



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

**CAMPUS IRAPUATO – SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**

**“POLARÍMETRO DINÁMICO PARA LA
CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS NO TRASLÚCIDAS
BAJO EL FORMALISMO STOKES-MÜELLER”**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
(INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMAS DIGITALES)**

PRESENTA

ING. DANIELA RODRÍGUEZ SOTELO

DIRECTORES

**DR. ROGELIO CASTRO SÁNCHEZ
DRA. DORA LUZ ALMANZA OJEDA**

SALAMANCA, GTO.

FEBRERO 2018

Salamanca, Gto., a 7 de Febrero del 2018.

M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTÍN
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) Daniela Rodríguez Sotelo del **Programa de Maestría en** Ing. Eléctrica (Instrumentación y Sist. Digitales) y cuyo número de **NUA** es: 251584 del cual soy director. El título de la tesis es: "Polarímetro dinámico para la caracterización de muestras no traslúcidas bajo el formalismo Stokes-Müeller"

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE


Dr. Rogelio Castro Sánchez

NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO


Dra. Dora Luz Almanza Ojeda

NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS


Dr. Miguel Torres Cisneros

NOMBRE Y FIRMA
PRESIDENTE


Dr. Donato Hernández Fusilier

NOMBRE Y FIRMA
VOCAL

*A mis padres y a mi hermana, porque
sin ustedes nada de esto sería posible.*

AGRADECIMIENTOS

PERSONALES

A *Dios*, por permitirme despertar cada día rodeada por gente que me quiere, por llenar mi camino de bendiciones y nuevas enseñanzas.

A mis padres, *Marisela Sotelo Santos* y *Ricardo Rodríguez González*, por su apoyo incondicional, por siempre creer en mí, por ser consejeros y grandes amigos en cada momento de mi vida, los quiero mucho, soy muy afortunada de tenerlos.

A mi hermana *Karla A. Rodríguez Sotelo*, por contagiarme su alegría día con día, por las horas de risa y las tonterías compartidas, espero sigan siendo muchas más, te quiero mucho.

A *Carlos A. Ruiz Ruiz*, por emprender esta aventura conmigo, por ser dos sin dejar de ser uno, por alentarme a emprender mis sueños, te amo.

A mi familia, en especial a mis primos, por siempre estar conmigo en cada proyecto que emprendo, por su amor incondicional, los quiero mucho.

A *Omar Calderón Nieto*, por su amistad y conocimientos, al prestar sus habilidades de diseño de piezas en este trabajo, muchas gracias por todo.

A *George, Ges, Jesús, Felipe, Marve, Manuel, Emmanuel* y *Luis*, por ser mi segunda familia, por hacer de estos dos años los más divertidos que había tenido en mucho tiempo, por las experiencias compartidas y todos los gratos momentos, los quiero chicos, un placer el haberlos conocido.

A mis asesores, la Dra. Dora Luz Almanza Ojeda y al Dr. Rogelio Castro Sánchez, considero que pocas personas tienen la fortuna de encontrarse con asesores como ustedes, muchas gracias por todo el apoyo y la asesoría brindada. Muchas gracias por permitirme trabajar y aprender de ustedes.

Al Dr. René Alfredo Martínez Celorio, muchas gracias por invitarme a ser parte de este gran proyecto, que a pesar del camino recorrido aún nos sigue poniendo retos por alcanzar.

Al Dr. Mario Ibarra Manzano, por su orientación y apoyo en esta larga travesía, muchas gracias.

Al Dr. Donato Hernández Fusilier y al Dr. Miguel Torres Cisneros, por tomarse el tiempo de realizar observaciones y comentarios de este trabajo.

Muchas gracias a todos.

AGRADECIMIENTOS

INSTITUCIONALES

De forma personal quiero agradecer a la Universidad de Guanajuato, en especial a la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca por recibirme de nuevo y darme la oportunidad de realizar un programa de posgrado.



De igual forma, un agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por aceptarme como becario con CVU 717796, durante la asignación de becas correspondientes al periodo Septiembre-Diciembre 2015.



*“Behind every young child who believes in
himself is a parent who believed first”.*

Matthew Jacobson

Resumen

En este trabajo se detalla la metodología y caracterización de los elementos de un polarímetro dinámico de Stokes, cuyo arreglo experimental puede ser en transmisión o en reflexión. Así mismo, se proporcionan detalles técnicos acerca de la sincronización de dos moduladores fotoelásticos (PEM) que, en conjunto con una tarjeta de adquisición de datos y dos nanorotores, permiten que cada medición realizada sea ejecutada de forma autónoma. Cada elemento del arreglo óptico permite obtener la información necesaria para el cálculo de la matriz de Mueller de cada muestra seleccionada por su valor conocido en la literatura; para el polarímetro dinámico de Stokes basado en reflexión se añade la matriz de Mueller de muestras no traslúcidas orgánicas e inorgánicas.

Abstract

This work presents the methodology and characterization of the elements of a Stokes dynamic polarimeter. The experimental setup can be used it in either transmission or reflection mode. Also, we show how can be implemented the automatic acquisition by the synchronization of two photoelastic modulators (PEM) an acquisition card and two nanorotors. Each element of the optical setup allows to obtain the necessary information for the calculation of the Müller matrix of each sample selected for its known value in the literature; for the Stokes dynamic polarimeter based on reflection, the Müller matrix obtained experimentally from non-translucent organic and inorganic samples are added.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3. OBJETIVOS	3
CAPÍTULO II	5
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1. RESEÑA HISTÓRICA	5
2.2. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	6
2.2.1. <i>Ondas de luz policromáticas y monocromáticas</i>	7
2.3. ESPARCIMIENTO	8
2.3.1. <i>Esparcimiento Rayleigh</i>	9
2.3.2. <i>Esparcimiento de Mie</i>	9
2.4. PROPAGACIÓN DE LA LUZ.....	9
2.4.1. <i>Transmisión</i>	10
2.4.2. <i>Reflexión</i>	10
2.4.3. <i>Refracción</i>	11
2.4.4. <i>Ecuaciones de Fresnel</i>	12
2.5. POLARIZACIÓN	13
2.5.1. <i>Estados de polarización</i>	14
2.5.2. <i>Representación gráfica de los estados de polarización</i>	17
2.5.3. <i>Generación de luz polarizada</i>	19
2.5.4. <i>Ley de Malus</i>	20
2.5.5. <i>Birrefringencia</i>	20
2.5.6. <i>Fotoelasticidad</i>	22
2.6. FORMULISMO STOKES-MÜELLER.....	23
2.6.1. <i>Matrices de Müeller de elementos polarizantes</i>	26
2.6.2. <i>Propiedades polarimétricas de la matriz de Müeller</i>	28
2.6.3. <i>Matriz de Müeller diferencial</i>	29

2.6.4. Método de 36 mediciones	29
2.7. CONCLUSIONES	30
CAPÍTULO III.....	31
DESARROLLO EXPERIMENTAL	31
3.1. INTRODUCCIÓN	31
3.2. DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO ÓPTICO	31
3.3. ALINEACIÓN.....	34
3.4. ESTADOS DE POLARIZACIÓN LINEAL	35
3.4.1. Polarímetro dinámico de Stokes basado en transmisión	36
3.4.2. Polarímetro dinámico de Stokes basado en reflexión.....	40
3.5. ESTADOS DE POLARIZACIÓN LINEAL Y CIRCULAR	41
3.6. ESTADOS DE POLARIZACIÓN CIRCULAR.....	47
3.7. PROGRAMA FINAL.....	50
3.8. CONCLUSIONES	51
CAPÍTULO IV	52
RESULTADOS.....	52
4.1. ASPECTOS GENERALES	52
4.2. POLARÍMETRO DINÁMICO DE STOKES BASADO EN TRANSMISIÓN	53
4.2.1. Aire	54
4.2.2. Polarizador a 0°	55
4.2.3. Polarizador a 45°	57
4.2.4. Polarizador a 90°	58
4.2.5. Lámina retardadora de $\lambda/2$	59
4.3. POLARÍMETRO DINÁMICO DE STOKES BASADO EN REFLEXIÓN	60
4.3.1. Espejo de primera superficie	63
4.3.2. Superficie de aluminio	66
4.3.3. Polarizador a 90°	67
4.3.4. Superficie de una manzana.....	69
4.3.5. Superficie de un plátano	70
4.4. CONCLUSIONES	72
CAPÍTULO V.....	73
CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	73
5.1. CONCLUSIONES GENERALES.....	73

5.2. TRABAJO A FUTURO	74
ANEXO I.....	77
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO.....	77
LÁSER HE-NE HRR170	77
TARJETA NI-USB 6259	78
NANOROTOR NR360S	79
MODULADOR FOTOELÁSTICO PEM-100.....	80
FOTODETECTOR PDA36A	81
ANEXO II.....	83
CARACTERIZACIÓN DE NR360S Y LPVIS100-MP	83
REPETITIVIDAD EN EL NÚMERO DE PASOS DE LOS NANOROTORES	84
ALINEACIÓN DE LOS POLARIZADORES Y MONTAJE EN LOS NANOROTORES	84
COMPORTAMIENTO DE VALORES MÁXIMOS EN LOS POLARIZADORES	88
ANEXO III.....	89
CARACTERÍSTICAS DEL PEM-100.....	89
REFERENCIAS	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
Figura 2.1	Propagación de una onda electromagnética.	7
Figura 2.2	Reflexión de la luz en una superficie lisa.	11
Figura 2.3	Refracción de la luz en una superficie plana.	11
Figura 2.4	Reflexión y transmisión de un haz incidente.	12
Figura 2.5	Distribución de los planos de polarización y oscilación de una onda electromagnética.	14
Figura 2.6	Propagación del campo óptico transversal .	15
Figura 2.7	Localización de los estados de polarización en el plano cartesiano complejo .	17
Figura 2.8	Representación de los estados de polarización en la esfera de Poincaré.	18
Figura 2.9	Sistema compuesto por un polarizador y analizador .	20
Figura 2.10	Comportamiento de un material birrefringente.	21
Figura 2.11	Interacción entre un haz de luz y un sistema óptico lineal	30
Figura 3.1	Diagrama a bloques del polarímetro dinámico en (a) transmisión y (b) reflexión.	33
Figura 3.2	Diagrama del polarímetro dinámico de Stokes en transmisión.	34
Figura 3.3	Diagrama a bloques de la metodología realizada.	35
Figura 3.4	Diagrama de flujo para la obtención de la combinación de estados de polarización lineal h_x y x_h .	38
Figura 3.5	Diagrama de flujo para la adquisición y generación entre estados de polarización lineal.	39
Figura 3.6	Panel frontal del SubVI para la combinación entre estados lineales de polarización.	40
Figura 3.7	Diagrama de flujo para la obtención de estados de polarización lineal de un polarímetro basado en reflexión.	42
Figura 3.8	Partes que conforman el Pem-100 de la firma Hinds™ Instruments.	43
Figura 3.9	Pem-100 configurado como $\lambda/4$: a) ubicación de estados de polarización, b) señales experimentales del PEM.	44
Figura 3.10	Diagrama a bloques para la obtención de estados de polarización lineal y circular.	46
Figura 3.11	Diagrama de flujo del SubVI realizado para la medición de estados de polarización lineal y circular.	46
Figura 3.12	Panel frontal del SubVI realizado para la medición de estados que involucran a h , v , r y l .	47
Figura 3.13	Panel frontal del SubVI realizado para la medición de estados que involucran a $+$, $-$, r y l .	48
Figura 3.14	Diagrama a bloques para la obtención de estados de polarización circular.	49
Figura 3.15	Sincronización de señales TTL de los PEM por medio del detector de fase.	49

Figura 3.16	Relación entre el desfase de señales TTL del PEM y estados de polarización obtenidos.	50
Figura 3.17	Panel frontal del programa final para la obtención de la matriz de Müller.	51
Figura 4.1	Panel frontal del programa final para la obtención de la matriz de Müller.	55
Figura 4.2	Muestras caracterizadas: lámina de $\lambda/2$ y polarizador lineal.	55
Figura 4.3	Espejo de primera superficie.	62
Figura 4.4	Arreglo experimental del polarímetro en reflexión: a) 30° y b) 165° .	63
Figura 4.5	Comportamiento en intensidad del polarímetro en reflexión al colocar como muestra un espejo.	65
Figura 4.6	Respuesta en amplitud diferentes condiciones de luz polarizada lineal al colocar como muestra un espejo.	65
Figura 4.7	Superficie de aluminio.	67
Figura 4.8	Respuesta en amplitud de un espejo (E) y de un soporte de aluminio (M) a luz polarizada lineal.	68
Figura 4.9	Respuesta en amplitud de un espejo (E) y de un polarizador a 90° (M) a luz polarizada lineal.	69
Figura 4.10	Arreglo experimental del polarímetro basado en reflexión al colocar como muestra una manzana: a) vista aérea y b) vista lateral.	70
Figura 4.11	Respuesta en amplitud de un espejo (E) y de la superficie de una manzana (M) a luz polarizada lineal.	71
Figura 4.12	Arreglo experimental del polarímetro basado en reflexión al colocar como muestra un plátano: a) vista aérea y b) vista lateral.	72
Figura 4.13	Respuesta en amplitud de un espejo (E) y de la superficie de un plátano (M) a luz polarizada lineal.	73
Figura Anexo I.1	Láser He-Ne de Throlabs®.	78
Figura Anexo I.2	Tarjeta de adquisición NI-USB 6259.	79
Figura Anexo I.3	Nanorotor NR360S.	80
Figura Anexo I.4	Monitor del controlador del PEM-100 en modo de control local.	81
Figura Anexo I.5	Fotodetector PDA36A.	82
Figura Anexo I.6	Curva de respuesta del PDA36A.	83
Figura Anexo II.1	Diagrama de flujo para el movimiento básico del NR360S.	84
Figura Anexo II.2	Montaje de los polarizadores en cada nanorotor: a) PSG y b) PSA.	86
Figura Anexo II.3	Círculos de acrílico utilizados para alineación.	86
Figura Anexo II.4	Efectos en amplitud respecto al sentido de giro de cada nanorotor en una revolución.	87
Figura Anexo II.5	Comportamiento en amplitud de los polarizadores.	88
Figura Anexo II.6	Respuesta de dos polarizadores para valores máximos en una revolución.	89
Figura Anexo III.1	Arreglo óptico para la calibración del PEM.	91
Figura Anexo III.2	Formas de onda para la calibración de los PEM con un retardo máximo de $\lambda/2$: a) estados de polarización que se pueden obtener, b) señales obtenidas en transmisión y c) señales obtenidas en reflexión.	91
Figura Anexo III.3	Señal TTL del PEM1 (rojo) y señal moduladora de la cabeza óptica (azul).	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
Tabla 2.1	Tipos de láminas retardadoras.	21
Tabla 2.2	Representación de estados de polarización por medio de los vectores de Stokes.	24
Tabla 3.1	Combinaciones que involucran estados de polarización lineal.	36
Tabla 3.2	Estados de polarización lineal y valores de irradiancia normalizada.	37
Tabla 3.3	Combinaciones de estados de polarización lineal y circular.	43
Tabla 3.4	Localización de estados de polarización del Pem-100 para un retardo máximo de $\lambda/4$.	44
Tabla 3.5	Condiciones experimentales para la obtención de estados de polarización lineal y circular.	45
Tabla 3.6	Condiciones experimentales para la obtención de estados de polarización circular.	48
Tabla 3.7	Relación entre el desfaseamiento de señales TTL del PEM y estados de polarización obtenidos.	50
Tabla 4.1	Matrices de Müller obtenidas experimentalmente del sistema sin muestra.	56
Tabla 4.2	Matrices de Müller experimentales de un polarizador lineal a 0° .	57
Tabla 4.3	Matrices de Müller experimentales de un polarizador lineal a 45° .	58
Tabla 4.4	Matrices de Müller experimentales de un polarizador lineal a 90° .	59
Tabla 4.5	Matrices de Müller experimentales de una lámina retardadora de $\lambda/2$.	61
Tabla 4.6	Matrices de Müller experimentales utilizando como muestra un espejo.	64
Tabla 4.7	Relación entre número de pasos y estados de polarización para el MP1.	66
Tabla 4.8	Matriz de Müller experimental al colocar una superficie de aluminio como muestra.	68
Tabla 4.9	Matrices de Müller experimentales al colocar como muestra un polarizador con su eje de transmisión a 90° .	69
Tabla 4.10	Matrices de Müller experimental al colocar como muestra una manzana.	70
Tabla 4.11	Matrices de Müller experimental al colocar como muestra un plátano.	72
Tabla Anexo I.1	Especificaciones del láser He-Ne de Throlabs®.	78
Tabla Anexo I.2	Características generales de NI-USB 6259.	79
Tabla Anexo I.3	Especificaciones del nanorotor NR360S.	80
Tabla Anexo I.4	Especificaciones del PEM-100.	81
Tabla Anexo I.5	Especificaciones eléctricas del PDA36A.	82
Tabla Anexo I.6	Especificaciones de acuerdo a la ganancia seleccionada en el PDA36A.	83
Tabla Anexo II.1	Número de pasos para cada nanorotor en una revolución.	85

CAPÍTULO I

Introducción

Este capítulo tiene como propósito presentar una visión general del polarímetro dinámico basado en reflexión para la caracterización de muestras no traslúcidas bajo el formalismo Stokes-Müeller, así mismo, se presentan: justificación del trabajo y objetivos planteados.

1.1. Antecedentes

A través de la historia de la humanidad, la luz ha jugado un papel importante [1] que ha influido de forma notoria en la tecnología que actualmente conocemos. Desde tiempos prehistóricos, nuestros antepasados atribuían ciertas propiedades de la luz a cosas mágicas y milagrosas; civilizaciones antiguas, como los griegos y los romanos, descubrieron el poder curativo que la **luz**, se dice posee. En años posteriores, personajes como J. Keppler, I. Newton, T. Young, H. Hertz, por mencionar algunos, por medio de diversos experimentos y modelos teóricos lograron describir de forma científica las propiedades de la luz y, con ello, cimentar los principios del avance y desarrollos tecnológicos que hoy en día se tienen.

La óptica [2] es la ciencia que estudia los orígenes, la propagación y la detección de la luz. La luz, en términos de electromagnetismo, consiste en la oscilación de ondas eléctricas y magnéticas [1]. Dos de los parámetros importantes que toda onda electromagnética posee son: fase y polarización. La fase, en general, permite el estudio de efectos como interferencia y difracción; la polarización, por otra parte, se describe como el cambio de dirección que sufre el campo eléctrico, mientras ésta se propaga.

La polarización es una de las propiedades fundamentales de la luz [3] y su estudio como tal, ha ayudado a la mejor comprensión de las ondas electromagnéticas [4]. El estudio de la naturaleza de la luz polarizada ha dado pie a numerosas aplicaciones [3] con

diferentes grados de escala. El número de aplicaciones ha crecido debido a su versatilidad en los diferentes campos de la ciencia y de la industria [5] en que pueden ser usadas, aunando a ello que generalmente son métodos no invasivos. Entre las diversas aplicaciones de luz polarizada se encuentran, por mencionar algunas; el sensado remoto en meteorología y astronomía, la determinación de las concentraciones de azúcar en procesos industriales, la caracterización de microestructuras en tejido biológico [6] para la detección de enfermedades como cáncer y cirrosis [7], clasificación de materiales [8], etc.

Con base en lo anterior, se hace notar que las técnicas de polarimetría son herramientas poderosas que permiten obtener información de diversos medios. Por esta razón, es necesario comprender las propiedades polarimétricas y físicas del medio por el cual se propaga la luz [9]. A medida que la luz interactúa o se propaga en un medio, ésta presenta variaciones en sus estados de polarización que, a su vez, están relacionados con la intensidad.

En la literatura existen diversos formalismos que son aplicados en las diversas técnicas de polarimetría, uno de ellos es el formalismo Stokes-Müeller. La matriz de Müeller representa la función de transferencia de un sistema óptico en su interacción con luz polarizada [10]. La importancia de la matriz de Müeller [9] radica en que ésta contiene toda la información (birrefringencia, dicroísmo y despolarización) que se puede obtener de la luz polarizada en un medio. Los estados de polarización de la luz son aplicados y analizados por medio del arreglo de dispositivos ópticos de manera sencilla [10] y al final del camino óptico, se captura la información utilizando una cámara CCD o un fotodetector, y un sistema de adquisición de datos para su procesamiento en computadora. El fotodetector puede realizar la detección en una única posición, o tener un movimiento angular determinado por las características físicas donde esté colocado [11].

Todo dispositivo que realiza mediciones de propiedades ópticas de un medio, posee características específicas como tipo de luz empleada, técnica empleada, tipo de muestras sobre las que hace el estudio, intervalo de precisión y formato de presentación de los resultados, entre otros.

1.2. Justificación

Actualmente en la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca se cuenta con el prototipo de un Esparcímetero de Resolución Angular (ERA) con el cual se han realizado estudios del esparcimiento de luz en elementos ópticos traslúcidos conocidos como polarizadores y láminas retardadoras en posiciones fijas, obteniendo resultados muy semejantes a los proporcionados en la literatura [11].

En este trabajo se propone utilizar el arreglo experimental del ERA junto con algunas modificaciones para implementar un Polarímetro Dinámico de Stokes (PDS) a diferentes ángulos de reflexión, que sea capaz de obtener automáticamente la matriz de Müeller de muestras no traslúcidas en tiempo real, permitiendo con ello una gama amplia de muestras a analizar.

La realización se llevará a cabo con ayuda de una tarjeta de adquisición de datos (TAD) de National Instruments® (NI) por medio la plataforma LabVIEW®, de tal forma que la caracterización de las muestras mediante la obtención de la matriz se lleve a cabo de forma autónoma y que, a su vez, permita una fácil interpretación de los resultados.

Lo anterior no dependerá del método de análisis de imágenes, como se lleva a cabo en las referencias [12], [13] y [14], sino que este trabajo brindará algunas opciones de medición en: detección de diversos tipos de tejido biológico con cáncer, rugosidad en superficies metálicas, adulteración de sustancias líquidas, análisis clínicos (sangre y orina), análisis de superficies de fruta, etc.

1.3. Objetivos

Objetivo General:

El presente trabajo tiene como objetivo principal la implementación de un polarímetro dinámico basado en reflexión para la caracterización de muestras no traslúcidas bajo el formalismo Stokes-Müeller.

Objetivos específicos:

- Implementar un arreglo experimental de un polarímetro dinámico de Stokes que permita la obtención de los elementos de la matriz de Müller en muestras no traslúcidas.

- Diseñar e implementar un circuito de sincronía, no programable, de dos moduladores fotoelásticos de luz (PEM, por sus siglas en inglés, Photoelastic Modulator).
- Desarrollo de una interfaz de usuario con el software LabVIEW® para el monitoreo y control automático de cada uno de los componentes del polarímetro, así como la obtención de la matriz de Müeller de las muestras analizadas.
- Análisis de mediciones realizadas en al menos 3 muestras conocidas para la calibración y en muestras biológicas y no biológicas seleccionadas de la literatura científica, así como el cálculo de errores en las mismas.

El presente trabajo se estructura en cinco capítulos. En el capítulo II se proporcionan los fundamentos teóricos básicos de electromagnetismo, tratando los conceptos de la polarización de la luz y la relación matemática entre los vectores de Stokes y la matriz de Müeller. El capítulo III describe los detalles experimentales necesarios llevados a cabo para el control del arreglo experimental del PDR. En el capítulo IV se muestran los resultados obtenidos del sistema en muestras caracterizadas y no caracterizadas, así como el margen de error presentado en las mediciones. Finalmente, en el capítulo V se discuten las conclusiones de la tesis, así como recomendaciones y trabajos a futuro.

CAPÍTULO II

Fundamentos Teóricos

Este capítulo tiene como objetivo el de proporcionar diversos conceptos de óptica, tales como: polarización, refracción, reflexión, esparcimiento, formulismo Stokes-Müeller, entre otros; con la finalidad de facilitar la comprensión del presente trabajo.

2.1. Reseña histórica

Las principales características asociadas a una fuente de luz cuasi-monocromática son; intensidad, longitud de onda y polarización [15]. La polarización en particular, es un de las propiedades fundamentales de la luz, como lo son también, la intensidad, frecuencia y coherencia [3].

La investigación acerca de la luz polarizada comenzó con Erasmus Bartholinus, quien, en 1669 [3], descubrió el fenómeno de doble refracción en cristales de calcita. Cristian Huygens interpretó los descubrimientos de Bartholinus y en 1690 [2], como consecuencia de su trabajo descubrió el principio que lleva su nombre, el cual considera que la luz se propaga a lo largo de líneas rectas perpendiculares al frente de onda [16]. Isaac Newton a partir de Huygens propuso el concepto de “transversalidad” de la luz.

En 1801, los trabajos de Thomas Young ayudaron a cambiar la teoría corpuscular de la luz, la cual predominó durante el siglo XVIII apoyada por Newton. Posteriormente, T. Young dio nueva vida a la teoría de las ondas con su principio de interferencia de la luz. Siete años después, Etienne-Louis Malus observó que el reflejo de la luz del sol al atravesar un cristal de calcita se obtenían dos imágenes por el efecto de doble refracción y que, al girar el cristal éstas desaparecían y aparecían alternativamente, sin embargo, no pudo demostrar el efecto matemáticamente. David Brewster, en 1812 descubrió la relación que existe entre el ángulo de rotación del vidrio

de calcita y el índice de refracción [3] de éste, tal trabajo lo hizo merecedor a la Medalla de oro de la Real Sociedad en 1815.

En 1818 Augustin Jean Fresnel y su colega Dominique François Arago, demostraron experimentalmente la teoría que describe la propagación de la luz polarizada a través de un medio ópticamente activo. Con los trabajos mencionados, la teoría de la **luz, vista como onda**, comenzó a tomar fuerza. La teoría electrodinámica de James Clerk Maxwell y su demostración experimental realizada por Heinrich Hertz en la segunda mitad del siglo diecinueve, sentaron las bases para que la ecuación de onda fuese aceptada. Con ella, fenómenos como la propagación, difracción, interferencia y polarización fueron mejor comprendidos [3].

2.2. Ondas electromagnéticas

La teoría electromagnética es una de las teorías más completas en la física. El trabajo de J. Clerk Maxwell obtuvo las relaciones entre: el campo eléctrico (\vec{E}) y las cargas eléctricas, el campo magnético (\vec{B}) y las cargas en movimiento, así como la relación entre el campo eléctrico y el campo magnético variables en el tiempo; por lo que, las ecuaciones de Maxwell describen el comportamiento de una onda electromagnética.

Las ondas electromagnéticas (OEM) planas, como se puede ver en la Figura 2.21, son transversales y su vector de propagación es la del vector de Poynting (\vec{k}), el cual a su vez, es perpendicular a ambos campos. En ellas, el campo magnético y eléctrico son perpendiculares entre si y ambos están en fase, ocasionando que en cada instante y en cada punto, las densidades de energía magnética y eléctrica sean iguales y el cociente entre los módulos instantáneos de \vec{E} y \vec{B} sea igual a la velocidad de la luz (c).

Es de importancia recalcar que el campo electromagnético [17] se propaga, a partir de la fuente, a una velocidad c de 300 000 km/s en el vacío y a una velocidad c/η , donde η índice de refracción, en un medio cualquiera.

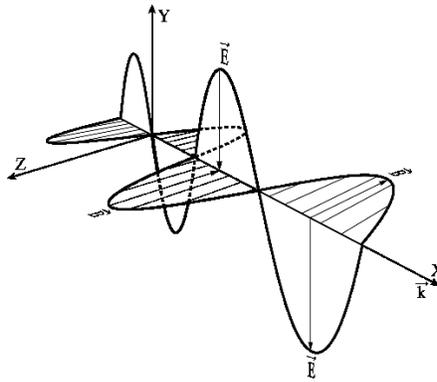


Figura 2.21 Propagación de una onda electromagnética.

La caracterización de las OEM se lleva a cabo por medio de su frecuencia, cuyo rango comprende desde Hz hasta más de 10^{22} Hz. Al rango de frecuencias cubierto por las ondas electromagnéticas, se le conoce como espectro de ondas electromagnéticas. Los límites entre los diferentes tipos de OEM no están claramente definidos, solapándose las frecuencias de las diferentes clases de radiación.

2.2.1. Ondas de luz policromáticas y monocromáticas

El espectro electromagnético se compone de componentes espectrales con frecuencias entre 10^{12} Hz (infrarrojo lejano) a 10^{16} Hz (ultravioleta lejano); de la brecha de cuatro décadas existente, solamente una octava parte ($\sim 4.8 \times 10^{14}$ Hz) representa la luz visible, encontrándose delimitada en el extremo de baja frecuencia por la región de las microondas y con la región de rayos x en el extremo de alta frecuencia (3×10^6 Hz a 30×10^6 Hz).

Se sabe que el análisis de Fourier de las variaciones en el tiempo del campo eléctrico para una onda, da componentes espectrales con frecuencias correspondientes a las del espectro electromagnético, con base en ello, las ondas de luz [18] se pueden clasificar en ondas policromáticas, monocromáticas y cuasi-monocromáticas.

