuación del vector de campo eléctrico queda como [18],

$$E_0 = E_x \hat{x} + E_y \hat{y}, \quad (2.01)$$

donde E_x y E_y son las dos componentes perpendiculares expresadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz), \quad (2.02)$$

$$E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta), \quad (2.03)$$

donde ω es la frecuencia angular de la luz, k es el número de onda en el medio de propagación y δ es el desfase entre ambas componentes. Como ya se mencionó el vector del campo eléctrico está siempre contenido en un plano y para

cada periodo de dicha onda su extremo describirá una curva cerrada, denominada elipse de polarización. Usando las siguientes relaciones:

$$\cos(a \pm b) = \cos(a) \cos(b) \mp \sin(a) \sin(b), \quad (2.04)$$

$$\sin(\omega t - kz) = \sqrt{1 - \cos^2(kz - \omega t)}, \quad (2.05)$$

La ecuación (2.03) queda como:

$$E_y = E_{0y} [\cos(\omega t - kz) \cos(\delta) - \sqrt{1 - \cos^2(kz - \omega t)} \sin(\delta)], \quad (2.06)$$

Ahora si se despeja $\frac{E_x}{E_{0x}}$ de (2.02) y sustituye en (2.06) se puede obtener que,

$$\frac{E_y(t)}{E_{0y}} = \frac{E_x(t)}{E_{0x}} \cos(\delta) - \sqrt{1 - \left(\frac{E_x(t)}{E_{0x}}\right)^2} \sin(\delta), \quad (2.07)$$

Reagrupando términos y elevando al cuadrado se puede llegar a la siguiente ecuación,

$$\left(\frac{E_x(t)}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y(t)}{E_{0y}}\right)^2 - 2 \frac{E_x(t)}{E_{0x}} \frac{E_y(t)}{E_{0y}} \cos(\delta) = \sin^2(\delta), \quad (2.08)$$

La ecuación (2.08) describe una elipse, por lo que es llamada la elipse de polarización. Aunque se ha eliminado explícitamente el término espacio-temporal $(\omega t - kz)$, las componentes E_x y E_y siguen dependiendo del tiempo. En la figura 2.1 se muestra la gráfica de la elipse de polarización y el sistema coordenado ξ - η , rotado un ángulo ψ . Como E_{0x} , E_{0y} y δ son valores constantes, la elipse siempre se mantiene fija [19].

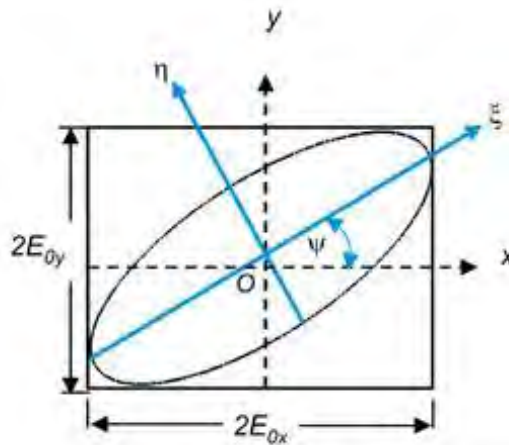


Figura 2.1. Elipse de polarización [19].

En general el campo eléctrico está polarizado elípticamente, pero existen ciertas combinaciones de amplitudes y desfase que son más relevantes, como en los siguientes casos: Cuando $E_{0x} = 0$ ó $E_{0y} = 0$ se tiene polarización lineal vertical u horizontal respectivamente, en el caso de que $E_{0x} = E_{0y}$, si $\delta = 0$ se tiene polarización lineal a 45° , o si $\delta = \frac{\pi}{2}$ se va a obtener polarización circular derecha.

2.2 FORMALISMO DE STOKES.

La descripción de la polarización de la luz en términos de la elipse de polarización es muy útil ya que podemos representar todos los tipos de polarización, pero solo en el caso de que tengamos luz completamente polarizada. Para el caso de tener luz parcialmente polarizada existen otros tipos de representaciones, como lo son los parámetros de Stokes. Con los parámetros de Stokes, el comportamiento de la polarización de la luz puede ser representado en términos de variables observables y se puede describir completamente cualquier estado de polarización, incluyendo luz parcialmente polarizada, mediante cuatro parámetros. Si tomamos el promedio temporal de la ecuación (2.08) podemos reescribirla como:

$$\frac{\langle E_x^2(t) \rangle}{E_{0x}^2} + \frac{\langle E_y^2(t) \rangle}{E_{0y}^2} - \frac{2\langle E_x(t)E_y(t) \rangle}{E_{0x}E_{0y}} \cos\delta = \sin^2\delta, \quad (2.09)$$

Siguiendo el desarrollo hecho por Goldstein [18] se puede llegar a la siguiente ecuación,

$$(E^2_{0x} + E^2_{0y})^2 - (E^2_{0x} - E^2_{0y})^2 - (2E_{0x}E_{0y}\cos\delta)^2 = (2E_{0x}E_{0y}\sin\delta)^2. \quad (2.11)$$

Las cantidades dentro de los paréntesis se definen como:

$$S_0 = E^2_{0x} + E^2_{0y}, \quad (2.12)$$

$$S_1 = E^2_{0x} - E^2_{0y}, \quad (2.13)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y}\cos\delta, \quad (2.14)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y}\sin\delta. \quad (2.15)$$

Sustituyendo las relaciones anteriores, se puede reescribir la ecuación (2.11) como:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2. \quad (2.16)$$

Si ahora se tiene luz parcialmente polarizada, los parámetros de Stokes siguen siendo válidos para intervalos de tiempo muy pequeños. Usando la desigualdad de Schwarz, se puede mostrar que cualquier estado de polarización satisface la siguiente relación:

$$S_0^2 \geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2. \quad (2.17)$$

El signo de igualdad aplica cuando se tiene luz completamente polarizada y el signo de desigualdad, cuando se tiene luz parcialmente polarizada.

El vector de Stokes es una matriz columna compuesta por los cuatro parámetros de Stokes (S_0, S_1, S_2 y S_3). Los cuatro parámetros se colocan de la siguiente manera:

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}. \quad (2.18)$$

Para luz polarizada elípticamente se tiene la siguiente relación, que se conoce como el vector de Stokes para una onda plana.

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y}\cos\delta \\ 2E_{0x}E_{0y}\sin\delta \end{pmatrix}. \quad (2.19)$$

En la tabla 2.1 se presentan algunos casos particulares del vector de Stokes [19].

$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\delta = 0^\circ$ $E_{0y} = 0$ $I_0 = E_{0x}^2$	Polarización lineal horizontal.
$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\delta = 0^\circ$ $E_{0x} = 0$ $I_0 = E_{0y}^2$	Polarización lineal vertical.
$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\delta = 0^\circ$ $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ $I_0 = 2E_0^2$	Polarización lineal +45°.
$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\delta = 180^\circ$ $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ $I_0 = 2E_0^2$	Polarización lineal -45°.
$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\delta = 90^\circ$ $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ $I_0 = 2E_0^2$	Polarización circular derecha.
$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$	$\delta = -90^\circ$ $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ $I_0 = 2E_0^2$	Polarización circular izquierda.

Tabla 2.1. Vectores de Stokes para distintos estados de polarización.

2.3 ELEMENTOS POLARIZADORES.

Un elemento polarizador es un elemento capaz de modificar el estado de polarización de un haz de luz, los cambios producidos en el estado de polarización van a depender, tanto de la naturaleza interna del elemento, como de su estructura macroscópica. Estos elementos polarizadores funcionan gracias a distintos fenómenos que ocurren cuando interactúa la luz con la materia, algunos de estos se describen a continuación.

Uno de los efectos de la interacción de un elemento con la luz es la diatenuación, esta es la propiedad de algunos de estos elementos en los que la intensidad transmitida depende del estado de polarización incidente. Un diatenuador no produce ningún retardo, tiene su eje en la misma dirección que el autovector con mayor transmitancia en intensidad y su diatenuación se puede definir como [20]:

$$D = \frac{|p_1^2 - p_2^2|}{|p_1^2 + p_2^2|} \quad (2.20)$$

Donde $0 \leq D \leq 1$, y la intensidad es máxima p_1 para un estado de polarización y mínima p_2 para el estado ortogonal.

El dicroísmo es un fenómeno de polarización por absorción. Un material dicroico separa la luz en dos componentes con polarizaciones ortogonales entre sí, y absorbe más una de ellas, un ejemplo de estos materiales es el Polaroid. La razón dicroica del medio se define como [21]:

$$R = p_1^2 / p_2^2 \quad (2.21)$$

La birrefringencia es un fenómeno de polarización por doble refracción, aunque también existen otros casos como la birrefringencia por tensión. Un elemento de este tipo tiene dos índices de refracción, al hacer incidir un haz de luz este se desdobra en dos, que se propagan dentro del medio a distintas velocidades y con

estados de polarización ortogonales. Uno de los rayos es llamado ordinario y el otro extraordinario, con índices de refracción n_o y n_e respectivamente. La birrefringencia del medio está dada por [22]:

$$B = \frac{\omega}{c} (n_o - n_e) \quad (2.22)$$

Donde ω es la frecuencia del frente de onda incidente.

La polarización por reflexión ocurre cuando un haz incide sobre una superficie con un ángulo distinto de 0° , respecto a la normal, el haz reflejado y el haz transmitido se polarizan un cierto grado. Si aplicamos ley de Snell cuando el haz reflejado es perpendicular al transmitido obtenemos un ángulo de incidencia en términos de los índices de refracción, llegado a la siguiente expresión:

$$\theta_B = \tan^{-1}(n_2/n_1) \quad (2.23)$$

Este ángulo es llamado el ángulo de Brewster y tiene la particularidad que al hacer incidir luz sobre una superficie con este ángulo, el haz reflejado está linealmente polarizado en dirección perpendicular al plano de incidencia.

Un tipo de elementos que usa la birrefringencia, para alterar el estado de polarización de un haz de luz, son los retardadores variables de cristal líquido (RVCL). Estos están fabricados con ventanas de sílice fundida separadas unas pocas micras, planas y pulidas con gran precisión, la separación entre ventanas está rellena con una solución de moléculas de cristal líquido y funciona como una placa retardadora variable [23].

Lo más importante de estos RVCL es que sin voltaje aplicado se alcanza una retardancia máxima y cuando el voltaje aumenta, las puntas de las moléculas provocan una reducción en la birrefringencia efectiva y, por lo tanto, en la retardancia, siendo cada vez menos diferente la respuesta de los electrones al

campo eléctrico de luz linealmente polarizada en diferentes direcciones. Por lo tanto, la diferencia de fase en un haz de luz puede ser controlada activamente mediante la variación del voltaje aplicado. El diagrama de los RVCL se muestra en la figura 2.2.

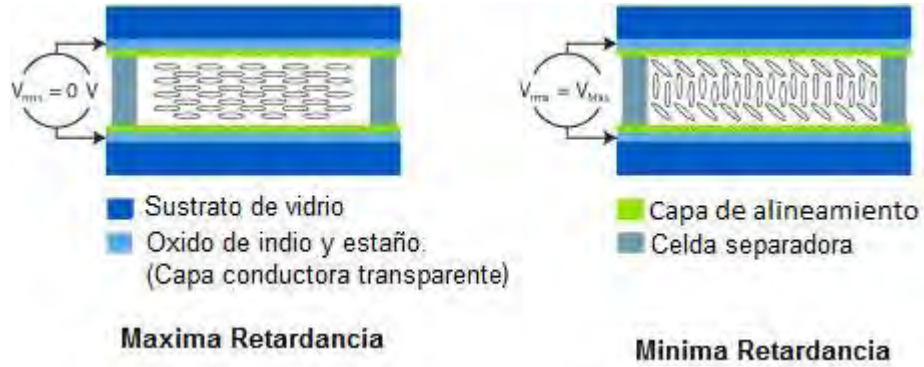


Figura 2.3 Composición de Retardadores Variables de Cristal Líquido [23].

Ya que existen materiales que inducen un cambio en el estado de polarización, se tiene un vector de Stokes incidente S_i y a la salida del material el vector de Stokes ya ha cambiado S_o , por lo que el sistema o elemento que lo ha cambiado puede caracterizarse mediante una matriz de 4x4. A esta matriz se le denomina la Matriz de Mueller y contiene todas las propiedades de polarización de un sistema. Escrito en forma matricial lo podemos expresar como [24]:

$$S_o = \begin{pmatrix} S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ S_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}. \quad (2.24)$$

En la tabla 2.2 se presentan algunos ejemplos de la matriz de mueller de distintos elementos.

$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	Vacío
$M_P(\theta) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Polarizador Lineal con eje de transmisión θ
$M_R(\delta, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \cos \delta \sin^2 2\theta & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin \delta (\sin 2\theta) \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta + \cos \delta \cos^2 2\theta & \sin \delta \cos 2\theta \\ 0 & \sin \delta (\sin 2\theta) & -\sin \delta \cos 2\theta & \cos \delta \end{pmatrix}$	Retardador con eje de transmisión θ y retardancia δ

Tabla 2.2. Matrices de Mueller de elementos polarizadores comunes.

Capítulo 3 Polarímetro de Stokes.

En este capítulo se presentan las caracterizaciones de todos los elementos ópticos, utilizados para el polarímetro, así como los arreglos experimentales y desarrollo teórico para las mediciones. Para esta tesis, se utilizaron dos polarizadores Glan-Thompson y dos RVCL, por lo que primero se presentan los resultados de la caracterización de dichos elementos en la sección 3.1, después en la sección 3.2 se encuentra detalladamente la metodología para la obtención de los parámetros de Stokes. Por último, en la sección 3.3 se presenta la metodología y resultados obtenidos utilizando la calibración.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS OPTICOS.

Con la finalidad de tener la menor cantidad de factores que puedan causar un error en la medición, se caracterizaron los componentes ópticos. Para el caso de los polarizadores lineales, los parámetros a medir son el coeficiente de transmisión y la diatenuación. En el caso de los RVCL, primero se necesita saber el tiempo de respuesta a cambios en el voltaje, y por último la relación de retardancia contra voltaje aplicado para cada uno de los RVCL.

