



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

---

---

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

*“Sistema mecatrónico programable para la  
caracterización y el control angular independiente de  
elementos ópticos en tándem”*

**TESIS PROFESIONAL**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

PRESENTA:

**Ing. Francisco Javier González Martínez**

ASESORES:

Dr. Mario Alberto Ibarra Manzano

Dr. Rogelio Castro Sánchez

SALAMANCA, GUANAJUATO

JULIO, 2025

Salamanca, Gto., a 20 de junio del 2025.

**MTRO. JUAN SIGFRIDO LÓPEZ CUSTODIO**  
**COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES**  
**P R E S E N T E.-**

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno Ing. Francisco Javier González Martínez del **Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica (Instrumentación y sistemas digitales)** y cuyo número de **NUA** es: 145048 del cual soy director. El título de la tesis es: *"Sistema mecatrónico programable para la caracterización y el control angular independiente de elementos ópticos en tándem"*

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. Mario Alberto Ibarra Manzano

NOMBRE Y FIRMA

**DIRECTOR DE TESIS**

**SECRETARIO**

Dr. Rogelio Castro Sánchez

NOMBRE Y FIRMA

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. José Amparo Andrade Lucio

NOMBRE Y FIRMA

**PRESIDENTE**

Dr. Juan Gabriel Aviña Cervantes

NOMBRE Y FIRMA

**VOCAL**

---

# Dedicatoria

*Dedico esta tesis a mis padres y hermanos, quienes han sido mi mayor inspiración y ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia. Gracias por su apoyo incondicional, por cada palabra de aliento en esta travesía, y por enseñarme —con su vida y su ejemplo— que los sueños se alcanzan con trabajo, constancia y dedicación. Esta tesis no solo es un logro personal, sino también el reflejo del compromiso y amor de ustedes. Es tanto mía como suya.*

---

# Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios por las oportunidades brindadas, por las pruebas que me han permitido crecer y por regalarme la vida para avanzar en la consecución de mis metas. Con tu amor y bendiciones, sé que todo es posible.

A mis padres: María Isabel Martínez Chávez y Javier González Moreno, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor incondicional, por sus enseñanzas constantes y por mostrarme con su ejemplo que el esfuerzo y la paciencia son la clave para alcanzar cualquier sueño. Son mi inspiración permanente y hoy soy quien soy gracias a ustedes.

A mi hermanos: José Román, por sus consejos sinceros y por enseñarme, con su ejemplo, el verdadero valor del esfuerzo, la constancia y la fortaleza. Tu guía ha iluminado mi camino. A mi hermana Juana Paulina, por contagiarme con tu alegría y brindarme siempre tu apoyo incondicional. A ambos, gracias por recordarme que siempre debemos dar lo mejor de nosotros, especialmente en los momentos más difíciles.

A mis amigos: Daniel Ramos, Ramón Aviña, Daniel Torres, Christian Salcedo y Mario Piña, por ser compañeros invaluable durante esta etapa de estudio, por compartir sus conocimientos y colaborar generosamente con recursos que hicieron posible la realización de esta tesis. Mención especial para mi primo Daniel, quien, sin importar las circunstancias, siempre me brindó su apoyo y tiempo desinteresadamente.

A mis asesores: Al Dr. Mario Ibarra Manzano, por compartir generosamente su conocimiento en cada situación que se presentó durante el proceso. Su profesionalismo, apoyo constante y confianza en mi trabajo me alentaron a alcanzar los mejores resultados, incluso cuando el desarrollo de la tesis se volvió complicado. Gracias por motivarme a continuar con mis estudios y por su guía en todo momento. Al Dr. Rogelio Castro Sánchez, por introducirme a esta técnica de trabajo, compartir su valiosa experiencia en el tema y brindarme orientación en la resolución de los desafíos técnicos que surgieron a lo largo del proyecto. También agradezco el haberme proporcionado las herramientas necesarias para el desarrollo del arreglo óptico.

A mis sinodales: Al Dr. Amparo Andrade Lucio, por su apoyo al facilitar el uso del láser empleado en este trabajo, así como por sus valiosos comentarios y la revisión detallada de esta tesis. Al Dr. Gabriel Aviña Cervantes, por sus observaciones durante la revisión del documento y por motivarme constantemente a continuar con mis estudios. A ambos, por compartir generosamente sus conocimientos y contribuir al desarrollo de este trabajo.