Se dice que una onda es policromática si el análisis de Fourier produce un espectro compuesto de frecuencias espectrales en una distribución continua o discreta; una onda monocromática, en cambio, consiste en una sola componente de frecuencia discreta de ancho espectral cero; finalmente, una onda cuasi-monocromática es descrita por una línea espectral de ancho muy pequeño, pero no cero.

2.3. Esparcimiento

La caracterización de un medio cualquiera puede llevarse a cabo por medio de su índice de refracción, siempre y cuando el medio sea uniforme, la luz pasará a través del medio sin dispersarse. Sin embargo, si el medio no es uniforme, parte de la radiación se dispersará en todas las direcciones. Cuando las dimensiones de una partícula son menores o comparables a la longitud de onda, no es posible separar las contribuciones a la intensidad debido a la reflexión, difracción y reflexión [19], el fenómeno que se describe ahora es conocido como esparcimiento.

El problema del esparcimiento consiste en relacionar las propiedades del dispersor, es decir, su forma, tamaño y su índice de refracción, con la distribución angular de la luz dispersada.

Se conoce como esparcimiento único [19] a la reflexión, refracción y difracción de un haz de luz en una sola partícula de dimensiones muy superiores a la longitud de onda. Puesto que es imposible investigar una sola partícula, debe considerarse siempre un gran número de partículas, así mismo, es necesario suponer que no existe una relación fija entre las fases de las ondas diseminadas de una sola partícula, de modo que no pueda surgir interferencia. Este es el caso de partículas [20] completamente aleatorias y partículas no localizadas suficientemente separadas entre sí; una separación media de dos veces el diámetro de una partícula es suficiente para proporcionar una dispersión independiente. En este caso se puede suponer que las amplitudes de dispersión de las ondas dispersadas en partículas individuales pueden ser añadidas entre sí en cada dirección sin considerar las fases, es decir, la intensidad de dispersión puede considerarse incoherente.

Las leyes de dispersión se aplican a todas las longitudes de onda, dependiendo únicamente de la relación que existe entre el tamaño de la partícula y la longitud de onda. Con base en lo anterior, existe una teoría única para el estudio del esparcimiento en moléculas que son pequeñas, en comparación con la longitud de onda (Rayleigh), y para partículas isótropas esféricas de cualquier tamaño (Mie).

2.3.1. Esparcimiento Rayleigh

En 1871 Rayleigh realizó el primer estudio cuantitativo de las leyes del esparcimiento [21], éste condujo a una ley general sobre la intensidad de la luz esparcida, aplicable a partículas muy espaciadas. Esta ley basada en análisis dimensional concluye que: la intensidad de la luz esparcida es proporcional a $1/\lambda^4$ y por lo tanto aumenta con la frecuencia a la cuarta potencia (ν^4) de la luz.

Rayleigh encontró que existe una dependencia del esparcimiento con la longitud de onda, es decir, para partículas de dimensiones menores a $\lambda/15$, las ondas largas son menos eficaces de esparcirse lateralmente que las cortas; de forma que la luz azul ($\lambda \sim 450 \text{ nm}$) tendrá una difusión $(1.37)^4$ veces mayor que la luz roja $\lambda \sim 620 \text{ nm}$

En la puede observar que la luz roja tiene $\lambda \sim 620 \text{ nm}$ y la luz azul $\lambda \sim 450 \text{ nm}$, de acuerdo a Rayleigh, la luz azul tendrá una difusión $(1.37)^4$ veces mayor.

2.3.2. Esparcimiento de Mie

Gustav Mie en 1908 estudió el esparcimiento en partículas del orden igual o mayor que la longitud de onda de la luz y observó que la luz esparcida por una fracción pequeña de la partícula puede interferir, constructiva o destructivamente, con la luz esparcida por otra fracción de la misma partícula; por lo que el esparcimiento en una dirección es el resultado de la superposición de las ondas esparcidas por cada fragmento pequeño de la partícula. La diferencia de fase entre estas ondas secundarias es pequeña en la dirección del haz incidente, mientras que la irradiancia es grande en esta dirección

El esparcimiento de Mie se produce en coloides, humo, niebla, y en las nubes. La magnitud de este tipo de esparcimiento es independiente de la longitud de onda.

2.4. Propagación de la luz

La interacción del plano electromagnético de una onda y de una partícula con dimensiones mayores a la longitud de onda (λ), puede ser descrito por medio de conceptos como reflexión [19], refracción y difracción, siempre y cuando no exista absorción [19].

Las leyes de la óptica geométrica (ley de reflexión y ley de refracción) permiten conocer la dirección que tomarán los rayos reflejado (θ_r) y transmitido (θ_t) en una interfase

entre dos medios dada una dirección de incidencia (θ_i) así como los índices de refracción (η_1 y η_2) de los medios en cuestión. Por lo general, en una superficie se dan simultáneamente los fenómenos de reflexión, refracción y absorción de la luz en diferentes proporciones; sin embargo, éstos no describen la cantidad de luz reflejada y transmitida en un sistema, por lo que se requiere del estudio de dichos fenómenos desde el punto de vista de la teoría electromagnética, dando pie a las ecuaciones de Fresnel.

2.4.1. Transmisión

La transmisión [22] de la luz a través de un medio homogéneo es un proceso continuo y repetitivo de dispersión y redispersión; sin embargo, si el medio es denso homogéneo, la cantidad de luz esparcida es casi nula y se da en dirección lateral o hacia atrás.

El fenómeno de transmisión está íntimamente ligado con el índice de refracción del medio, es decir, la luz que atraviesa el medio se retrasa o adelanta progresivamente, por lo que cualquier cambio que se produzca en la fase provocará un cambio de velocidad.

2.4.2. Reflexión

La ley de reflexión [23] relaciona dos rayos, el incidente y el reflejado, de manera que la luz reflejada en una superficie lisa y pulimentada emerge con un ángulo de reflexión (ε) de igual magnitud que el de incidencia (ε'), como se observa en la Figura 2.4, es decir

$$\varepsilon = \varepsilon' \quad (2.1)$$

estos ángulos siempre se miden respecto de la normal (N) a la superficie en el punto de incidencia. Se conoce como reflexión especular a la reflexión que se produce en una superficie lisa y pulimentada y se la llama reflexión difusa si ésta se produce sobre una superficie irregular.

Existen dos tipos de reflexión: reflexión interna y externa. Se habla de reflexión externa cuando un porcentaje de la luz que es transmitida a través de un primer medio de menor densidad óptica (p. ej. aire) es reflejada hacia atrás o lateral al pasar a un segundo medio de mayor densidad óptica (p. ej. vidrio), debido al cambio de medios; por otra parte,

el fenómeno de reflexión interna se da cuando, la luz transmitida pasa de un medio de mayor densidad óptica a uno de menor densidad.

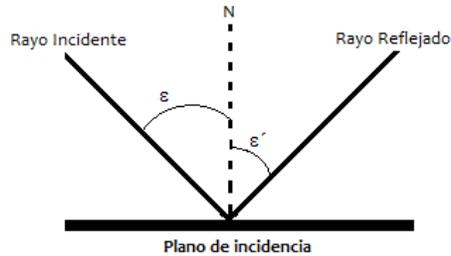


Figura 2.4 Reflexión de la luz en una superficie lisa.

2.4.3. Refracción

El fenómeno de refracción se produce cuando la luz cambia de medio de propagación, como se observa en la Figura 2.4, provocando una desviación en la trayectoria luminosa de acuerdo con la ley de Snell o ley de la refracción [23],

$$\eta \sin \varepsilon = \eta' \sin \varepsilon' \quad (2.2)$$

donde η y η' son los índices de refracción del primer y segundo medio respectivamente, ε y ε' son los ángulos de incidencia y refracción, ambos medios respecto a la normal en el punto de incidencia. Cuando la luz pasa de un medio a otro con mayor índice de refracción ($\eta < \eta'$) el rayo refractado se acerca a la normal ($\varepsilon > \varepsilon'$), en caso contrario, ($\eta > \eta'$) y el rayo refractado se aleja de la normal.

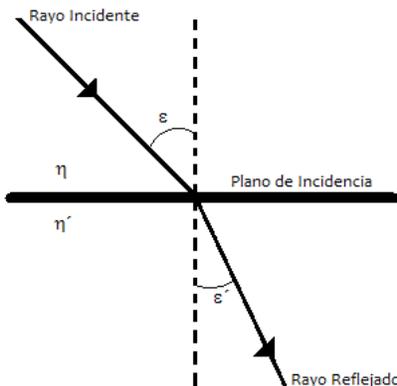


Figura 2.4 Refracción de la luz en una superficie plana.

2.4.4. Ecuaciones de Fresnel

Las ecuaciones de Fresnel [24] son expresiones que permiten conocer los coeficientes de reflexión y transmisión de la luz en una superficie de contacto.

De acuerdo con la teoría de polarización, cualquier onda monocromática se puede descomponer en dos componentes perpendiculares entre sí, con o sin un determinado desfase. El cálculo de los coeficientes de Fresnel de reflexión (r) y transmisión (t), se dividen en dos casos, de acuerdo con la dirección del campo eléctrico: transversal eléctrico (\perp) y transversal magnético (\parallel). El primero se define cuando el campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia, por lo que el campo magnético es paralelo a él. En el segundo caso, el campo eléctrico es paralelo al plano de incidencia, mientras que el campo magnético es paralelo a la superficie de separación de los medios.

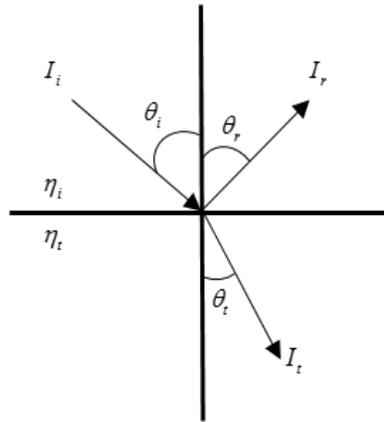


Figura 2.4 Reflexión y transmisión de un haz incidente.

Las ecuaciones (2.3-2.6) representan las expresiones de Fresnel para el cálculo de los coeficientes de reflexión y de transmisión de amplitud.

$$r_{\perp} = \frac{\eta_i \cos \theta_i - \eta_t \cos \theta_t}{\eta_i \cos \theta_i + \eta_t \cos \theta_t} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.3)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\eta_t \cos \theta_t - \eta_i \cos \theta_i}{\eta_t \cos \theta_t + \eta_i \cos \theta_i} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.4)$$

$$t_{\perp} = \frac{2\eta_i \cos \theta_i}{\eta_i \cos \theta_i + \eta_t \cos \theta_t} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.5)$$

$$t_{\parallel} = \frac{2\eta_i \cos \theta_i}{\eta_i \cos \theta_i + \eta_t \cos \theta_t} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \quad (2.6)$$

Así mismo, se define la irradiancia (I) al promedio de la energía por unidad de tiempo que atraviesa una unidad de área (A). Ésta es descrita en la Ec. 2.7, donde c es la velocidad de la luz, $\epsilon_0 = 8.85418 \times 10^{-12} F/m$ es la permitividad del vacío y E_0 es la componente del campo eléctrico.

$$I = \frac{c\epsilon_0}{2} E_0^2 \quad (2.7)$$

Cuando un haz de luz [25] incide (I_i) sobre una superficie transparente y lisa, como la que se muestra en la Figura 2.4, se observa que una parte de ésta se transmite (I_t) o refracta y otra parte se refleja (I_r). En función de lo mencionado previamente, la densidad de flujo incidente (ϕ) puede expresarse como

$$\phi = \phi_T + \phi_R \quad (2.8)$$

donde ϕ_T y ϕ_R son los flujos reflejado y transmitido respectivamente, de manera que la expresión presentada a continuación cumplirá el principio de conservación de la energía,

$$T + R = 1 \quad (2.9)$$

2.5. Polarización

Se dice que una onda luminosa está polarizada cuando el vector intensidad de campo eléctrico sigue una ley determinada, es decir, considerando el caso de polarización lineal, como ejemplo, se tiene que la orientación del campo eléctrico es constante mientras que su magnitud y signo varían en el tiempo. En la Figura 2.5 se muestra la distribución de los planos de oscilación y de polarización de una OEM.

La polarización juega un papel importante en diversas aplicaciones al ser un método de diagnóstico [26] no destructivo, de forma que las propiedades de polarización pueden ser la base del estudio óptico en diversos tipos de muestras [27].

Dependiendo del tipo de aplicación que se requiera, se deben considerar ciertos aspectos, como lo son: el tipo de fuente de luz a utilizar, la intensidad de ésta, el tipo de

muestra, los estados de polarización (lineal o circular), los cuales presentan un cambio significativo en la caracterización de la muestra; etc.

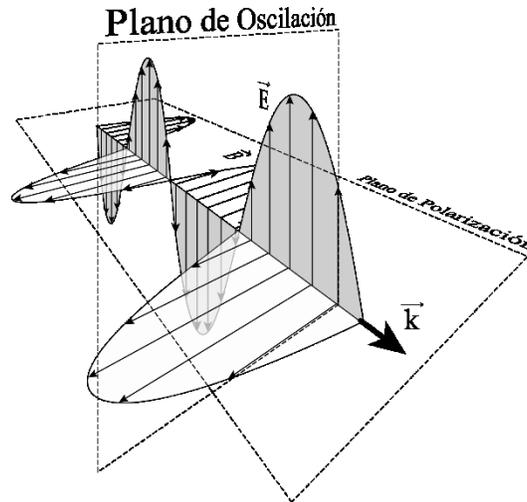


Figura 2.5 Distribución de los planos de polarización y oscilación de una onda electromagnética.

Existen tres diferentes estados de polarización: lineal, circular y elíptica. La polarización elíptica es la más general y de ella se puede obtener la polarización lineal y circular.

2.5.1. Estados de polarización

Partiendo del hecho de que la luz consta de dos componentes transversales, siendo éstas perpendiculares entre si y eligiendo por conveniencia que se propagan en el eje z de la Figura 2.5, entonces la representación de las componentes en los ejes E_x y E_y estaría dada por

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\tau + \delta_x) \quad (2.10)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\tau + \delta_y) \quad (2.11)$$

donde, $\tau = \omega t - \kappa z$ es la fase de las componentes transversales. Los subíndices x y y son las componentes en las direcciones x y y , E_{0x} y E_{0y} son las amplitudes máximas, mientras que δ_x y δ_y son las fases iniciales, respectivamente.

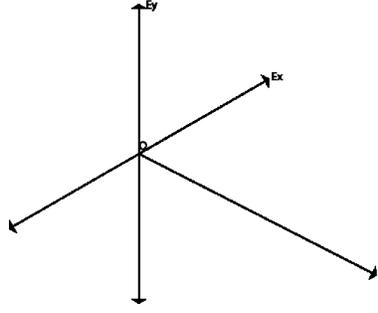


Figura 2.5 Propagación del **campo óptico transversal**.

La magnitud del vector resultante puede calcularse como la superposición de ambas ondas, tomando únicamente los valores instantáneos¹ y no la fase, las ecuaciones (2.10) y (2.11) pueden reescribirse como sigue

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \sin \delta_y - \frac{E_y}{E_{0y}} \sin \delta_x = \cos \tau \sin(\delta_y - \delta_x) \quad (2.12)$$

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \cos \delta_y - \frac{E_y}{E_{0y}} \cos \delta_x = \sin \tau \sin(\delta_y - \delta_x) \quad (2.13)$$

elevando al cuadrado las ecuaciones (2.12) y (2.13) y sumándolas se obtiene

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x}{E_{0x}} \frac{E_y}{E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (2.14)$$

donde

$$\delta = \delta_y - \delta_x \quad (2.15)$$

La Ec. (2.14) representa la forma general de una elipse, la cual describe el tiempo y lugar de los puntos descritos por el campo eléctrico. El comportamiento de la elipse representa el fenómeno de la polarización [3] óptica, por lo que la Ec. (2.14) se conoce como elipse de polarización.

Para ciertos valores de E_{0x} , E_{0y} y δ , la elipse de polarización sufre ciertas deformaciones, de las cuales se derivan cuatro casos:

¹ Se dice que una onda es “instantánea” en el sentido que; el tiempo en que la onda completa un ciclo es de 10^{-15} segundos a frecuencias ópticas [23].

1. Si en la ecuación (2.11) se tiene que $E_{0x} = 0$, y $E_y \neq 0$, entonces existirá una oscilación únicamente en la dirección y . En este caso se dice que la luz está linealmente polarizada en la dirección y y se llama polarización lineal verticalmente. De la misma forma, si ahora en la ecuación (2.12) se tiene que $E_{0y} = 0$, y $E_x \neq 0$, se tendrá luz polarizada horizontalmente.
2. Para valores de δ múltiplos pares e impares de π , la Ec. (2.14) puede escribirse como se presenta en la Ec. (2.16), la cual representa la ecuación de una línea con pendiente $\pm E_{0x}/E_{0y}$ e intercepción en el origen. Cuando δ es un múltiplo par de π , la Ec. (2.16) tendrá un valor positivo obteniendo polarización lineal a $+45^\circ$, en caso de que δ es un múltiplo impar de π la Ec. (2.16) tendrá un valor negativo, obteniendo así polarización lineal a -45° o a 135° .

$$E_y = \pm \left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}} \right) E_x \quad (2.16)$$

3. Para valores de $\delta = \pm\pi/2$ o $\delta = \pm3\pi/2$, etc, la Ec. (2.14) se reduce a la Ec. (2.17), la cual es la ecuación estándar de una elipse.

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} = 1 \quad (2.17)$$

La polarización elíptica es el estado de polarización de cualquier campo óptico que es estrictamente monocromático [28]. Las especificaciones de la polarización elíptica son:

- i. La orientación en el espacio del plano de polarización de la elipse.
 - ii. La orientación de la elipse en su plano, su forma y el sentido en que es descrito.
 - iii. La amplitud de la elipse.
 - iv. La fase temporal absoluta.
4. Si $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ y $\delta = \pi/2$ o $\delta = 3\pi/2$, la Ec. (2.14) describirá la ecuación de un círculo, ésta es representada en la Ec. (2.18). Se habla de polarización circular derecha y polarización circular izquierda para los valores mencionados de δ , respectivamente.

$$\frac{E_x^2}{E_0^2} + \frac{E_y^2}{E_0^2} = 1 \quad (2.18)$$

Nótese que los estados de polarización circular y lineal son casos especiales del estado de polarización elíptico y se generan cuando la excentricidad de ésta tiene valores de 0 y ± 1 respectivamente.

2.5.2. Representación gráfica de los estados de polarización

En 1832, H. Poincaré introdujo dos importantes y elegantes representaciones para describir los estados de polarización de una onda: el plano complejo y la esfera de Poincaré. Poincaré utilizó el plano complejo principalmente como un escalón de la representación esférica, como puede observarse en la Figura 2.5.

La esfera de Poincaré [29] proporciona una representación geométrica útil de todos los estados posibles de polarización de la luz, así como de la acción de los medios materiales sobre la luz polarizada. Los puntos en la superficie representan estados totalmente polarizados (estados puros), mientras que los puntos dentro de la esfera representan estados parcialmente polarizados (estados mixtos), cuya distancia del punto al centro viene dado por

$$r = \frac{\text{Intensidad parte totalmente polarizada}}{\text{Intensidad total}} = G \quad (2.19)$$

donde G , es denominado grado de polarización.

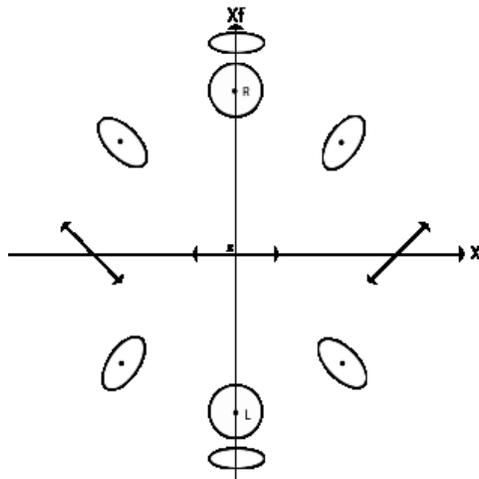


Figura 2.5 Localización de los estados de polarización en el plano cartesiano complejo.

Las propiedades de correspondencia de los estados de polarización en la esfera de Poincaré [30] con diámetro unitario, que se muestra en la Figura 2.5, se enuncian continuación:

1. Los polos “sur” y “norte” de la esfera representan los estados de polarización circular izquierda y derecha respectivamente.
2. Cada punto sobre el ecuador de la esfera representa un distinto estado de polarización lineal.
3. Excluyendo el polo sur, el ecuador y el polo norte, todos los puntos en la esfera representan estados elípticos de polarización. Por debajo del ecuador, la polarización es levógira ($90^\circ \leq 2\epsilon \leq 0^\circ$) y por arriba de éste, es dextrógira ($0^\circ \leq 2\epsilon \leq 90^\circ$).
4. Los estados de polarización localizados en el mismo meridiano serán elípticos con la misma orientación (θ cte.).
5. Estados de polarización en el mismo paralelo tendrán la misma elipticidad (ϵ cte.).

Las propiedades de la esfera de Poincaré pueden resumirse en el siguiente enunciado: un estado de polarización de azimuth θ y excentricidad ϵ es representado sobre la superficie de la esfera de Poincaré cuya “longitud” es el doble del azimuth y cuya latitud es el doble del ángulo de la excentricidad.

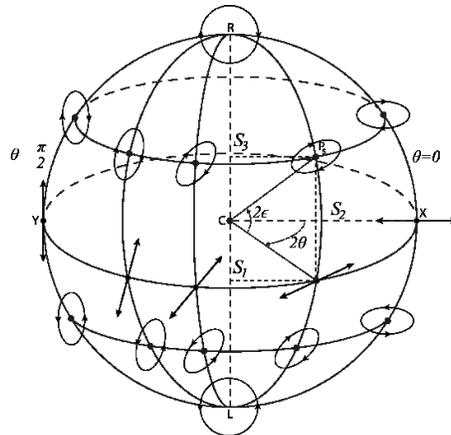


Figura 2.5 Representación de los estados de polarización en la esfera de Poincaré.

Considerando un sistema coordenado S_1 , S_2 y S_3 como el que se muestra en la Figura 2.5, las coordenadas polares (r, θ, ϕ) del punto P_S sobre la esfera están dadas por $(1/2, \pi/2 - 2\epsilon, 2\theta)$. Denotando el radio de la esfera por S_0 , el conjunto de parámetros

(S_0, S_1, S_2, S_3) está dado por: $S_0 = 1/2$, $S_1 = 1/2 \cos \epsilon \cos 2\theta$, $S_2 = 1/2 \cos 2\epsilon \cos 2\theta$, $S_3 = 1/2 \cos 2\epsilon$. Cuando el radio es multiplicado por dos, las ecuaciones anteriores dan los parámetros de Stokes de luz de intensidad unitaria.

2.5.3. Generación de luz polarizada

La generación de la polarización de la luz ha sido estudiada a lo largo del tiempo, así como su aplicación en técnicas de espectroscopía [31]. Para generar luz polarizada existen métodos convencionales llamados, métodos estáticos de polarización; los cuales utilizan elementos ópticos como polarizadores (para la generación de polarización lineal) y láminas retardadoras, que en conjunto con los polarizadores pueden generar luz polarizada circular.

Físicamente, un elemento polarizante altera el estado de polarización de la luz por medio del cambio de amplitud y/o de la fase de los componentes de su campo eléctrico [32]. Existen dos tipos de elementos polarizantes: polarizadores y retardadores.

Los polarizadores o atenuadores cambian únicamente la amplitud de los componentes del campo eléctrico, de forma que la intensidad transmitida a través de ellos dependerá del estado de polarización incidente. En consecuencia, un polarizador transmite la luz con el plano de vibración paralelo a su eje de transmisión y esa única componente pasa a través del polarizador sin alteraciones.

Los retardadores, en cambio, alteran únicamente la fase de los componentes del campo eléctrico, por lo que la intensidad que transmite se mantiene constante independiente del estado de polarización incidente. Los retardadores se fabrican con el eje óptico perpendicular al plano de incidencia.

Los dispositivos estáticos para medir y producir luz polarizada son problemáticos para trabajar y ofrecen sensibilidad baja. Como alternativa a dicho problema, se derivaron los métodos dinámicos, en los cuales, los estados de polarización cambian periódicamente en el tiempo, con un periodo mucho mayor que el de una oscilación del campo eléctrico, un ejemplo de ello es el modulador fotoelástico (PEM).

2.5.4. Ley de Malus

Un polarizador [33] es un dispositivo óptico que al hacerle incidir como entrada luz natural o un estado de polarización arbitrario, proporciona en su salida un estado de polarización determinado por su eje de transmisión.

Cuando un haz de luz linealmente polarizado [34] incide sobre un polarizador lineal, la irradiancia emergente dependerá del ángulo que forma la dirección de transmisión del polarizador lineal y la dirección de vibración del campo eléctrico incidente, como se observa en la Figura 2.5; de forma que la onda formará un ángulo ϕ con el eje de transmisión del polarizador y la amplitud del campo eléctrico emergente será proporcional al coseno del ángulo ϕ .

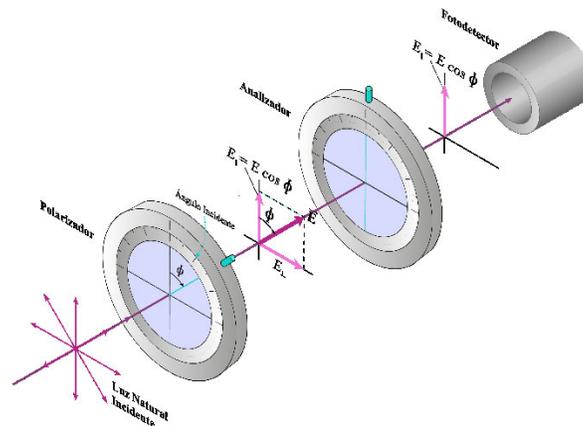


Figura 2.5 Sistema compuesto por un polarizador y analizador.

La ley de Malus (Ec. 2.21), nos permite conocer la irradiancia luminosa I que leerá un fotodetector localizado a la salida de un sistema conformado por un polarizador y un analizador (un segundo polarizador), la cual es proporcional al cuadrado del coseno del ángulo ϕ , dicho ángulo está formado por la dirección del eje de transmisión del polarizador y la dirección de vibración del campo eléctrico incidente.

$$I(\phi) = I(0) \cos^2 \phi \quad (2.20)$$

2.5.5. Birrefringencia

La propiedad de birrefringencia es característica de materiales anisotrópicos que poseen doble refracción, es decir, cuentan con dos ejes de transmisión denominados eje

rápido y eje lento [35]. La componente de onda que se propaga a lo largo del eje rápido (denominado rayo ordinario) sufre un adelanto con respecto a la componente que se propaga por el eje lento (denominado rayo extraordinario), ocasionando una diferencia de fase entre ambas componentes ortogonales, como se observa en la Figura 2.5, alterando el estado de polarización de la onda, la birrefringencia de un medio está dado por

$$B = \frac{\omega}{c}(n_o - n_e) \quad (2.21)$$

donde n_o , n_e son los índices de refracción del eje rápido y del eje lento respectivamente; ω es la frecuencia del frente de onda incidente y c es la velocidad de la luz en el vacío.

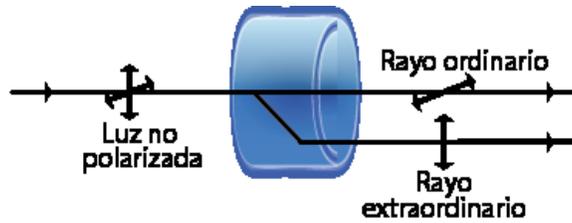


Figura 2.5 Comportamiento de un material birrefringente.

Las láminas retardadoras están compuestas por materiales birrefringentes (usualmente cristales) cuya diferencia de fase o retardo de fase se calcula como

$$\Delta(\psi) = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d \quad (2.22)$$

donde d es el ancho de la lámina y λ es la longitud de onda del haz incidente. Existen diversos tipos de láminas retardadoras, sin embargo, las más usuales de acuerdo al desfase que introducen se enlistan en la siguiente tabla.

Tabla 2.1 Tipos de láminas retardadoras.

Tipo de lámina	Diferencia de fase	Tipo de luz que emerge de la lámina
Lámina de una longitud de onda (λ)	2π	Luz L.P. (No hay giro de \vec{E}) Luz L.P.
Lámina de media longitud de onda ($\lambda/2$)	π	(\vec{E} gira un ángulo de 2θ tomando como bisectriz el eje de transmisión del polarizador) Luz L.P.
Lámina de un cuarto de longitud de onda ($\lambda/4$)	$\pi/2$	Luz C.P. (Hay giro de \vec{E})

Un retardador depende íntimamente de la longitud de onda, sin embargo, existen retardadores acromáticos que dependen lentamente de ésta.

Algunos elementos birrefringentes son: calcita, niobato de litio, cloruro de sodio, cuarzo, fluoruro de magnesio etc.