3.1.1 POLARIZADORES GLAN-THOMPSON.

Para realizar la caracterización de los 2 polarizadores Glan-Thompson, primero se montó una fuente luz colimada y polarizada linealmente. Se midió la intensidad de la fuente sin ningún elemento extra, después se colocó el elemento polarizador que se iba a caracterizar con su eje paralelo a la dirección de la polarización incidente, y se midió la intensidad al salir del elemento polarizador. El coeficiente de transmisión está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Coef. Transmision} = I_p/I_0 \quad (3.1)$$

Donde I_p es la intensidad medida al colocar el polarizador, e I_0 la intensidad medida cuando no hay elementos extras entre la fuente y el detector. Mientras que para medir la diatenuación se usa la ecuación (2.20), el montaje es el mismo, solo que en este caso se toman medidas con el polarizador con su eje paralelo y ortogonal a la dirección de polarización incidente.

Las medidas experimentales del coeficiente de transmisión y la diatenuación, de ambos polarizadores, se muestran en la tabla 3.1.

	Coeficiente de Transmisión	Diatenuación
Polarizador 1*	$0.8574 \pm 1.424 \times 10^{-5}$	$0.9999 \pm 1.232 \times 10^{-7}$
Polarizador 2*	$0.9124 \pm 2.185 \times 10^{-5}$	$0.9922 \pm 1.865 \times 10^{-6}$

Tabla 3.1. Coeficientes de transmisión y diatenuación de los polarizadores utilizados.

En esta tabla se puede observar que la diatenuación en ambos casos es mayor a 0.99, aunque esta no es muy alta, tomando en cuenta que para un polarizador ideal $D=1$, servirá para nuestros propósitos. En el caso del coeficiente de transmisión, ambos transmiten arriba del 85% de la luz incidente, lo cual es aceptable para nuestros experimentos.

3.1.2 RETARDADORES VARIABLES DE CRISTAL LÍQUIDO.

Un parámetro importante al utilizar estos RVCL, es el tiempo en que responden a un cambio en el voltaje, ya que se pueden obtener lecturas erróneas si no se toma en cuenta este tiempo. El tiempo de respuesta a cambios en el voltaje depende de varios parámetros como el espesor del cristal, temperatura, o voltaje aplicado. Por lo que se realizó un sencillo experimento para medir el tiempo de respuesta del sistema completo, incluyendo el tiempo de lectura de los detectores .

Para realizar estas mediciones se colocaron dos polarizadores, con sus ejes ortogonales entre sí, en medio de estos se colocó el RVCL con su eje a 45° respecto al eje horizontal. Se realizaron mediciones de potencia óptica cada 10 ms, que es el tiempo de lectura del medidor de potencia, y se realizaron cambios en el voltaje aplicado al retardador, donde fuera más notorio el cambio de potencia. Por último, se tomó en cuenta el tiempo en que tardaba en estabilizarse las mediciones después de un cambio en el voltaje. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de las mediciones realizadas.

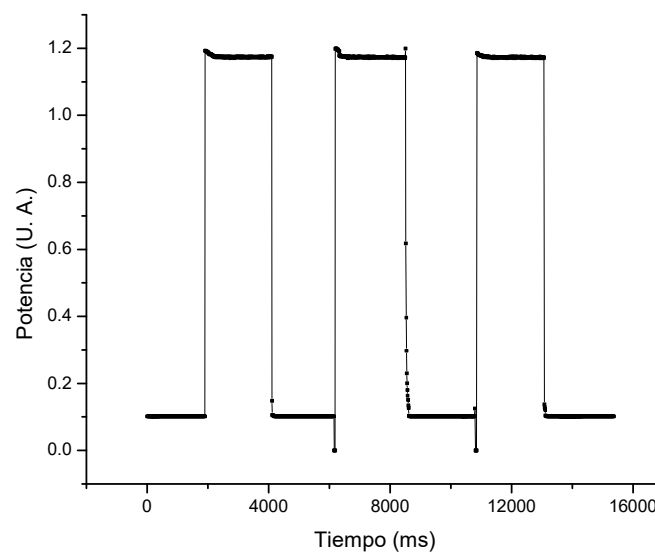


Figura 3.1. Mediciones de potencia al cambiar el voltaje aplicado.

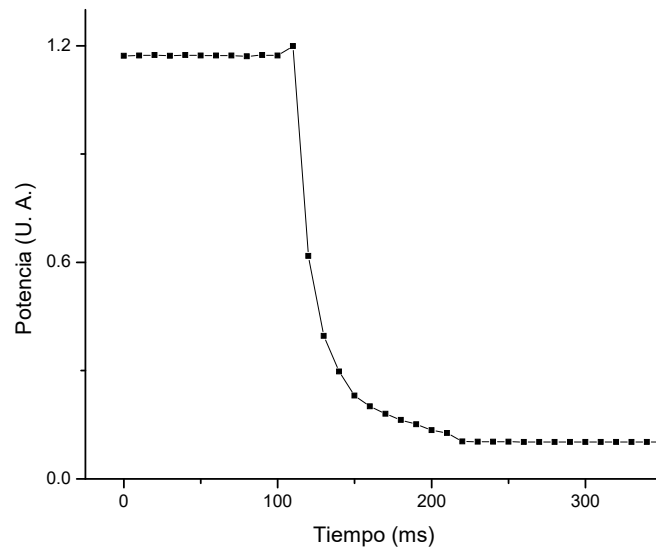


Figura 3.2. Acercamiento a uno de los cambios de voltaje de la figura 3.1.

En la figura 3.1y 3.2 se puede observar claramente que toma distintos valores de potencia antes de estabilizarse en una medición. Para estar seguros de que en ningún caso afectaría nuestras mediciones, se tomó el tiempo de respuesta máximo para cada retardador. En la tabla 3.2 se muestran los datos obtenidos experimentalmente.

Elemento	Tiempo de Respuesta Máximo (Segundos)
RVCL 1*	0.160 ± 0.005
RVCL 2*	0.140 ± 0.005

Tabla 3.2. Tiempo de respuesta máximo en cada RVCL.

Para la siguiente parte de la caracterización de los RVCL se busca obtener una gráfica continua de voltaje aplicado contra retardancia. Utilizando el montaje experimental mostrado en la figura 3.3 se puede obtener de manera indirecta la función continua de voltaje contra retardancia, después de realizar un

desdoblamiento de fase sobre los datos obtenidos directamente del experimento [25].

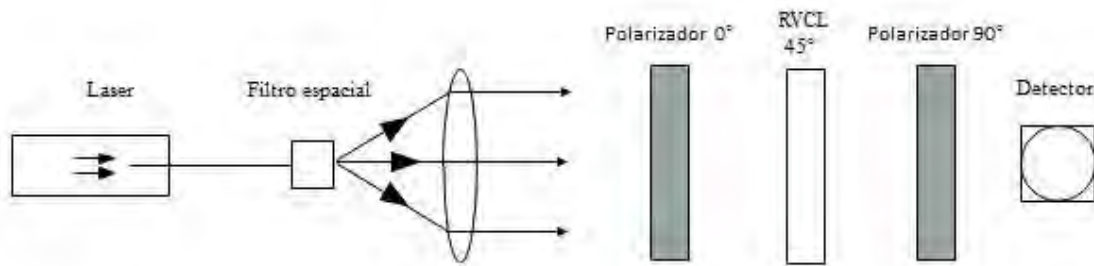


Figura 3.3 Diagrama del montaje experimental para la caracterización de los RVCL.

Como fuente se utilizó un láser He-Ne de 633 nm. La luz emitida se filtra espacialmente y se colima. El haz atraviesa un polarizador lineal horizontal, después pasa a través del RVCL que se quiera caracterizar, con su eje óptico a 45° con respecto al primer polarizador y finalmente a través de otro polarizador lineal con su eje de transmisión perpendicular al eje del primer polarizador. Como se vio en el capítulo 2 este sistema óptico puede ser representado mediante la siguiente relación:

$$S = M_S S_i, \quad (3.01)$$

donde S_i es el vector de Stokes del haz incidente, y S es el vector de Stokes del haz de luz saliente. El término M_S es la matriz de Mueller del sistema y puede ser escrita en términos de las matrices de Mueller de sus componentes, es decir,

$$M_S = M_P(90^\circ) M_R(\delta, 45^\circ) M_P(0^\circ), \quad (3.02)$$

donde $M_P(\theta)$ es la matriz de Mueller de un polarizador lineal con su eje de transmisión en un ángulo de θ , y $M_R(\delta, \theta)$ es la matriz de Mueller de un retardador con retardancia δ y su eje rápido en θ . Estas matrices están definidas en la tabla

2.2, si se sustituyen en la ecuación (3.02), la matriz de Mueller para este sistema en particular resulta ser:

$$M_s = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 - \cos\delta & 1 - \cos\delta & 0 & 0 \\ -1 + \cos\delta & -1 + \cos\delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.03)$$

Para resolver la ecuación (3.03), solo hace falta el vector de Stokes S_i y este se toma como luz polarizada linealmente horizontal, esto es:

$$S_i = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3.04)$$

Ahora, sustituyendo las ecuaciones (3.04) y (3.03) en (3.01), se obtiene

$$S = A \begin{pmatrix} 1 - \cos\delta \\ -1 + \cos\delta \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.05)$$

donde A es una constante que depende del factor $\frac{1}{4}$ de la ecuación (3.03) pero también de los parámetros experimentales como la absorción de los polarizadores. La intensidad máxima es alcanzada cuando $\cos\delta = -1$. Sustituyendo este valor en (3.05) y recordando que la intensidad en el detector es el primer término S_0 del vector de Stokes S , se encuentra que:

$$I_{max} = A(1 + 1) = 2A. \quad (3.06)$$

Ahora despejando A y sustituyendo este valor en la ecuación (3.05) queda:

$$S_0 = I = \frac{I_{max}}{2} (1 - \cos\delta). \quad (3.07)$$

Despejando δ , finalmente se obtiene que:

$$\delta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2I}{I_{max}} \right). \quad (3.08)$$

Con esta ecuación se puede obtener la retardancia de los retardadores variables en base a datos experimentales de la intensidad de luz detectada.

Una vez montado el arreglo de la figura 3.3, se aplican voltajes entre 1.6 y 8.6, en incrementos de 2 mV a cada RVCL, tomando medidas de intensidad para cada valor de voltaje aplicado. Estas medidas se tomaron cada 200 ms tomando en cuenta los datos de la tabla 3.1. Para realizar las mediciones en el tiempo mencionado y además obtener la resolución deseada se necesitan una gran cantidad de mediciones en poco tiempo, por lo que se automatizo el experimento con ayuda del software LabView.

Usando la ecuación (3.08) con los valores de intensidad medidos, se puede obtener la retardancia como función del voltaje aplicado en cada RVCL. En la figura 3.4 se presenta un ejemplo de la gráfica obtenida de retardancia para cada voltaje aplicado, pero debido a la periodicidad de la función coseno en la ecuación (3.08), la retardancia queda “envuelta” en el intervalo de 0° a 180° .

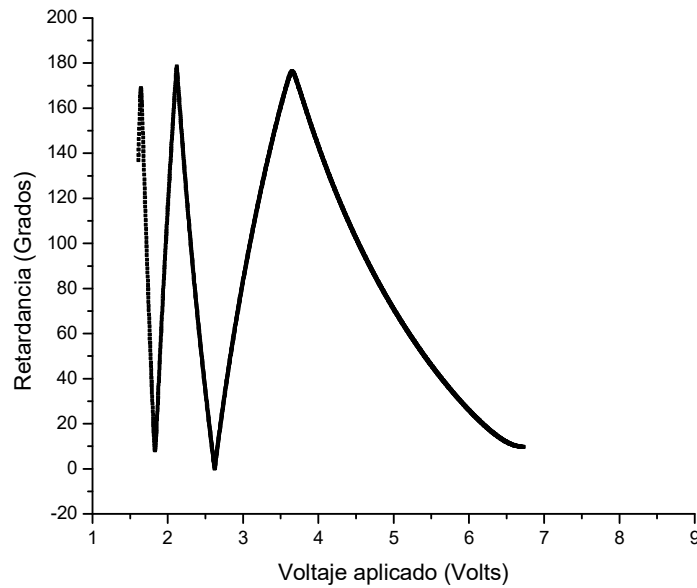


Figura 3.4 Relación de retardancia-voltaje aplicado.

Para obtener la función continua de voltaje contra retardancia es necesaria una etapa final conocida como “desdoblamiento de fase”. Este desdoblamiento de fase se debe realizar sobre los datos obtenidos de retardancia, y consiste primero en identificar el voltaje con el cual la retardancia tiene su primer máximo, y para los voltajes menores a este, se utilizará la siguiente ecuación sobre los valores correspondientes de retardancia:

$$\delta' = 2(\delta_{max}) - \delta. \quad (3.09)$$

Donde δ es la retardancia que se va a corregir y δ' es el nuevo valor de retardancia, resultando así una nueva curva con una nueva retardancia máxima alrededor de 360° . En esta nueva curva se identifica el voltaje que nos da la nueva retardancia máxima, y nuevamente a todos los valores de retardancia con voltajes menores a éste, se les aplicara la siguiente ecuación:

$$\delta'' = 2(\delta'_{max}) - \delta' \quad (3.10)$$

Donde δ_{max} es la retardancia máxima. Este procedimiento se repite hasta obtener una curva continua como la mostrada en la figura 3.5.

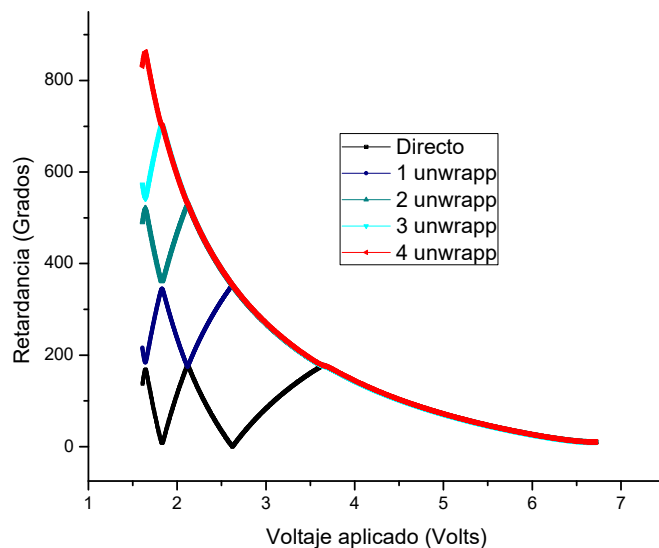


Figura 3.5. Relación de retardancia-voltaje aplicado después de aplicar varias veces el procedimiento de desdoblamiento de fase.