A mis profesores: A la Dra. Luz Almanza Ojeda, por brindarme la oportunidad de desenvolverme en el ámbito profesional y proporcionarme un espacio de trabajo durante mi estancia. Al Dr. Óscar Ibarra Manzano, por su atención y apoyo invaluable, los cuales fueron clave para la continuidad y culminación de este trabajo. Al Dr. Manuel Sierra Hernández, por el apoyo, los consejos y la amistad que siempre me ha ofrecido con generosidad, los cuales han sido de gran valor a lo largo de mi formación. Al Dr. Roberto Reyes Ayona, por sus valiosos comentarios, su amistad sincera y por brindarme la oportunidad de asistir a mi primer congreso.

A mis fieles compañeros: Figo, mi perrito, y Panchito, mi conejo, quienes fueron un apoyo emocional invaluable a lo largo de esta travesía. Que Dios los tenga en su gloria.

---

## Agradecimientos institucionales

”Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad de Guanajuato, en especial a la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, por brindarme la oportunidad de cursar este programa de postgrado.”



”De igual forma, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por aceptarme como becario con el número de apoyo 811522, y por el respaldo brindado durante mis estudios.”

# Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades,  
Tecnología e Innovación



---

# Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema mecatrónico programable conformado por seis módulos dispuestos en tándem. Cuatro de estos permiten el posicionamiento angular preciso de elementos ópticos, mientras que otro integra la tarjeta de control y adquisición de datos, así como una base intercambiable para la colocación de diferentes muestras. El módulo final está dedicado al fotodetector. El sistema cuenta con una fuente de luz láser en la entrada y una pantalla HMI que permite visualizar los resultados obtenidos.

El diseño del sistema se realizó mediante software CAD, y su fabricación se llevó a cabo con impresión 3D, lo que permitió construir una arquitectura modular adaptable a distintas configuraciones experimentales. El objetivo principal fue la caracterización óptica de muestras translúcidas, activas desde el punto de vista polarimétrico, utilizando el formalismo de Stokes-Mueller.

El arreglo experimental incluye una fuente de luz, un sistema óptico de entrada, la muestra bajo estudio, un sistema óptico de salida y un fotodetector. El prototipo permite la adquisición de las 36 mediciones necesarias para obtener la matriz de Mueller de manera automatizada, proporcionando resultados reproducibles y comparables con valores ideales reportados en la literatura. Este sistema representa una alternativa de bajo costo, compacta y versátil para aplicaciones de caracterización óptica en investigación científica y docencia.

---

# Abstract

This work presents the development of a programmable mechatronic system composed of six modules arranged in tandem. Four of these modules enable precise angular positioning of optical elements, one houses the control and data acquisition board along with an interchangeable base for placing various samples, and the final module is dedicated to the photodetector. The system features an input laser light source and an HMI touchscreen for real-time visualization of results.

The device was designed using CAD software and manufactured through 3D printing, enabling the construction of a modular architecture that is adaptable to diverse experimental configurations. The main objective was the optical characterization of translucent, optically active samples using the Stokes-Mueller formalism.

The experimental setup includes a light source, an input optical system, the sample under test, an output optical system, and a photodetector. The prototype enables automated acquisition of the 36 required measurements to compute the Mueller matrix, delivering reproducible results that align with ideal values reported in the literature. This system offers a low-cost, compact, and versatile solution for optical characterization applications in both research and educational contexts.

# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>3</b>
1.1	Antecedentes	3
1.2	Justificación	7
1.3	Objetivos	8
1.3.1	Objetivo General:	8
1.3.2	Objetivos Específicos:	8
1.4	Estructura del documento	9
<b>2</b>	<b>Marco Téorico</b>	<b>10</b>
2.1	Ondas electromagnéticas	10
2.2	Interacción de la luz en la materia	12
2.3	Polarización de la luz	13
2.3.1	Polarizaciones elíptica, circular y lineal	14
2.4	Procesos para obtener luz polarizada	15
2.5	Descripción matricial de la polarización.	17
2.5.1	Matrices de Mueller.	19
2.5.2	Descripción del diseño óptico mecánico.	24
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>27</b>
3.1	Elementos utilizados para la elaboración del sistema de posicionamiento angular	27
3.1.1	Fuente de luz	27
3.1.2	Motores	28
3.1.3	Polarizadores	28
3.1.4	Retardadores	28
3.1.5	Fotodetector	29
3.1.6	Tarjeta de control / adquisición	29
3.1.7	Drive para el control del motor	29
3.1.8	Panel táctil	30
3.2	Descripción del arreglo óptico	30
3.2.1	Diseño e impresión del dispositivo	31

3.2.2	Arreglo electrónico-mecánico . . . . .	38
3.2.3	Programación del dispositivo . . . . .	44
3.2.4	Diseño de la interfaz del usuario . . . . .	46
3.2.5	Estados de polarización . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>51</b>
4.1	Sistema mecatrónico funcional . . . . .	51
4.2	Condiciones de iniciales . . . . .	53
4.3	Proceso de adquisición . . . . .	54
4.4	Muestras analizadas . . . . .	56
4.4.1	Aire . . . . .	57
4.4.2	Polarizador lineal a $0^\circ$ . . . . .	59
4.4.3	Polarizador lineal a $45^\circ$ . . . . .	60
4.4.4	Polarizador lineal a $90^\circ$ . . . . .	60
4.4.5	Polarizador lineal a $-45^\circ$ . . . . .	61
4.4.6	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $0^\circ$ . . . . .	62
4.4.7	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $45^\circ$ . . . . .	64
4.4.8	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $90^\circ$ . . . . .	65
4.4.9	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $-45^\circ$ . . . . .	65
4.4.10	Lámina de retardo $\lambda/2$ WPH10M-780 . . . . .	66
4.4.11	Agua destilada . . . . .	68
4.4.12	Polarizador lineal a $0^\circ$ y Lámina de retardo $\lambda/4$ a $-45^\circ$ . . . . .	69
4.4.13	Polarizador lineal a $45^\circ$ y Lámina de retardo $\lambda/4$ a $0^\circ$ . . . . .	70
4.4.14	Polarizador lineal a $90^\circ$ y Lámina de retardo $\lambda/4$ a $45^\circ$ . . . . .	71
4.4.15	Polarizador lineal a $-45^\circ$ y Lámina de retardo $\lambda/4$ a $90^\circ$ . . . . .	72
4.4.16	Polarizador lineal a $0^\circ$ y Lámina de retardo $\lambda/4$ a $45^\circ$ . . . . .	73
4.4.17	Polarizador lineal a $45^\circ$ y Lámina de retardo $\lambda/4$ a $90^\circ$ . . . . .	74
4.4.18	Polarizador lineal a $90^\circ$ y Lámina de retardo $\lambda/4$ a $-45^\circ$ . . . . .	75
4.4.19	Polarizador lineal a $-45^\circ$ y Lámina de retardo $\lambda/4$ a $0^\circ$ . . . . .	76
4.4.20	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $45^\circ$ y polarizador lineal a $0^\circ$ . . . . .	77
4.4.21	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $90^\circ$ y polarizador lineal a $45^\circ$ . . . . .	78
4.4.22	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $-45^\circ$ y polarizador lineal a $90^\circ$ . . . . .	79
4.4.23	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $0^\circ$ y polarizador lineal a $-45^\circ$ . . . . .	80
4.4.24	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $-45^\circ$ y polarizador lineal a $0^\circ$ . . . . .	81
4.4.25	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $0^\circ$ y polarizador lineal a $45^\circ$ . . . . .	82
4.4.26	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $45^\circ$ y polarizador lineal a $90^\circ$ . . . . .	83
4.4.27	Lámina de retardo $\lambda/4$ a $90^\circ$ y polarizador lineal a $-45^\circ$ . . . . .	84