2.5.6. Fotoelasticidad

La fotoelasticidad es un fenómeno que bajo presión o tensión, permite que las sustancias transparentes normalmente isotrópicas presenten propiedades ópticas de un material anisotrópico [36]. El fenómeno también es conocido como birrefringencia mecánica o birrefringencia por esfuerzo. El eje óptico efectivo se localiza en la dirección del esfuerzo y la birrefringencia inducida es proporcional al esfuerzo, teniendo como consecuencia que si el esfuerzo no es uniforme sobre la muestra, no lo serán tampoco la birrefringencia ni la retardancia impuesta en una onda transmitida.

Un ejemplo de aplicación de este fenómeno es lo que se conoce como modulador fotoelástico. En las últimas décadas el modulador fotoelástico ha sido tema de gran interés y ha sido ampliamente utilizado en métodos experimentales para la medición de vectores de Stokes.

Un modulador fotoelástico modula la polarización de la luz que pasa a través de él. El PEM es un dispositivo que con ayuda del efecto fotoelástico produce un retardo de fase con una variación de tiempo sinusoidal muy precisa, la cual es utilizada para modular el estado de polarización de un haz de luz. Debido a diversas características como lo son su alta sensibilidad, amplio rango espectral y modulación de fase de alta precisión, lo han posicionado en un lugar prominente en una amplia gama de medidas físicas.

El PEM puede utilizarse en cualquier sistema para el cual un estado de polarización sea especificado, éste debe ser generado o analizado, de cualquier haz dado para cualquier estado de polarización.

El principio de funcionamiento del PEM consiste en un cristal que presenta propiedades de birrefringencia al cual se le aplica una diferencia de potencial eléctrico lo cual provoca un esfuerzo mecánico, esta diferencia de potencial alterna es controlada por medio de un oscilador electrónico que utiliza el cristal en su circuito. Las variaciones de

voltaje modulan la polarización la luz a una frecuencia y amplitud. Si se coloca un polarizador detrás del PEM, dicha modulación se transformará en intensidad modulada, la cual puede ser detectada con diversas técnicas [37].

2.6. Formulismo Stokes-Müeller

El desarrollo de métodos polarimétricos para la identificación y clasificación de sistemas requiere el entendimiento de la relación entre las propiedades de polarización y físicas de los objetos. A medida que la luz interactúa o se propaga a través de un medio, su estado de polarización cambia, al igual que su intensidad, de forma que al dispersarse la luz en el medio, ésta contiene información sobre las propiedades ópticas del medio [5].

Existen diversos formalismos matemáticos que ayudan a describir lo mencionado anteriormente, uno de ellos es el formalismo Stokes-Müeller [4]. En este formalismo, cualquier estado de polarización de la luz [38] (monocromática o cuasi-monocromática) es representado por un vector de dimensión 4×1 , conocido como vector de Stokes [4], [37]. Las cuatro cantidades reales que componen dicho vector, son a su vez, una combinación de seis mediciones de intensidad realizadas con polarizadores ideales: I_h , polarización lineal horizontal (0°); I_v , polarización lineal vertical (90°); I_+ , polarización lineal a 45° ; I_- , polarización lineal a 135° (-45°); I_r , polarización circular derecha e I_l , polarización circular izquierda. El vector de Stokes (S) es definido como

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_h + I_v \\ I_h - I_v \\ I_+ - I_- \\ I_r - I_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_h + I_v \\ I_h - I_v \\ 2\sqrt{I_h I_v} \cos \varepsilon \\ 2\sqrt{I_h I_v} \sin \varepsilon \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Los componentes s_2 y s_3 pueden expresarse en términos de I_h , I_v y ε , que representa la diferencia de fase entre las componentes ortogonales del vector intensidad del campo eléctrico.

El parámetro de Stokes I es proporcional a la irradiancia total incidente. Los parámetros de Stokes Q y U representan la diferencia entre dos componentes del flujo, en donde los vectores del campo eléctrico oscilan simultáneamente en direcciones ortogonales.

El parámetro de Stokes V , representa la diferencia entre dos estados de polarización circular opuestos. De forma que se pueden dar cinco casos específicos

$$Q \neq 0, U \neq 0, V = 0 \quad (2.24)$$

$$Q = 0, U = 0, V \neq 0 \quad (2.25)$$

$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2 \quad (2.26)$$

$$I^2 > Q^2 + U^2 + V^2 \quad (2.27)$$

$$Q = U = V = 0 \quad (2.28)$$

polarización lineal, polarización circular, luz completamente polarizada, luz parcialmente polarizada y luz sin polarizar, respectivamente.

Usando el principio de conservación de energía, los parámetros de Stokes esparcidos (por reflexión o transmisión) [39] obedecen la relación de la Ec. 2.29, donde la igualdad se dará para luz polarizada y en caso contrario, significará una despolarización total, lo que significa que no hay estados completamente polarizados. Esta inecuación juega un papel importante en polimetría, debido a que permite clasificar el carácter en la interacción luz-medio [9].

$$s_0^2 \geq s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 \quad (2.29)$$

En la Tabla 2.6 se presentan los estados de polarización por medio de los vectores de Stokes, observando que el primer elemento tomará un valor unitario mientras que los elementos restantes tomarán los valores correspondientes [22], [40] al estado de polarización.

Tabla 2.6 Representación de estados de polarización por medio de los vectores de Stokes.

Luz monocromática	Vector de Stokes (S)
con polarización:	
Horizontal	$[1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$
Vertical	$[1 \ -1 \ 0 \ 0]^T$
+45°	$[1 \ 0 \ 1 \ 0]^T$
-45°	$[1 \ 0 \ -1 \ 0]^T$
Circular Derecha	$[1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$
Circular Izquierda	$[1 \ 0 \ 0 \ -1]^T$

La matriz que transforma un vector que entra a un sistema óptico lineal en otro vector de salida, se conoce como matriz de Müeller [41], [15] y se representa por la relación

$$S^{sal} = M S^{ent} \quad (2.30)$$

donde S son los vectores de Stokes de entrada y salida, respectivamente, relacionados mediante la Ec. 2.30 y M es una matriz con dimensión 4×4 de elementos reales, como se puede observar en la Ec. 2.31. La relación entre los vectores de Stokes (incidentes y salientes en un medio óptico lineal) y la matriz de Müeller fue propuesta por Hans Müeller es 1943, pudiendo ser aplicable a estudios que involucren luz polarizada y parcialmente polarizada; así mismo, dicha relación permite que la transformación de los estados de polarización pueda ser descrita mediante una simple multiplicación de matrices.

La matriz de Müeller está dada por la Ec. 2.31, donde cada elemento que la conforma es resultado a su vez, de la suma o resta de cuatro irradiancias [39] mostradas en la Ec. 2.32.

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} m_{11} &= \frac{1}{2}(I_{hh} + I_{hv} + I_{vh} + I_{vv}) & m_{12} &= \frac{1}{2}(I_{hh} + I_{hv} - I_{vh} - I_{vv}) \\ m_{13} &= \frac{1}{2}(I_{+h} + I_{+v} - I_{-h} - I_{-v}) & m_{14} &= \frac{1}{2}(I_{rh} + I_{rv} - I_{lh} - I_{lv}) \\ m_{21} &= \frac{1}{2}(I_{hh} - I_{hv} + I_{vh} - I_{vv}) & m_{22} &= \frac{1}{2}(I_{hh} - I_{hv} - I_{vh} + I_{vv}) \\ m_{23} &= \frac{1}{2}(I_{+h} - I_{+v} - I_{-h} + I_{-v}) & m_{24} &= \frac{1}{2}(I_{rh} - I_{rv} - I_{lh} + I_{lv}) \\ m_{31} &= \frac{1}{2}(I_{h+} - I_{h-} + I_{v+} - I_{v-}) & m_{32} &= \frac{1}{2}(I_{h+} - I_{h-} - I_{v+} + I_{v-}) \\ m_{33} &= \frac{1}{2}(I_{++} - I_{+-} - I_{-+} + I_{--}) & m_{34} &= \frac{1}{2}(I_{r+} - I_{r-} - I_{l+} + I_{l-}) \\ m_{41} &= \frac{1}{2}(I_{hr} - I_{hl} - I_{vl} + I_{vr}) & m_{42} &= \frac{1}{2}(I_{hr} - I_{hl} - I_{vr} + I_{vl}) \\ m_{43} &= \frac{1}{2}(I_{+r} - I_{+l} - I_{-r} + I_{-l}) & m_{44} &= \frac{1}{2}(I_{rr} - I_{rl} - I_{lr} + I_{ll}) \end{aligned} \quad (2.32)$$

Cada uno de los términos I_{ab} indican las irradiancias medidas por un elemento fotodetector cuando se tiene luz incidente con polarización a y la luz detectada

correspondiente al estado de polarización b . Así a y b pueden tomar los valores de $+$, $-$, h , v , r y l , que son la nomenclatura utilizada para identificar luz polarizada a $+45^\circ$, -45° o 135° , horizontal o a 0° , vertical o a 90° , circular derecha y circular izquierda respectivamente.

2.6.1. Matrices de Müeller de elementos polarizantes

Cuando un haz de luz interactúa con la materia, es posible que se produzca un cambio en su estado de polarización. Este cambio del estado de polarización [3] puede alterar a su vez, las amplitudes y la fase del haz de luz, modificando la orientación de las componentes del campo eléctrico ortogonal o transfiriendo energía de los estados polarizados al estado no polarizado.

Un elemento óptico que cambia las amplitudes ortogonales desigualmente se llama polarizador. De manera similar, un dispositivo óptico que introduce un desplazamiento de fase entre los componentes ortogonales se denomina retardador; otros nombres utilizados para el mismo dispositivo son lámina de onda, compensador o desfasador. Si el dispositivo óptico gira los componentes ortogonales del haz a través de un ángulo a medida que se propaga a través del elemento, se llama un rotador. Finalmente, si la energía en estados polarizados va al estado no polarizado, el elemento es un despolarizador.

Las matrices de Müeller de los elementos ópticos mencionados anteriormente han sido ampliamente estudiadas y a continuación se presentan algunas de ellas.

La matriz de Müeller [3] general para un polarizador lineal es descrita por la siguiente ecuación

$$M = \frac{\rho^2}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\gamma & 0 & 0 \\ \cos 2\gamma & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin 2\gamma \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

donde $\rho = 1$ para un polarizador ideal; γ puede tomar los valores de 0° , 45° y 90° , los cuales corresponden a un polarizador lineal horizontal, un filtro de densidad neutra, y a un polarizador lineal vertical, respectivamente. Ahora bien, suponiendo que se desea saber la

matriz de Müeller de un polarizador lineal horizontal cuyo eje de transmisión rotará con un ángulo θ , entonces, la expresión que representará dichas condiciones será

$$M_p(2\theta) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

de forma que cuando $\theta = 0, 45^\circ, 90^\circ$, la Ec. 2.34 permitirá obtener la matriz de Müeller para un polarizador lineal horizontal, a 45° y vertical, respectivamente.

La matriz de Müeller para un retardador [3] con un desplazamiento de fase Φ está dada por la Ec. 2.35. Teniendo en cuenta que los retardadores introducen un desfaseamiento entre las componentes ortogonales del campo incidente, cuando $\Phi = 180^\circ$ o $\Phi = 90^\circ$, la Ec. 2.35 permite obtener la matriz de Müeller para una lámina retardadora de media onda y de un cuarto de onda, respectivamente.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \Phi & \sin \Phi \\ 0 & 0 & -\sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

Al igual que con los polarizadores, si se desea conocer la matriz de Müeller de un retardador cuyo eje rápido se encuentre a un ángulo θ , la Ec. 2.36 lo permitirá de forma directa.

$$M_R(\phi, 2\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \cos \Phi \sin^2 2\theta & (1 - \cos \Phi) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin \Phi \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \Phi) \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta + \cos \Phi \cos^2 2\theta & \sin \Phi \cos 2\theta \\ 0 & \sin \Phi \sin 2\theta & -\sin \Phi \cos 2\theta & \cos \Phi \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

Las ecuaciones anteriores serán utilizadas en capítulos posteriores, de igual forma permiten conocer las matrices de los elementos ópticos mencionados bajo determinadas condiciones.

2.6.2. Propiedades polarimétricas de la matriz de Müeller

A continuación, se presentan diversas propiedades polarimétricas que se pueden obtener a partir del cálculo de la matriz de Müeller.

- **Diatenuación (Dicroísmo).**- Se define como la propiedad que tiene un elemento o un sistema óptico de cambiar la amplitud de las componentes del campo eléctrico que pasa a través de él, por lo que la intensidad de transmisión depende del estado de polarización del haz incidente [42]. Esta propiedad se puede leer directamente de la matriz de Müeller [43] simplemente mirando su primera fila

$$\bar{D} = [M_{12}/M_{11} \quad M_{13}/M_{11} \quad M_{14}/M_{11}]^T \quad (2.37)$$

Lo anterior se puede expresar como

$$D = \frac{\sqrt{M_{12}^2 + M_{13}^2 + M_{14}^2}}{M_{11}} \quad (2.38)$$

donde $0 \leq D \leq 1$ [44]. En caso de que $D = 0$, ello implicará que únicamente la intensidad total de haz incidente va a contribuir en una cantidad M_{11} a la intensidad total del haz emergente; en cambio, si $D = 1$ esto significa que la intensidad total del haz incidente contribuye en igual manera a la intensidad del haz emergente.

- **Grado de polarización** [44].- El grado de polarización de un sistema está dado por la relación de la Ec. 2.39.

$$DoP = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0} = \frac{\sum_{j=2}^4 \sqrt{(M_{j1}s_0^i + M_{j2}s_1^i + M_{j3}s_2^i + M_{j4}s_3^i)^2}}{M_{11}s_0^i + M_{12}s_1^i + M_{13}s_2^i + M_{14}s_3^i} \quad (2.39)$$

cada elemento de la matriz de Müeller estará en función de un vector de Stokes incidente (s^i). La Ec. 2.39 debe cumplir la desigualdad $0 \leq DoP \leq 1$, existiendo tres posibles casos: $DoP = 0$ indica que el haz de luz emergente no se encuentra polarizado; $DoP = 1$ el haz emergente se encuentra completamente polarizado y $0 < DoP < 1$, el haz de luz emergente se encuentra parcialmente polarizado.

2.6.3. Matriz de Müller diferencial

La importancia de la matriz de Müller radica en que permite una caracterización [45] matemática completa de las propiedades de polarización de un objeto, incluyendo despolarización, birrefringencia, rotación óptica, etc. Lo anterior se logra por medio de lo que se conoce como *matriz diferencial de Müller* [46], la cual proporciona información acerca de la evolución de un estado de polarización que se propaga a lo largo de una muestra; suponiendo que se desea analizar el estado de polarización que se propaga a través del eje z de una muestra, de forma matemática se puede expresar como una ecuación diferencial no lineal de primer orden

$$dS / dz = mS \quad (2.40)$$

donde S representa los vectores de Stokes y m , es la matriz de Müller diferencial con dimensión 4×4 conformada por elementos reales. Para un medio uniforme, lineal y no despolarizante m puede ser definida por siete parámetros independientes

$$m = \begin{pmatrix} \alpha & \beta & \gamma & \delta \\ \beta & \alpha & \mu & \nu \\ \gamma & -\mu & \alpha & \eta \\ \delta & -\nu & -\eta & \alpha \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

donde α es la absorción isotrópica, β es el dicroísmo lineal a lo largo de los ejes coordinados x - y (donde x - y - z , es un sistema coordinado fijo al medio), γ dicroísmo lineal a lo largo de las bisectrices de x - y , δ representa el dicroísmo circular, η es la birrefringencia lineal a lo largo de los ejes x - y , mientras que ν es la birrefringencia lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x - y y μ representa la birrefringencia circular.

2.6.4. Método de 36 mediciones

Existen diversos métodos para la conformación de la matriz de Müller [47]. Éstos se diferencian fundamentalmente en la capacidad de simplificar los cálculos dependiendo de las propiedades que presenta el sistema bajo estudio. El método utilizado en este trabajo de tesis es el Método de 36 mediciones [48], el cual es un método general y aplicable a cualquier sistema arbitrario. Para su implementación es necesario generar seis estados de polarización tanto para la onda incidente como para la reflejada, como se observa en la

Figura 2.6. Estos estados son combinados entre sí, de ahí su nombre, ya que el total de vectores a generar es 36. Este método es preferiblemente usado en sistemas donde sus propiedades sean desconocidas (sistemas físicos arbitrarios).

Actualmente se utilizan las matrices de Müeller para describir la interacción que existe entre la luz y diversos medios ópticos, principalmente en áreas enfocadas hacia biomedicina [4].

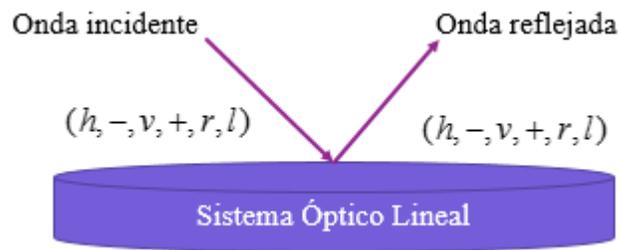


Figura 2.6 Interacción entre un haz de luz y un sistema óptico lineal.

El formalismo Stokes-Müeller tiene ciertas ventajas. En primer lugar, como se ha establecido anteriormente, puede abarcar cualquier estado de polarización de la luz (natural, total o parcialmente polarizado). En segundo lugar, los vectores de Stokes y las matrices de Müeller pueden ser medidas mediante instrumentos convencionales de medición de intensidad (polarizadores y láminas retardadoras).

2.7. Conclusiones

En este capítulo se presentó una breve descripción de conceptos teóricos presentes en la caracterización de muestras en el polarímetro. Al trabajar con el principio de reflexión es de vital importancia conocer los fenómenos ópticos presentes en la interacción medio-luz, algunos de ellos son fenómenos como transmisión y esparcimiento. Las ecuaciones de Fresnel nos permiten conocer la cantidad de luz que es reflejada o transmitida al interactuar la luz en dos medios diferentes. El formalismo Stokes-Müeller, por otra parte, nos permite representar las propiedades en la muestra al aplicarle luz polarizada, de forma que la caracterización de ésta se lleve a cabo por medio de elementos ópticos como polarizadores y moduladores fotoelásticos.

CAPÍTULO III

Desarrollo Experimental

En este capítulo se presenta el diseño e implementación del polarímetro dinámico de Stokes basado en reflexión, así como la obtención de los estados de polarización por medio del uso de moduladores fotoelásticos con ayuda de un circuito de sincronía análogo y polarizadores montados en motores a pasos. El sistema es controlado por medio de una tarjeta de adquisición de datos (TAD) bajo la plataforma de programación LabVIEW®.

3.1. Introducción

Este trabajo tiene como finalidad la implementación de un polarímetro dinámico basado en reflexión cuyo principal objetivo es la comprobación de la matriz de Mueller de muestras previamente reportadas en la literatura, como polarizadores y láminas retardadoras, así como la caracterización de muestras biológicas y no biológicas seleccionadas como casos de estudio.

Se dice que el polarímetro es dinámico puesto que entre los elementos que lo conforman se encuentran dos PEM, los cuales, como se describió en el capítulo anterior permiten obtener diversos estados de polarización de forma periódica en el tiempo.

El polarímetro funciona de forma autónoma por medio de una interfaz creada para el usuario bajo la plataforma de LabVIEW®.

3.2. Descripción del arreglo óptico

Los elementos que conforman el polarímetro dinámico son: dos polarizadores lineales montados en dos nanorotores (con su respectiva etapa de potencia), dos moduladores fotoelásticos (PEM), un generador de sincronía analógico, un fotodetector y una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments®.

Para llevar a cabo la implementación del polarímetro basado en reflexión se decidió como primer paso, construir el arreglo óptico cuyo diagrama a bloques se muestra en la Figura 3.2 (a), el cual corresponde a un polarímetro basado en transmisión. Esto con la finalidad de poder caracterizar de forma rápida y eficiente cada uno de los componentes así como detectar posibles fuentes de error.

Una vez caracterizado cada elemento que conforma el polarímetro de transmisión, se procedió a construir el arreglo del polarímetro basado en reflexión, cuyo diagrama de bloques es mostrado en la Figura 3.2 (b). Donde el ángulo θ es fijo a $\sim 30^\circ$, teniendo en consideración la información previamente recabada del sistema.

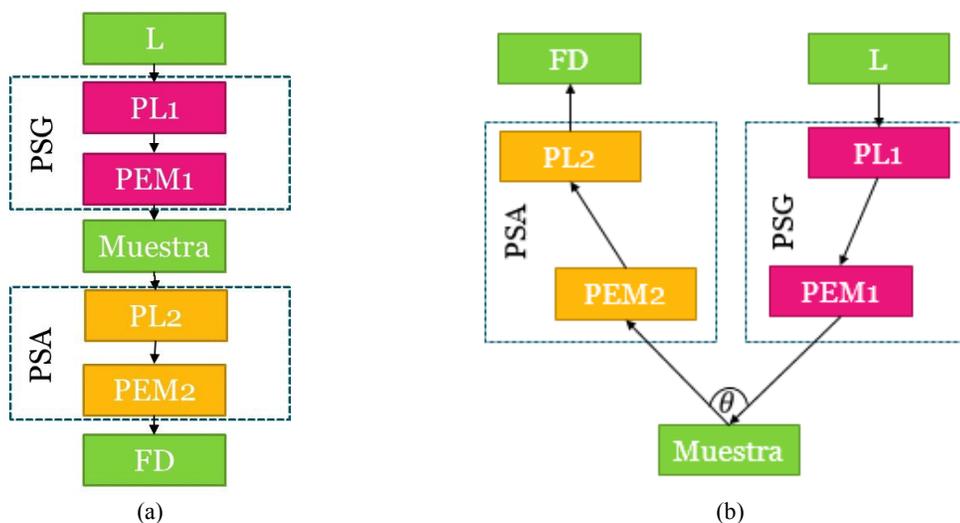


Figura 3.2 Diagrama a bloques del polarímetro dinámico en (a) transmisión y (b) reflexión.

Todo sistema óptico cuya finalidad sea el estudio de luz polarizada, cuenta con dos etapas principales conocidas como: generador de estados de polarización y analizador de estados de polarización, denominados PSG (PSG: Polarization States Generator, por sus siglas en inglés) y PSA (PSA: Polarization States Analyzer, por sus siglas en inglés), respectivamente. Lo anterior, sin excluir la fuente de luz, que en estos sistemas es un elemento clave. En nuestro caso, la fuente de luz utilizada es un láser (representado como L, en el diagrama a bloques de la Figura 3.2) He-Ne con longitud de onda de 632.8 nm y potencia continua de 17 mW, de la marca Thorlabs®.

Procediendo a describir el arreglo óptico que se muestra en la Figura 3.2, de forma general para ambas imágenes se puede observar que el primer elemento que se tiene es la

fuentes de luz, seguido de ésta se encuentra un polarizador lineal (PL_1) modelo LPVIS100-MP montado sobre un nanorotor (motor a pasos) con giro continuo de 360° modelo NR360S, ambos de la marca Thorlabs® así como la cabeza óptica de un PEM (PEM_1) de la marca Hinds®, estos dos elementos conforman el PSG.

La muestra por caracterizar se coloca en medio del PSG y del PSA. Este último está conformado por una segunda cabeza óptica de un PEM (PEM_2) y un segundo polarizador lineal (PL_2) LPVIS100-MP montado en un nanorotor NR360S. A la salida del PSA se coloca un fotodetector (FD) modelo PDA36 de la firma Thorlabs®, el cual será el encargado de registrar los cambios en irradiancia que se presenten en la muestra al aplicarle diferentes estados de polarización.

Las características detalladas de cada uno de los elementos que conforman el polarímetro se detallan en el Anexo I. A excepción de la fuente de luz y de la muestra, los componentes son controlados por medio de la TAD, de forma que el sistema únicamente depende del usuario para el encendido y la colocación de la muestra en él.

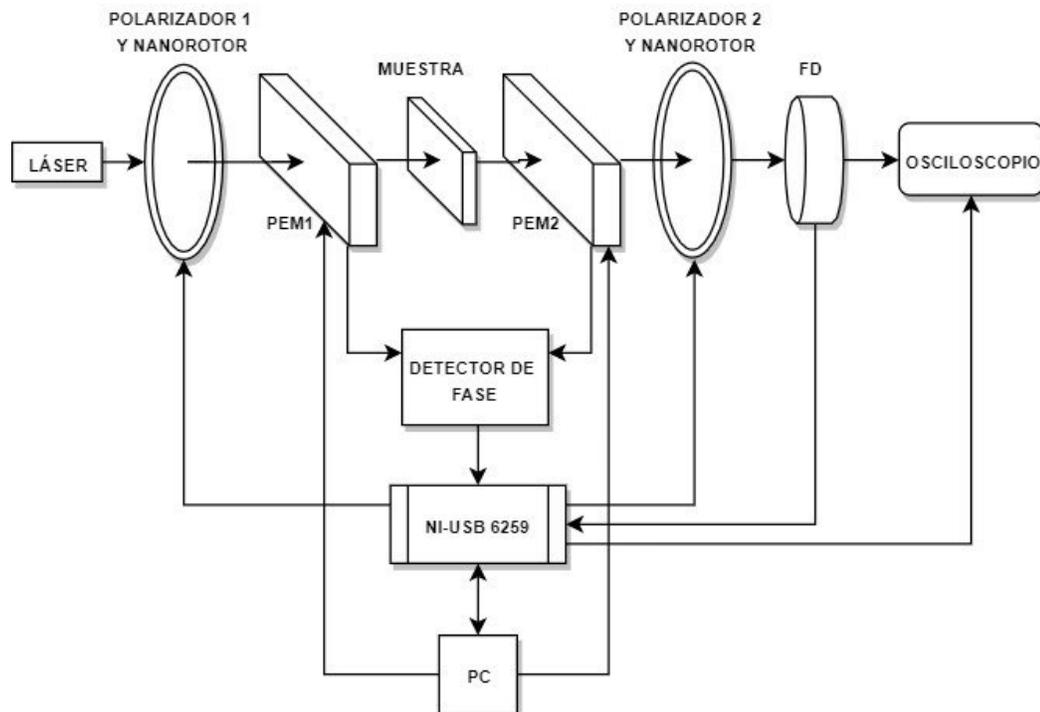


Figura 3.2 Diagrama del polarímetro dinámico de Stokes en transmisión.

En la Figura 3.2 se presenta el diagrama del polarímetro dinámico basado en transmisión, haciéndose notar que las conexiones en éste no cambian de ninguna forma al implementar el polarímetro basado en reflexión. Para fines de visualización se decidió añadir al sistema un osciloscopio digital, sin embargo, éste puede ser un elemento de medición optativo.

La principal característica del arreglo óptico propuesto es la versatilidad que tiene para generar estados de polarización circular y lineal combinando métodos estáticos con métodos dinámicos de forma automatizada.

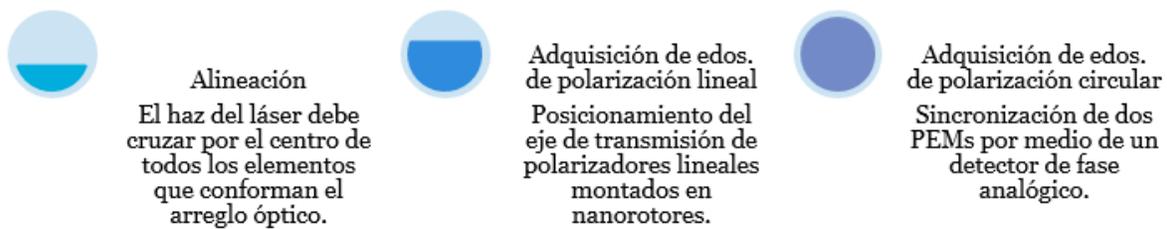


Figura 3.2 Diagrama a bloques de la metodología realizada.

La metodología general utilizada, se muestra en el diagrama de la Figura 3.2 esta consiste en tres pasos principales aplicables tanto al polarímetro en reflexión como en transmisión: alineación, adquisición de estados de polarización lineal y adquisición de estados de polarización circular; cada uno de ellos se detallará en las secciones siguientes.

3.3. Alineación

Todo sistema óptico requiere, previo a su implementación, de un proceso de alineación; entre más metódico sea éste, mejores serán los resultados obtenidos. En el presente trabajo se tuvo especial cuidado en alinear cada uno de los elementos que conforman el arreglo experimental propuesto, con la finalidad de evitar introducir posibles errores y obtener mediciones con la mayor precisión posible.

De forma general los pasos que se siguieron para asegurar que todos los elementos del sistema estén correctamente alineados fueron

1. De acuerdo con la altura de cada soporte y tamaño de dispositivos ópticos con que se contaban, se estableció la altura máxima del sistema (16 cm); principalmente se estableció en función a la altura de los postes que sostienen los motores a pasos, con

la finalidad que el movimiento que generen los nanorotores al posicionarse no afecte la alineación del mismo.