En el caso del primer retardador (RVCL 1*), figura 3.6, se tomaron mediciones en pasos de 2 mV en el rango de 1.6 a 8.1 V, que es el rango que cubre las retardancias que serán necesarias para el polarímetro. Este procedimiento se realizó 10 veces y el máximo error asociado en las mediciones es de 0.61° por lo que no tiene sentido poner barras de error en la gráfica.

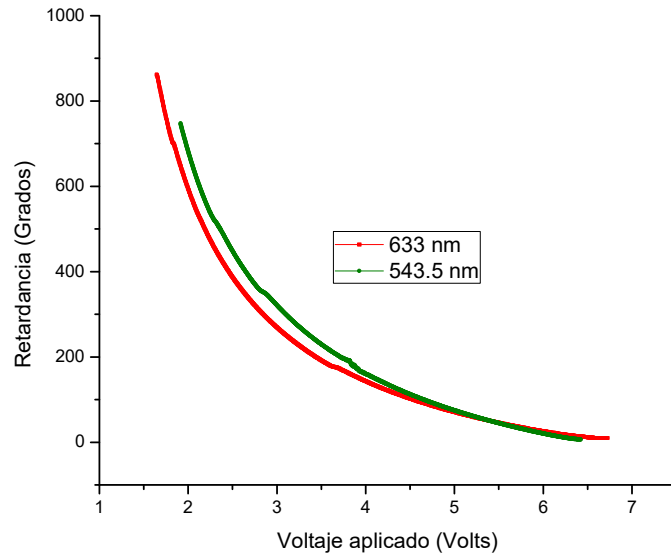


Figura 3.6 Relación voltaje aplicado-retardancia para RVCL 1*

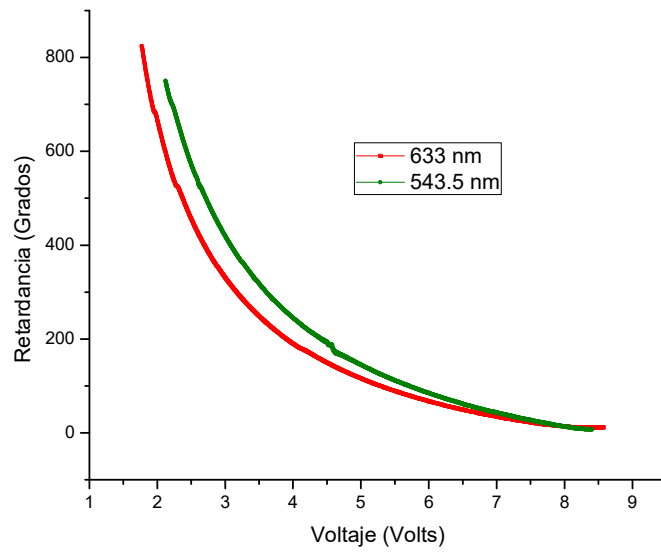


Figura 3.7 Relación voltaje aplicado-retardancia para RVCL 2*

En el caso del segundo retardador (RVCL 2*), figura 3.7, también se tomaron mediciones en pasos de 2 mV pero esta vez el rango estuvo entre 1.77 y 8.58 V. En este caso el máximo error asociado en las mediciones es de 0.74°, en general el error asociado fue un poco más grande que en el caso anterior.

En las figuras 3.6 y 3.7 se muestra la función de voltaje aplicado contra retardancia obtenida para cada uno de los retardadores caracterizados, y en dos longitudes de onda, 633 y 543.5 nm. En todos los casos se pudo notar que los RVCL no producen retardos nulos, debido a los retardos residuales de los cristales líquidos y al hecho de que nuestros RVCL no están compensados. En las tablas 3.3 a 3.6, se muestran los voltajes necesarios para obtener ciertos valores de retardancia, para cada RVCL, importantes para la etapa del polarímetro de Stokes.

RVCL 1* (633 nm)				
Voltaje	4.682 V	3.604 V	2.996 V	2.596 V
Retardancia	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π

Tabla 3.3. Retardancias importantes para RVCL 1*, para 633nm.

RVCL 2* (633 nm)				
Voltaje	5.486 V	2.858 V	2.240 V	1.894 V
Retardancia	$\pi/2$	2π	3π	4π

Tabla 3.4. Retardancias importantes para RVCL 2*, para 633 nm.

RVCL 1* (543.5 nm)				
Voltaje	4.786 V	3.878 V	3.257 V	2.795 V
Retardancia	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π

Tabla 3.5. Retardancias importantes para RVCL 1*, para 543.5nm.

RVCL 2* (543.5 nm)				
Voltaje	5.892 V	3.276 V	2.592 V	2.171 V
Retardancia	$\pi/2$	2π	3π	4π

Tabla 3.6. Retardancias importantes para RVCL 2*, para 543.5 nm.

3.2 MEDICION DE LOS PARAMETROS DE STOKES.

3.2.1 METODO DE MEDICION.

Para la medición de los parámetros de Stokes, se plantea un polarímetro que utiliza dos retardadores variables de cristal líquido y un polarizador lineal como base para el analizador de estados de polarización. En la figura 3.8 se muestra el arreglo experimental. Como fuente se utilizó un láser He-Ne de 633 nm, la luz que incide sobre la muestra se filtra espacialmente, se colima con una lente y atraviesa un polarizador lineal con su eje de transmisión a 45° , para asegurar que a la muestra le está incidiendo luz polarizada. Después de que el haz atraviesa la muestra el haz pasa por el RVCL 1*, con su eje lento horizontal, después por el RVCL 2* con su eje a 45° respecto al anterior, por último atraviesa un polarizador lineal horizontal, antes de llegar al detector. En la figura 3.9 se muestra una fotografía del analizador de estados de polarización, ya montado.

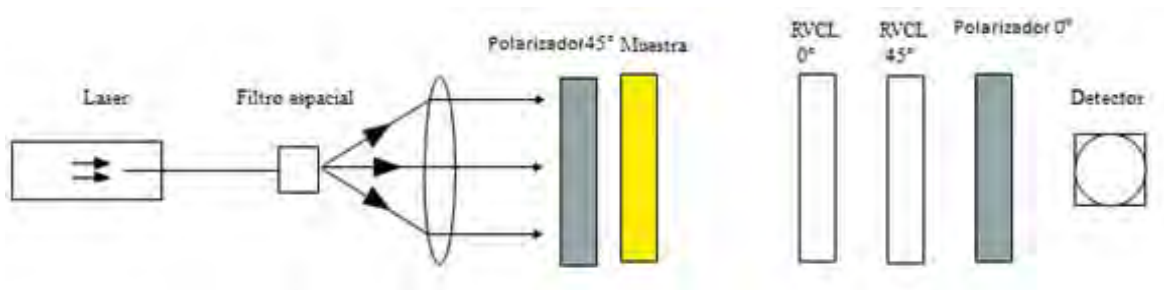


Figura 3.8. Diagrama experimental del polarímetro de Stokes.



Figura 3.9. Fotografía del analizador de estados de polarización.

Con el arreglo mostrado en la figura 3.8, se pueden medir los cuatro parámetros de Stokes. Tomando en cuenta que el vector de Stokes saliendo de la muestra es S_{out} , y el vector de Stokes incidiendo en el detector es,

$$S_I = M_{P0}M_{R2}M_{R1}S_{out} \quad (3.11)$$

De acuerdo a la tabla 2.2 y el arreglo se tiene que los valores de las matrices son,

$$S_I = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_2 & 0 & \sin \delta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \delta_2 & 0 & \cos \delta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_1 & -\sin \delta_1 \\ 0 & 0 & \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{pmatrix} S_{out} \quad (3.12)$$

Multiplicando las matrices se tiene que,

$$\begin{pmatrix} S_{I0} \\ S_{I1} \\ S_{I2} \\ S_{I3} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos \delta_2 & \sin \delta_1 \sin \delta_2 & \cos \delta_1 \sin \delta_2 \\ 1 & \cos \delta_2 & \sin \delta_1 \sin \delta_2 & \cos \delta_1 \sin \delta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{out0} \\ S_{out1} \\ S_{out2} \\ S_{out3} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

El primer término del vector de Stokes final será la intensidad detectada, por lo que se tiene,

$$S_{I0} = \frac{1}{2} (S_{out0} + S_{out1} \cos \delta_2 + S_{out2} \sin \delta_1 \sin \delta_2 + S_{out3} \cos \delta_1 \sin \delta_2) \quad (3.14)$$

Recordando que los parámetros de Stokes están relacionados con las intensidades medibles y se pueden escribir de las siguientes formas,

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_h + I_v \\ I_h - I_v \\ I_{45} - I_{-45} \\ I_R - I_L \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

Donde I_H, I_V, I_{45} y I_{-45} son polarización lineal horizontal, vertical, en $+45^\circ$ y en -45° , respectivamente, y I_R y I_L son polarización circular derecha e izquierda, respectivamente. Entonces, si se requiere detectar polarización I_H , se necesita que:

$$\begin{aligned} \cos \delta_2 &= 1, \sin \delta_2 = 0 \\ \delta_2 &= 0, 2\pi, 4\pi, \dots \end{aligned}$$

Para este caso, el primero término del vector de Stokes incidente en el detector, queda como:

$$S_{I0} = \frac{1}{2}(S_{out0} + S_{ou1}) = \frac{1}{2}([I_H + I_V] + [I_H - I_V]) = I_H \quad (3.16)$$

Si se requiere detectar polarización I_V , se necesita,

$$\begin{aligned} \cos \delta_2 &= -1, \sin \delta_2 = 0 \\ \delta_2 &= \pi, 3\pi, 5\pi, \dots \end{aligned}$$

En este caso, el primer parámetro de Stokes quedo como:

$$S_{I0} = \frac{1}{2}(S_{out0} - S_{out1}) = \frac{1}{2}([I_H + I_V] - [I_H - I_V]) = I_V \quad (3.17)$$

Si se requiere detectar polarización I_+ , se necesita,

$$\cos \delta_2 = 0, \sin \delta_2 = 1$$

$$\cos \delta_1 = 0, \sin \delta_1 = 1$$

$$\delta_2 = \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots$$

$$\delta_1 = \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots$$

En este caso, el primer parámetro quedo como:

$$S_{I1} = \frac{1}{2}(S_{out0} + S_{out2}) = \frac{1}{2}([I_+ + I_-] + [I_+ - I_-]) = I_+ \quad (3.18).$$

Si se requiere detectar polarización I_- , se necesita,

$$\cos \delta_2 = 0, \sin \delta_2 = 1$$

$$\cos \delta_1 = 0, \sin \delta_1 = -1$$

$$\delta_2 = \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots$$

$$\delta_1 = \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{2} \dots$$

En este caso, el primer parámetro quedo como:

$$S_{I1} = \frac{1}{2}(S_{out0} - S_{out2}) = \frac{1}{2}([I_+ + I_-] - [I_+ - I_-]) = I_- \quad (3.19)$$

Si se requiere polarización I_R , se necesita,

$$\cos \delta_2 = 0, \sin \delta_2 = 1$$

$$\cos \delta_1 = 1, \sin \delta_1 = 0$$

$$\delta_2 = \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots$$

$$\delta_1 = 0, 2\pi, 4\pi$$

En este caso, el primer parámetro quedo como:

$$S_{I1} = \frac{1}{2}(S_{out0} + S_{out3}) = \frac{1}{2}([I_R + I_L] + [I_R - I_L]) = I_R \quad (3.20)$$

Si se requiere polarización I_L , se necesita,

$$\begin{aligned}\cos \delta_2 &= 0, \sin \delta_2 = 1 \\ \cos \delta_1 &= -1, \sin \delta_1 = 0 \\ \delta_2 &= \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \\ \delta_1 &= \pi, 3\pi, 5\pi, \dots\end{aligned}$$

En este caso, el primer parámetro quedo como:

$$S_{I1} = \frac{1}{2}(S_{out0} - S_{out3}) = \frac{1}{2}([I_R + I_L] - [I_R - I_L]) = I_L \quad (3.21)$$

Tomando en cuenta las relaciones (3.16-3.21) y las tablas 3.3 y 3.4, se puede saber cuáles son las retardancias y voltajes necesarios para obtener cada una de las seis intensidades, en la tabla 3.7 se muestran estos valores. Con estas mediciones se puede reconstruir el vector de Stokes, utilizando la ecuación (3.15).

Combinación	Polarización detectada	Retardancias (Radianes)		Voltajes (Volts)	
		RVCL 1*	RVCL 2*	RVCL 1*	RVCL 2*
1	I_H		2π		2.858
2	I_V		3π		2.240
3	I_+	$\pi/2$	$\pi/2$	4.682	5.486
4	I_-	$3\pi/2$	$\pi/2$	2.996	5.486
5	I_R	2π	$\pi/2$	2.596	5.486
6	I_L	π	$\pi/2$	3.604	5.486

Tabla 3.7. Valores de retardancias y voltajes necesarios para las mediciones de intensidad.

3.2.2 AUTOMATIZACION DEL EXPERIMENTO.

El diagrama de flujo del proceso utilizado para la automatización del experimento se muestra en la figura 3.10. La función de este programa consiste en controlar el voltaje aplicado a cada uno de los RVCL, para obtener las combinaciones

mostradas en la tabla 3.7. En cada una de las combinaciones el detector mide el valor de la intensidad y lo guarda. Una vez que se tienen las mediciones de intensidad, se procesan los datos y se calcula el vector de Stokes y el grado de polarización del haz de luz. En la figura 3.11 se muestra el panel frontal del programa utilizado para la automatización del experimento.