---

4.4.28 Lámina de retardo de $\lambda/4$ a $45^\circ$ , polarizador lineal a $0^\circ$ y Lámina de retardo de $\lambda/4$ a $-45^\circ$ . . . . .	85
4.4.29 Lámina de retardo de $\lambda/4$ a $-45^\circ$ , polarizador lineal a $0^\circ$ y Lámina de retardo de $\lambda/4$ a $45^\circ$ . . . . .	86
<b>5 Conclusiones y trabajo a futuro</b>	<b>88</b>
5.1 Conclusiones y observaciones . . . . .	88
5.2 Trabajo a Futuro . . . . .	89
<b>Bibliografía</b>	<b>95</b>
<b>A Especificaciones Técnicas del Equipo.</b>	<b>96</b>
A.1 Láser He-Ne HRR170. . . . .	96
A.2 Motor paso a paso hibrido, Nema 17HS08-1004S STEPPERINLINE. . . . .	97
A.3 LPVIS100-MP - Polarizador lineal SM1 de $\varnothing$ 25,0 mm, 550 - 1500 nm . . . . .	98
A.4 PDA36A - Detector de ganancia conmutable Si . . . . .	99
A.5 Modulo ESP32-WROOM-32 . . . . .	101
A.6 Drive TMC2208-V3.0 BIGTREETECH. . . . .	102
A.7 Pantalla táctil HMI Nextion de 4,3", NX4827K043. . . . .	103

# Índice de tablas

Tabla 0.0.1	Glosario de abreviaturas y símbolos empleados en el desarrollo del sistema.	1
Tabla 2.4.1	Ventajas y desventajas de los procesos de obtención de polarización. . .	18
Tabla 2.5.1	Vectores de Stokes para algunos estados de polarización. . . . .	19
Tabla 3.2.1	Combinación de estados de polarización lineal en el SOE y en el SOS. .	49
Tabla 3.2.2	Combinación de estados de polarización lineal y circular. . . . .	50
Tabla 3.2.3	Combinación de estados de circular. . . . .	50
Tabla 4.4.1	Matriz de Mueller para el aire a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.	57
Tabla 4.4.2	Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una muestra (aire) en diferentes días. . . . .	58
Tabla 4.4.3	Matriz de Mueller para un polarizador a $0^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	59
Tabla 4.4.4	Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $0^\circ$ en diferentes días. . . . .	59
Tabla 4.4.5	Matriz de Mueller de un polarizador a $45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	60
Tabla 4.4.6	Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $45^\circ$ en diferentes días. . . . .	60
Tabla 4.4.7	Matriz de Mueller de un polarizador a $90^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	61
Tabla 4.4.8	Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $90^\circ$ en diferentes días. . . . .	61
Tabla 4.4.9	Matriz de Mueller de un polarizador a $-45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	62

Tabla 4.4.10 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $-45^\circ$ en diferentes días. . . . .	62
Tabla 4.4.11 Matriz de Mueller de un retardador de cuarto de onda a $0^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	63
Tabla 4.4.12 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $0^\circ$ en diferentes días. . . . .	63
Tabla 4.4.13 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	64
Tabla 4.4.14 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ en diferentes días. . . . .	64
Tabla 4.4.15 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $90^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	65
Tabla 4.4.16 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $90^\circ$ en diferentes días. . . . .	65
Tabla 4.4.17 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	66
Tabla 4.4.18 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ en diferentes días. . . . .	66
Tabla 4.4.19 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de media onda a 780 nm, retardando a $224.7^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	67
Tabla 4.4.20 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de media onda en diferentes días. . . . .	68
Tabla 4.4.21 Matriz de Mueller del agua destilada, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	68
Tabla 4.4.22 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller del agua destilada en diferentes días. . . . .	69
Tabla 4.4.23 Matriz de Mueller de un polarizador lineal a $0^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	69
Tabla 4.4.24 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $0^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ , en diferentes días. . . . .	70