2. El haz que emerge del láser debe cruzar por el centro de cada uno de los elementos sin excepción (incluyendo la muestra a caracterizar).
3. Todos los elementos deben ser perpendiculares a la superficie de la mesa holográfica en la que se encuentran montados.

Aunque parece superficial, el tema de la alineación en el desarrollo de este trabajo juega un papel determinante en la obtención de los resultados que más adelante se presentan, un caso específico en el que se observó su importancia fue en la caracterización de los nanorotores donde se montaron sus respectivos polarizadores, teniendo como consecuencia directa la obtención de estados de polarización lineal (ver Anexo II).

3.4. Estados de polarización lineal

Como se mencionó en el Capítulo II, el método utilizado para la caracterización de las muestras es el método de 36 mediciones. Estas mediciones se obtuvieron por la generación de seis estados de polarización con el PSG y seis más con el PSA, así como de la combinación entre ellos. De estas 36 combinaciones posibles, únicamente 16 de ellos corresponden a combinaciones entre estados de polarización lineales, en la Tabla 3.4 se muestra la lista de las combinaciones.

Tabla 3.4 Combinaciones que involucran estados de polarización lineal.

<i>hh</i>	<i>+h</i>	<i>vh</i>	<i>-h</i>
<i>h+</i>	<i>++</i>	<i>v+</i>	<i>-+</i>
<i>hv</i>	<i>+v</i>	<i>vv</i>	<i>-v</i>
<i>h-</i>	<i>+-</i>	<i>v-</i>	<i>--</i>

Las combinaciones presentadas anteriormente se logran en este trabajo, mediante el posicionamiento del eje de transmisión de los polarizadores lineales, por medio del movimiento angular de los nanorotores en cuatro ángulos específicos: 0° (*h*), 45° (*+*), 90° (*v*) y 135° (*-*); cada nanorotor se encuentra localizado en PSG y PSA respectivamente, consiguiendo de esta forma las 16 combinaciones requeridas. Durante este proceso las cabezas ópticas de los PEM se encuentran en estado de relajación, es decir, no intervienen de ninguna forma en los valores de irradiancia adquiridos por medio del fotodetector y la TAD.

El nanorotor NR360S de la firma Thorlabs® es un motor a pasos bipolar cuyo tamaño de paso puede alcanzar resoluciones < 1 arco segundo [49], permite un giro continuo de 360° y cuenta con un conmutador mecánico, con el cual es posible conocer la posición de éste cuando se completa una revolución (ver Anexo I). Teniendo en cuenta que los nanorotores funcionan como un motor a pasos bipolar, de ahora en adelante se utilizará de forma indistinta la denominación motor a pasos (MP) para hacer referencia al nanorotor.

La metodología para la obtención de la combinación entre los estados de polarización lineal en el sistema basado en reflexión y en transmisión se detalla en cada uno de los siguientes apartados.

3.4.1. Polarímetro dinámico de Stokes basado en transmisión

La adquisición y generación de la combinación entre los estados de polarización lineal para el sistema basado en transmisión consiste en realizar de forma autónoma cada una de las combinaciones presentadas anteriormente, las cuales corresponden a un valor de irradiancia determinado. En la Tabla 3.4 se enuncian estos valores de forma normalizada para las 16 combinaciones utilizando como muestra aire; estas combinaciones de estados lineales cumplen con la Ley de Malus, de forma que corresponderán a los valores que leerá un fotodetector a la salida de un sistema conformado por un polarizador y un analizador.

Tabla 3.4 Estados de polarización lineal y valores de irradiancia normalizada.

Estado	Posición angular PL ₁ /PL ₂	Valor de irradiancia teórica	Valor de irradiancia normalizada
<i>hh</i>	0°/0°	Máximo	1
++	45°/45°		
<i>vv</i>	90°/90°		
--	135°/135°		
<i>h+</i>	0°/45°	Medio	0.5
+ <i>h</i>	45°/0°		
<i>h-</i>	0°/135°		
- <i>h</i>	135°/0°		
<i>v+</i>	90°/45°		
+ <i>v</i>	45°/90°		
<i>v-</i>	90°/135°		
- <i>v</i>	135°/90°		
<i>hv</i>	0°/90°	Mínimo	0
<i>vh</i>	90°/0°		
+ <i>-</i>	45°/135°		
- <i>+</i>	135°/45°		

Los valores mencionados fueron utilizados como referencia para la validación del sistema propuesto. Como se detalla en el Anexo II, el movimiento de los motores se realiza en el sentido opuesto a las manecillas del reloj, de forma que la secuencia en la que se moverán los polarizadores será 0° , 135° , 90° y 45° . Lo anterior fue únicamente con la finalidad de obtener los estados de polarización lineal, sin embargo, se hace notar que el programa de movimiento para cada motor no es restrictivo a una secuencia específica.

De acuerdo a las condiciones de la Tabla 3.4, respecto a la posición angular que deben cumplir los polarizadores para cada uno de las combinaciones entre estados mostrados y de acuerdo a la caracterización de los motores a pasos, se realizó un SubVI en la plataforma de LabVIEW®, que sigue el diagrama a flujo presentado en la Figura 3.4 y en la Figura 3.4, aprovechando cada una de las posiciones realizadas por los motores.

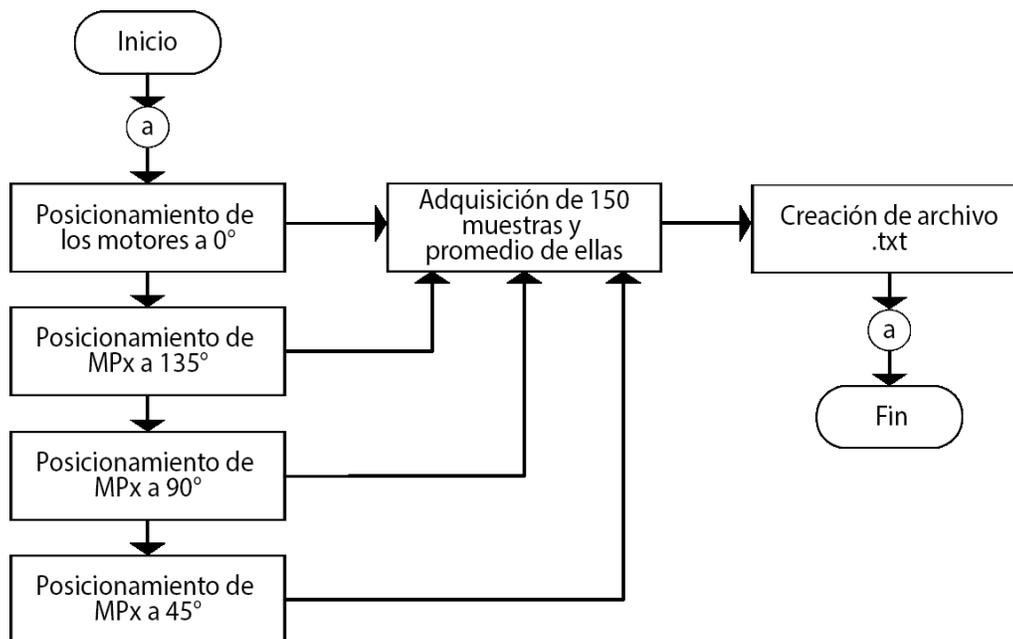


Figura 3.4 Diagrama de flujo para la obtención de la combinación de estados de polarización lineal hx y xh .

El diagrama de flujo de la Figura 3.4 permite obtener las combinaciones hx y xh , donde x puede tomar los valores de $+$, $-$, h y v , obteniendo 8 de las 16 combinaciones deseadas. El principio de funcionamiento de éste, consiste en posicionar en primera instancia los motores a pasos a la posición de referencia; procediendo a colocar MPx (que para la primera corrida será el nanorotor colocado en PSG y después tendrá la dirección que

corresponde al nanorotor colocado en PSA) a 135° , 90° y 45° , en cada posicionamiento se adquirirán 150 muestras y se realizará el promedio de éstas.

Al finalizar el programa se contará con dos archivos de texto con extensión .txt que contendrán 4 estados de polarización cada uno, sin embargo, únicamente se requerirán 7 valores, debido a que el estado hh se repite en ambos archivos.

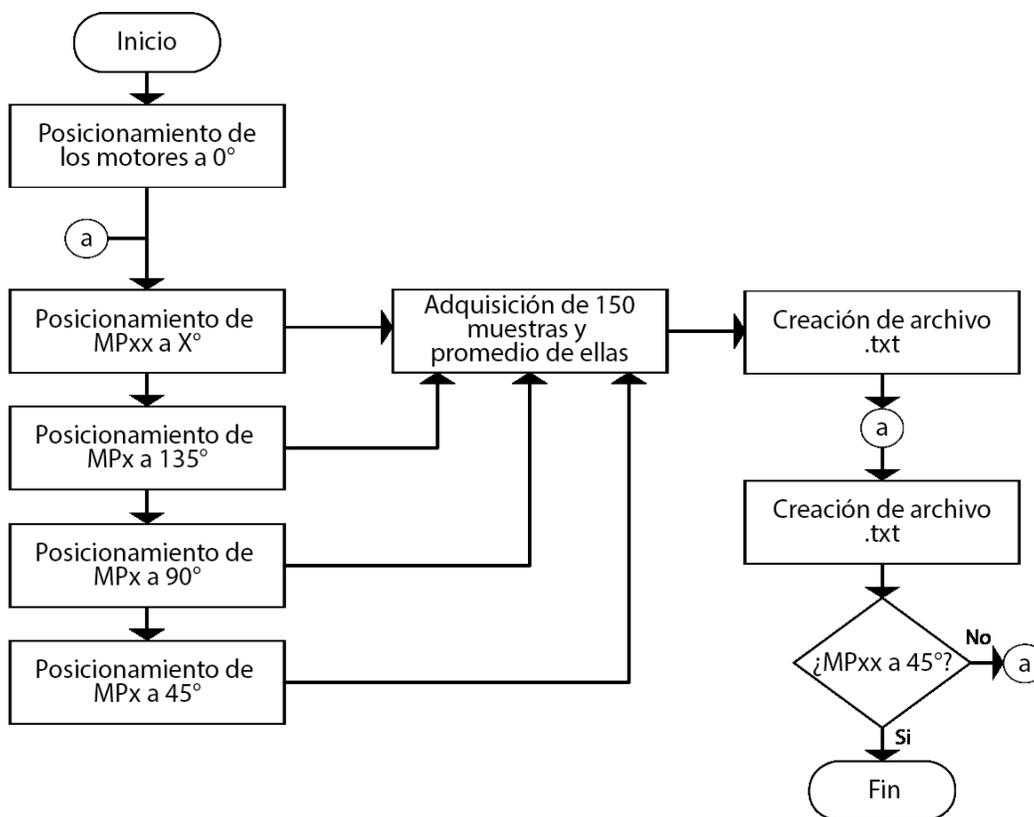


Figura 3.4 Diagrama de flujo para la adquisición y generación entre estados de polarización lineal.

La combinación de los estados de polarización restantes se obtiene de acuerdo con el diagrama de flujo presentado en la Figura 3.4, cuyo principio de funcionamiento es muy similar al presentado en la Figura 3.4, con la única diferencia de que en este caso se deben combinar la posición angular de ambos motores.

Describiendo el diagrama de flujo anterior se tiene como primer paso el posicionamiento de ambos motores a 0° , una vez completado el paso anterior se procede a seleccionar la dirección que corresponde al nanorotor colocado en PSG ($MPxx$) haciéndolo girar hasta un ángulo X , iniciando en 135° ; finalizado el paso anterior, el nanorotor

colocado en PSA (MPx) realizará la secuencia de posicionamiento previamente mencionada, adquiriendo entre cada uno de los posicionamientos 150 muestras, se calcula su promedio respectivo y finalmente se genera un archivo .txt que contiene 4 mediciones de las respectivas combinaciones entre estados realizadas.

Por cada posicionamiento de $MPxx$, el motor MPx debe cumplir la secuencia de posicionamiento (135° , 90° y 45°), generando las combinaciones faltantes de estados de polarización lineal. Una vez realizada dicha secuencia por el motor MPx ambos motores retornan a cero y se procede a realizar el siguiente movimiento de $MPxx$, mientras que MPx inicia su movimiento hasta completar la secuencia; el proceso se repite hasta que $MPxx$ llegue a 45° .

Cada archivo .txt contiene como primer elemento el promedio de las 150 muestras leídas por el fotodetector y la TAD para el estado hh , sin embargo para el cálculo de la matriz de Müeller únicamente un valor de ellos se considera. En la Figura 3.4 se presenta el panel frontal del programa realizado en LabVIEW® para la generación y adquisición de la combinación entre estados de polarización lineal, el cual fue realizado con base en los diagramas de bloques previamente descritos.

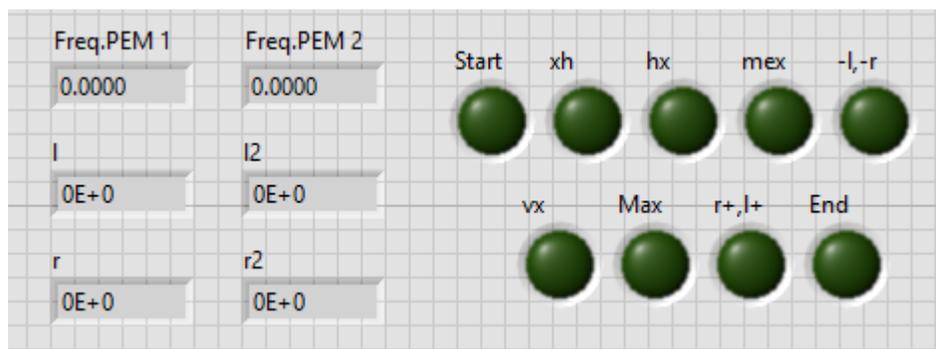


Figura 3.4 Panel frontal del SubVI para la combinación entre estados lineales de polarización.

A su vez, el programa presentado está conformado por una serie de SubVI y a su vez, éste pasa a ser uno de tres SubVI del programa final. Se puede observar que el panel frontal contiene dos tipos de indicadores: numéricos y visuales, estos últimos le permiten al usuario conocer el progreso del programa. Los indicadores numéricos así como los visuales titulados $-l$, $-r$ y $r+$, $l+$ serán explicados en la siguiente sección. Los indicadores visuales

restantes representan la combinación del posicionamiento de los motores para cada combinación de estados lineales.

El nombre de cada indicador visual representa la combinación de estados de polarización que se están generando, siempre de PSG a PSA. Un ejemplo de ello es para los estados hx y xh , en donde se observa que si la letra x se encuentra al inicio, esto indica que el motor colocado en PSG será el que realice la secuencia de posicionamiento, por lo contrario, si se encuentra al final ello indica que el motor colocado en PSA será el encargado de realizar la secuencia. Para los demás estados la nomenclatura es similar, cambiando la letra x por un estado de polarización lineal.

3.4.2. Polarímetro dinámico de Stokes basado en reflexión

La metodología planteada para el sistema basado en transmisión no aplica para el caso en el que el sistema se encuentra en reflexión, principalmente porque al colocar un elemento adicional en el sistema (la muestra en la que se refleja el haz de luz proveniente del PSG), los estados de polarización se verán afectados por ella.

Inicialmente se estuvo trabajando bajo la suposición de que la metodología planteada para un sistema basada en transmisión, no cambiaría de forma drástica para un sistema basado en reflexión. Sin embargo, al realizar experimentalmente la metodología detallada para transmisión al caso de reflexión por medio de un espejo, se observó que no era la forma adecuada para la obtención de las 16 combinaciones que involucran estados de polarización lineal.

En función de lo anterior, se planteó una metodología alterna que sigue el diagrama de flujo de la Figura 3.4, la cual cuenta con ventajas y desventajas. La principal ventaja es la adaptabilidad que presenta para ser aplicada en sistemas de polarización donde se tiene transmisión y reflexión. Además permite observar los efectos de alineación en el sistema. Sus principales desventajas son; el tiempo y la interpretación de resultados.

El SubVI realizado, únicamente tiene como parámetros de entrada la resolución del paso que se desea para ambos motores (en nuestro caso es de 0.02°) y el ángulo de paro para cada uno; en nuestro caso se desea que ambos motores recorran la misma cantidad de pasos equivalentes a 180° .

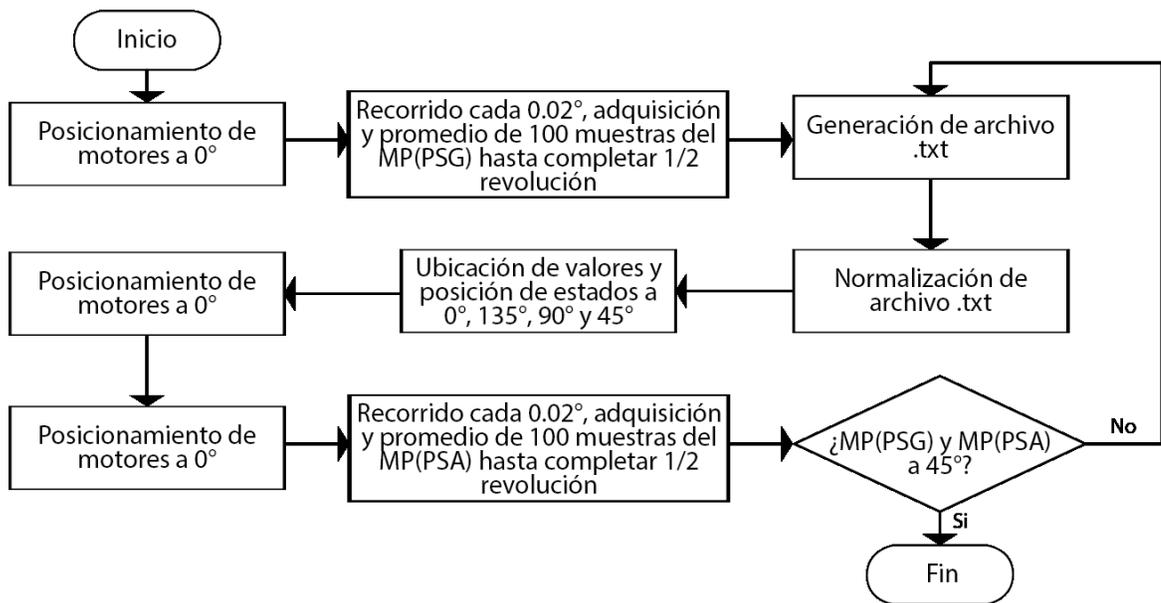


Figura 3.4 Diagrama de flujo para la obtención de estados de polarización lineal de un polarímetro basado en reflexión.

Al terminar de ejecutarse el SubVI se generan 5 archivos .txt, cada uno de ellos es analizado por separado, adicionalmente cada archivo es graficado en Excel para el análisis e interpretación de resultados. El tiempo aproximado para cada corrida es de 30 min, es decir, el programa tarda alrededor de 2 horas con 30 minutos en completarse para la calibración del sistema en reflexión.

3.5. Estados de polarización lineal y circular

Como se mencionó en el capítulo anterior, existen tres tipos de estados de polarización: lineal, circular y elíptica; siendo este último la forma más general. En dicho capítulo también se explicaron las condiciones bajo las cuales se puede generar luz polarizada lineal y circular, así como los diferentes métodos que existen para ello.

Retomando los conceptos presentados, si se desea generar luz polarizada lineal es necesario el uso de polarizadores, mientras que para generar luz polarizada circular se requiere combinar un polarizador lineal a 45° seguido de una lámina retardadora de $\lambda/4$. Lo anterior es válido siempre y cuando se utilicen métodos estáticos, sin embargo, se puede obtener luz polarizada lineal y circular de forma dinámica, combinando polarizadores y moduladores fotoelásticos.

Para el cálculo de la matriz de Müller se requieren de 36 estados de polarización, de los cuales: 16 son resultado de combinaciones de polarización lineal; 16 representan combinaciones de estados de polarización lineal y circular, como se observa en la Tabla 3.5, y las 4 combinaciones restantes son resultado de las combinaciones entre estados de polarización circular.

Tabla 3.5 Combinaciones de estados de polarización lineal y circular.

<i>hr</i>	<i>-r</i>	<i>vr</i>	<i>+r</i>
<i>hl</i>	<i>-l</i>	<i>vl</i>	<i>+l</i>
<i>rh</i>	<i>r-</i>	<i>rv</i>	<i>r+</i>
<i>lh</i>	<i>l-</i>	<i>lv</i>	<i>l+</i>

En esta sección se abordará únicamente la generación de 16 combinaciones de estados de polarización que involucran luz polarizada lineal y circular, utilizando para ello el movimiento de los polarizadores montados sobre los motores a pasos y dos PEM. Los moduladores fotoelásticos utilizados en este trabajo son modelo Pem-100, mostrado en la Figura 3.5, de la firma Hinds™ Instruments y están conformados por tres partes principales: controlador, cabeza electrónica y cabeza óptica.



Figura 3.5 Partes que conforman el Pem-100 de la firma Hinds™ Instruments.²

En el Anexo III se detallan algunas características y consideraciones que se deben tener en cuenta para el correcto manejo de los PEM, así como la descripción de su funcionamiento.

En la Figura 3.5 a) se presenta una gráfica proporcionada por el fabricante donde se muestran los estados de polarización que se pueden obtener cuando la configuración del

² Tomado de [55].

PEM es de $\lambda/4$, mientras que en la Figura 3.5 b) se pueden observar la señal TTL del PEM (azul) y la señal que lee el fotodetector (rosa) para un retardo máximo de $\lambda/4$.

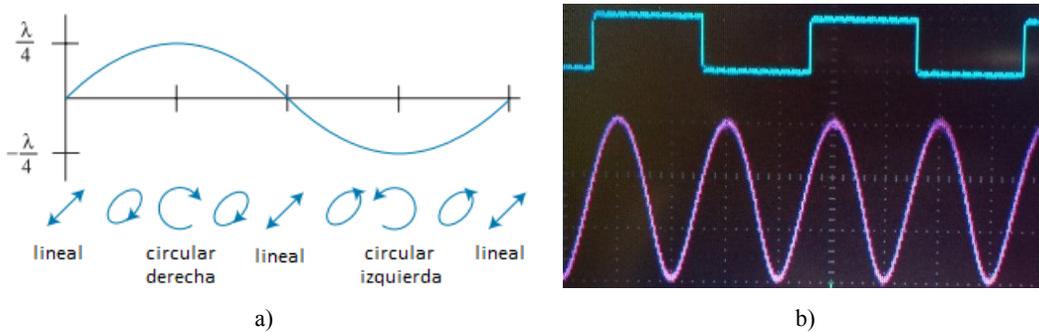


Figura 3.5 Pem-100 configurado como $\lambda/4$: a) ubicación de estados de polarización³, b) señales experimentales del PEM.

Las escalas utilizadas para la Figura 3.5 b) son: 5 μ s en el eje x ; 5 V en el eje y para la señal TTL del PEM y 1 V en el eje y para la señal leída por el fotodetector. En el Anexo III se presenta el arreglo experimental para su obtención.

Como se observa en la Figura 3.5 a), configurando el PEM como lámina de $\lambda/4$ únicamente se pueden obtener estados de polarización circular: derecha (r) e izquierda (l). Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas en el Anexo III, experimentalmente se obtuvo que la localización de dichos estados con respecto al flanco de subida de la señal TTL del PEM1 son los valores presentados en la Tabla 3.5. Dichos valores se mantienen para el sistema en transmisión y reflexión, por lo que únicamente se presenta una metodología.

Tabla 3.5 Localización de estados de polarización del Pem-100 para un retardo máximo de $\lambda/4$.

Estado de polarización	Ángulo de la señal TTL
r	50°
l	224°

A lo largo del desarrollo de este trabajo el Pem-100 será utilizado como lámina de $\lambda/4$, esto con la finalidad de realizar mediciones únicamente en puntos mínimos y máximos de la señal y así reducir el margen de error en ellas.

³ Tomado de [59]

Tabla 3.5 Condiciones experimentales para la obtención de estados de polarización lineal y circular.

Estado	Posición angular	PEM1		Posición angular	PEM2	
	PL ₁	Estado	λ	PL ₂	Estado	λ
<i>-l</i>	135°	Off	----	135°	On	$\lambda/4$
<i>-r</i>	135°	Off	----	135°	On	$\lambda/4$
<i>l+</i>	45°	On	$\lambda/4$	45°	Off	----
<i>r+</i>	45°	On	$\lambda/4$	45°	Off	----
<i>l-</i>	45°	On	$\lambda/4$	45°	Off	----
<i>r-</i>	45°	On	$\lambda/4$	45°	Off	----
<i>+l</i>	45°	Off	----	135°	On	$\lambda/4$
<i>+r</i>	45°	Off	----	135°	On	$\lambda/4$
<i>hr</i>	0°	Off	----	135°	On	$\lambda/4$
<i>hl</i>	0°	Off	----	135°	On	$\lambda/4$
<i>vr</i>	90°	Off	----	135°	On	$\lambda/4$
<i>vl</i>	90°	Off	----	135°	On	$\lambda/4$
<i>rh</i>	45°	On	$\lambda/4$	0°	Off	----
<i>lh</i>	45°	On	$\lambda/4$	0°	Off	----
<i>rv</i>	45°	On	$\lambda/4$	90°	Off	----
<i>lv</i>	45°	On	$\lambda/4$	90°	Off	----

Para llevar a cabo la localización de los estados de polarización circular y lineal se deben de cumplir las condiciones que se presentan en la Tabla 3.5; en donde el valor de λ representa el valor del retardo máximo de fase que se verá reflejado en la cabeza óptica del PEM, en los casos donde no aparece dicho valor (----) significa que el PEM se encuentra en estado de relajación o apagado, es decir, que la cabeza óptica se comporta como si fuera un cristal transparente, no afectando en nada los estados de polarización generados o analizados por cualquiera de los polarizadores.

La programación de cada uno de los PEM para su encendido (On) y apagado (Off) se lleva a cabo utilizando el PEM en modo de control remoto (ver Anexo III), el cual permite realizar una comunicación serial entre la PC y cada uno de los PEM por medio del módulo VISA de LabVIEW®.

La adquisición de los estados de polarización mencionados en la Tabla 3.5 requirió de la medición de las frecuencias de cada PEM (~50 kHz) por medio de la TAD con la mayor precisión y exactitud posibles, debido a que con base en ellas, son calculadas las ubicaciones de cada uno de los estados de polarización. Para ello se hizo uso de un circuito divisor de frecuencia por 100, cuyo diagrama de conexiones, utilizado para lograr cumplir dichas condiciones, es mostrado en la Figura 3.5.

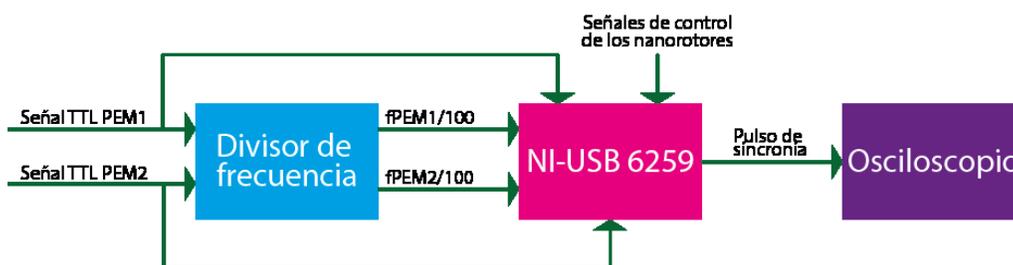


Figura 3.5 Diagrama a bloques para la obtención de estados de polarización lineal y circular.

La metodología seguida en la generación del programa en LAbVIEW® se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 3.5 y es válida para las condiciones en transmisión y en reflexión del sistema; nótese que cada uno de los PEM es controlado de forma independiente.

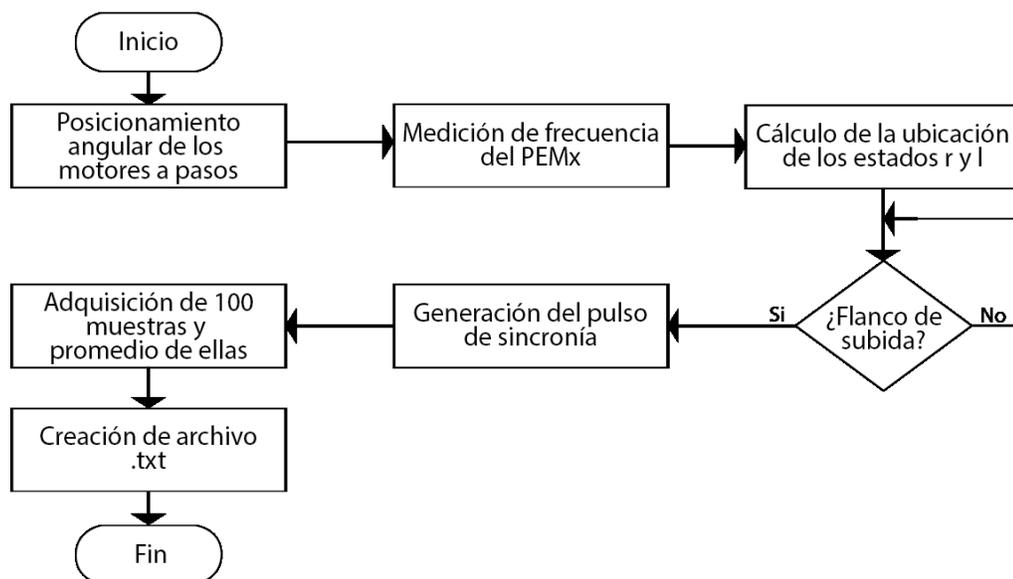


Figura 3.5 Diagrama de flujo del SubVI realizado para la medición de estados de polarización lineal y circular.