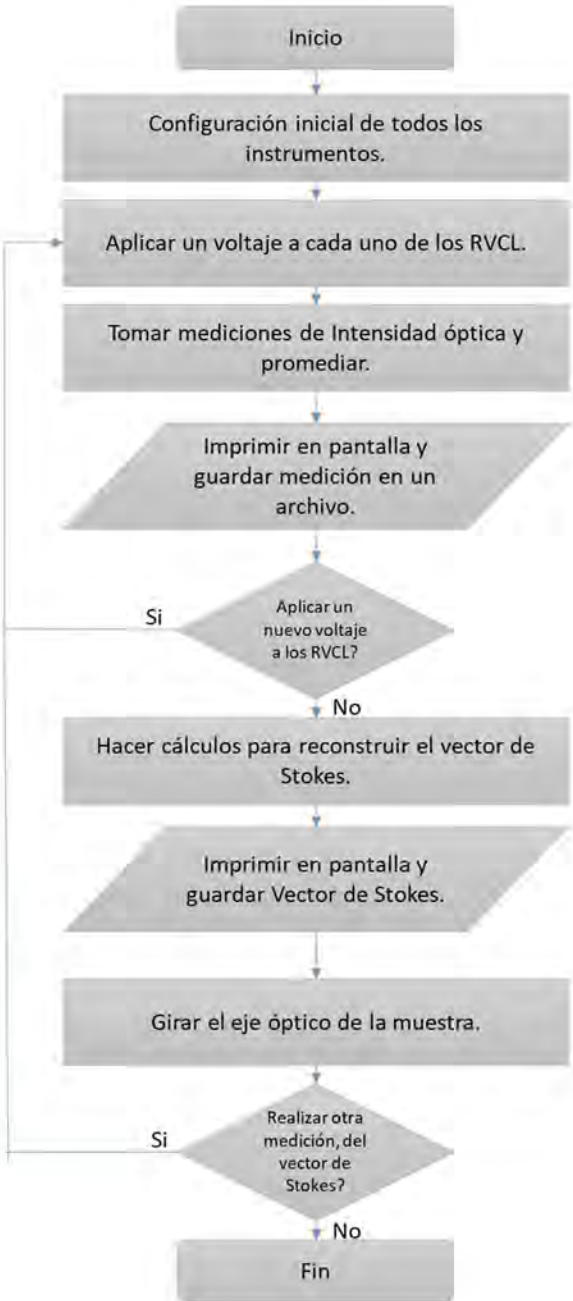


Figura 3.10. Diagrama de Flujo del proceso de automatización.

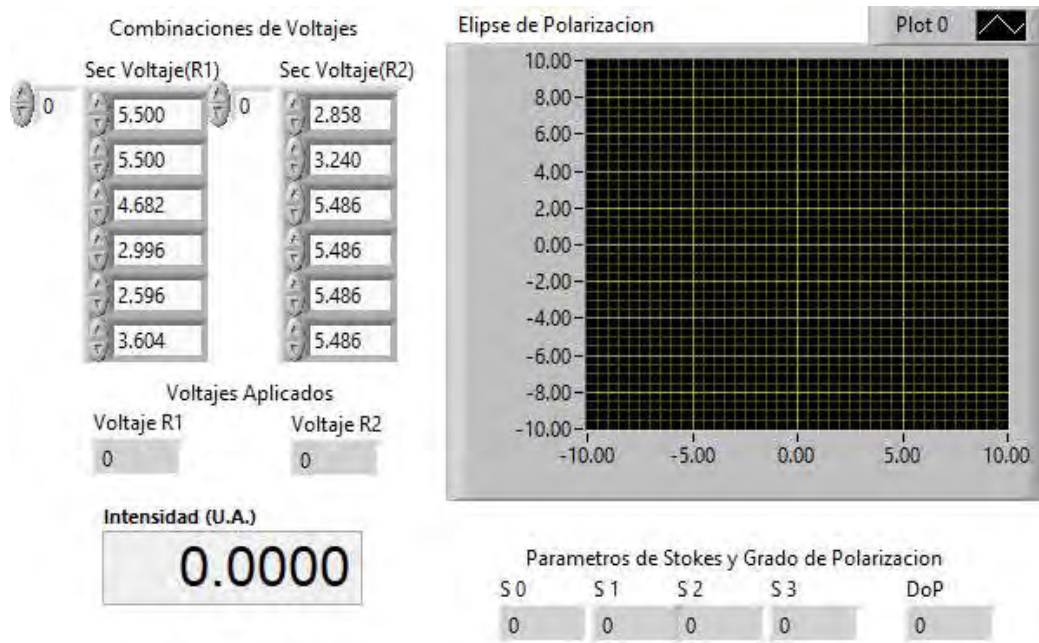


Figura 3.11. Panel frontal del programa para realizar mediciones del vector de Stokes, en el software LabView.

En la parte izquierda del panel frontal, se pueden ajustar los valores de voltaje aplicado para cada una de las combinaciones, también muestra el voltaje que se está aplicando en ese momento y el valor de intensidad medido. En la parte derecha, se muestran los valores calculados para los parámetros de Stokes y el grado de polarización. En la parte superior derecha, muestra una gráfica de la elipse de polarización, en base al vector de Stokes calculado.

3.2.3 RESULTADOS.

Con el método descrito anteriormente y la automatización del experimento, se aplicaron seis combinaciones de voltajes a los RVCL y se midió la intensidad detectada en cada combinación. Los valores de intensidad medidos, se sustituyeron en las relaciones de la ecuación (3.15), por último, se normalizaron los datos respecto al primer parámetro de Stokes, para calcular los demás parámetros.

Para probar el funcionamiento del polarímetro se midieron los vectores de Stokes de tres tipos muestras. Las muestras utilizadas fueron: un polarizador lineal, una placa retardadora de $\lambda/2$, y una placa retardadora de $\lambda/4$, cada una se roto en el

rango de 0° a 180° en pasos de 10° . Los valores calculados teóricamente, están definidos por las relaciones mostradas en la tabla 2.2 y la ecuación (2.24). Se toma en cuenta un vector de Stokes incidente en la muestra de $(1, 0, 1, 0)^T$, que es lo equivalente al polarizador lineal a 45° . En las figuras 3.12, 3.13 y 3.14, se muestran los resultados obtenidos, junto con los valores calculados teóricamente, para cada muestra.

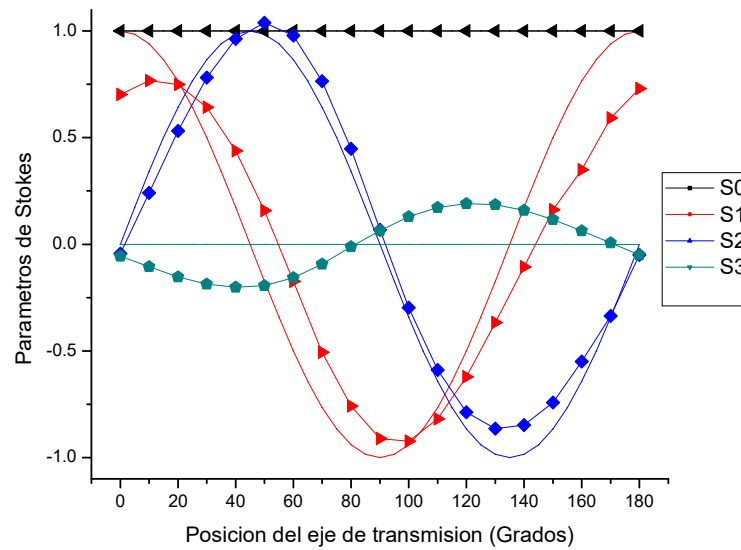


Figura 3.12. Las líneas con un símbolo representan los datos experimentales del Vector de Stokes de la luz a través de un polarizador lineal rotando. Las líneas continuas son los valores teóricos.

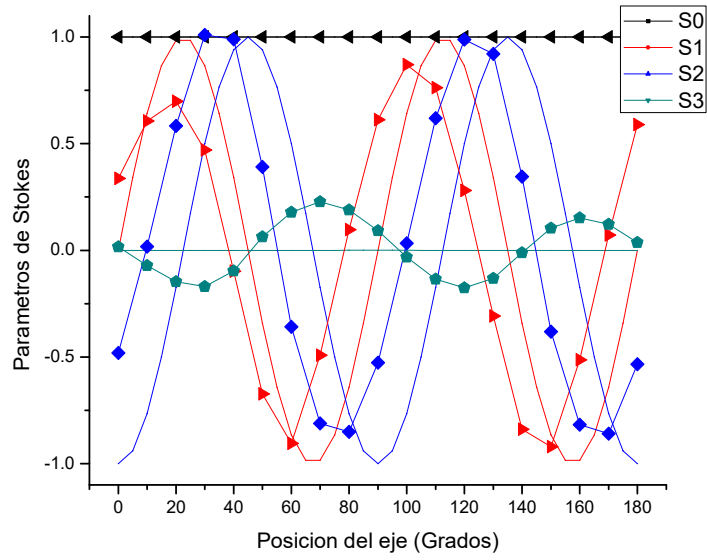


Figure 3.13. Las líneas con un símbolo representan los datos experimentales del Vector de Stokes de la luz a través de una placa de $\lambda/2$ rotando. Las líneas continuas son los valores teóricos.

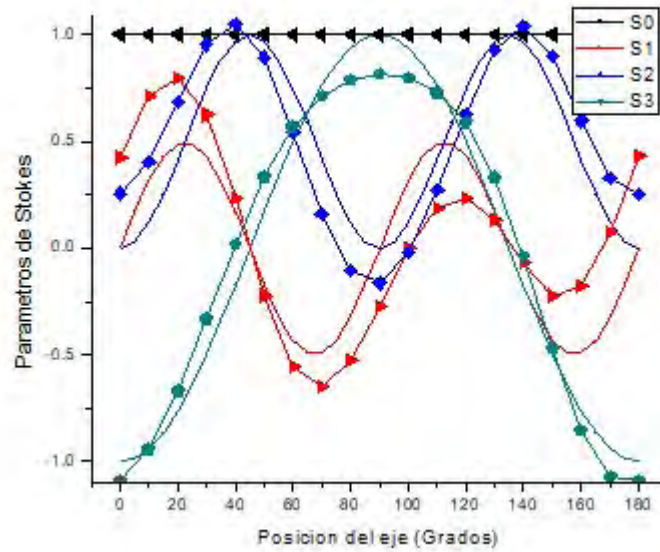


Figure 3.14. Las líneas con un símbolo representan los datos experimentales del Vector de Stokes de la luz a través de una placa de $\lambda/4$ rotando. Las líneas continuas son los valores teóricos.

Como se puede observar en las figuras 3.12 y 3.13, referentes al polarizador y la placa de $\lambda/2$, los resultados para los parámetros S1 y S2, son muy parecidos a los valores esperados, pero se puede ver un desfase en la posición de los ejes, también se observa que hay discrepancias en la amplitud. En el caso del parámetro S3, se puede observar que en ambos casos aparece una componente, la cual debería ser cero, ya que con estos elementos no se involucran estados de polarización circulares.

En la figura 3.14, referente a la placa de $\lambda/4$, se puede observar nuevamente un ligero desfase en las componentes S1 y S2, además de que hay una notable discrepancia, en el caso teórico las curvas son simétricas, cosa que no sucede con nuestros datos experimentales. En el caso del parámetro S3 se puede observar, que las curvas son muy parecidas, con una ligera discrepancia en amplitud.

Las discrepancias en amplitud, que existen en todos los casos, pueden deberse a que las muestras de elementos polarizadores no son perfectas, y por lo tanto podrían estar afectando el grado de polarización del haz que incide en el detector. Tomando en cuenta esto, se puede considerar que existen contribuciones de luz no polarizada, en la intensidad detectada.

Los errores en el desfase, podrían solo indicar un error en el posicionamiento de los ejes ópticos de las muestras. En cuanto a las componentes circulares que no deberían aparecer puede deberse a un error en la posición del eje rápido o en la retardancia obtenida en cada uno de los RVCL, causando así polarizaciones elípticas.

Se volvieron a realizar las mismas mediciones pero esta vez se hizo incidir luz polarizada horizontalmente, sobre la muestra. Los valores obtenidos experimentalmente y los valores esperados se muestran en las figuras 3.15 a 3.17. Cabe mencionar que se realizó nuevamente la caracterización de los RVCL, obteniendo diferencias de hasta 200 mV comparado con los valores mostrados en la tabla 3.7.

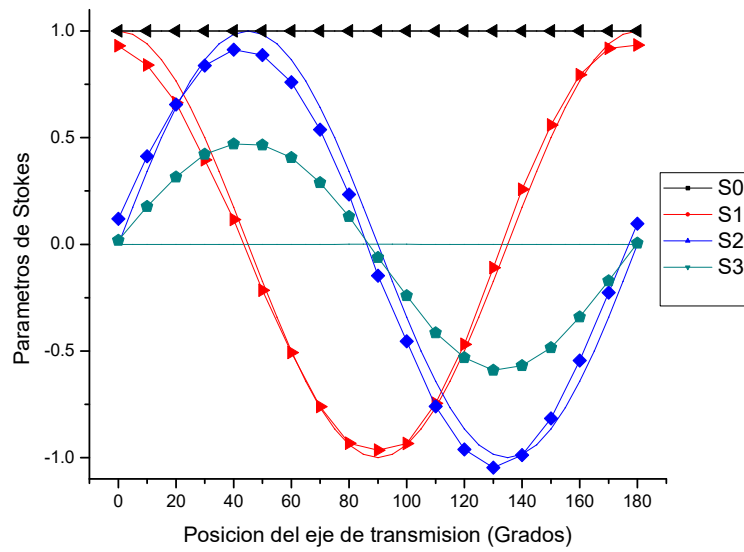


Figura 3.15. Las líneas con un símbolo representan los datos experimentales del Vector de Stokes de la luz a través de un polarizador lineal rotando. Las líneas continuas son los valores teóricos.