Tabla 4.4.25 Matriz de Mueller de un polarizador lineal a $45^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $0^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. .	70
Tabla 4.4.26 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $45^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $0^\circ$ , en diferentes días.	71
Tabla 4.4.27 Matriz de Mueller de un polarizador lineal a $90^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. .	71
Tabla 4.4.28 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $90^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ , en diferentes días.	72
Tabla 4.4.29 Matriz de Mueller de un polarizador lineal a $-45^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $90^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. .	72
Tabla 4.4.30 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $-45^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $90^\circ$ , en diferentes días.	73
Tabla 4.4.31 Matriz de Mueller de un polarizador lineal a $0^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. .	73
Tabla 4.4.32 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $0^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ , en diferentes días.	74
Tabla 4.4.33 Matriz de Mueller de un polarizador lineal a $45^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $90^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. .	74
Tabla 4.4.34 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $45^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $90^\circ$ , en diferentes días.	75
Tabla 4.4.35 Matriz de Mueller de un polarizador lineal a $90^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. .	75
Tabla 4.4.36 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $90^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ , en diferentes días.	76
Tabla 4.4.37 Matriz de Mueller de un polarizador lineal a $-45^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $0^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. .	76
Tabla 4.4.38 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a $-45^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $0^\circ$ , en diferentes días.	77

Tabla 4.4.39 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ y polarizador lineal a $0^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . .	77
Tabla 4.4.40 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ y polarizador lineal a $0^\circ$ , en diferentes días. . . .	78
Tabla 4.4.41 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $90^\circ$ y polarizador lineal a $45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . .	78
Tabla 4.4.42 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $90^\circ$ y polarizador lineal a $45^\circ$ , en diferentes días. . .	79
Tabla 4.4.43 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ y polarizador lineal a $90^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . .	79
Tabla 4.4.44 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ y polarizador lineal a $90^\circ$ , en diferentes días. . .	80
Tabla 4.4.45 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $0^\circ$ y polarizador lineal a $-45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . .	80
Tabla 4.4.46 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $0^\circ$ y polarizador lineal a $-45^\circ$ , en diferentes días. . .	81
Tabla 4.4.47 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ y polarizador lineal a $0^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . .	81
Tabla 4.4.48 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ y polarizador lineal a $0^\circ$ , en diferentes días. . .	82
Tabla 4.4.49 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $0^\circ$ y polarizador lineal a $45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . .	82
Tabla 4.4.50 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $0^\circ$ y polarizador lineal a $45^\circ$ , en diferentes días. . . .	83
Tabla 4.4.51 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ y polarizador lineal a $90^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . .	83
Tabla 4.4.52 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ y polarizador lineal a $90^\circ$ , en diferentes días. . .	84

Tabla 4.4.53 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $90^\circ$ y polarizador lineal a $-45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	84
Tabla 4.4.54 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda $90^\circ$ y polarizador lineal a $-45^\circ$ , en diferentes días. . . . .	85
Tabla 4.4.55 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ , un polarizador lineal a $0^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	85
Tabla 4.4.56 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ , un polarizador lineal a $0^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ , en diferentes días. . . . .	86
Tabla 4.4.57 Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ , un polarizador lineal a $0^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal. . . . .	86
Tabla 4.4.58 Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a $-45^\circ$ , un polarizador lineal a $0^\circ$ y una lámina de retardo de cuarto de onda a $45^\circ$ , en diferentes días. . . . .	87
Tabla A.1.1 Especificaciones del láser He-Ne de Thorlabs. . . . .	97
Tabla A.2.1 Especificaciones del motor Nema 17 de STEPPERONLINE y secuencia de avance. . . . .	98
Tabla A.3.1 Especificaciones del Polarizador lineal LPVIS100-MP de Thorlabs. . . . .	99
Tabla A.4.1 Especificaciones del Detector PDA36A de Thorlabs. . . . .	100
Tabla A.5.1 Especificaciones del Módulo ESP32-WROOM-32. . . . .	102
Tabla A.6.1 Especificaciones del TMC2208-V3.0. . . . .	103
Tabla A.7.1 Especificaciones de la pantalla táctil NX4827K043. . . . .	104

## Índice de figuras

Figura 2.1.1 Visualización de una onda electromagnética como ondas planas. . . . .	11
Figura 2.1.2 Onda electromagnética y sus componentes. . . . .	12