Pasando a describir el diagrama de flujo presentado se observa que consiste en un proceso secuencial, donde el primer paso consiste en el posicionamiento de los motores a pasos ubicados en PSG y PSA, de forma que cumplan con las características previamente mencionadas. Una vez posicionados ambos motores, se procede a medir la frecuencia del PEM previamente seleccionado; teniendo esta medición se calcula la ubicación en tiempo de cada estado de polarización circular, sin embargo, el programa debe esperar a detectar un flanco de subida de la señal TTL del PEM en cuestión para la generación del pulso de

sincronía en la posición del estado deseado y finalmente adquirir 100 muestras en la misma posición. El proceso se repite para la medición de cada combinación presentada en la Tabla 3.5, variando las condiciones según ésta.

El pulso de sincronía generado por la TAD tiene un desfase en tiempo de 700 ns respecto a cada una de las transiciones positivas de la señal TTL de los PEM. Este tiempo es considerado en cada uno de los programas para la medición de los estados de polarización.

Estrictamente hablando, la generación del pulso de sincronía descrita en la metodología puede ser omitida, debido a que su función consiste en permitir la visualización de los estados de polarización por medio de un osciloscopio, sin embargo, a lo largo de este trabajo se decidió no hacerlo, ya que nos permitió observar con mayor detalle el comportamiento de los PEM al interactuar con una muestra, así como de plantear una metodología alterna para la caracterización de los PEM.

Con la finalidad de aprovechar el posicionamiento de cada uno de los nanorotores, así como hacer el programa escalable y de fácil depuración se realizaron dos SubVI, ambos son mostrados en la Figura 3.5 y en la Figura 3.5, respectivamente. Este último es utilizado también para la obtención de estados circulares, cuya metodología se explicará en la siguiente sección correspondiente a los estados de polarización circulares, al igual que los indicadores numéricos titulados *X.Gap* y *Freq.Difference*.

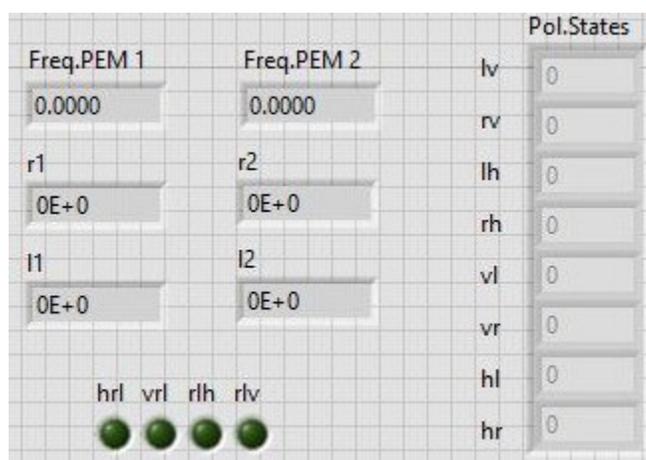


Figura 3.5 Panel frontal del SubVI realizado para la medición de estados que involucran a h , v , r y l .

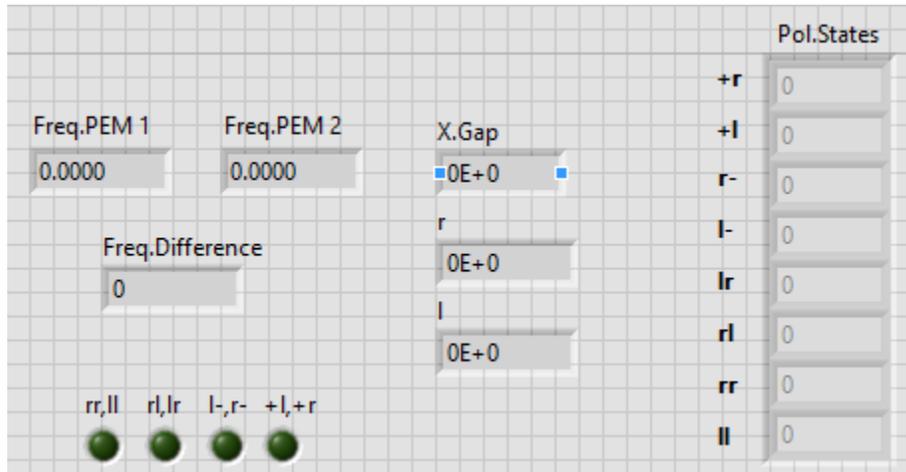


Figura 3.5 Panel frontal del SubVI realizado para la medición de estados que involucran a +, -, r y l.

Los SubVI correspondientes a esta sección contienen dos tipos de indicadores: visuales y numéricos. Los visuales permiten al usuario monitorear el progreso del programa, indicando los estados que se están adquiriendo; mientras que los indicadores numéricos cumplen con diversas funciones: desplegar la frecuencia leída por la TAD para cada uno de los PEM ($Freq.PEM1$, $Freq.PEM2$), indicar el posicionamiento en tiempo para cada uno de los estados circulares de cada PEM ($r1$, $l1$, $r2$, $l2$), y mostrar el promedio de las mediciones realizadas para cada uno de los estados de polarización ($Pol.States$).

3.6. Estados de polarización circular

La metodología llevada a cabo para la obtención de estados de polarización circular fue realizada con el propósito de cumplir las condiciones que se establecen en la

Tabla 3.6, siendo éstas completamente válidas para el sistema en transmisión y reflexión; con la finalidad de obtener las 4 combinaciones restantes que involucran únicamente la combinación de estados de polarización circulares, requiriendo para ello el utilizar los dos PEM sincronamente.

Tabla 3.6 Condiciones experimentales para la obtención de estados de polarización circular.

Estado	Posición angular	PEM1		PEM2	
	PL ₁	Estado	λ	PL ₂	Estado λ
<i>rr</i>	45°	On	$\lambda/4$	135°	On $\lambda/4$
<i>ll</i>	45°	On	$\lambda/4$	135°	On $\lambda/4$
<i>rl</i>	45°	On	$\lambda/4$	135°	On $\lambda/4$
<i>lr</i>	45°	On	$\lambda/4$	135°	On $\lambda/4$

La sincronía de ambos PEM se logra por medio de un circuito detector de fase, el cual fue construido utilizando como circuito principal el integrado MC4044. La función del detector de fase (D.F.) consiste en detectar el momento en el que ambas señales TTL de los PEM se encuentran con una diferencia de fase determinada (para el desarrollo de este trabajo, la diferencia de fase establecida fue de 180°) y cuando dicha condición se cumple el D.F. genera un pulso de sincronía. Las conexiones realizadas para la obtención de los estados mencionados en la Tabla 3.6 se describen en la Figura 3.6 por medio de un diagrama a bloques.

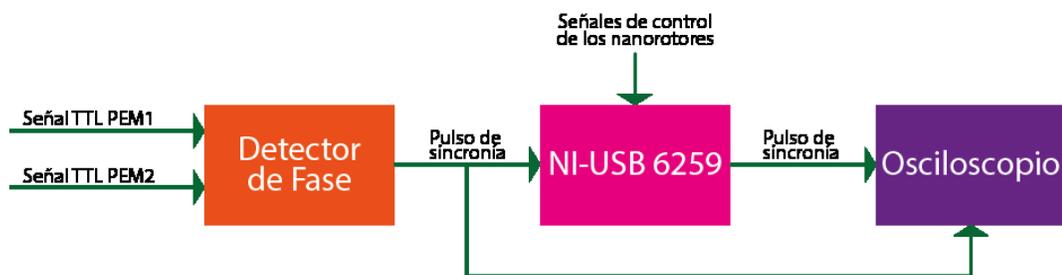


Figura 3.6 Diagrama a bloques para la obtención de estados de polarización circular.

El pulso de sincronía generado por el D.F. nos permite dos cosas: visualizar ambas señales TTL de los PEM en el osciloscopio, como se muestra en la Figura 3.6, así como ser utilizada como señal de control en el programa realizado en LAbVIEW® para adquirir y lograr diferentes desfases entre las señales TTL [47] de los PEM, consiguiendo así la detección de las combinaciones pertinentes de los estados de polarización deseados.

Así mismo el programa realizado genera un segundo pulso de sincronía con ayuda de la TAD, el cual nos permite visualizar en el osciloscopio de forma dinámica cada uno de los desfases programados para las señales TTL así como las formas de onda características que adquiere el fotodetector para cada una de las condiciones establecidas.

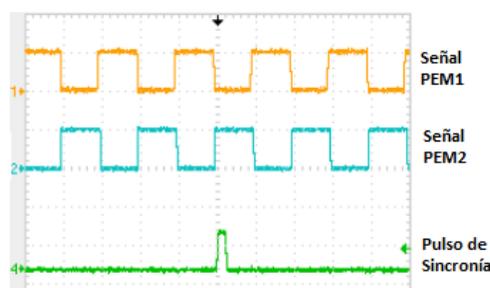


Figura 3.6 Sincronización de señales TTL de los PEM por medio del detector de fase.

En la Tabla 3.6 se presentan los ángulos de desfase que deben existir entre las señales TTL para obtener todas las combinaciones posibles entre los estados de polarización circular bajo las condiciones previamente señaladas. Los valores presentados no son únicos, en el trabajo [47] se detallan diferentes desfases entre señales TTL así como retardos máximos del PEM para obtener diversas combinaciones entre ellos.

Tabla 3.6 Relación entre el desfase de señales TTL del PEM y estados de polarización obtenidos.

Ángulo entre señales TTL	Combinación de estados obtenidos
0°	<i>ll</i>
	<i>rr</i>
180°	<i>rl</i>
	<i>lr</i>

La lógica que sigue el programa realizado en LabVIEW® sigue la lógica que se enuncia en el diagrama de flujo de la Figura 3.6. Es importante hacer notar que los flancos de subida de las señales TTL de los PEM son utilizados como señales de control para el correcto posicionamiento en tiempo, junto con el pulso de sincronía del D.F., lo que tiene una repercusión directa en el momento en que se lleva a cabo la adquisición de muestras.

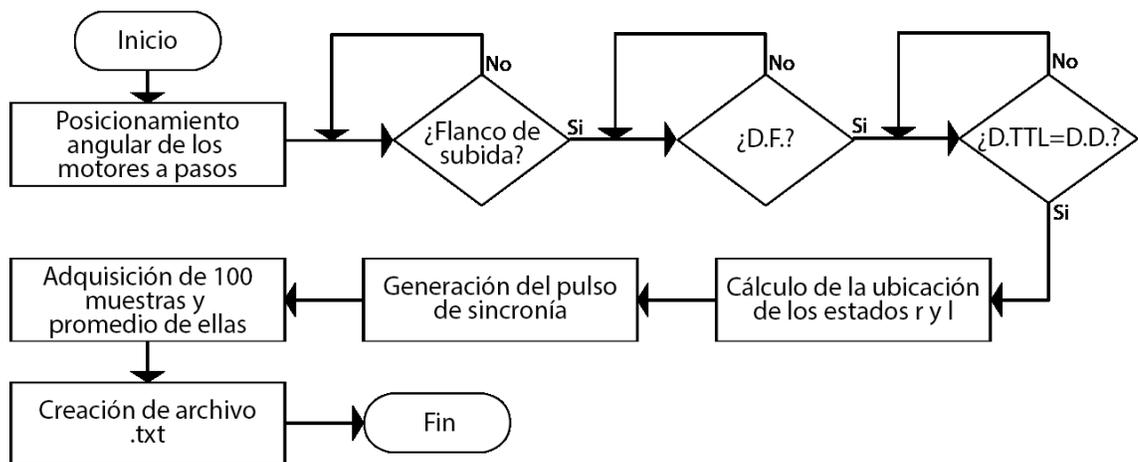


Figura 3.6 Diagrama de flujo para la obtención de la combinación de estados de polarización circular.

El cálculo de la ubicación de los estados r y l , se realizan tomando como referencia la frecuencia del PEM1 debido a que ésta siempre es mayor que la del PEM2. En esta parte del programa únicamente se adquieren 50 muestras debido a que la TAD ejecuta una serie de procesos en paralelo incluyendo la adquisición de muestras, lo que ocasiona que el tiempo de ejecución sea proporcional al número de muestras que se deseen, es decir, entre mayor número de muestras se adquieran mayor tiempo tarda en ejecutarse el programa.

3.7. Programa Final

Cada uno de los SubVI detallados en las secciones previas bajo la condición en la que se encuentre el polarímetro (transmisión o reflexión) se integró en un programa general cuya interfaz se presenta en la Figura 3.7 y aunque en apariencia contienen los mismos elementos, los SubVI que los conforman difieren.

Como se observa, la interfaz fue pensada en cumplir dos funciones principales: ser amigable e informar al usuario final de forma general de los elementos que conforman el polarímetro; más no tiene opciones para que el usuario pueda realizar modificaciones a ningún parámetro de forma directa.

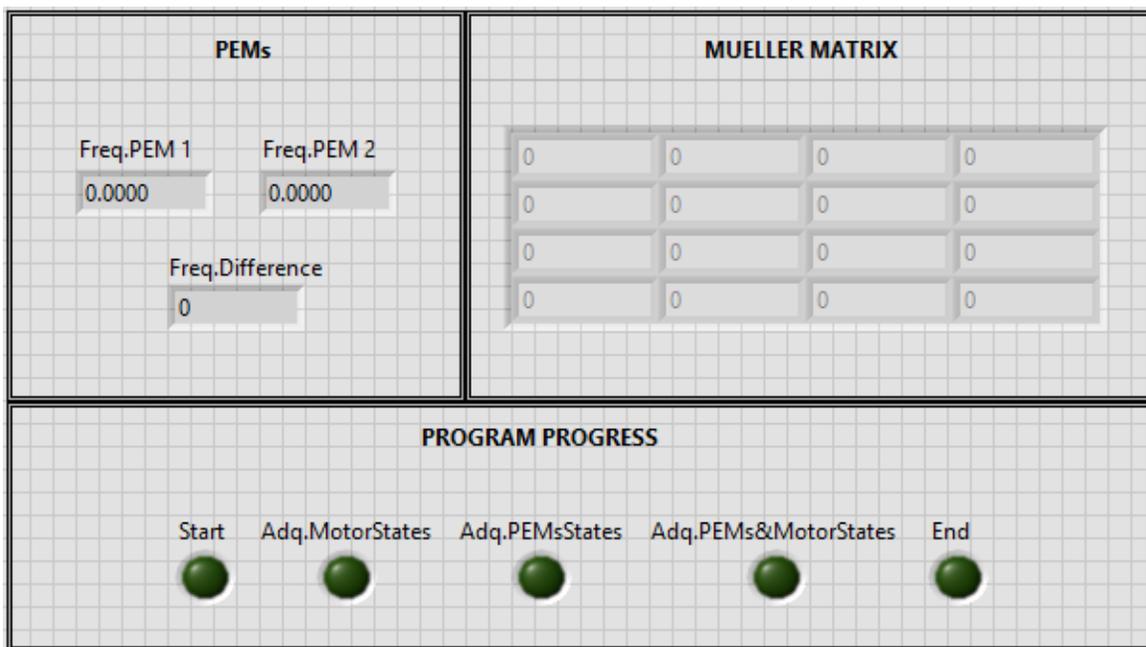


Figura 3.7 Panel frontal del programa final para la obtención de la matriz de Müller.

Cada una de las secciones se enuncia con mayor detalle a continuación:

- *PEM*: aporta información acerca de la evolución de las frecuencias de los PEM y se actualiza conforme se realiza algún proceso que involucre a los PEM, al igual que el indicador numérico que presenta la diferencia de frecuencia entre ellos.
- *PROGRAM PROGRESS*: permite al usuario dar seguimiento de la ejecución del programa por medio de indicadores visuales que indican los elementos físicos que están en uso en ese momento.

- *MUELLER MATRIX*: permite visualizar la matriz de Müller de la muestra colocada en el sistema; el SubVI encargado de ello genera un archivo .txt con ésta, de forma que el usuario puede disponer de dicha información para hacer uso de ella después.

3.8. Conclusiones

En este capítulo se detalló la metodología implementada tanto para la obtención de las combinaciones entre estados de polarización como para la construcción de los arreglos ópticos, basándose para ello en lo establecido por la literatura, así como por trabajos presentados anteriormente en la División.

Cada uno de los diagramas de flujo presentados sigue la lógica de su respectivo programa realizado en LabVIEW®, para su correcto funcionamiento fue necesario correr cada uno por separado y asegurar que cumplieran con su propósito.

El tiempo de ejecución al utilizar los PEM en su mayoría es mucho menor en comparación con el programa que realiza las secuencias de movimiento de los motores a pasos, sin embargo, ambos son complementarios.

La TAD fue utilizada como centro de control junto con la PC para llevar a cabo el control de cada uno de los elementos que conforma el polarímetro.

La construcción de un circuito D.F. permite la sincronización de los PEM y con ayuda de la TAD se pueden obtener mediciones precisas de estados de polarización circular y lineal de acuerdo con la configuración del PEM y, con ayuda del protocolo de comunicación RS232 se pueden modificar los parámetros de éstos.

CAPÍTULO IV

Resultados

El presente capítulo tiene como finalidad dar a conocer las matrices de Müller obtenidas experimentalmente de cada uno de los elementos utilizados como muestra, configurando el polarímetro en transmisión y en reflexión, así mismo se proporcionan mediciones realizadas para su respectiva evaluación.

4.1. Aspectos Generales

Los resultados reportados en las secciones siguientes fueron obtenidos bajo las mismas condiciones de trabajo, por lo que para su reproducción se deben considerar, algunas de éstas son:

- **Alineación.-** En todo sistema óptico la obtención de buenos resultados depende en su mayor parte de ésta; el trabajo presentado no es la excepción, en el desarrollo de éste nos percatamos de que pequeñas variaciones en alineación representan cambios significativos en las mediciones realizadas. La alineación depende también de la calidad del montaje de los componentes ópticos en los soportes utilizados en el arreglo experimental.
- **Temperatura ambiental.-** El lugar donde se llevaron a cabo los experimentos no cuenta con un regulador de temperatura ambiental, ésta siempre se mantuvo variable oscilando entre 20°C y 25°C afectando directamente a la diferencia de frecuencia entre los PEM.
- **Fuente de luz del sistema.-** Como regla general, el láser utilizado en el sistema se dejó precalentar 30 minutos antes de realizar los experimentos

pertinentes, ello con la finalidad de que su amplitud lograra mantenerse estable.

Las muestras utilizadas para validar el sistema fueron seleccionadas en concordancia a lo presentado en la literatura. En el caso del polarímetro en transmisión el tipo de muestras es amplio, siendo los más comunes polarizadores y láminas retardadoras, cuyos ejes de transmisión se colocan en ángulos específicos presentando su respectiva matriz de Müller.

Por otra parte, al buscar en la literatura muestras que puedan validar el funcionamiento de un polarímetro basado en reflexión el número de opciones se ve notoriamente reducido a trabajos que utilizan tejidos biológicos [50] o artículos que trabajan con muestras cuyas características son muy específicas [8] haciendo problemático su reproducción; un grupo reducido de trabajos se enfocan a medir la calidad en diversos tipos de espejos [51], [52] partiendo de la matriz de Müller de un espejo ideal, siendo las condiciones reproducibles por nuestro sistema.

El máximo error de cada una de las matrices presentadas a continuación será el elemento que se aleje notoriamente del valor ideal, así mismo se presentará el error promedio \bar{e} determinado por la siguiente ecuación

$$\bar{e} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 |M_{ij}^{ideal} - M_{ij}| \quad (4.1)$$

donde se realizará el promedio del valor absoluto de la diferencia elemento a elemento de los valores de la matriz de Müller ideal (M_{ij}^{ideal}) y los valores de esta obtenidos experimentalmente (M_{ij}).

4.2. Polarímetro dinámico de Stokes basado en transmisión

El arreglo experimental utilizado del polarímetro dinámico de Stokes, basado en transmisión, se muestra en la Figura 4.2. Este arreglo óptico cumple con las características de alineación mencionadas en el Capítulo II para cada elemento que lo conforma.

Las muestras seleccionadas para corroborar su funcionamiento fueron un polarizador lineal y una lámina retardadora de $\lambda/2$ de la firma Thorlabs® modelo WPH10M-780, ambos se muestran en la Figura 4.2.



Figura 4.2 Arreglo físico del polarímetro dinámico de Stokes basado en transmisión.

Nótese que el polarizador lineal se encuentra montado sobre una base giratoria graduada (MP + Polarizador) facilitando posicionar su eje de transmisión al ángulo que se desee; mientras que el eje rápido de la lámina retardadora viene posicionado de fábrica y es señalado con dos líneas blancas en la base en la que viene montada.

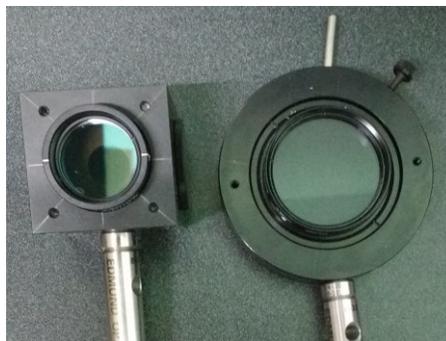


Figura 4.2 Muestras caracterizadas: lámina de $\lambda/2$ y polarizador lineal.

En el caso de la lámina retardadora al no contar con un soporte graduado para posicionar en un ángulo específico su eje rápido, éste fue encontrado experimentalmente, utilizando como referencia líneas dibujadas en el soporte donde se montó la lámina, como se observa en la Figura 4.2 y corroborando los resultados con los presentados en la teoría.

4.2.1. Aire

La primera prueba que se realizó para calibrar el sistema es, no colocar una muestra (o se utiliza como muestra, el aire), con la intención de observar únicamente el comportamiento de los polarizadores lineales y poder caracterizar los motores a pasos.

Consultando la literatura, la matriz de Müeller del aire está caracterizada por tener unos en su diagonal principal como se aprecia en la Ec. 4.2.

$$MM_{Aire} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Utilizando la metodología previamente descrita, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 4.2, su respectivo error promedio, así como los elementos de la matriz que se alejan del valor teórico y que, por ende presentan mayor error en el cálculo de ésta.

Tabla 4.2 Matrices de Müeller obtenidas experimentalmente del sistema sin muestra.

Matriz de Müeller experimental	Error promedio (\bar{e})	Elementos que presentan mayor error
$\begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0342 & -0.0286 & -0.0041 \\ -0.0344 & 0.9936 & 0.0640 & -0.0002 \\ 0.0965 & -0.0673 & 1.0326 & -0.0035 \\ -0.0050 & 0.0001 & -0.0011 & 0.9902 \end{bmatrix}$	0.0242	
$\begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0203 & -0.0407 & -0.0032 \\ -0.0204 & 0.9936 & 0.0677 & -0.0007 \\ 0.0819 & -0.0673 & 1.0165 & -0.0009 \\ -0.0013 & 0.0009 & -0.0052 & 0.9947 \end{bmatrix}$	0.0212	m_{13} m_{23} m_{32}
$\begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0075 & -0.0468 & -0.0040 \\ -0.0076 & 0.9937 & 0.0644 & 0.0004 \\ 0.0679 & -0.0669 & 1.0043 & 0.0031 \\ 0.0018 & 0.0054 & 0.0003 & 0.9918 \end{bmatrix}$	0.0184	

El error máximo que se presentó en el cálculo de la matriz de Müeller del polarímetro en transmisión sin muestra fue de 2.42 %, tomando en cuenta los datos de la Tabla 4.2. Se observa de igual forma que los elementos que introducen mayor error en el cálculo de ésta, involucran la combinación de estados de polarización lineal. Esto lo atribuimos al error de posicionamiento físico de los polarizadores.

Basándonos en la Ec. 2.41, cuando una muestra presenta variaciones en la diagonal de la matriz de Müeller esto indica que posee características de absorción isotrópica.

4.2.2. Polarizador a 0°

Con la intención de observar el comportamiento del polarímetro en transmisión al caracterizar diferentes muestras se colocó un polarizador lineal colocando su eje de

transmisión a 0°. En base a la Ec. 2.34 la matriz de Müeller del polarizador bajo dicha condición será

$$MM_{Pol,0^\circ} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Las matrices de Müeller obtenidas experimentalmente al realizar tres pruebas seguidas se presentan en la Tabla 4.2 (omitiendo la constante 0.5 para fines comparativos). Se hace notar que, a pesar de que el polarizador utilizado como muestra se encontraba montado en un soporte graduado, su eje de transmisión no coincidía con las marcas de éste. Por lo que, para encontrarlo, se hizo uso de la ley de Malus y de los polarizadores montados en los nanorotores de PSG y PSA.

Tabla 4.2 Matrices de Müeller experimentales de un polarizador lineal a 0°.

Matriz de Müeller experimental	Error promedio (\bar{e})	Elementos que presentan mayor error
$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.9778 & 0.0502 & 0.0032 \\ 0.9776 & 0.9765 & 0.0501 & 0.0032 \\ -0.0628 & -0.0628 & -0.0068 & -0.0004 \\ 0.0042 & 0.0042 & 0.0001 & 0.0036 \end{bmatrix}$	0.0200	m_{13} m_{23} m_{31} m_{32}
$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.9765 & 0.1050 & 0.0014 \\ 0.9766 & 0.9753 & 0.1048 & 0.0014 \\ -0.0076 & -0.0076 & -0.0020 & -0.0003 \\ 0.0016 & 0.0017 & 0.0015 & 0.0206 \end{bmatrix}$	0.0204	m_{13} m_{22} m_{23}
$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.9765 & 0.0959 & 0.0002 \\ 0.9765 & 0.9752 & 0.0957 & 0.0001 \\ -0.0133 & -0.0133 & -0.0028 & 0.0005 \\ -0.0003 & -0.0002 & 0.0021 & 0.0079 \end{bmatrix}$	0.0190	m_{13} m_{23} m_{33}

El error máximo que el sistema presentó en el cálculo de la matriz de Müeller al caracterizar muestras con características de absorción isotrópica y dicroísmo lineal (que son los elementos de la matriz que se ven afectados al utilizar como muestra un polarizador a 0°, de acuerdo con la Ec. 2.41) fue de 2.04 %.

Así mismo, se observa que las tres matrices obtenidas experimentalmente comparten elementos que involucran una vez más combinaciones entre estados de

polarización lineal, los cuales atribuimos al error por posicionamiento física de los ejes de transmisión en los polarizadores colocados en PSG, PSA y el utilizado como muestra.

4.2.3. Polarizador a 45°

Al girar el eje de transmisión del polarizador utilizado como muestra en el punto anterior de tal forma que este se encuentre a 45° y sustituyendo dicho valor en la Ec. 2.34 entonces la matriz de Müeller que representa dicho cambio está representado por la Ec. 4.4.

$$MM_{Pol.45^\circ} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Los cambios en los elementos m_{11} , m_{13} , m_{31} y m_{33} (Ec. 2.41), representan susceptibilidad de la muestra a propiedades de absorción isotrópica y dicroísmo lineal. Las matrices de Müeller calculadas experimentalmente se muestran en la Tabla 4.2, para fines comparativos se excluye la constante de 0.5 en ellas.

Tabla 4.2 Matrices de Müeller experimentales de un polarizador lineal a 45°.

Matriz de Müeller experimental	Error promedio (\bar{e})	Elementos que presentan mayor error
$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.2935 & 0.9275 & 0.0047 \\ 0.3479 & 0.1029 & 0.3345 & 0.0018 \\ 1.0294 & 0.3145 & 0.9691 & 0.0004 \\ 0.0075 & 0.0021 & 0.0073 & -0.0110 \end{bmatrix}$	0.0975	
$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.2982 & 0.9138 & 0.0048 \\ 0.3493 & 0.1056 & 0.3300 & 0.0002 \\ 1.0222 & 0.3104 & 0.9422 & 0.0054 \\ 0.0060 & 0.0006 & 0.0046 & -0.0054 \end{bmatrix}$	0.0992	m_{12} m_{21} m_{23} m_{32}
$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0.3034 & 0.8970 & 0.0062 \\ 0.3522 & 0.1102 & 0.3271 & 0.0018 \\ 1.0112 & 0.3119 & 0.9163 & 0.0043 \\ 0.0080 & 0.0009 & 0.0068 & -0.0199 \end{bmatrix}$	0.1032	

El error máximo obtenido en este caso es de 10.32 %, siendo un margen de error considerable en comparación del error presentado en pruebas anteriores sin embargo a diferencia de ellas los elementos m_{21} , m_{23} y m_{32} quedan muy alejados del valor ideal, aportando a que el margen de error sea considerablemente alto.