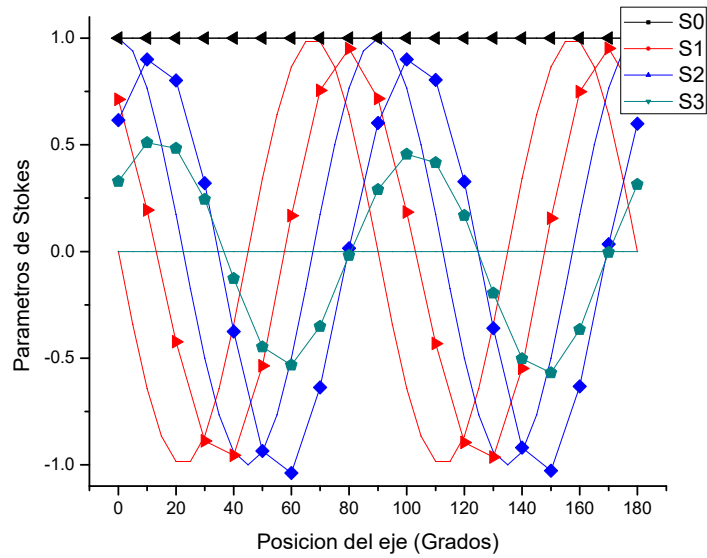


Figure 3.16. Las líneas con un símbolo representan los datos experimentales del Vector de Stokes de la luz a través de una placa de $\lambda/2$ rotando. Las líneas continuas son los valores teóricos.

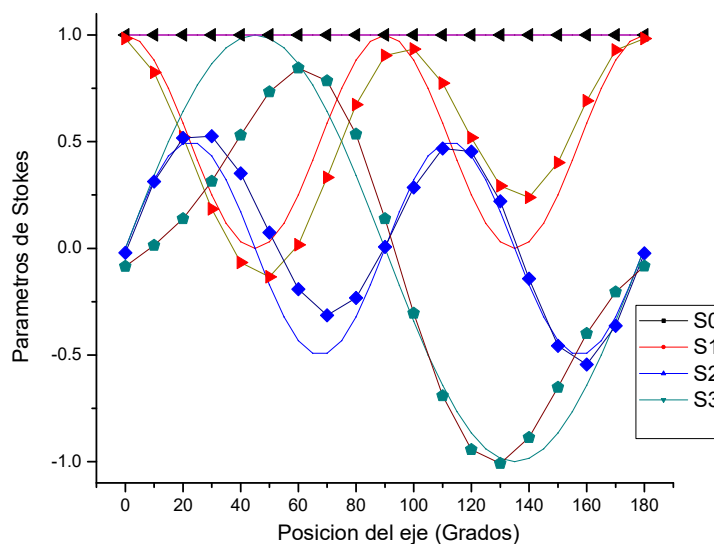


Figure 3.17. Las líneas con un símbolo representan los datos experimentales del Vector de Stokes de la luz a través de una placa de $\lambda/4$ rotando. Las líneas continuas son los valores teóricos.

En las figuras 3.15 y 3.16, se puede ver que los parámetros S1 y S2 se ajustan mejor en este caso, teniendo solo un pequeño desfase y obteniendo amplitudes muy cercanas al valor teórico. Para el parámetro S3 se puede notar que esta componente aumenta mucho teniendo un máximo error de hasta el 40%, casi el doble que en el caso anterior. En la figura 3.17, se pueden observar diferencias muy similares a las presentadas en la figura 3.14, donde aparecen diferencias muy notables en todos los tres parámetros. En general se puede observar que los parámetros S1 y S2 se ajustan mucho mejor en este caso, mientras que el parámetro S3 tiene un peor ajuste. Una de las posibles razones de estas diferencias, es la caracterización de los retardadores variables, ya que resulta muy complicado saber que tanto han cambiado los valores reales a los de la caracterización. Estos cambios en las retardancias, de los RVCL, para un voltaje aplicado pueden deberse a distintos factores como lo son la humedad o temperatura.

3.3 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA.

En este capítulo se presentan las bases teóricas de la calibración, así como también los resultados, después de realizar el proceso de calibrado, de las muestras utilizadas en el capítulo 3.2.

Debido a que los valores de intensidad en cada combinación de la tabla 3.5, no se ajustan por completo a los valores ideales, se necesita realizar un procedimiento de calibración. El método de calibración propuesto en esta tesis, utiliza seis muestras de calibración y no requiere de ningún tipo de optimización, las muestras de calibración utilizadas fueron un polarizador lineal horizontal y vertical, una placa retardadora de $\lambda/2$ con su eje rápido a 30° y 60° , y un placa retardadora de $\lambda/4$ con su eje rápido a 30° y 60° .

Con estas seis muestras de calibración se realiza un ajuste de los valores experimentales de intensidad, a los valores teóricos de un polarímetro con errores, para poder calcular errores en el arreglo experimental. Estos errores incluyen, el error en el ángulo del eje rápido de cada uno de los RVCL, errores en los valores de retardancia utilizados en los RVCL para cada combinación, y errores en el ángulo de los ejes de transmisión de las seis muestras, en total se tienen 15 errores como parámetros de ajuste. El método de ajuste que se utilizó para este procedimiento es un algoritmo de "Powell" [26], en este tipo de algoritmos se necesita una solución inicial, por lo que se utilizó un arreglo ideal como solución inicial.

Se ajustan los parámetros del polarímetro para obtener las intensidades experimentales con las muestras de calibración, para obtener una estimación de los parámetros reales del polarímetro de Stokes. Después de obtener los parámetros de ajuste, estos se mantienen fijos, y con las mediciones de intensidad se puede reconstruir el vector de Stokes completo de un haz de luz desconocido. En la figura 3.18 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo utilizado para la calibración de los datos.



Figura 3.18. Diagrama de Flujo del algoritmo de calibración.

En las figuras 3.19 a 3.21 se muestran los datos de los parámetros de Stokes después de aplicar el método de calibración.

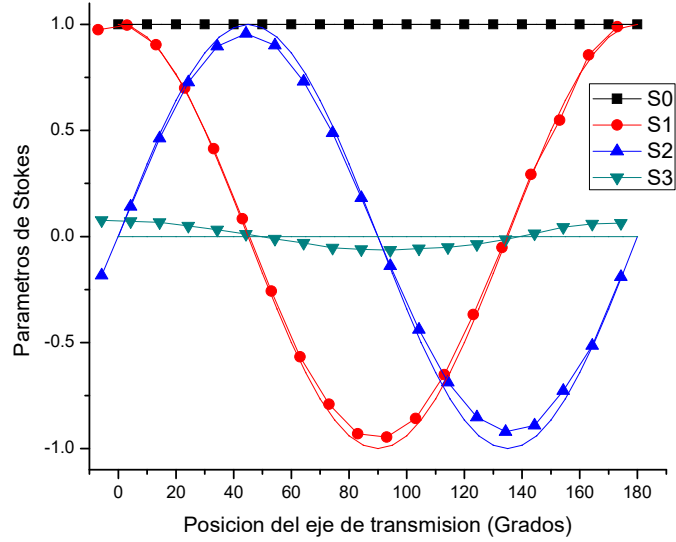


Figura 3.19. Las líneas con un símbolo representan las mediciones para el vector de Stokes de luz a través de un polarizador lineal rotando, después de la calibración. Las líneas continuas son los valores teóricos.

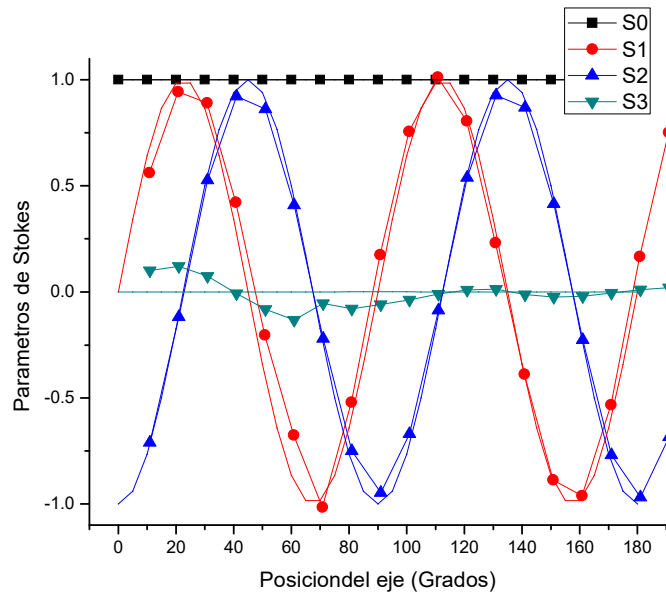


Figura 3.20. Las líneas con un símbolo representan las mediciones para el vector de Stokes de luz a través de una placa de $\lambda/2$ rotando, después de la calibración. Las líneas continuas son los valores teóricos.

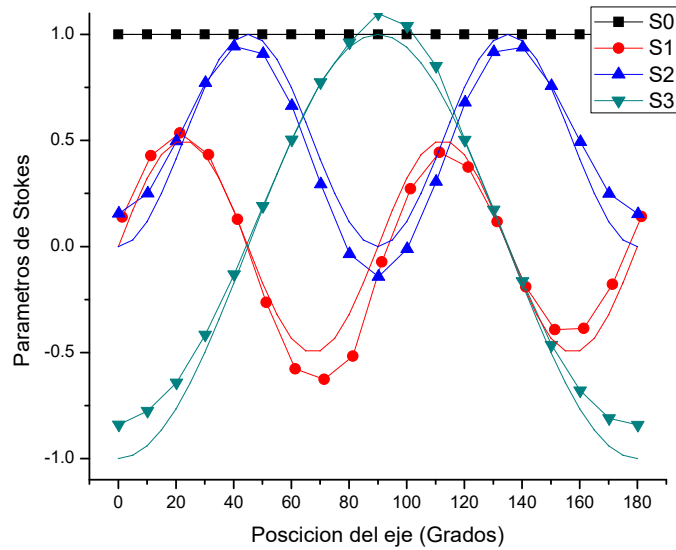


Figura 3.21. Las líneas con un símbolo representan las mediciones para el vector de Stokes de luz a través de una placa de $\lambda/4$ rotando, después de la calibración. Las líneas continuas son los valores teóricos.

En las figuras anteriores se puede ver que el vector de Stokes resultante, en todos los casos fue más preciso o cercano a los valores esperados. Los desfases en la posición de los ejes fueron corregidos, así como también las amplitudes, excepto en la placa de $\lambda/4$, ya que en esta aún se pueden observar algunas discrepancias y asimetrías. Se realizó un ajuste de las curvas resultantes a las curvas calculadas mediante las siguientes ecuaciones, respectivamente.

$$S_{pol} = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos(2\theta) + \sin(2\theta) \cos(2\theta)/1 + \sin(2\theta) \\ \sin(2\theta) + \sin^2(2\theta)/1 + \sin(2\theta) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

$$S_{\lambda/2} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \sin(2\theta) \cos(2\theta) \\ \sin^2(2\theta) - \cos^2(2\theta) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

$$S_{\lambda/4} = \begin{pmatrix} 1 \\ \sin(2\theta)\cos(2\theta) \\ \sin^2(2\theta) \\ -\cos(2\theta) \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Los coeficientes de correlación (R^2), para cada una de las curvas de los parámetros de Stokes se muestran en la tabla 3.8. En el caso en que las curvas son una constante, se utilizó la desviación estándar (σ) como parámetro de comparación.

Pol 45° incidente.	Polarizador Lineal		Placa retardadora $\lambda/2$		Placa retardadora $\lambda/4$	
	Mediciones Directas	Mediciones optimizadas.	Mediciones Directas	Mediciones optimizadas.	Mediciones Directas	Mediciones optimizadas.
S1	R2= 0.954	R2=0.998	R2=0.931	R2= 0.980	R2=0.595	R2=0.935
S2	R2=0.987	R2=0.996	R2=0.987	R2=0.997	R2=0.760	R2=0.912
S3	$\sigma = 0.14$	$\sigma = 0.05$	$\sigma = 0.13$	$\sigma = 0.06$	R2=0.973	R2= 0.983

Tabla 3.8. R^2 para cada curva de los parámetros de Stokes de todas las muestras.

Para poder tener un buen ajuste de los datos experimentales con los valores teóricos, es necesario tener un valor cercano a 1 para el coeficiente de correlación, y cercano a 0 para la desviación estándar. En la tabla 3.6 se puede notar que con el método de calibración propuesto, todos los valores de coeficiente de correlación aumentaron y las desviaciones estándar disminuyeron, lo que quiere decir que el ajuste en todos los casos fue mejor al aplicar el método de calibración. La mejoría más notable se puede ver en la placa de $\lambda/4$ donde se tienen los peores ajustes de las mediciones directas.

Otra manera de notar la mejoría al utilizar el método de calibración, es calculando el grado de polarización (DoP). Con el arreglo utilizado se esperaría obtener un grado de polarización muy cercano a uno para todas las muestras sin importar la posición de su eje óptico, debido a que toda la luz a analizar está pasando a través de un polarizador antes de llegar a la muestra. En las figuras 3.22 a 3.24 se muestra el grado de polarización medido para cada muestra, antes y después de la calibración.

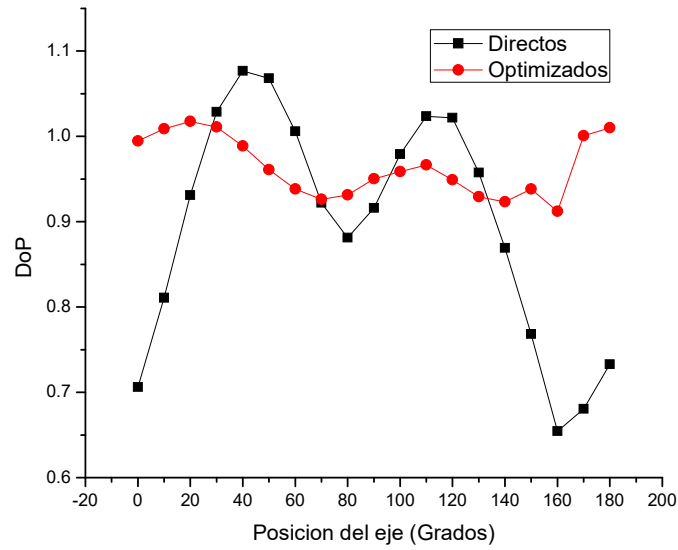


Figura 3.22. Grado de polarización en función de la posición del eje de transmisión de un polarizador lineal. Los datos en negro son los datos antes de la calibración y los rojos después de la calibración.

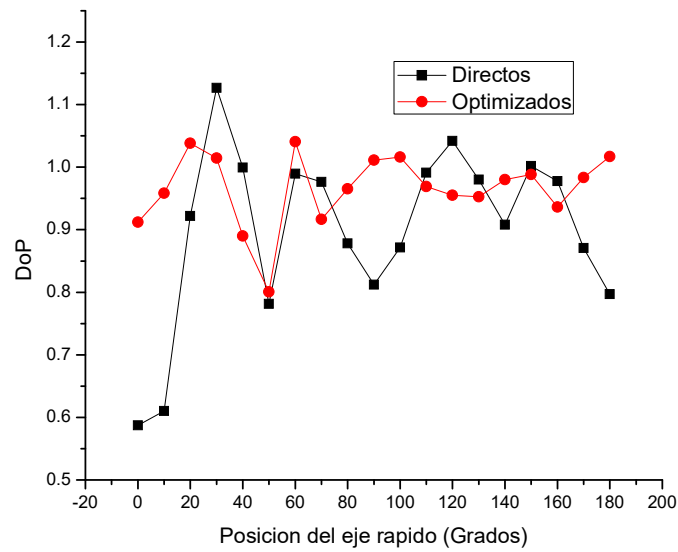


Figura 3.23. Grado de polarización en función de la posición del eje rápido de una placa de $\lambda/2$. Los datos en negro son los datos antes de la calibración y los rojos después de la calibración.

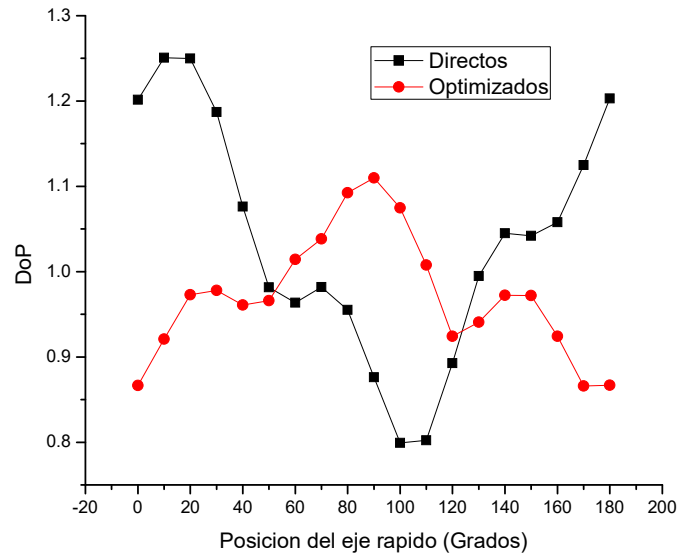


Figura 3.24. Grado de polarización en función de la posición del eje rápido de una placa de $\lambda/4$. Los datos en negro son los datos antes de la calibración y los rojos después de la calibración.

En las figuras anteriores se puede observar que el grado de polarización, en los tres tipos de muestras, tiene una menor variación al optimizar los datos. Además los valores se acercan más al valor esperado.

Debido a que en todos los casos el grado de polarización no debería de cambiar, se tomó el promedio y la desviación estándar, como parámetros de comparación antes y después de la calibración. Estos datos se presentan en la tabla 3.9.

Muestra	Datos directos	Datos optimizados
Polarizador Lineal	0.896 ± 0.135	0.964 ± 0.035
Placa $\lambda/2$	0.901 ± 0.138	0.966 ± 0.058
Placa $\lambda/5$	1.036 ± 0.141	0.972 ± 0.072

Tabla 3.9. Promedio y desviación estándar del Grado de polarización de todas las muestras.

Como ya se mencionó en todos los casos esperamos un valor cercano a 1, y la menor desviación estándar posible. En la tabla 3.9 se puede ver que después de aplicar el método de calibración, todos los valores son más cercano a 1, presentando un error máximo del 3.6%, mientras que los datos en crudo tienen

errores de hasta el 10.4%. Sumando a esto, las variaciones que son representada mediante la desviación estándar, disminuyen a menos de la mitad en los tres casos. Lo que nos confirma que el método de calibración es adecuado para este tipo de mediciones.

Se realizó la calibración sobre los datos de las figuras 3.15 a 3.17, los resultados después de realizar el método de calibración se muestran en las figuras 3.25 a 3.27.

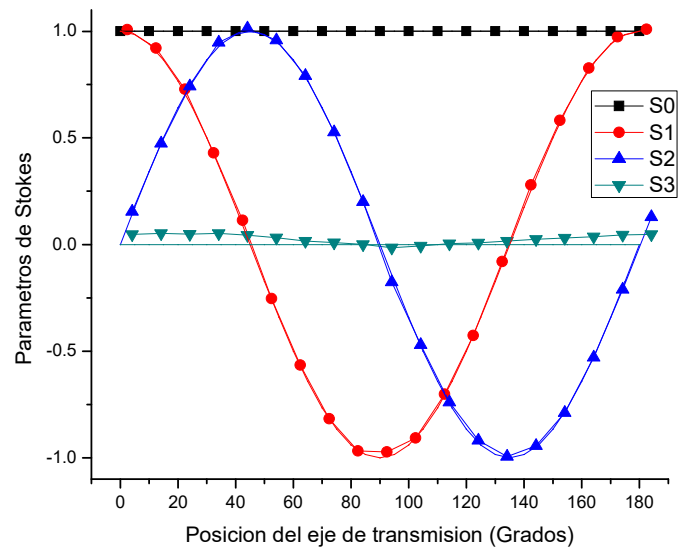


Figura 3.25. Las líneas con un símbolo representan las mediciones para el vector de Stokes de luz a través de un polarizador lineal rotando, después de la calibración. Las líneas continuas son los valores teóricos.

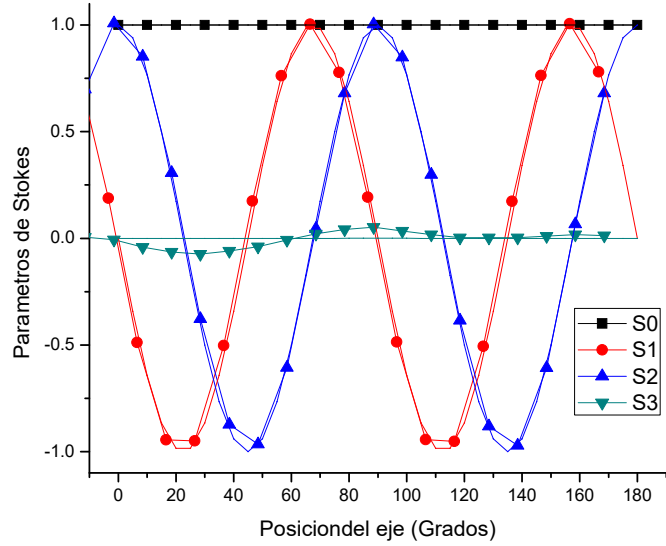


Figura 3.26. Las líneas con un símbolo representan las mediciones para el vector de Stokes de luz a través de una placa de $\lambda/2$ rotando, después de la calibración. Las líneas continuas son los valores teóricos.

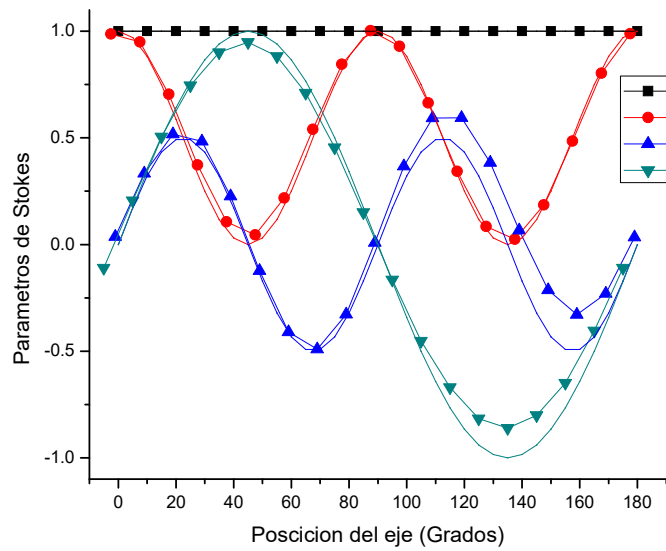


Figura 3.27. Las líneas con un símbolo representan las mediciones para el vector de Stokes de luz a través de una placa de $\lambda/4$ rotando, después de la calibración. Las líneas continuas son los valores teóricos.

Se calcularon los coeficientes de correlación y la desviación estándar de la misma manera que el caso anterior, estos se muestran en la tabla 3.10.

Pol 0° incidente	Linear Polarizer		Half-wave plate.		Quarter-wave plate.		
	Stokes parameters	Direct measurements	After calibration.	Direct measurements	After calibration.	Direct measurements	After calibration.
S1		R2=0.997	R2=0.9997	R2=0.997	R2= 0.9999	R2=0.820	R2=0.995
S2		R2=0.996	R2=0.9997	R2=0.995	R2=0.9998	R2=0.922	R2=0.908
S3		$\sigma = 0.37$	$\sigma = 0.02$	$\sigma = 0.38$	$\sigma = 0.03$	R2=0.841	R2= 0.986

Tabla 3.10. R² para cada curva de los parámetros de Stokes de todas las muestras.

Se obtuvieron resultados similares solo que en el caso de los parámetros S1 y S2 los ajustes finales fueron mucho más precisos, que al incidir luz polarizada a 45° , esto debido al hecho de que la mayoría de los datos directamente del experimento eran mejores. En el caso del parámetro S3, los resultados directamente del experimento tenían un peor ajuste, teniendo desviaciones estándar de hasta 0.38, pero al realizar la calibración los datos optimizados se corrigieron mejor que en el caso anterior teniendo variaciones menores al 0.03, mientras que en el caso anterior la mínima fue de 0.05.

Capítulo 4 Polarimetría de Imagen

4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama experimental para la obtención de las imágenes polarimétricas de los parámetros de Stokes. Como fuente se utilizó un LED blanco, seguido de un polarizador lineal horizontal, para asegurar que está incidiendo luz blanca polarizada en la muestra. Para la formación de imágenes se utilizó un arreglo telescópico junto con una cámara CCD, en la cual se formó la imagen.

El haz de luz saliendo de la muestra es enfocado con una lente acromática, la cual forma la imagen en infinito, crean rayos paralelos entre ambas lentes. En el camino óptico donde los rayos son paralelos podemos colocar el analizador de estados de polarización sin tener ninguna deformación en la imagen. El último lente es usado para enfocar los rayos paralelos en la cámara CCD, y así obtener las imágenes polarimétricas. Antes de la cámara CCD se colocó un filtro de color, ya que las retardancias son para una sola longitud de onda y en este caso se tiene luz blanca como fuente.

El polarímetro de imagen de Stokes obtiene seis imágenes polarizadas para reconstruir una imagen completa con toda la información del vector de Stokes. Para obtener las seis imágenes polarizadas, cada imagen fue tomada usando las mismas combinaciones, de retardancias, mostradas en la tabla 3.7.

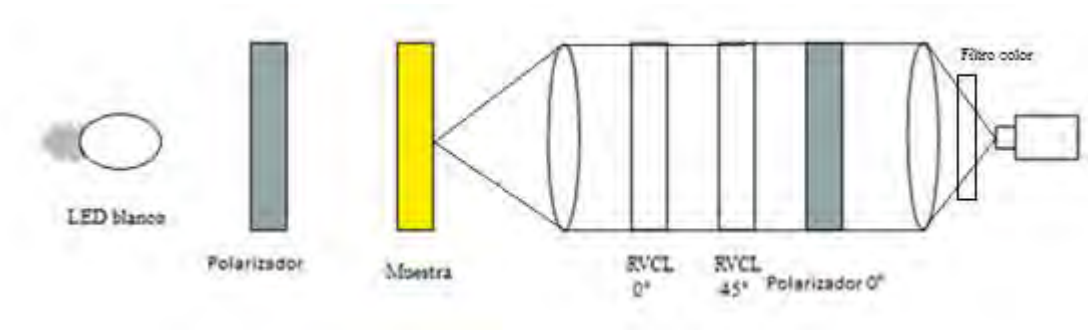


Figura 4.1. Diagrama experimental del polarímetro de Stokes, para formación de imágenes.

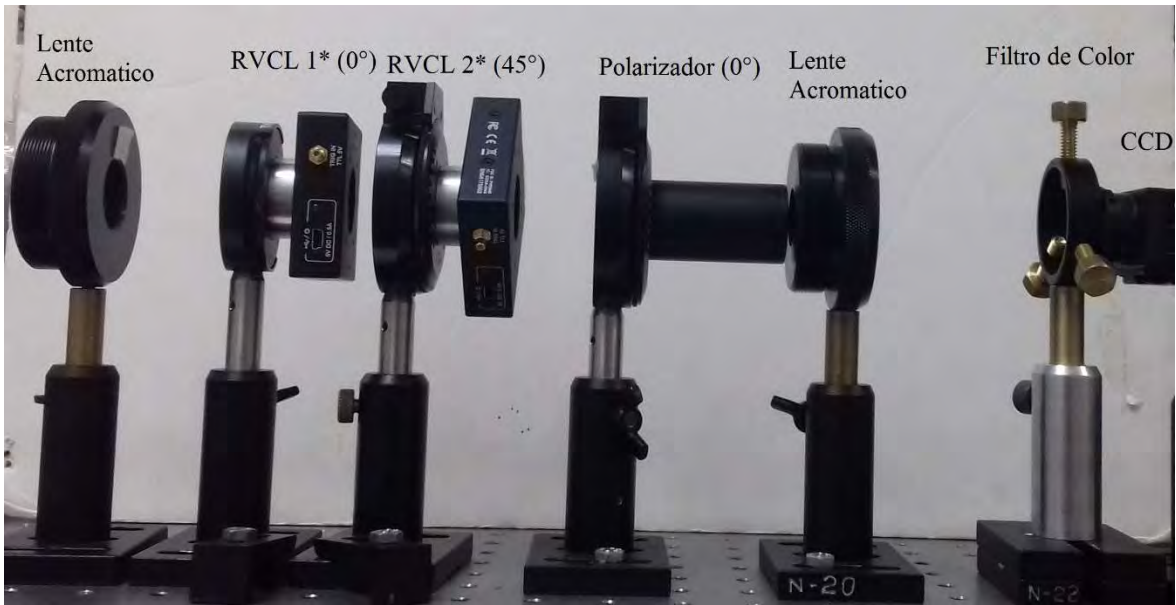


Figura 4.2. Fotografía del polarímetro de Stokes, para formación de imágenes.