Lo anterior puede ser consecuencia, en gran medida, por haber colocado erróneamente el eje de transmisión del polarizador utilizado como muestra en el ángulo deseado, recordando que éste fue identificado de forma experimental.

4.2.4. Polarizador a 90°

Al tener como condición inicial el eje de transmisión del polarizador utilizado como muestra a 90°, su matriz de Müeller es similar al caso en donde este se posiciona a 0° representada en la Ec. 4.2 con signos diferentes, como se observa en la Ec. 4.5.

$$MM_{Pol.90^\circ} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

En la Tabla 4.2 se enuncian las matrices de Müeller resultantes al caracterizar la muestra, una vez más se omite la constante de 0.5 a fin de poder realizar una rápida comparativa de los resultados obtenidos.

Tabla 4.2 Matrices de Müeller experimentales de un polarizador lineal a 90°.

Matriz de Müeller experimental	Error promedio (\bar{e})	Elementos que presentan mayor error
$\begin{bmatrix} 1.0000 & -0.9759 & -0.0828 & -0.0018 \\ -0.9767 & 0.9743 & 0.0827 & 0.0015 \\ 0.0764 & -0.0763 & -0.0066 & 0.0015 \\ 0.0006 & -0.0006 & 0.0001 & -0.0004 \end{bmatrix}$	0.0253	
$\begin{bmatrix} 1.0000 & -0.9760 & -0.1258 & -0.0008 \\ -0.9767 & 0.9743 & 0.1258 & 0.0012 \\ 0.0577 & -0.0574 & -0.0104 & 0.0004 \\ -0.0018 & 0.0008 & -0.0143 & 0.0047 \end{bmatrix}$	0.0296	m_{13} m_{23} m_{31} m_{32}
$\begin{bmatrix} 1.0000 & -0.9782 & -0.0540 & 0.0014 \\ -0.9786 & 0.9767 & 0.0536 & -0.0012 \\ 0.0727 & -0.0725 & -0.0242 & -0.0004 \\ -0.0010 & 0.0015 & -0.0042 & 0.0040 \end{bmatrix}$	0.0223	

En este caso, el error máximo obtenido es de 2.96 %, es decir existe un margen de error de 0.92% con respecto a los resultados obtenidos al caracterizar el mismo polarizador colocando su eje de transmisión a 0°.

4.2.5. Lámina retardadora de $\lambda/2$

Idealmente la matriz de Müeller que caracteriza una lámina retardadora de $\lambda/2$ es calculada en función de la Ec. 2.36, de forma que al sustituir los valores de $\phi = 180^\circ$ y $\theta = 0^\circ$, se esperaría obtener experimentalmente una matriz semejante a

$$MM_{L.R.0.5} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

sin embargo, para que esto suceda se deben considerar factores de propios de la lámina a caracterizar, ya que de no hacerlo los resultados reflejados al realizar su caracterización estos pueden diferir notablemente de lo esperado.

En nuestro caso las matrices de Müeller experimentales enunciadas en la Tabla 4.2 son comparadas respecto a la matriz de la Ec. 4.7; esto se debe a que la lámina utilizada⁴ como muestra funciona como una lámina retardadora de $\lambda/2$, es decir un retardo de 180° , siempre y cuando el haz de luz que incide en ella tiene un $\lambda = 780 \text{ nm}$ ⁵, sin embargo la fuente de luz utilizada en este trabajo tiene un $\lambda = 633 \text{ nm}$ por lo que el retardo de la lámina de acuerdo a dicha longitud de onda es de $\phi = 224.7^\circ$.

$$MM_{L.R.0.5} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.7124 & -0.7017 \\ 0 & 0 & 0.7017 & -0.7124 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Se decidió únicamente realizar mediciones de la lámina con su eje rápido en 0° por la situación descrita anteriormente y por no contar con un soporte donde se pudiese tener la certeza de colocar el eje rápido a un ángulo diferente, pudiendo acarrear errores adicionales a las mediciones.

El error máximo obtenido, al caracterizar una lámina retardadora bajo las condiciones descritas, fue de 8.47 %; es importante notar que los elementos m_{33} y m_{44}

⁴ Modelo WPH10M-780.

⁵ De acuerdo a los datos proporcionados por el fabricante en la página web: www.thorlabs.com.

presentan mayor simetría entre ellos aunque quedan muy por debajo del valor ideal; mientras que el elemento m_{43} es el que introduce mayor error en las mediciones.

Tabla 4.2 Matrices de Müller experimentales de una lámina retardadora de $\lambda/2$.

Matriz de Müller experimental	Error promedio (\bar{e})	Elemento (s) que presentan mayor error
$\begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0832 & 0.0005 & -0.0018 \\ -0.0904 & 0.9793 & -0.0179 & 0.0015 \\ -0.0678 & -0.0779 & -0.5692 & 0.7920 \\ -0.0376 & -0.1353 & -0.4458 & -0.5928 \end{bmatrix}$	0.0779	
$\begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0857 & -0.0033 & -0.0456 \\ -0.0867 & 0.9815 & 0.0290 & 0.0811 \\ 0.0745 & -0.0278 & -0.5762 & 0.7753 \\ -0.0423 & -0.1034 & -0.4050 & -0.5978 \end{bmatrix}$	0.0762	m_{33} m_{43} m_{44}
$\begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0967 & -0.0001 & -0.0491 \\ -0.1077 & 0.9764 & -0.0431 & -0.0414 \\ -0.0631 & -0.1113 & -0.5761 & 0.7993 \\ -0.0406 & -0.1499 & -0.4260 & -0.5935 \end{bmatrix}$	0.0847	

En la realización de estas pruebas experimentales se observó que el sistema es extremadamente sensible en cuanto a la posición del eje rápido de la lámina, por lo que un pequeño cambio en ésta, se veía reflejado de forma notoria en la matriz final.

4.3. Polarímetro dinámico de Stokes basado en reflexión

La realización física del montaje experimental que conforma al polarímetro dinámico de Stokes basado en reflexión se llevó a cabo utilizando la muestra como referencia para determinar el ángulo de reflexión deseado; por ello fue necesario montar el PSG sobre una superficie de aluminio uniforme, permitiéndonos asegurar que el posicionamiento de cada elemento que lo conforma fuera el correcto.

Dicho movimiento se llevó a cabo de forma manual tanto la posición de la muestra como la ubicación de PSG. Así mismo, se tuvieron que realinear los elementos que conforman el PSG en función al reflejo del espejo de primera superficie, el cual fue utilizado a lo largo del presente como muestra de referencia para evaluar la calidad de las mediciones realizadas por el polarímetro basado en reflexión.

El espejo de primera superficie utilizado se muestra en la Figura 4.3, éste fue montado sobre un soporte de aluminio cuidando que el espejo se encontrara alineado con ésta y perpendicular con la mesa holográfica.



Figura 4.3 Espejo de primera superficie.

Se llevaron a cabo dos montajes experimentales variando el ángulo de reflexión y las muestras utilizadas; en ambos el espejo de primera superficie fue utilizado como referencia para calibrar el sistema.

Al introducir un elemento “externo” en el sistema; la respuesta reflejada en intensidad y la respuesta de éste con respecto a las combinaciones de estados de polarización que le sean aplicados; dependerá de las características propias de dicho elemento.

En este caso, también la alineación se vuelve más complicada, al presentarse tanto: limitaciones físicas, para asegurar la correcta alineación; como el efecto que ocasiona en ella el fenómeno de esparcimiento, el cual ocasionará que la intensidad detectada en el fotodetector sea atenuada en mayor o menor cantidad.

En el primer experimento se utilizó un ángulo de reflexión de 30° , como se muestra en la Figura 4.3 a. El arreglo experimental fue utilizado para obtener los resultados presentados de la sección 4.3.1 a la 4.3.3. Es decir, en superficies reflejantes inorgánicas. El segundo arreglo experimental fue colocando un ángulo de 165° , como se observa en la Figura 4.3 b, y fue utilizado para obtener las matrices de Müeller de la superficie de una manzana (sección 4.3.3) y un plátano (sección 4.3.5).

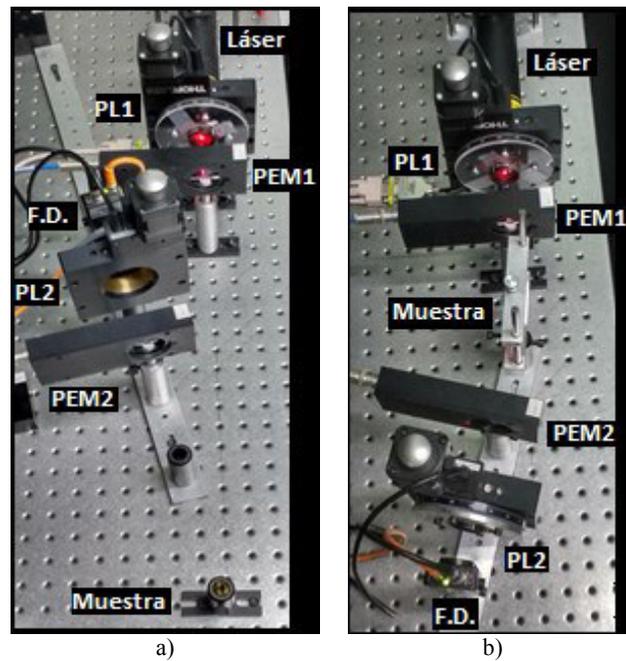


Figura 4.3 Arreglo experimental del polarímetro en reflexión: a) 30° y b) 165°.

Cabe mencionar que el ángulo mínimo de reflexión, en el que se pueden realizar pruebas, es de 30°, esto debido al tamaño que ocupan los elementos que conforman el PSG. En ángulos menores el haz de luz reflejado incide con las paredes de estos, por ello se optó por manejar dicho ángulo como punto de partida.

El proceso para la obtención de la matriz de Müeller de cada muestra que se presenta a continuación se realizó con base en la siguiente metodología:

1. Posicionar los motores a pasos a referencia 0°.
2. Colocar el espejo montado en su soporte como muestra en el arreglo experimental, teniendo en cuenta que al posicionarlo se debe obtener la máxima intensidad del haz de luz reflejado en el centro del fotodetector.
3. Correr el programa descrito en el capítulo anterior.
4. Graficar los archivos obtenidos en el paso anterior, para observar la respuesta en intensidad del espejo con respecto a la rotación del eje de transmisión de los polarizadores.
5. Cálculo de la matriz de Müeller correspondiente.
6. Quitar el espejo de primera superficie y colocar la muestra deseada y repetir el proceso con los datos previamente recabados.

4.3.1. Espejo de primera superficie

La matriz de Müller de una superficie reflejante ideal se trata en la literatura [52] por la Ec. 4.8, la cual es muy similar a la Ec. 4.1, cambiando los signos de los dos últimos elementos de la diagonal principal. Lo anterior se debe a que una superficie perfectamente reflejante se comporta matemáticamente como una lámina retardadora de media onda.

$$MM_{Espejo} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

A modo de corroborar el funcionamiento del polarímetro basado en reflexión se presentan a continuación tres matrices de Müller obtenidas experimentalmente al colocar el espejo como muestra.

Tabla 4.3 Matrices de Müller experimentales utilizando como muestra un espejo.

Prueba	Matriz de Müller	Error promedio (\bar{e})	Elemento(s) que presentan mayor error
P1	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0 & -0.0010 & 0.0179 \\ 0 & 1.0000 & 0 & -0.0119 \\ -0.0013 & 0.0005 & -1.0000 & 0.0050 \\ 0.0067 & 0.0047 & -0.0002 & -0.8758 \end{pmatrix}$	0.0108	m_{14} m_{24} m_{44}
P2	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0 & -0.0021 & 0.0070 \\ 0 & 1.0000 & 0.0005 & 0.0028 \\ -0.0008 & -0.0006 & -1.0000 & -0.0013 \\ 0.0020 & 0.0019 & 0.0072 & -0.9882 \end{pmatrix}$	0.0024	m_{44}
P3	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0 & 0.0012 & 0.0060 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0.0040 \\ 0.0028 & 0.0003 & -1.0000 & -0.0085 \\ 0.0022 & 0.0016 & 0 & -0.9804 \end{pmatrix}$	0.0029	m_{44}

De acuerdo con los resultados de la Tabla 4.3 el error máximo obtenido es de 1.08 %, el cual es un margen de error mucho menor a los obtenidos para el polarímetro basado en transmisión. Con ello se valida el funcionamiento del polarímetro dinámico en reflexión para poder realizar diferentes pruebas con precisión.

Así mismo, los elementos que presentan mayor error en la P1 corresponden a 3 de los 4 elementos de la última columna de la matriz, dos de los cuales involucran

combinaciones entre luz polarizada lineal y circular; mientras que el último elemento depende directamente de luz polarizada circular. El error presentado en el elemento m_{44} se puede atribuir tanto a errores de lectura en la señal modulada del PEM como a características propias de la superficie del espejo.

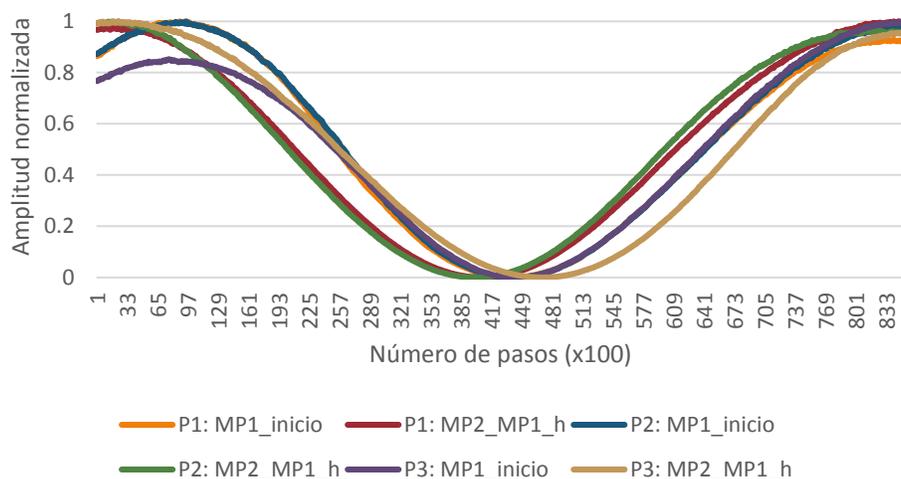


Figura 4.3 Comportamiento en intensidad del polarímetro en reflexión al colocar como muestra un espejo.

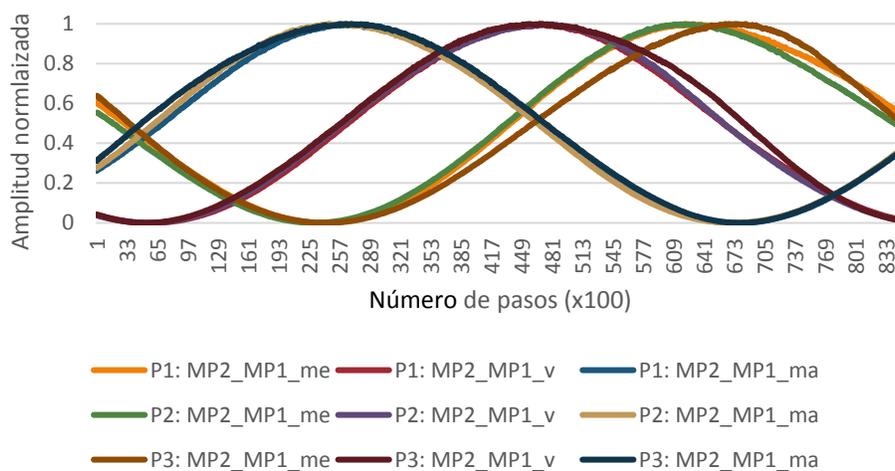


Figura 4.3 Respuesta en amplitud diferentes condiciones de luz polarizada lineal al colocar como muestra un espejo.

Las gráficas que se muestran en la Figura 4.3 y en la Figura 4.3 tienen como objetivo observar el comportamiento en intensidad que presentan las tres pruebas enunciadas en la Tabla 4.3, de acuerdo a la rotación de los polarizadores correspondientes en PSG y PSA con condiciones que involucran luz polarizada lineal; así como determinar si

tanto la respuesta es repetitiva en amplitud presentada y el posicionamiento de los nanorotores es repetitivo.

Las leyendas que se presentan en cada una de las respectivas gráficas se detallan a continuación:

- *MP1_inicio*.- Consiste en girar media revolución el nanorotor colocado en PSG (MP1) mientras que el nanorotor colocado en PSA (MP2) se mantiene estático en la referencia a 0°. Del análisis de esta forma de onda se determina la posición en pasos que corresponden a los estados *h*, - (*me*), *v*, y + (*ma*).
- *MP2_MP1_x*.- Una vez identificados los estados de polarización lineal para el MP1, estos serán utilizados como referencia para obtener las 5 formas de onda restantes. Para ello se posicionará el MP1 en el número de pasos correspondiente al estado *x* (iniciando en *h*) cada estado mientras el MP2 realiza el recorrido de media revolución. Por lo que cuando termine MP2 ambos motores retornan a la posición de referencia y ahora *x* corresponde al número de pasos del estado – y se repite sucesivamente hasta completar los estados mencionados.

En la Tabla 4.3 se enuncian la relación entre números de pasos y estado de polarización correspondiente del nanorotor de referencia (PSG) para cada prueba. Cabe mencionar que cada corrida se llevó a cabo en un día diferente, observando que la ubicación de los estados (en número de pasos) se mantiene cercanas en la mayoría de estos.

Tabla 4.3 Relación entre número de pasos y estados de polarización para el MP1.

Prueba	Estado de polarización lineal	Número de pasos correspondiente
P1	<i>h</i>	87
	-	253
	<i>v</i>	434
	+	641
P2	<i>h</i>	94
	-	260
	<i>v</i>	438
	+	641
P3	<i>h</i>	848
	-	251
	<i>v</i>	440
	+	638

La repetitividad en el posicionamiento correspondiente a cada estado de polarización, dependerá en parte de la intensidad del láser cuando se realicen las mediciones.

4.3.2. Superficie de aluminio

Una vez validado el sistema se procedió a obtener la matriz de Müeller de muestras que se tuvieran al alcance de la mano. Cabe mencionar que llegado a este punto no se puede decir el porcentaje de error que presentará la matriz obtenida experimentalmente como se ha mencionado.

La superficie de aluminio colocada como muestra fue la misma del soporte del espejo. Una vez calculada la matriz de Müeller del espejo se colocó el soporte de éste a una altura mayor, de modo que el haz del láser incidiera en él como se observa en la Figura 4.3.



Figura 4.3 Superficie de aluminio.

En la Tabla 4.3 se muestran las matrices de Müeller correspondientes a un espejo y a la obtenida colocando la superficie de aluminio como muestra. Se hace notar que esta última se comporta como superficie reflejante, en caso de considerarla así su porcentaje de error con respecto a una superficie reflejante ideal sería de 5.44 %; mientras que en la matriz del espejo dicho porcentaje es <1 %.

Al llevar a cabo el presente experimento se aumentó la ganancia del fotodetector a 70 dB; esto debido a que al colocar el soporte como muestra, el haz de luz reflejado en él presentó una considerable atenuación en su intensidad, de modo que el voltaje registrado en el fotodetector era muy pequeño, dificultando las mediciones realizadas.

Tabla 4.3 Matriz de Müeller experimental al colocar una superficie de aluminio como muestra.

Muestra	Matriz de Müeller	Error promedio (\bar{e})
Espejo	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0 & 0.0015 & 0.0084 \\ 0 & 1.0000 & 0.0015 & 0.0019 \\ 0.0014 & 0.0008 & -1.0000 & -0.0024 \\ 0.0032 & 0.0032 & 0.0089 & -0.9882 \end{pmatrix}$	0.0028
Superficie de aluminio	$\begin{pmatrix} 1.0079 & 0.0073 & 0.1743 & 0.0052 \\ -0.0082 & 0.9808 & -0.3409 & -0.0019 \\ 0.1497 & 0.1023 & -0.9799 & -0.0011 \\ -0.0022 & -0.0018 & 0.0014 & -0.9736 \end{pmatrix}$	No aplica

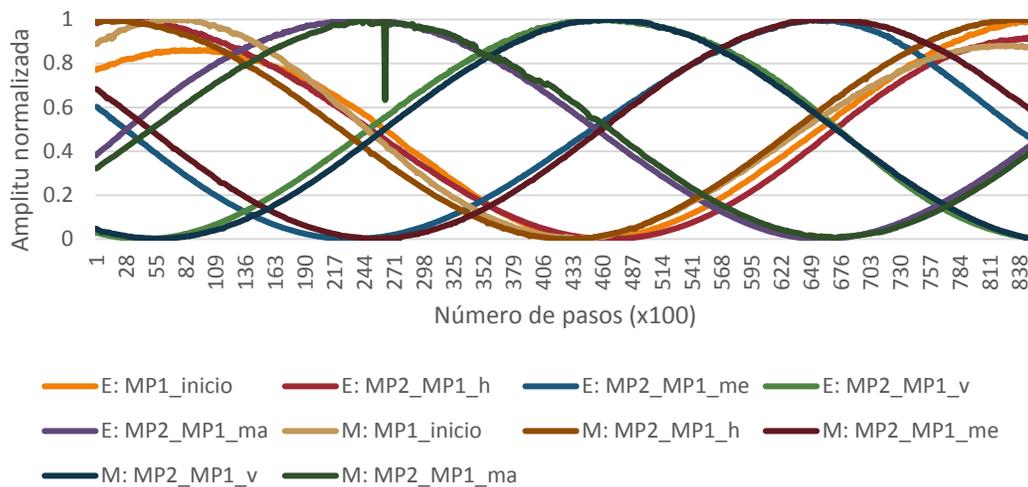


Figura 4.3 Respuesta en amplitud de un espejo (E) y de un soporte de aluminio (M) a luz polarizada lineal.

En la Figura 4.3 se observan las diferentes formas de onda obtenidas al hacer incidir luz polarizada lineal primeramente utilizando como muestra el espejo de primera superficie y, posteriormente el soporte de aluminio; haciendo notar que las respuestas son muy similares entre sí.

4.3.3. Polarizador a 90°

Se decidió colocar como muestra un polarizador lineal posicionando su eje de transmisión a 90°, de forma que el haz incidente no pasara a través de él. Una vez más se presentó atenuación de la intensidad del haz de luz, por lo que la ganancia del fotodetector fue aumentada a 40 dB.

En la Tabla 4.3 se presentan las matrices de Müeller experimentales al colocar como muestra de referencia el espejo de primera superficie y posteriormente el polarizador a 90°. Se observa que el porcentaje de error presentado en la matriz de Müeller correspondiente al espejo es de 0.31 %, manteniéndose por debajo del 1 %.

Por otra parte, se observa que la matriz de Müeller del polarizador es muy semejante a la de un elemento reflejante, observándose cambios notorios además en los elementos: m_{13} , m_{23} y m_{31} .

Tabla 4.3 Matrices de Müeller experimentales al colocar como muestra un polarizador con su eje de transmisión a 90°.

Muestra	Matriz de Müeller	Error promedio ($\bar{\epsilon}$)
Espejo	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0 & 0.0013 & 0.0037 \\ 0 & 1.0000 & -0.0009 & 0.0028 \\ 0.0005 & 0.0001 & -1.0000 & -0.0003 \\ 0.0065 & 0.0018 & 0.0012 & -0.9702 \end{pmatrix}$	0.0031
Polarizador a 90°	$\begin{pmatrix} 0.9644 & -0.0228 & 0.1286 & 0.0008 \\ -0.0119 & 0.9529 & -0.2915 & 0.0910 \\ -0.1615 & 0.0972 & -0.9749 & 0.0136 \\ 0.0260 & 0.0650 & 0.0502 & -0.9463 \end{pmatrix}$	No aplica

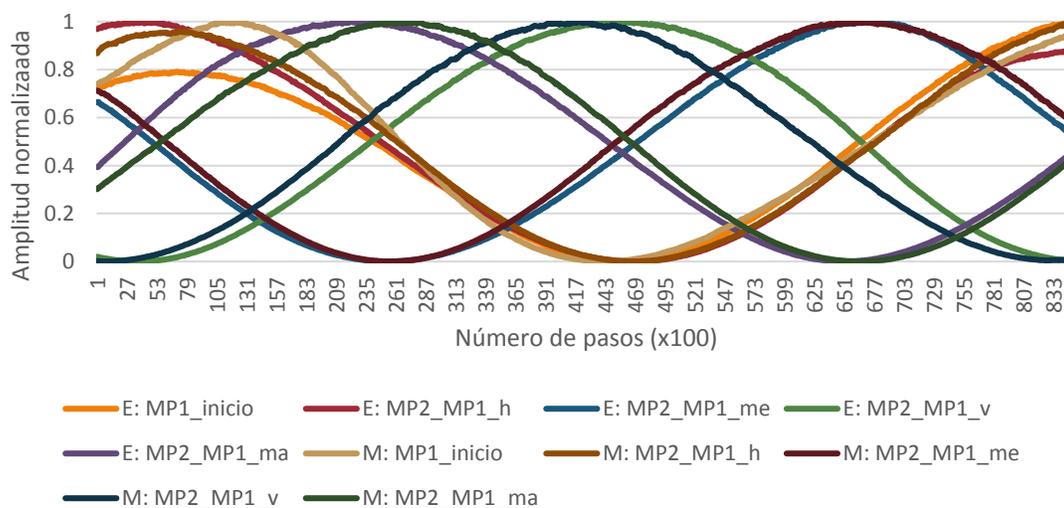


Figura 4.3 Respuesta en amplitud de un espejo (E) y de un polarizador a 90° (M) a luz polarizada lineal.

En la gráfica de la Figura 4.3 se reportan las formas de onda obtenidas para las diferentes combinaciones de luz polarizada lineal de cada una de las muestras.

4.3.4. Superficie de una manzana

Las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo el experimento para obtener la matriz de Müeller de un punto de la superficie de la manzana de enlistan a continuación:

- Se posicionó la manzana de tal forma que la irradiancia leída por el fotodetector fuera la intensidad máxima (~ 5 V) con una ganancia de 70 dB.
- La superficie de la manzana donde incide el haz era un punto semiplano y no se presentaba ningún tipo de deformación ni abolladura visible, en ella.
- La superficie de la manzana, donde incidió el haz de luz, era completamente lisa y de color amarillo uniforme (a la vista).

En las imágenes de la Figura 4.3 se logra observar desde dos puntos de vista el arreglo experimental utilizado.

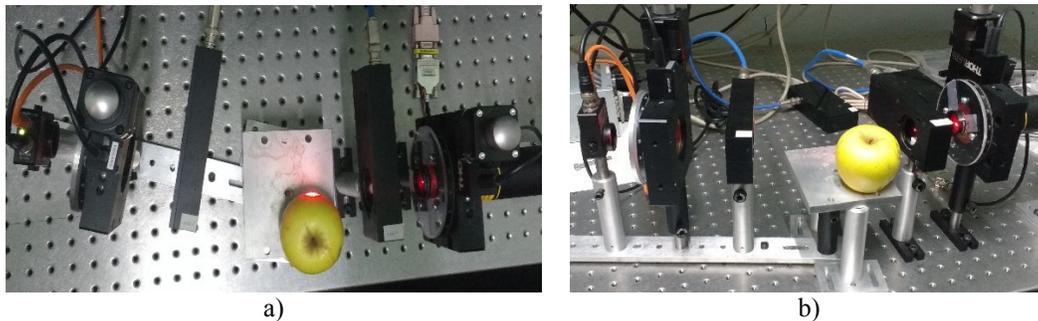


Figura 4.3 Arreglo experimental del polarímetro basado en reflexión al colocar como muestra una manzana: a) vista aérea y b) vista lateral.

En la Tabla 4.3 se presentan las matrices de Müeller respectivas al utilizar como muestra un espejo de primera superficie y una manzana.

Tabla 4.3 Matrices de Müeller experimental al colocar como muestra una manzana.

Muestra	Matriz de Müeller	Error promedio (\bar{e})
Espejo	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0 & -0.0012 & 0.0136 \\ 0 & 1.0000 & 0.0011 & -0.8720 \\ -0.0010 & 0.0002 & -1.0000 & 0.0014 \\ 0 & -0.2444 & -0.2466 & -0.1023 \end{pmatrix}$	0.1425
Superficie de una manzana	$\begin{pmatrix} 0.9912 & -0.0076 & -0.0106 & 0.0012 \\ -0.0391 & 0.9301 & -0.6605 & -0.0020 \\ 0.1022 & 0.3230 & -0.6801 & 0.0003 \\ -0.0020 & 0.0002 & 0.0030 & -0.3438 \end{pmatrix}$	No aplica

En esta ocasión se observa que el error promedio correspondiente a la matriz de Müeller del espejo aumentó a 14.25%, lo cual nos indica que (a reserva de un análisis detallado) en el arreglo experimental de la Figura 4.3 b) se ven afectados los parámetros de luz polarizada lineal, puesto que en estos elementos es donde se presentan mayores errores.