4.2 IMÁGENES POLARIMÉTRICAS.

Con el polarímetro de Stokes para la formación de imágenes, se tomaron imágenes de las seis muestras de calibración. Las imágenes del segundo, tercer y cuarto parámetro de Stokes fueron normalizadas, dividiendo pixel por pixel entre la imagen de intensidad, y reconstruyendo la imagen de acuerdo a la ecuación (3.15). Las imágenes obtenidas directamente del experimento se muestran en las figuras 4.3 a 4.7.

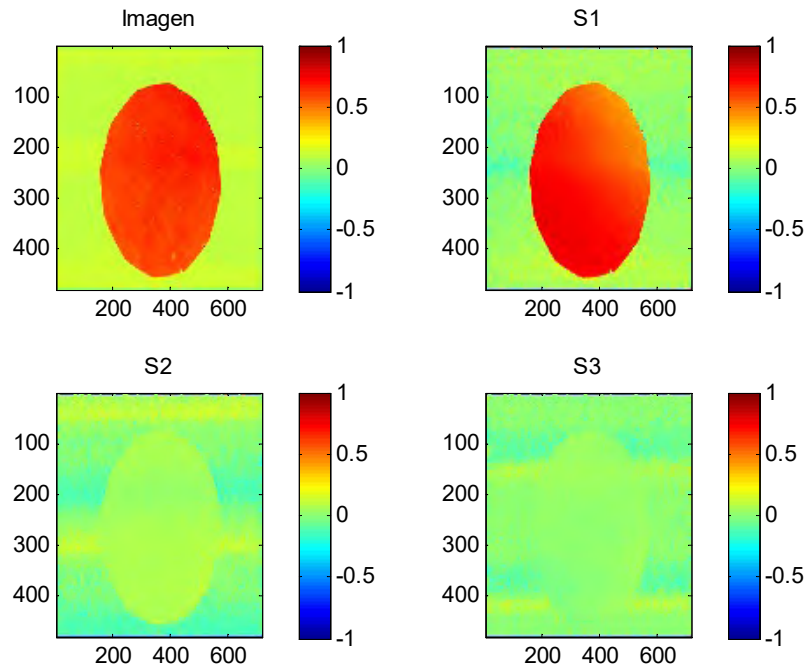


Figura 4.3. Imagen en intensidad y parámetros de Stokes, de un polarizador lineal horizontal.

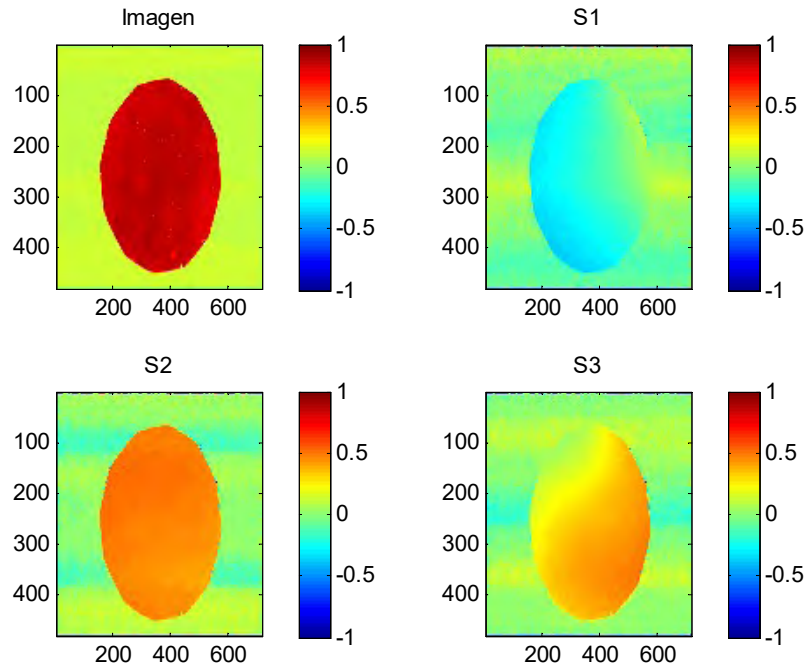


Figura 4.4. Imagen en intensidad y parámetros de Stokes, de una placa de $\lambda/2$ con su eje a 30° .

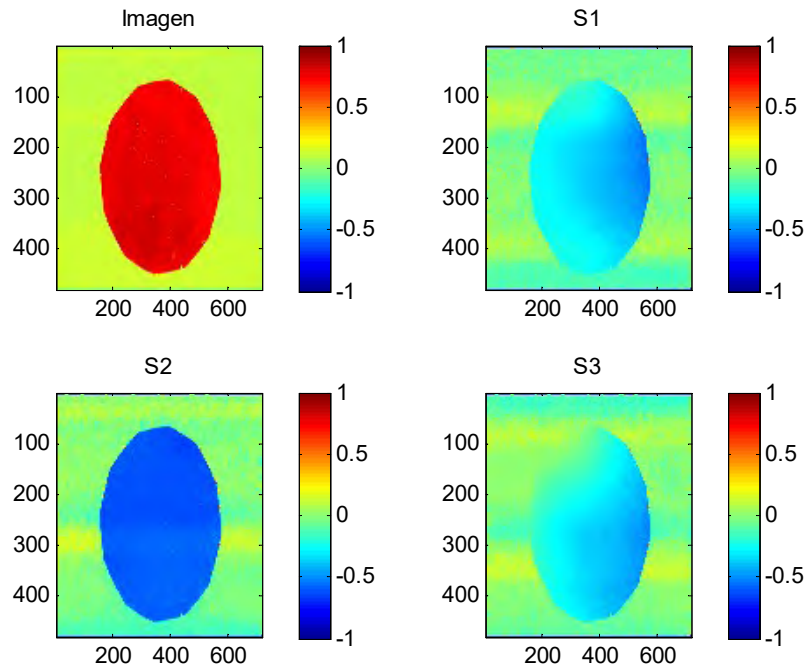


Figura 4.5. Imagen en intensidad y parámetros de Stokes, de una placa de $\lambda/2$ con su eje a 60° .

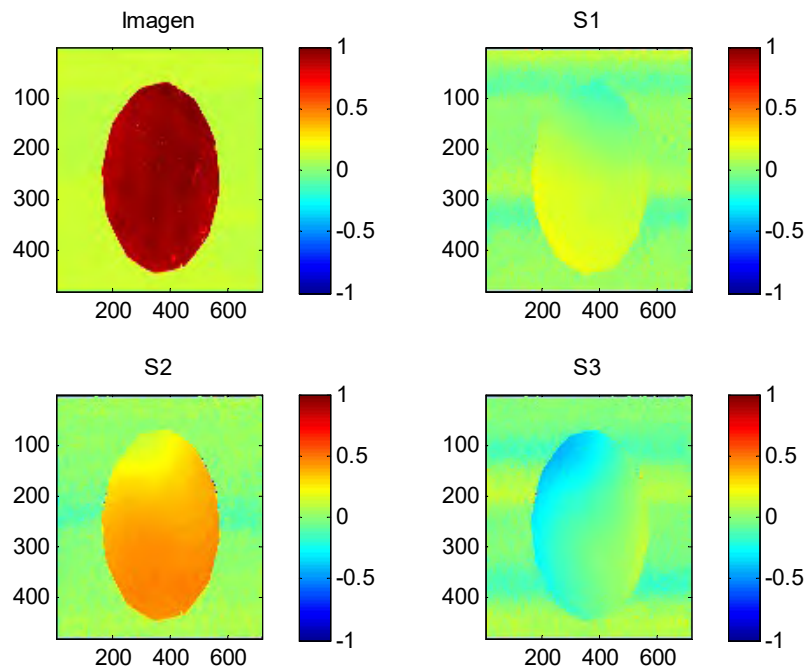


Figura 4.6. Imagen en intensidad y parámetros de Stokes, de una placa de $\lambda/4$ con su eje a 30° .

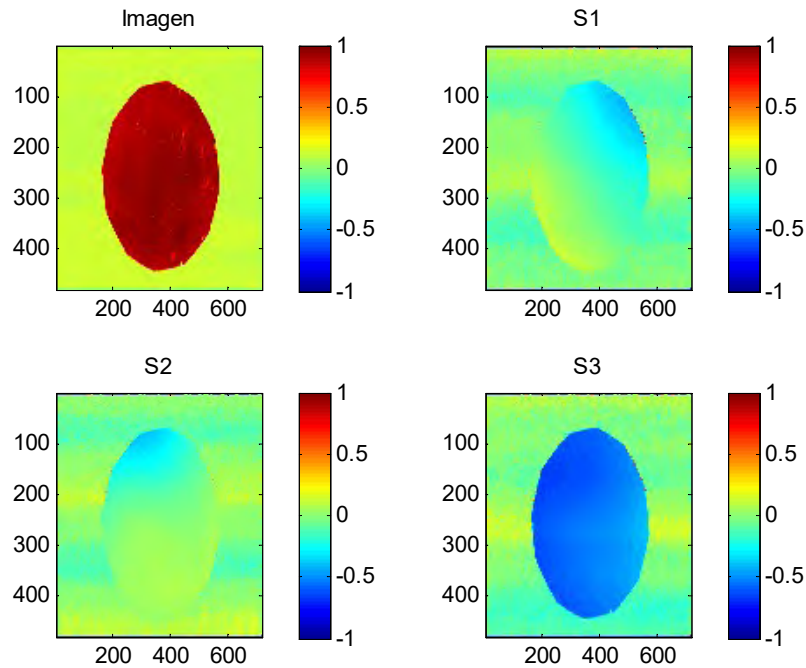


Figura 4.7. Imagen en intensidad y parámetros de Stokes, de una placa de $\lambda/4$ con su eje a 60° .

En las imágenes anteriores no se muestra el caso del polarizador lineal vertical, debido al hecho de que la muestra está siendo iluminada con polarización lineal horizontal causando que se extinga por completo el haz. Debido a esto, las mediciones son solamente ruido de la CCD.

En la tabla 4.1 se muestran los valores esperados para cada parámetro de Stokes y el valor promedio de los pixeles de interés, en cada imagen de Stokes.

Muestras	Vector de Stokes esperado.	Valor promedio del Vector de Stokes en las imágenes.
Polarizador lineal con eje de transmisión a 0°	$S_{teo} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$S_{exp} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0.649 \pm 0.01 \\ 0.066 \pm 0.002 \\ 0.025 \pm 0.004 \end{pmatrix}$
Polarizador lineal con eje de transmisión a 90°	$S_{teo} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$S_{exp} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ ?? \\ ?? \\ ?? \end{pmatrix}$
Placa $\lambda/2$ con eje rápido a 30°	$S_{teo} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -0.5 \\ 0.866 \\ 0 \end{pmatrix}$	$S_{exp} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -0.182 \pm 0.012 \\ 0.478 \pm 0.002 \\ 0.349 \pm 0.018 \end{pmatrix}$
Placa $\lambda/2$ con eje rápido a 60°	$S_{teo} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -0.5 \\ -0.866 \\ 0 \end{pmatrix}$	$S_{exp} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -0.34 \pm 0.004 \\ -0.593 \pm 0.003 \\ -0.299 \pm 0.015 \end{pmatrix}$
Placa $\lambda/4$ con eje rápido a 30°	$S_{teo} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0.25 \\ 0.433 \\ 0.866 \end{pmatrix}$	$S_{exp} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0.093 \pm 0.005 \\ 0.395 \pm 0.015 \\ -0.101 \pm 0.015 \end{pmatrix}$
Placa $\lambda/4$ con eje rápido a 60°	$S_{teo} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0.25 \\ -0.433 \\ 0.866 \end{pmatrix}$	$S_{exp} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -0.117 \pm 0.009 \\ -0.029 \pm 0.020 \\ -0.536 \pm 0.004 \end{pmatrix}$

Tabla 4.1 Valores esperados y promedios de las imágenes, de los parámetros de Stokes.

Como se puede ver en la tabla 4.1 los valores esperados y el valor promedio de los pixeles, son muy diferentes. En el caso del polarizador lineal horizontal, que se muestra en la figura 4.3 podemos observar que en el parámetro S1 los pixeles toman valores desde 0.3 hasta 0.8 en una muestra que en principio debería ser casi uniforme, los parámetros S2 y S3, tienen una menor variación y el promedio de los pixeles es cercano a cero. En los siguientes casos tenemos diferencias similares, hay grandes variaciones en el parámetro S1, pero en estos casos también están

estas variaciones en los parámetros S2 y S3, además de que el valor promedio también está lejos del valor esperado.

Se intentó realizar la calibración con el mismo método, en cada uno de los pixeles, pero notamos que para que funcione bien este método se debe saber aproximadamente todos los valores de los parámetros del arreglo experimental, o en otras palabras el arreglo experimental debe estar cercano al valor ideal, para que el ajuste converja rápidamente a una solución razonable. Como se puede ver en las figuras 4.3 a 4.7 las variaciones en distintos pixeles son muy grandes por lo que no tenemos esta condición y el método de calibración, no funciona en estos casos. Posteriormente se intentó realizar la calibración sobre el pixel central, y utilizar estos parámetros de ajuste en cada uno de los pixeles, pero no hubo ninguna mejoría notable.

Revisando más detalladamente notamos ciertos patrones que pueden ser producto de variaciones o errores en el sistema. En el parámetro S1, se puede notar un patrón que se repite en el polarizador, y la placa de $\lambda/4$, un caso similar es en el parámetro S3 de las placas retardadoras de $\lambda/2$ y $\lambda/4$. Esto se puede ver de mejor manera en las figuras 4.8 y 4.9. Debido a que son muestras completamente distintas, en principio no tendrían por que tener similitudes, lo que sugiere que la fuente de estas variaciones son errores en el sistema y no a la muestra.