En el caso de la matriz de Müeller correspondiente a la superficie de la manzana se presentan variaciones en los elementos m_{11} , m_{22} , m_{23} , m_{31} , m_{32} , m_{33} y m_{44} ; indicando que tiene mayor susceptibilidad a la luz polarizada lineal y ligeramente a la combinación entre luz polarizada lineal y circular. Algunos parámetros que se pueden añadir son la diatenuación (Ec. 2.38) cuyo valor es 0.0131.

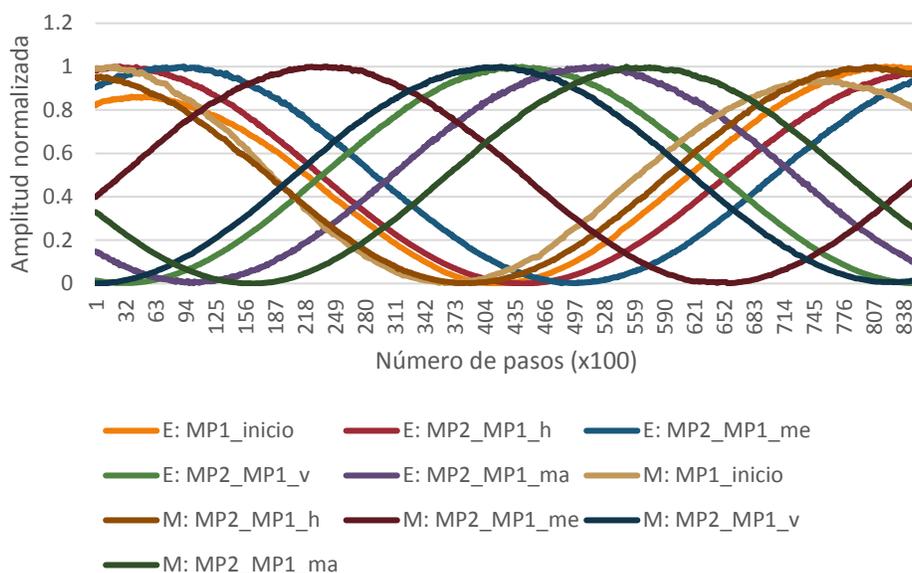


Figura 4.3 Respuesta en amplitud de un espejo (E) y de la superficie de una manzana (M) a luz polarizada lineal.

En la Figura 4.3 se puede observar el comportamiento en amplitud que presentan las muestras utilizadas al hacerles incidir diferentes tipos de luz polarizada. Las formas de onda correspondientes a la muestra presentan un ligero desfase con respecto a las del espejo.

4.3.5. Superficie de un plátano

El experimento relacionado con la obtención de la matriz de Müeller de la superficie de un plátano se basó en el arreglo experimental de la Figura 4.3. Cabe mencionar que el haz incide en una superficie del plátano completamente amarilla a pesar de que la mayor

parte de éste se encontraba oxidada. Al presentarse dispersión, se aumentó la ganancia del fotodetector a 70 dB sin embargo, en este caso el valor máximo obtenido fue ~ 2.75 V.

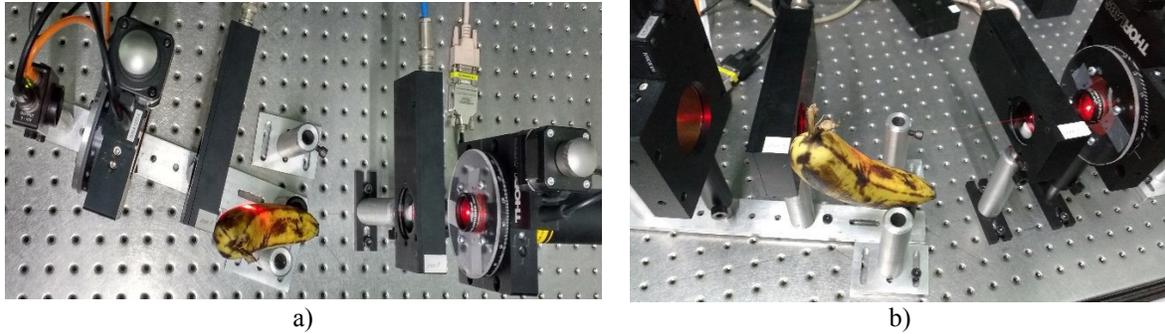


Figura 4.3 Arreglo experimental del polarímetro basado en reflexión al colocar como muestra un plátano: a) vista aérea y b) vista lateral.

Tabla 4.3 Matrices de Müller experimental al colocar como muestra un plátano.

Muestra	Matriz de Müller	Error promedio (\bar{e})
Espejo	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0 & -0.0020 & -0.0078 \\ 0 & 1.0000 & -0.0030 & 0.8603 \\ -0.0007 & 0.0001 & -1.0000 & 0.0025 \\ 0.1246 & -0.0803 & -0.2611 & -0.0913 \end{pmatrix}$	0.1407
Superficie de un plátano	$\begin{pmatrix} 0.9451 & -0.0418 & 0.0025 & -0.0008 \\ -0.0691 & 0.8942 & -0.6369 & 0.0025 \\ -0.1848 & 0.0212 & -0.6108 & 0.0003 \\ -0.0001 & -0.0002 & 0.0030 & -0.1874 \end{pmatrix}$	No aplica

El margen de error promedio en la matriz de Müller para el espejo es de 14.07 %, similar al presentado en el apartado anterior. En cuanto a la matriz de Müller de la superficie de un plátano presentada en la Tabla 4.3, se observan variaciones similares que en los elementos mencionados en el experimento realizado con la manzana (m_{11} , m_{22} , m_{23} , m_{31} , m_{32} , y m_{44}).

El parámetro referente a la diatenuación (Ec. 2.38), cuyo valor respectivo es de 0.0444.

Las formas de onda respectivas de cada muestra utilizada se presentan en la Figura 4.3, se observa además que las correspondientes a la muestra tienen mayores variaciones en amplitud.

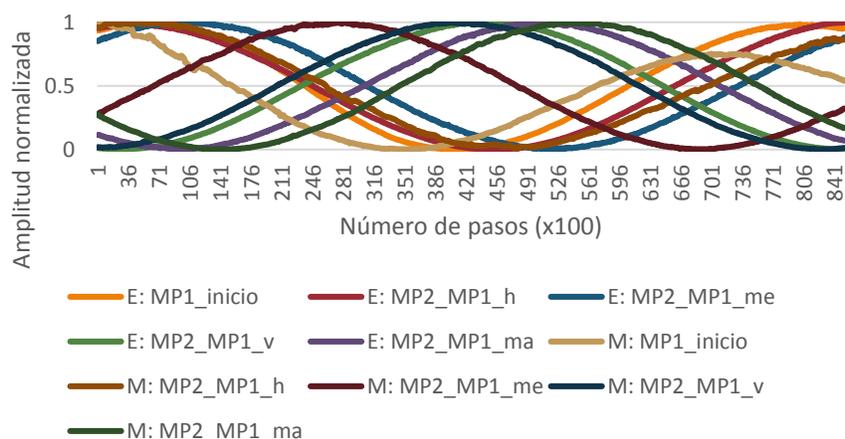


Figura 4.3 Respuesta en amplitud de un espejo (E) y de la superficie de un plátano (M) a luz polarizada lineal.

4.4. Conclusiones

De este capítulo se pueden recopilar una serie de puntos a considerar, entre ellos se encuentra que el sistema es factible para realizar mediciones con un margen de error relativamente bajo tanto en transmisión como en reflexión.

Así mismo, cabe resaltar que el objetivo principal en la realización de los experimentos relacionados en muestras no reportadas en la literatura fue el de observar los cambios que se presentan o no, al exponer la muestra a diferentes condiciones de luz polarizada.

Mientras que los experimentos realizados en muestras reportadas en la literatura nos permitieron evaluar el funcionamiento y precisión del sistema, obteniendo resultados satisfactorios; así como corroborar el funcionamiento de los elementos que conforman el sistema.

Las formas de onda reportadas ayudaron en la caracterización del sistema, permitiéndonos conocer con mayor detalle el comportamiento de los polarizadores (sistema en transmisión) como el efecto que tiene en dicha respuesta el colocar una muestra entre ellos (sistema en reflexión).

En los experimentos reportados utilizando como muestra materiales orgánicos existen diversos factores tales como la madurez de la muestra, la posición, el tiempo de exposición.

CAPÍTULO V

Conclusiones y Trabajo a Futuro

Este capítulo tiene como objetivo el mencionar algunas conclusiones generales del presente trabajo, así como el de presentar algunas recomendaciones que pudieran ser aplicados como trabajo futuro que permita mejorar o ahondar en los resultados obtenidos.

5.1. Conclusiones generales

Algunas de las principales conclusiones que se obtuvieron a lo largo del desarrollo de este trabajo se enuncian a continuación:

- El objetivo principal del trabajo se cumplió, es decir, se logró implementar un polarímetro dinámico basado en reflexión para la caracterización de muestras no traslúcidas.
- Se realizó un circuito de sincronía no programable que en conjunto con un programa desarrollado en LabVIEW® permitió la obtención de mediciones simultáneas de dos PEM de forma satisfactoria; reduciendo el error ocasionado por la diferencia de frecuencia entre ellos.
- Se desarrolló una interfaz en LabVIEW® que permite al usuario el monitoreo en el progreso del programa así como las condiciones de frecuencia de los PEM y la matriz de Müeller de la muestra a caracterizar.
- Se realizaron pruebas en muestras conocidas para la calibración del sistema en transmisión, obteniendo resultados con un margen de error promedio entre 2.2 % y 10.38 %, siendo posible reducirlos si se cuenta con material en mejores condiciones y que sean compatibles con la longitud de onda de la fuente de luz del sistema.

- En el caso del sistema en reflexión las pruebas realizadas para una muestra conocida fueron sobresalientes en el caso de un ángulo de reflexión de 30° con errores promedio $< 1 \%$; mientras que este aumenta considerablemente ($> 14 \%$) en el caso de ángulos de reflexión mayores (165°).
- Se realizaron pruebas tanto en superficies reflejantes como en materiales orgánicos con la finalidad de sentar un precedente de las posibles variaciones que pueden llegar a presentarse bajo condiciones determinadas.
- Por medio de la ley de Malus fue posible realizar una caracterización del comportamiento de los polarizadores y obtener así, las condiciones bajo las cuales se podían obtener las 16 combinaciones requeridas en el cálculo de la matriz de Müller.
- El tiempo de ejecución de los programas utilizados en el sistema en transmisión son: realizando mediciones únicamente con los PEM y al utilizar los estos en conjunto con los motores a pasos es de 4 min cada uno; sin embargo únicamente posicionando los motores a pasos aumenta a 16 min.
- En el caso del sistema en reflexión los tiempos de ejecución para los SubVI® que involucran mediciones entre PEM y los nanorotores se mantiene; una vez más el posicionamiento únicamente de los motores a pasos para obtener su respuesta en amplitud en media revolución tarda 25 min cada condición.
- El sistema presentado puede llegar a ser automático en su totalidad si se añadieran dos motores a pasos más. Con ello a su vez, tiene altas posibilidades de ser escalado.
- Los resultados obtenidos dependen de forma proporcional a la alineación del sistema.

5.2. Trabajo a futuro

Algunas de las dificultades que se tuvieron en el desarrollo de este trabajo se enuncian a continuación:

- Se observó que los resultados al realizar la caracterización de las muestras dependen principalmente de la alineación de los elementos que conforman el polarímetro. El no contar con una mesa holográfica neumática dificultó el mantener el sistema alineado, así como la falta de soportes adecuados que permitieran la sujeción de cada elemento.
- Las variaciones de temperatura en el área donde se encontraba montado el arreglo experimental dificultó la igualdad de condiciones bajo las cuales fueron realizados los experimentos.
- El montaje al tratar de hacer coincidir el eje de transmisión de los polarizadores con el punto de referencia de los nanorotores, tanto como el programar las secuencias de movimiento necesarias para la obtención de estados de polarización lineal, fueron problemáticas de gran peso al tener como consecuencias errores de medición y mayor tiempo de ejecución.
- La variación de los ángulos de reflexión se llevó a cabo de forma manual, utilizando el soporte donde se coloca la muestra a caracterizar como referencia para posicionar el PSA; sin embargo el posicionamiento se ve limitado por la sujeción del brazo en el que se encuentra montado el PSA con la mesa holográfica y de la precisión del ángulo de reflexión.
- Al realizar la caracterización de muestras orgánicas se observó que el esparcimiento que éstas producían era considerable, por lo cual se debía variar el ángulo de reflexión del arreglo, así como aumentar la ganancia del fotodetector para poder adquirir las mediciones necesarias.

Como posible solución a las problemáticas planteadas anteriormente a continuación se enlistan algunas perspectivas con la finalidad de mejorar tanto la caracterización del sistema como la obtención de la matriz de Müeller de cualquier muestra que se desee.

- En lo que respecta a la alineación del sistema se propone diseñar un dispositivo (mecánico o automático) que permita controlar cada uno de los ejes de movimiento de los elementos que conforman el sistema, de forma que ésta sea igual de precisa y más rápida. Así mismo, se propone diseñar o

en su defecto, adquirir soportes que permitan sujetar de mejor forma los elementos que conforman el polarímetro, incluyendo las muestras.

- Realizar una caracterización del comportamiento en intensidad que presenta el láser y los PEM a diferentes condiciones de temperatura externa y en funcionamiento continuo.
- Pensar en reemplazar los motores a pasos con sus respectivos polarizadores por unos que se encuentren previamente montados y posicionados en ángulos determinados, con lo cual se ahorraría tiempo y se evitarían errores debido a posición.
- Añadir dos motores a pasos al sistema actual: uno que permita controlar el brazo donde se montó el PSA, lo cual permitiría tener un polarímetro que pueda ser utilizado para mediciones en transmisión y en reflexión con ángulos precisos; y el segundo en donde se coloca la muestra, permitiendo tener amplio control sobre el ángulo de incidencia en ésta.
- Disminuir el tiempo de ejecución del programa, de forma que obtenga la matriz de Müeller en un tiempo menor a 10 min, con ello se lograrían realizar pruebas en muestras orgánicas sin verse alterado su estado de composición a lo largo de la medición.
- Modificar el arreglo del sistema, para que en caso de presentarse esparcimiento a causa de la muestra, por medio de espejos se pueda enfocar la mayor parte del haz en un punto coherente
- Realizar el modelo matemático del sistema, de forma que posteriormente se pueda realizar un emulador que permita obtener una matriz de Müeller de cierta muestra variando algunos parámetros de entrada.

ANEXO I

Características Técnicas del Equipo

Láser He-Ne HRR170

La línea de láseres [53] de He-Ne de la línea Thorlabs® con longitud de onda de 632.8 nm cuentan con salidas estables de 10.0 a 25.0 mW con un haz fundamental Gausiano. El láser HRR170 es un láser polarizado aleatoriamente, es decir, su estado de polarización cambia en una escala de tiempo de nanosegundos.



Figura Anexo I.1 Láser He-Ne de Thorlabs®.⁶

Tabla Anexo I.1 Especificaciones del láser He-Ne de Thorlabs®.

Especificaciones	
Longitud de onda	633 nm
Beam Drift ⁷	< 0.2 mrad
Min. Potencia de salida	17.0 mW
Max. Potencia de salida	25.0 mW
Temperatura de operación (°C)	-20 a 70
Voltaje de operación (DC)	3500 V
Operación en altitud (m)	0 a 30000
Humedad	≤ 80%
Voltaje de arranque	< 10 kV (DC)
Corriente de operación	5.25 mA
Peso	600 g
Estructura modal	TEM00 > 99%
Diámetro del haz	0.98 mm
Diámetro de divergencia	0.820 mrad
Espacio modal longitudinal	252 MHz
Ruido (30 Hz – 10 MHz)	< 1%

⁶ Tomado de [53].

⁷ Después de 30 min de encendido.

Tarjeta NI-USB 6259

El NI USB-6259 [54] es un módulo DAQ multifunción USB de alta velocidad de la Serie M optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas.

Está diseñado para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio. Cuenta con terminales de tornillo, simplificando las conexiones de señal.



Figura Anexo I.2 Tarjeta de adquisición NI-USB 6259.⁸

Tabla Anexo I.2 Características generales de NI-USB 6259.

Analógico I/O	Digital I/O/PFI	Contadores/Timers
16 entradas analógicas diferenciales o 32 entradas simples.	48 terminales, 32 (P0. <0...31>), 16 (PFI <0...7>/P1, PFI <8...15>/P2).	2 contadores/timers.
Resolución ADC de 16 bits.	Cada terminal se puede programar individualmente para ser programada como entrada o salida.	Resolución de 32 bits.
Razón de muestreo de un solo canal a 1.25 MS/s (1.00 MS/s agregado).	Voltaje de entrada alto (V_{IH}) Min. 2.2 V y Máx. de 5.25 V.	Base interna de reloj 80 MHz, 20 MHz, 0.1 MHz.
Tiempo de resolución de 50 ns.	Voltaje de entrada bajo (V_{IL}) Min. 0 V y Máx. de 0.8 V.	Base externa de reloj de frecuencia de 0 MHz a 20 MHz.
Voltaje de entrada ± 10 V, ± 5 V, ± 2 V, ± 1 V, ± 0.5 V, ± 0.2 V, ± 0.1 V.		Precisión de reloj de 50 ppm.

⁸ Tomado de www.ni.com

Nanorotor NR360S

La etapa de rotación del NR360S [49] proporciona una resolución de arco segundos cuando se acciona desde un controlador de micro-pasos, con un aumento de los pasos por revoluciones de 200 a 25 600. El micro-escalonamiento también asegura un movimiento de baja velocidad más suave al permitir que el paso discreto de 1.8° , que produce ruido vibratorio, sea reducido a pasos mucho más pequeños con ruido vibracional resultante inherentemente más bajo.



Figura Anexo I.3 Nanorotor NR360S.⁹

Tabla Anexo I.3 Especificaciones del nanorotor NR360S.

Especificaciones generales	
Peso	1.4 kg
Capacidad de carga	50 kg
Viaje de rotación	360° continuos
Señal de referencia	Cada 360° por un switch mecánico
Especificaciones del motor	
Ángulo del paso	1.8°
Precisión del paso	5 %
Corriente nominal de fase	1 A
Resistencia de fase	4.6 Ω
Inductancia de fase	10.6 mH
Par de retención	23.1 N.cm
Temperatura de operación	-20 °C a +40 °C

⁹ Tomado de www.thorlabs.com.

Modulador Fotoelástico PEM-100

El modulador fotoelástico PEM-100 [55] de la firma Hinds™ Instruments, es un instrumento resonante basado en el fenómeno de fotoelasticidad cuya birrefringencia oscilante a una frecuencia fija se encuentra en el rango de ultrasonido de baja frecuencia (20 kHz a 100 kHz), proporcionando gran calidad en la pureza de alta modulación.



Figura Anexo I.4 Monitor del controlador del PEM-100 en modo de control local.

Dentro de sus principales características [56] destacan las siguientes:

- Alta sensibilidad.
- Interfaz de comunicación RS-232, permitiendo el control y monitoreo de todas las funciones del PEM por medio de un PC.
- El dispositivo resonante genera un retardo sinusoidal a una frecuencia fija.
- Cuenta con un display digital que permite al usuario seleccionar las unidades del retardo y la longitud de onda.

Algunas otras características son enlistadas en la tabla siguiente:

Tabla Anexo I.4 Especificaciones del PEM-100.

Especificaciones Generales	
Alimentación	100 – 240 VAC 50 – 60 Hz, 27 W max.
Forma de onda de salida	5 VDC onda cuadrada
Especificaciones de los Parámetros de Visualización	
1 ^o Rango de visualización/resolución	20 kHz – 100 kHz, 1 Hz
2 ^o Rango de visualización/resolución	40 kHz – 200 kHz, 1 Hz
Precisión de visualización	+1 Hz @ 25°C
Especificaciones de la Cabeza Óptica	
Max. voltaje, pin a tierra	48 VDC @ 300 mAmax.
Rango de retardos	170 nm - 2μm, λ/4 170 nm - 2μm, λ/2
Frecuencia nominal	50 kHz
Material Óptico	Sílice fundida
Especificaciones Ambientales	
Temperatura de Operación	2°C a 42 °C

Fotodetector PDA36A

El fotodetector PDA36A [57] es un amplificador con ganancia ajustable, su detector de silicón está diseñado para la detección de señales de luz dentro de un rango de longitud de onda de 350 – 1100 nm. La ganancia puede ser ajustada por medio de un switch rotatorio de 8 posiciones, en incrementos de 10 dB.



Figura Anexo I.5 Fotodetector PDA36A.¹⁰

Tabla Anexo I.5 Especificaciones eléctricas del PDA36A.¹¹

Especificaciones Eléctricas	
Detector	Si PIN
Área activa	3.6 x 3.6 mm (13 mm ²)
Rango de onda (λ)	350 a 1100 nm
Pico de onda (λ_p)	970 nm (Typ)
Pico de respuesta R(λ_p)	0.65 A/W (Typ)
Amplificador GBP	600 MHz
Impedancia de salida (I_{OUT})	50 Ω
Máxima corriente de salida	100 mA
Impedancia de carga	50 Ω a Hi-Z
Rango de ajuste de ganancia	0 dB a 70 dB
Pasos de ganancia	8 x 10 dB pasos
Voltaje de salida (V_{OUT})	0 a 5 V (50 Ω) 0 a 10 V (Hi-Z)
Especificaciones Generales	
Peso del detector	0.15 lbs
Temperatura de operación	-55 a 125 °C
	31 W
Alimentación	100– 200 VAC (50 a 60 Hz) 220 – 240 VAC (50 a 60 Hz)

¹⁰ Tomado de [57].

¹¹ Tomado de [57].

De acuerdo con rango de ganancia seleccionada ciertas características del fotodetector cambian, a continuación, se enlistan algunas.

Tabla Anexo I.6 Especificaciones de acuerdo a la ganancia seleccionada en el PDA36A.¹²

	Especificaciones de Comportamiento		
	10 dB	40 dB	70 dB
Ganancia (Hi-Z)	$4.75 \times 10^3 \text{ V/A} \pm 2\%$	$1.51 \times 10^5 \text{ V/A} \pm 2\%$	$4.75 \times 10^6 \text{ V/A} \pm 2\%$
Ganancia (50 Ω)	$2.38 \times 10^3 \text{ V/A} \pm 2\%$	$0.75 \times 10^5 \text{ V/A} \pm 2\%$	$2.38 \times 10^6 \text{ V/A} \pm 2\%$
Ancho de banda	5.5 MHz	150 kHz	5 kHz
Ruido (RMS)	280 μV	340 μV	1.10 mV
Offset	4 mV (10 mV max)	4 mV (10 mV max)	6 mV (10 mV max)

La curva de respuesta del PDA36A [58] para diferentes longitudes de onda de la luz incidente, es mostrada a continuación.

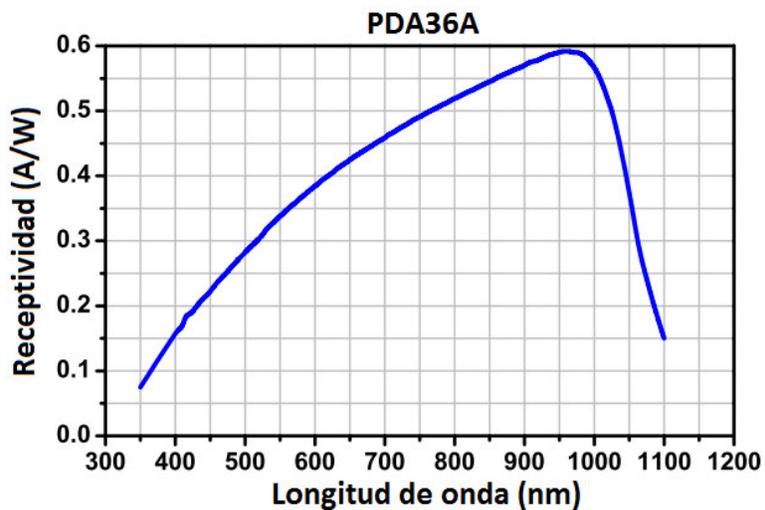


Figura Anexo I.6 Curva de respuesta del PDA36A.¹³

¹² Tomado de [57].

¹³ Tomado de [57].

ANEXO II

Caracterización de NR360S y LPVIS100-MP

La caracterización de cada uno de los nanorotores así como de sus respectivos polarizadores fue un punto muy importante en el desarrollo de este trabajo, ya que por medio de su posicionamiento es como se generan las 16 combinaciones de luz polarizada lineal, necesarias para la obtención de la matriz de Müller.

El posicionamiento básico de cada motor a pasos se realizó por medio de una TAD y un programa en LabVIEW®, el cual sigue el diagrama de flujo que se presenta en la Figura Anexo II..

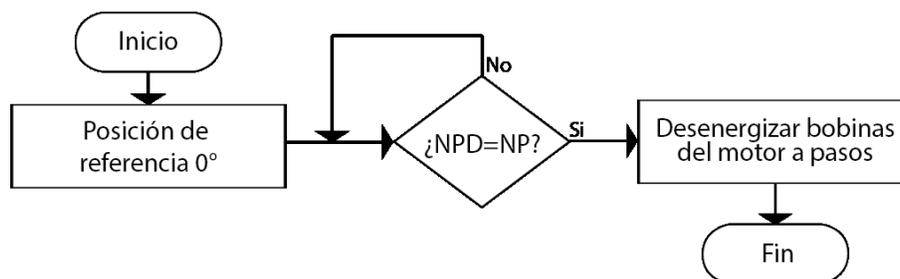


Figura Anexo II.1 Diagrama de flujo para el movimiento básico del NR360S.

La idea general del programa consiste en contar el número de pasos que realiza el motor (NP) y detenerlo cuando se alcance el número de pasos previamente definidos por el usuario (NDP); cuando lo anterior ocurre se desenergizan las bobinas del motor y termina el programa. Por motivos de referencia en posición se utiliza como bandera de inicio el switch mecánico que posee el motor, ello nos permite iniciar el movimiento de este partiendo siempre desde un punto conocido e invariable.

Repetitividad en el número de pasos de los nanorotores

Para corroborar la repetitividad de cada uno de los nanorotores se realizó un programa para contar el número de pasos que da cada uno de ellos en una revolución, para ello se realizaron 12 corridas de cada uno, obteniendo los valores presentados en la Tabla AnexoII.1.

Tabla AnexoII.1 Número de pasos para cada nanorotor en una revolución.

Nanorotor	MP1	MP2
	13199	13200
	13199	13200
	13199	13200
	13207	13200
	13196	13201
	13199	13200
	13199	13200
	13199	13200
	13199	13201
	13200	13200
	13204	13200
	13199	13198
Promedio	13199.92	13200
Desviación estándar	2.84	0.71

Observando los valores obtenidos y en función a la desviación de estándar de éstos se puede deducir que el nanorotor localizado en PSG (MP1) puede llegar a presentar un comportamiento más errático al ser propenso a tener un margen de error en posicionamiento de casi 3 pasos; en cambio el nanorotor localizado en PSA (MP2) presenta mayor constancia en posicionamiento.

El estudio anterior nos da un panorama general del comportamiento de los nanorotores, se hace notar que en este caso el movimiento de ellos se realiza cada 100 pasos, con pasos mayores de 100 el comportamiento reportado anteriormente se vuelve mayor, es decir, el número de pasos del MP1 es considerablemente mayor a los del MP2.

Alineación de los polarizadores y montaje en los nanorotores

Un primer reto fue el de adaptar bases para montar los polarizadores LPVIS100-MP sobre los nanorotores, para lo cual se mandaron hacer dos platinas de acrílico de forma que cada polarizador quedara lo más centrado posible en estas. Se optó por utilizar acrílico puesto que es económico y ligero, ambas se muestran en la Figura AnexoII.2.

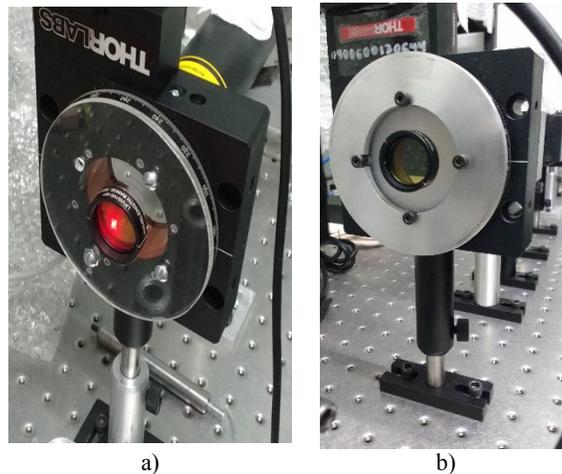


Figura AnexoII.2 Montaje de los polarizadores en cada nanorotor: a) PSG y b) PSA.