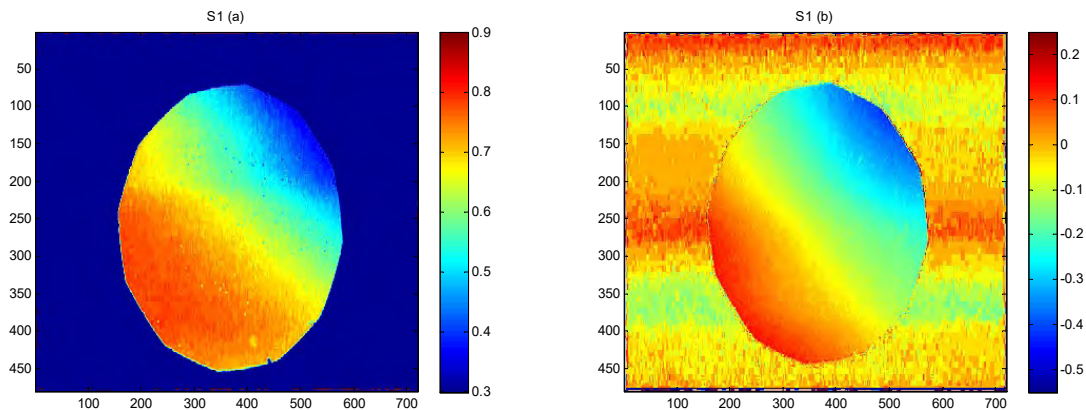


Figura 4.8. Segundo parámetro Stokes, de un polarizador lineal (a) y una placa retardadora de $\lambda/4$ (b).

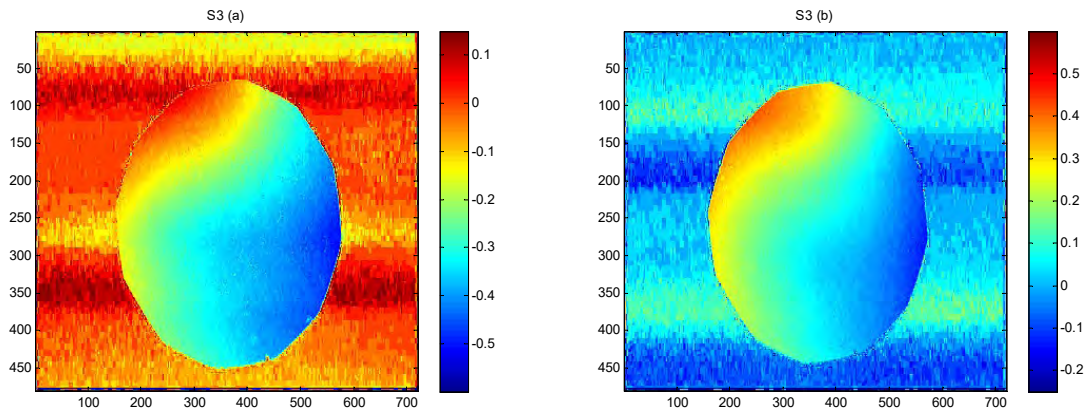


Figura 4.8. Cuarto parámetro Stokes, de una placa retardadora de $\lambda/2$ (a) y una placa retardadora de $\lambda/4$ (b).

Capítulo 5 Conclusiones

En esta tesis se presentó detalladamente el desarrollo experimental de un polarímetro de Stokes, así como el método de extracción de datos. Para obtener mediciones precisas y disminuir fuentes de error, se necesitó caracterizar muy bien la relación de la retardancia en función del voltaje aplicado. Se realizaron pruebas de la medición del vector de Stokes, en un polarizador lineal, una placa retardadora de $\lambda/2$ y una placa retardadora de $\lambda/4$, en todas las muestras se giró su eje óptico de 0° a 180° , en pasos de 10° y se midieron los cuatro parámetros de Stokes. Posteriormente se propuso un método de calibración, para compensar errores experimentales, como errores en las retardancias o en la posición de los ejes ópticos. El método se aplicó a los datos obtenidos directamente del experimento.

Por último se presentó un polarímetro de Stokes para obtención de imágenes polarimétricas, se midieron los cuatro parámetros de Stokes en cada pixel de la imagen, tomando como muestras un polarizador lineal y placas retardadoras de $\lambda/2$ y $\lambda/4$. Finalmente se intentó utilizar el mismo método de calibración en cada pixel.

5.1 POLARÍMETRO DE STOKES.

El método de polarimetría de Stokes utilizado en esta tesis (Sección 3.2), se realizó mediante la aplicación de combinaciones de voltajes fijos, a los RVCL, y la medición de intensidad. Los resultados obtenidos directamente del experimento se compararon con los valores teóricos, mediante el coeficiente de correlación. En estos resultados se muestra que los parámetros S1 y S2, del polarizador lineal y la placa retardadora de $\lambda/2$, fueron los más cercanos a los valores teóricos obteniendo coeficientes de correlación por encima de 0.95 y 0.995, en el caso de incidir luz

polarizada a 45° y 0° , respectivamente. Mientras que, para ambas polarizaciones incidentes, los peores ajustes fueron al utilizar la placa retardadora de $\lambda/4$, y en general el parámetro S3. Las mayores diferencias pueden tener su origen en la falta de control al medir polarizaciones elípticas.

Después de aplicar el método de calibración, es muy notorio que todas las curvas obtenidas experimentalmente se ajustaron mejor a la teoría. En particular los que en principio fueron más precisos, el polarizador y la placa de $\lambda/2$, mejoraron su ajuste con un coeficiente de correlación mínimo de 0.98 y 0.999, para luz incidente con polarización lineal a 45° y 0° , respectivamente. El parámetro S3 que en principio debería ser nulo, se disminuyó la desviación estándar teniendo una máxima de 0.06, directamente del experimento se tenían desviaciones estándar de hasta 0.38. En el caso de la placa retardadora de $\lambda/4$, también tuvo una clara mejoría el ajuste en todos los parámetros, obteniendo coeficientes de correlación mayores a 0.91, mientras que originalmente se tenían valores de hasta 0.59. Sobre los resultados del grado de polarización, mejoraron los resultados obteniendo un error máximo del 3.6%, este error es aceptable si se toma en cuenta que los elementos polarizadores no son ideales, y puede haber alguna contribución de luz no polarizada. Con esta información podemos concluir que el método de medición y calibración, propuesto en esta tesis, es confiable y apropiado para realizar mediciones de polarimetría de Stokes.

5.2 POLARIMETRÍA DE IMAGEN.

Para la obtención de imágenes polarimétricas, se utilizó un método análogo para la medición de los parámetros de Stokes en cada pixel. Sin hacer ninguna calibración se encontraron diferencias muy grandes entre los valores teóricos y el valor promedio de los pixeles de interés, se obtuvo el promedio por que en principio las muestras deberían ser uniformes. Los promedios difieren mucho debido a que se tienen variaciones muy grandes en todos los pixeles de la imagen, también se encontraron variaciones muy similares en muestras distintas, estas similitudes

pueden tener su origen en variaciones o errores del sistema experimental mas que la muestra.

Al intentar aplicar el mismo método de calibración en cada un de los pixeles, este no convergía a ninguna solución, lo que nos indica que el método de calibración propuesto depende mucho de los parámetros iniciales. Por esta razón el método descrito en la sección 3.3, no funciona para este tipo de mediciones.

5.3 TRABAJO A FUTURO.

Aunque el montaje y el método utilizado funcionaron bien al hacer mediciones de polarimetría de Stokes, usando fotodiodos sensores de potencia, al realizar mediciones en formación de imágenes se tiene la limitación del método de calibración, por lo que se tendrá que buscar un método distinto.

La propuesta para trabajo futuro seria realizar mediciones de polarización en imágenes, utilizando un sistema optimizado [27], junto con el mismo método de extracción de datos ya descrito en la sección 3.2. Posteriormente, se propone desarrollar un método de calibración, equivalente al método de Compain [16], pero se pretende desarrollarlo para el caso de polarímetros de Stokes. La idea sería utilizar este nuevo método de calibración en cada uno de los pixeles de la imagen, para poder compensar los errores en polarización de cada pixel, con esto se podrá obtener una imagen con una medición precisa del vector de Stokes.

Otro aspecto importante para tomar en cuenta, en futuras mediciones, son los errores debidos a las variaciones de retardancia en los RVCL, ya que las mediciones se hicieron suponiendo que se tiene una retardancia uniforme sobre toda su abertura. Recientemente se han encontrado que los RVCL no son completamente uniformes, se ha encontrado que las variaciones de retardancia en distintos puntos de los RVCL llegan a ser de hasta 30° para luz de longitud de onda de 633 nm. Por lo que los datos con los que se compararon los resultados no son el caso real, ya que no se cumple esta suposición. Debido a esto, se pretende hacer una

caracterización muy detallada punto a punto de los RVCL para poder compensar estas variaciones al hacer mediciones con el polarímetro de imagen. Además, para diferentes puntos de un objeto, los rayos atraviesan los retardadores a diferentes ángulos, lo que da variaciones de retardación para diferentes puntos del objeto, por lo que sería de mucha utilidad realizar una caracterización para saber que tanto influye el ángulo de incidencia en la retardancia inducida.

Bibliografía

- [1] W. A. Shurcliff, "Polarized light: Production and Use," *Harvard University Press*, 1962.
- [2] A. Roseler, " Problem of polarization degree in spectroscopic photometric ellipsometry, " *J. Opt. Soc. Am.*, 1992.
- [3] J. S. Tyo, D. L. Goldstein, D. B. Chenault and J. Shaw, " Review of a passive imaging polarimetry for remote sensing applications, " vol. 45, *App. opt.*, 2006.
- [4] J. Zhou, H. He, Y. Wang and H. Ma, "Stage scoring of liver fibrosis using Mueller matrix microscope," *SPIE Proceedings*, vol. 10024, 2017.
- [5] G. Lewis, D. Jordan and P. Roberts, "Backscattering target detection in a turbid medium by polarization discrimination," *App. Opt.*, vol. 38, 1999.
- [6] S. G. Demos, H. B. Radousky and R. R. Alfano, "Deep subsurface imaging in tissues using spectral and polarization filtering," *opt. Express*, vol. 7, 2000.
- [7] F. Liu, X. Shao and P. Han, "Desing of a circular polarization imager for contrast enhancement in rainy conditions," *App. opt.*, vol. 55, 2016.
- [8] D. H. Goldstein, "Mueller Matrix dual-rotating-retarder polarimeter," *App. opt.* , vol. 31, 1992.
- [9] R. M. A. Azzam, "Oscillating-analyzer ellipsometer," *REv. Sci. Instrum.*, vol. 47, 1976.
- [10] R. M. Neal, D. Dayton and J. Gonglewski, "Laboratory result using an active Wollaston polarimeter," *SPIE Proceedings*, vol. 5888, 2005.
- [11] J. M. Lopez-Tellez and N. C. Bruce, "Stokes polarimetry using analysis of the nonlinear voltage-retardance relationship for liquid-crystal variable retarders," *Rev. Sci. Instrum.* , vol. 85, 2014.
- [12] J. L. Pezzaniti and R. A. Chipman, "Mueller matrix imaging polarimetry," *Opt. Eng.* , vol. 34, 1995.
- [13] N. J. Brock, C. Crandall and J. Millerd, "Snap-shot imaging polarimeter: Performance and application," *SPIE Proceedings*, vol. 9099, 2014.
- [14] B. Laude-Boulesteix and A. D. Martino, "Mueller polarimetric imaging system with liquid crystals," *App. Opt.*, vol. 55, 2016.
- [15] I. Berezhnyy and A. Dogariu, "Time-resolved Mueller matrix imaging polarimetry," *Opt. Express*, vol. 12, 2004.
- [16] E. Compain, S. Poirier and B. Drevillon, "General and self consistent method for the calibration of polarization modulator, polarimeter, and Mueller-matrix ellipsometers," *App. Opt.*, vol. 38, 1999.

- [17] B. Boulbry, J. C. Ramella-Roman and T. A. Germer, "Improve method for calibrating a Stokes polarimeter," *App. Opt.*, vol. 46, 2007.
- [18] D. H. Goldstein, "Polarized Light," Marcel Dekker, 2003.
- [19] E. Collett, "Field guide to Polarization," *SPIE*, 2005.
- [20] R. A. Chipman, "polarization analysis of optical systems," *Opt. Eng.*, vol. 28, 1989.
- [21] G. Meier, E. Sackman and J. G. Grabmaier, "Applications of liquid crystals," *Springer Verlag*, 1975.
- [22] E. Collett, *Polarized Light, Fundamentals and Applications*, Marcel Dekker, 1993.
- [23] "http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6339&pn=LCC1113-A.," [Online]. [Accessed 2017].
- [24] R. A. Chipman, *Polarimetry: Handbook of Optics*, MacGraw-Hill, 1995.
- [25] J. M. López-Téllez, N.C. Bruce, J. Delgado-Aguillón, J. Garduño-Mejía y M. Avendaño-Alejo, "Experimental method to characterize the retardance function of optical variable retarders", *Am. J. Phys.* 83(2), 143-149 (2015).
- [26] S. A. T. W. T. V. a. B. P. F. W. H. Press, "Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing," *Cambridge University*, 1992.
- [27] J. S. Tyo, Design of optimal polarimeters: maximization of signal to noise ratio and minimization of systematic errors, *Applied Optics*, 41(4), (2002), 619-63

Apéndice A

A continuación, se muestran los elementos ópticos utilizados en este trabajo, y algunas de sus especificaciones.

Laser He-Ne.

Máxima potencia: 10 mW

Longitud de onda: 633 nm

Marca: JDS Uniphase

Modelo: 1125P

Polarizador lineal. (2)

Rango espectral: 350 nm a 700 nm

Tipo: Glan-Thompson

Marca: Thorlabs

Modelo: GTH10-A

Divisor de haz.

Tasa de división: 50:50 a 635 nm

Material de la membrana: Nitrocelulosa

Marca: Thorlabs

Modelo: CM1-BP150

Detector. (2)

Tipo: Fotodiodo de Silicio

Rango espectral: 400 nm a 1,100 nm

Marca: Thorlabs

Modelo: S130C

Retardador variable de cristal líquido. (2)

Rango espectral: 400 nm a 700 nm

Rango retardancias: 0 nm a 4000 nm

Marca: Thorlabs

Modelo: LCC2415-VIS

Lentes acromáticas. (2)

Diámetro: 25 mm

Marca: Edmundo Optics

Cámara CCD.

Rango espectral: 400 nm a 700 nm

Pixeles: 768 x 494

Marca: Sony

Modelo: XC-ST70