Los polarizadores entran a presión en cada una de las platinas de acrílico y son fijadas a los motores por medio de cuatro tornillos, sin embargo, en el caso del nanorotor posicionado en PSA al realizar una serie de pruebas se observó que la platina no quedaba completamente paralela con respecto a la superficie de este, haciendo necesario colocarle una platina de metal adicional para fijarla adecuadamente.

Los ejes ópticos de cada polarizador fueron alineados con respecto a las marcas de referencia a 0° que posee cada nanorotor; mientras que la alineación de cada nanorotor en conjunto con su polarizador correspondiente y el la fuente de luz se llevó a cabo mediante círculos de acrílico como los de la Figura AnexoII.3 y con círculos semejantes a estos pero hechos de plástico duro con pequeños hoyos en su centro.



Figura AnexoII.3 Círculos de acrílico utilizados para alineación.

La alineación de los polarizadores con respecto a la fuente de luz utilizada en el sistema se llevó a cabo por medio de los siguientes pasos:

1. Los círculos de acrílico fueron mandados hacer bajo las especificaciones de la base en donde se encuentran montados los polarizadores, de forma que fueran insertados por encima de estos y poder alinear el haz de luz proveniente del láser con el centro de cada polarizador.
2. Los círculos fabricados en hule por otra parte fueron hechos de forma manual cumpliendo las características del tamaño de los polarizadores, por lo que su uso consistía en superponer dichos círculos dentro de cada soporte y alinear con mayor precisión el haz de luz con el centro de estos.

Una vez alineado el sistema conformado por el polarizador y analizador se procedió a observar el comportamiento de estos en una revolución. El nanorotor NR360S puede girar en sentido horario (T) continuo y en sentido anti horario (F) únicamente una revolución según los datos proporcionados por el fabricante.

Para observar si había algún efecto físico como consecuencia del sentido de giro de ambos motores, se decidió obtener el promedio de 100 muestras en intervalos de 100 pasos. Cada motor gira de forma independiente hasta completar una revolución para cada sentido, algunos de los resultados obtenidos se presentan en la gráfica de la Figura AnexoII.4.

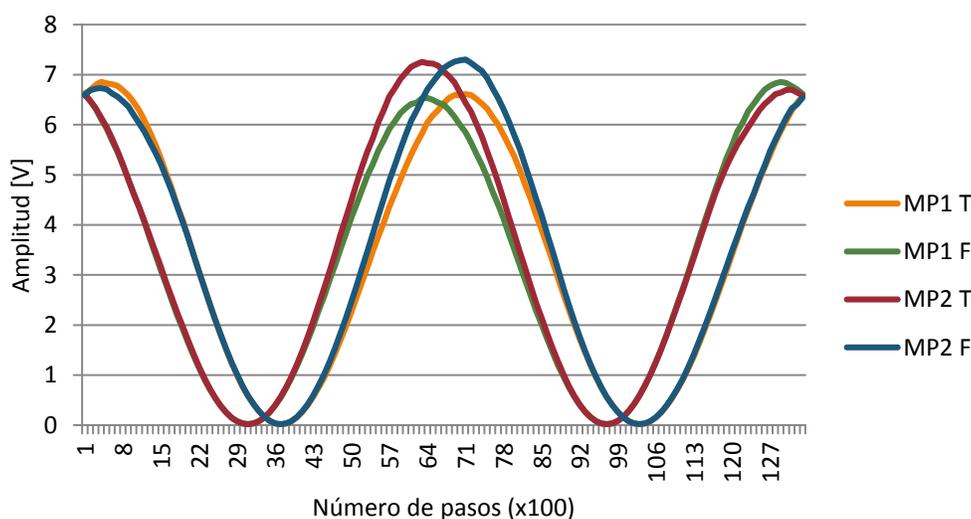


Figura AnexoII.4 Efectos en amplitud respecto al sentido de giro de cada nanorotor en una revolución.

De lo anterior se deben tener en cuenta diversos factores tal como la amplitud de las señales, así como el desfase proporcional presente entre ellas. De forma

experimental se comprobó que ambas son resultado de alineación, tanto de la fuente de luz con los polarizadores como del eje óptico de estos respecto a la platina en la que se encuentran montados. Idealmente se esperaría que las cuatro señales presentadas fueran de la misma amplitud y no existiera desfaseamiento.

Al tratar de alinear el sistema para que las condiciones anteriores ocurrieran se observó que los movimientos a realizar deben ser exactos y muy finos, ya que pequeñas variaciones en cuanto a posición tienen como consecuencia grandes cambios en amplitud y fase.

Por cuestiones relacionadas al punto de referencia se optó por elegir el sentido horario para posición de los motores, mientras que el retorno de estos a posición de referencia se realiza en sentido contrario.

Tomando como referencia el par de señales correspondientes a MP1 T y MP2 T presentadas en la gráfica de la Figura AnexoII.4 y observando que las amplitudes de ambas señales son similares, se decidió obtener el comportamiento de los polarizadores al posicionarlos cada 100 pasos de forma alternada adquiriendo 100 muestras en cada punto. Primeramente, ambos en sentido horario y posteriormente cambiando el giro del MP2 bajo las mismas condiciones, adquiriendo 100 muestras en cada punto y graficando el promedio de estas; la respuesta en amplitud se observa en la gráfica de la Figura Anexo II.5.

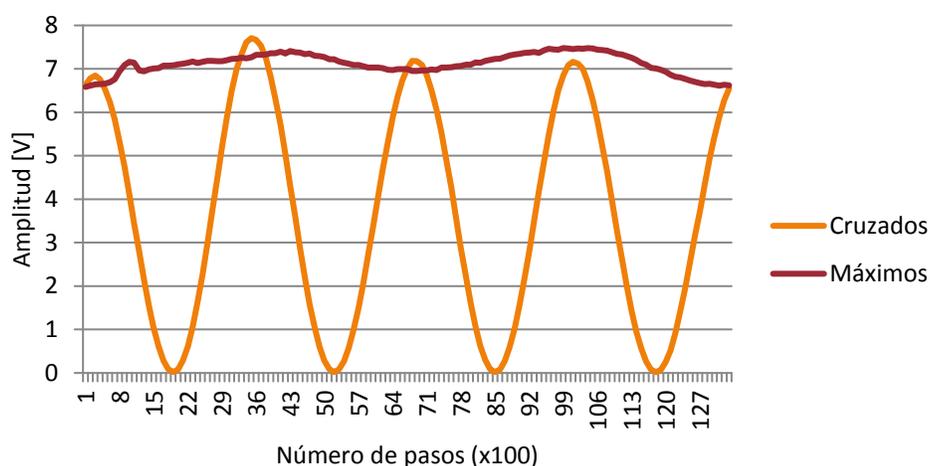


Figura Anexo II.5 Comportamiento en amplitud de los polarizadores.

En la Figura Anexo II.5 existen variaciones en amplitud conforme cambia el área de interacción entre ambos polarizadores y el haz de luz proveniente del láser. A modo de deducir las condiciones bajo las cuales sucede lo anterior se realizó el experimento que se detalla en la siguiente sección.

Comportamiento de valores máximos en los polarizadores

A modo de experimento para observar el comportamiento de los polarizadores se planteó el realizar un programa que permitiera mover alternadamente cada motor en la misma dirección (sentido horario) hasta completar 1 revolución de éstos. Cada motor recorría 100 pasos, adquiriendo 100 muestras al final de cada movimiento, en la gráfica de la Figura Anexo II.6 se presenta el comportamiento de 6 pruebas realizadas.

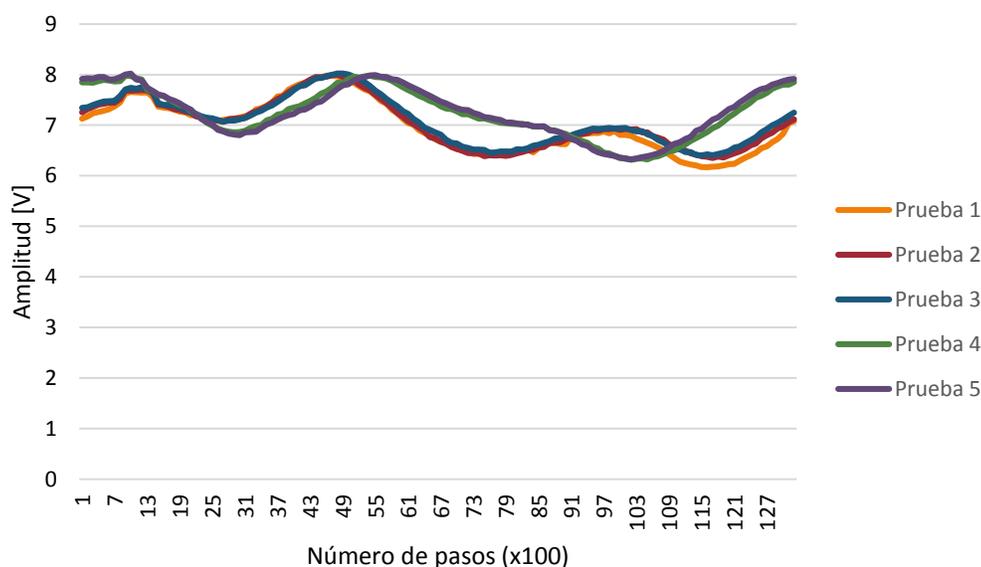


Figura Anexo II.6 Respuesta de dos polarizadores para valores máximos en una revolución.

Las pruebas 1 a 3 se llevaron a cabo colocando los motores a pasos a corta distancia entre ellos (aproximadamente 2 cm entre ellos), el comportamiento de estas en la gráfica tienen el mismo patrón y se mantiene la amplitud de estas; las pruebas 4 y 5 fueron realizadas alejando el MP2 del MP1 aproximadamente 40 cm y el comportamiento de los valores máximos mantienen el patrón de las primeras tres pruebas con un ligero desfase.

ANEXO III

Características del PEM-100

El PEM-100 de la firma Hinds Instruments es un dispositivo versátil que, como se hizo mención en el Capítulo II de este trabajo (Figura 3.5), consta de tres partes principales: controlador, cabeza óptica y cabeza electrónica. A continuación, se describen con detalle cada uno de ellos, con la finalidad de comprender el funcionamiento del PEM.

- **Controlador.**- Permite seleccionar por el usuario la longitud de onda de trabajo así como el retardo de fase que será introducido a la señal lumínica de entrada; de esta forma el PEM puede comportarse como lámina de media onda o de cuarto de onda. La frecuencia del PEM puede ser monitoreada por medio del panel frontal de este.
- **Cabeza electrónica.**- Consiste en un circuito LC tanque conectado en paralelo a la cabeza óptica; el cable que interconecta ambas cabezas contribuye a la capacitancia del circuito. La cabeza electrónica [59] también es la encargada de generar las condiciones de oscilación y de retroalimentación hacia el controlador.
- **Cabeza óptica [55].**- está conformada por una barra transparente de sílice, la cual se comporta como un cristal piezoeléctrico. La barra vibra a una frecuencia de 50 kHz, la cual es proporcionada por la cabeza electrónica con las características proporcionadas por el controlador. El efecto de birrefringencia máxima se encuentra en el centro de la barra.

El ensamble óptico entre la cabeza óptica y electrónica del PEM por medio del cable que los conecta permite que se produzcan variaciones de birrefringencia en el tiempo, cumpliendo así el principio de operación del PEM.

A modo de corroborar el funcionamiento del PEM el fabricante recomienda el arreglo óptico presentado en la Figura Anexo III.1 .

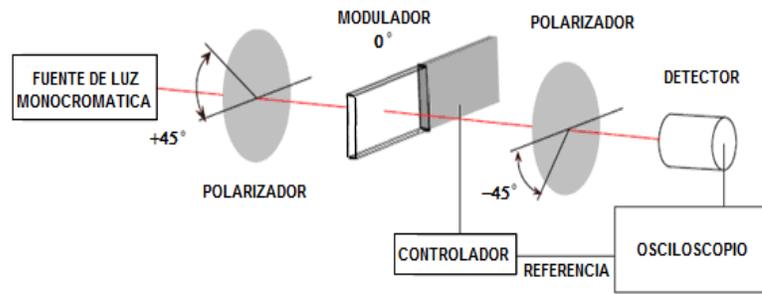


Figura Anexo III.1 Arreglo óptico para la calibración del PEM.¹⁴

En nuestro caso la Figura Anexo III.1 se utiliza como referencia y a este arreglo se añade un segundo modulador después del polarizador a $+45^\circ$, obteniendo las señales que se muestran en la Figura Anexo III.2 y para el caso de transmisión y reflexión con un retardo máximo de $\lambda/2$.

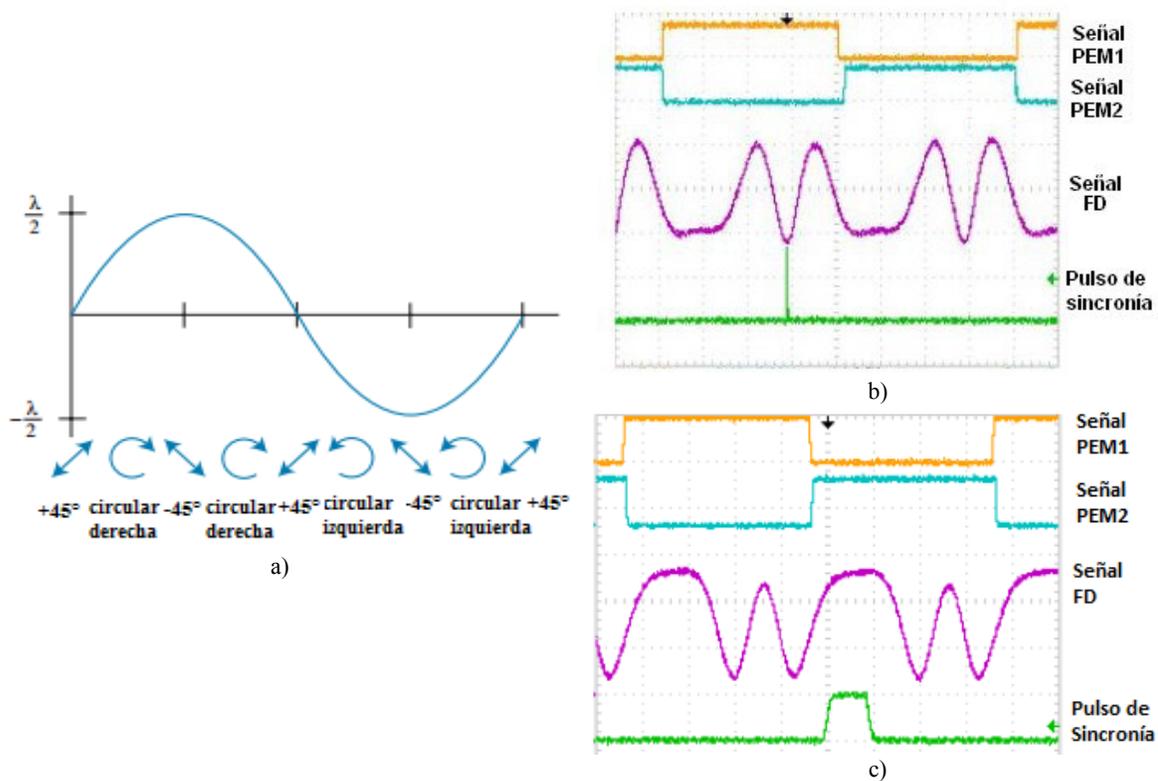


Figura Anexo III.2 Formas de onda para la calibración de los PEM con un retardo máximo de $\lambda/2$: a) estados de polarización¹⁵ que se pueden obtener, b) señales obtenidas en transmisión¹⁶ y c) señales obtenidas en reflexión.

¹⁴ Tomado de [55].

Una de las principales ventajas que presenta el PEM-100 es su modo de control remoto, por medio del cual se puede controlar las características como: longitud de onda, retardo de fase, etc.; por medio de una PC utilizando la interfaz RS-232. En el desarrollo del trabajo presentado el manejo de los PEM se realiza utilizando este modo de control.

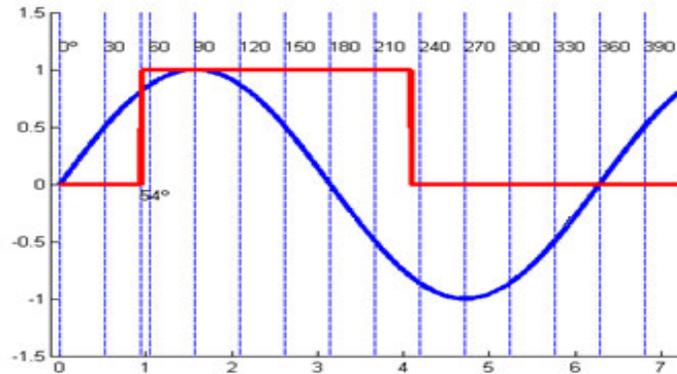


Figura Anexo III.3 Señal TTL del PEM1 (rojo) y señal moduladora de la cabeza óptica (azul).¹⁷

Partiendo de trabajos anteriores [17] se hace notar que las características de trabajo que presentan los PEM deben ser consideradas para su correcto manejo e interpretación:

- La frecuencia de operación de ambos PEM es ligeramente diferente y su diferencia se sitúa entre 2 Hz y 4 Hz. Esta diferencia se conserva aunque cambie la temperatura ambiente.
- Existe un desfase de 54° entre la señal modulada del PEM y la TTL del mismo, esto se ilustra en la Figura Anexo III.3.
- La señal TTL del PEM2 se encuentra adicionalmente desfasa 180° con respecto a la señal TTL del PEM1.

Por último, se hace notar que se pueden obtener diversas combinaciones de estados de polarización lineal dependiendo de los retardos de fase programados en cada uno de los PEM así como del desfase existente entre las señales TTL de estos.

¹⁵ Tomado de [55]

¹⁶ Tomado de [47].

¹⁷ Tomado de [47].

REFERENCIAS

- [1] T. Vo-Dinh and B. R. Masters, “Biomedical Photonics Handbook,” *J. Biomed. Opt.*, vol. 9, no. 5, p. 1787, 2004.
- [2] D. Malacara, “Óptica Básica,” p. 532, 2015.
- [3] D. Goldstein, “Polarized Light,” *Image (Rochester, N.Y.)*, p. 644, 2003.
- [4] N. Ghosh and I. A. Vitkin, “Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook,” *J. Biomed. Opt.*, vol. 16, no. 11, p. 110801, 2011.
- [5] J. J. Gil, “Review on Mueller matrix algebra for the analysis of polarimetric measurements,” *J. Appl. Remote Sens.*, vol. 8, no. 1, p. 81599, 2014.
- [6] M. Sun, H. He, N. Zeng, E. Du, Y. Guo, S. Liu, J. Wu, Y. He, and H. Ma, “Characterizing the microstructures of biological tissues using Mueller matrix and transformed polarization parameters,” *Biomed. Opt. Express*, vol. 5, no. 12, pp. 4223–34, 2014.
- [7] Y. Wang, H. He, J. Chang, N. Zeng, S. Liu, M. Li, and H. Ma, “Differentiating characteristic microstructural features of cancerous tissues using Mueller matrix microscope,” *Micron*, vol. 79, pp. 8–15, 2015.
- [8] S. A. Hall, M. A. Hoyle, J. S. Post, and D. K. Hore, “Combined stokes vector and Mueller matrix polarimetry for materials characterization,” *Anal. Chem.*, vol. 85, no. 15, pp. 7613–7619, 2013.
- [9] R. A. McLaughlin, D. Lorensen, and D. D. Sampson, “Handbook of Coherent-Domain Optical Methods,” pp. 1065–1102, 2013.
- [10] N. Ghosh, M. F. G. Wood, S. Li, R. D. Weisel, B. C. Wilson, R.-K. Li, and I. A. Vitkin, “Mueller matrix decomposition for polarized light assessment of biological tissues,” *J. Biophotonics*, vol. 2, no. 3, pp. 145–56, 2009.
- [11] D. Rodríguez-Sotelo, “Espirómetro de resolución angular aplicado en el estudio óptico de muestras,” *Tesis Licenciatura, Univ. Guanajuato.*, pp. 1–73, 2015.
- [12] Y. Castillejos, G. Martínez-Ponce, A. Mora-Nuñez, and R. Castro-Sánchez,

- “Multispectral Stokes polarimetry for dermatoscopic imaging,” *Biophotonics Japan, SPIE.*, vol. 9792, 2015.
- [13] T. Novikova, “Polarimetric imaging for cancer diagnosis and staging,” *Opt. ...*, no. October, pp. 26–33, 2012.
- [14] S. L. Jacques, J. R. Roman, and K. Lee, “Imaging superficial tissues with polarized light,” *Lasers Surg. Med.*, vol. 26, no. 2, pp. 119–129, 2000.
- [15] S. N. Savenkov, “Principles of the Mueller matrix measurements,” *Light Scatt. Rev. 9 Light Scatt. Radiat. Transf.*, pp. 213–255, 2015.
- [16] B. Rossi, “Fundamentos de óptica,” p. 488, 1978.
- [17] S. B. De Ercilla and C. G. Muñoz, “Física general,” p. 288, 2003.
- [18] N. M. B. N.-H. R.M.A. Azzam, “Ellipsometry and polarized light,” *Optics & Laser Technology*, vol. 10, no. 2. p. 100, 1978.
- [19] Gustav Kortüm, “Reflectance Spectroscopy,” p. 371, 1969.
- [20] A. A. Kokhanovsky, “Light Scattering Reviews 9,” *Light Scatt. Rev. 9 Light Scatt. Radiat. Transf.*, pp. 1–430, 2015.
- [21] F. A. Jenkins and H. E. White, “Fundamentos de óptica,” p. 696, 1963.
- [22] E. Hecht, “Optics,” *Opt. 4th Ed. by Eugene Hecht Read. MA AddisonWesley Publ. Co. 2001*, 2001.
- [23] M. S. Millán, M. S. M. García-Varela, and J. E. Soteras, ““Óptica geométrica,”” p. 296, 2004.
- [24] M. Bass, “Handbook of optics: v.1: Fundamentals, techniques, and design; v.2: Devices, measurements, and properties,” *Choice Rev. Online*, vol. 32, no. 10, pp. 32-5715-32–5715, 1995.
- [25] J. Caum Aregay, J. Salvadó Arqués, and M. Fransoy Bel, ““Tecnología óptica: lentes oftálmicas, diseño y adaptación,”” p. 292, 2001.
- [26] L. Jiancheng, L. Zhenhua, X. Chong, W. Qinghua, and H. Anzhi, “Experimental Investigation of Backscattered Mueller Matrices of Turbid Media,” 2007.
- [27] Y. Wang, H. He, J. Chang, C. He, S. Liu, M. Li, N. Zeng, J. Wu, and H. Ma, “Mueller matrix microscope: a quantitative tool to facilitate detections and fibrosis scorings of liver cirrhosis and cancer tissues.,” *J. Biomed. Opt.*, vol. 21, no. 8, p.

71112, 2016.

- [28] N. M. B. N.-H. R.M.A. Azzam, “Ellipsometry and polarized light,” *Optics & Laser Technology*, vol. 10, no. 2. p. 100, 1978.
- [29] R. Ossikovski, J. J. Gil, and I. San José, “Poincaré sphere mapping by Mueller matrices,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 30, no. 11, pp. 32–50, 2013.
- [30] P. A. Gil and J. G. Pérez, “El modelo de la esfera de Poincaré: representación de medios materiales,” *Zubía*. p. 9, 1991.
- [31] K. W. Hipps and G. a. Crosby, “Applications of the Photoelastic Modulator to Polarization Spectroscopy,” *J. Phys. Chem.*, vol. 83, no. 5, pp. 555–562, 1979.
- [32] S.-Y. Lu and R. A. Chipman, “Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, no. 5, p. 1106, 1996.
- [33] F. L. Pedrotti and L. S. Pedrotti, “Introduction to optics 2nd edition,” *Introd. to Opt. 2nd Ed. by Frank L. Pedrotti, SJ, Leno S. Pedrotti New Jersey Prentice Hall, 1993*, vol. 1, 1993.
- [34] F. C. Sánchez, “Experiencias de óptica física,” p. 192, 2001.
- [35] J. C. Gutiérrez García and J. F. Mosiño, “Análisis de polarización de la interacción luz-materia en medios anisotrópicos,” León, Gto., 2008.
- [36] J. R. García, J. M. Virgós, and J. M. V. Rovira, “Fundamentos de óptica ondulatoria,” 1999.
- [37] M. Kuldkepp, N. C. Hawkes, E. Rachlew, and B. Schunke, “Accurate polarization measurements with a dual photoelastic modulator.,” *Appl. Opt.*, vol. 44, no. 28, pp. 5899–5904, 2005.
- [38] Y. Liu, G. A. Jones, Y. Peng, and T. H. Shen, “Generalized theory and application of Stokes parameter measurements made with a single photoelastic modulator,” *J. Appl. Phys.*, vol. 100, no. 6, 2006.
- [39] W. S. Bickel and W. M. Bailey, “Stokes vectors, Mueller matrices, and polarized scattered light,” *Am. J. Phys.*, vol. 53, no. 5, p. 468, 1985.
- [40] R. Espinosa-Luna, A. Mendoza-Suárez, G. Atondo-Rubio, S. Hinojosa, J. O. Rivera-Vázquez, and J. T. Guillén-Bonilla, “Mueller matrix determination for one-dimensional rough surfaces: Four reduced measurement equivalent sets,” *Opt.*

Commun., vol. 259, no. 1, pp. 60–63, 2006.

- [41] R. Castro-Sánchez, R. A. Martínez-Celorio, R. M. Cibrían, R. Salvador, D. H. Fusilier, and J. B. Hurtado-Ramos, “Synchronization of two photoelastic light modulators to obtain Mueller matrix,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 7, pp. 2050–2057, 2013.
- [42] R. A. Chipman, “Polarimetry,” *OSA Handb. Opt. - Vol II*, p. 22.1–22.35, 1995.
- [43] C. Fallet, “Angle resolved Mueller polarimetry, applications to periodic structures,” 2011.
- [44] H. E. Saueda Felix, G. Atondo-Rubio, and R. Espinoza-Luna, “Manejo e Interpretación Polarimétrica de las Matrices de Mueller,” pp. 1–2, 2006.
- [45] J. Qi and D. S. Elson, “A high definition Mueller polarimetric endoscope for tissue characterisation,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. April, p. 25953, 2016.
- [46] J. F. Mosiño, O. Barbosa-García, A. Starodumov, L. A. Díaz-Torres, M. A. Meneses-Nava, and J. T. Vega-Durán, “Evolution of partially polarized light through non-depolarizing anisotropic media,” *Opt. Commun.*, vol. 173, no. 1–6, pp. 57–71, 2000.
- [47] G. I. de León Rodríguez, “Generador de sincronía para un esparcímetero de resolución angular,” *Tesis Licenciatura, Univ. Guanajuato*.
- [48] R. A. Matínez-Celorio, R. Espinoza-Luna, J. O. Rivera-Vázquez, and R. Castro-Sánchez, “Metodología para el estudio de los tejidos biológicos usando matrices de Müeller,” *Rev. Mex. Fis.*, vol. 26, p. 12, 2005.
- [49] ThorLabs, “Handbook: NanoRotator 360° Rotation Stage,” p. 24.
- [50] A. Pierangelo, S. Manhas, A. Benali, C. Fallet, M.-R. Antonelli, T. Novikova, B. Gayet, P. Validire, and A. De Martino, “Ex vivo photometric and polarimetric multilayer characterization of human healthy colon by multispectral Mueller imaging,” *J. Biomed. Opt.*, vol. 17, no. 6, p. 66009, 2012.
- [51] O. G. Rodríguez-Herrera, “Mueller matrix for an ellipsoidal mirror,” *Opt. Eng.*, vol. 45, no. 5, p. 53602, 2006.
- [52] J. M. Krijger, R. Snel, G. Van Harten, J. H. H. Rietjens, and I. Aben, “Mirror contamination in space I: Mirror modelling,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 7, no. 10, pp.

3387–3398, 2014.

- [53] O. Manual, “Red HeNe Laser Systems (High Power) Operating Manual,” *Thorlabs*.
- [54] N. NI, “Technical Sales: High Speed M Series Multifunction DAQ,” no. 866, pp. 1–7, 2010.
- [55] L. S. O. M. E. Try, A. G. N. E. To, P. Tic, and E. Rr, “Pem-100: Photoelastic Modulators,” *Hinds Instruments*.
- [56] Hinds-Instruments, P. Modulators, and P. Bulletin, “PEM Technical Overview,” pp. 1–6, 2010.
- [57] ThorLabs, “PDA36A - Si Switchable Gain Detector,” 2015.
- [58] O. Voltage, G. Specifications, P. Supply, and I. Power, “PDA36A Operating Manual - Switchable Gain , Amplified Silicon Detector Description : Specifications ;,” *Power*, no. 973, pp. 1–5, 2011.
- [59] H. Instruments, “Pem 100 Photoelastic Modulator.”