Figura 2.2.1	Interacción de la luz con un medio material $M$ . La fuente de luz ( $FL$ ) emite un haz incidente que, al alcanzar la interfaz aire-material, puede dividirse en diferentes componentes: $Re$ , luz reflejada externamente en la superficie del material (reflexión especular); $Rf$ , luz refractada que penetra al interior del medio; $Ri$ , luz que sufre reflexión interna tras alcanzar una segunda interfaz dentro del material; $T$ , luz transmitida que atraviesa completamente el medio; $E$ , luz esparcida dentro del material debido a irregularidades, partículas o estructuras microscópicas; y $A$ , luz absorbida por el medio, cuya energía se convierte en calor u otros procesos internos. . . . .	13
Figura 2.3.1	Elipse de polarización. . . . .	14
Figura 2.3.2	Luz elípticamente polarizada. . . . .	15
Figura 2.4.1	Ley de Malus. . . . .	16
Figura 2.5.1	Sistema óptico experimental utilizado para medir todos los elementos de la Matriz Mueller. . . . .	20
Figura 2.5.2	Los 16 elementos de la Matriz de Mueller para un polarizador lineal como muestra en función del ángulo del eje de transmisión $\theta$ . . . . .	22
Figura 2.5.3	Los 16 elementos de la Matriz de Mueller para una lámina de retardo $\lambda/4$ como muestra en función del ángulo del eje de transmisión $\theta$ . . . . .	23
Figura 2.5.4	Polarímetros de elementos rotativos. P es un polarizador, A es un analizador, R es un retardador y S es la muestra. Los elementos medidos de la Matriz de Mueller se indican con puntos grandes. . . . .	25
Figura 2.5.5	Polarímetros de modulación de fase. Un polarímetro de modulador de fase/modulador de fase se muestra en (a); un polarímetro de doble modulador de fase se muestra en (b). . . . .	25
Figura 3.2.1	Arreglo óptico del polarímetro. . . . .	30
Figura 3.2.2	Parámetros resultantes en el software de inventor para el diseño del mecanismo de posicionamiento. . . . .	32
Figura 3.2.3	Captura de forma dinámica de la intensidad en un arreglo de dos polarizadores. . . . .	33
Figura 3.2.4	Ensamble de las piezas diseñadas en SolidWorks para un módulo de posicionamiento óptico. . . . .	34

Figura 3.2.5	Estructura de un módulo de posicionamiento: 1) Compartimento para el control del motor, 2) Compartimento para el sensor de posición inicial, 3) Eje principal del haz y soporte para el rodamiento, 4) Engrane, 5) Rodamiento para el engrane, 6) Tuerca de seguridad, 7) Base para posicionar el soporte del elemento óptico, 8) Base para el elemento óptico adaptable, 9) Elemento óptico, 10) Rodamiento para el tornillo sin fin, 11) Eje de alineamiento del sistema, 12) Tornillo sin fin y 13) Motor Nema 17. . . . .	35
Figura 3.2.6	Estructura y piezas diseñadas para a) el módulo porta muestra y fuente de alimentación, b) sensor de adquisición. . . . .	36
Figura 3.2.7	Ensamble del modelo final para sistema de posicionamiento óptico diseñado en SolidWorks. . . . .	37
Figura 3.2.8	Captura del pieza diseñada y elaborada en una impresora 3D. . . . .	38
Figura 3.2.9	Primer diseño electrónico para el posicionamiento preciso del motor. . . . .	40
Figura 3.2.10	Diseño electrónico para el control del motor mediante instrucciones con un panel táctil. . . . .	41
Figura 3.2.11	Diseño electrónico final utilizado con conexión para un solo módulo de posicionamiento. . . . .	42
Figura 3.2.12	Diseño del PCB utilizado para cada placa utilizada: a) Diseño para la fuente de alimentación, b) controlador para el motor y distribución para el sensor de posición inicial, c) placa para el sensor CNY70, d) placa de distribución de conexiones y tarjeta principal de control y e) PCB impreso (vista superior). . . . .	44
Figura 3.2.13	Proceso de captura de la Matriz de Mueller con el dispositivo. . . . .	45
Figura 3.2.14	Interfaz del usuario diseñada en Nextion Editor: a) menú principal, b) pantalla de alineación para la muestra. . . . .	47
Figura 3.2.15	Interfaz del usuario diseñada en Nextion Editor: a) pantalla de adquisición de datos y b) pantalla de cálculo de la Matriz de Mueller. . . . .	48
Figura 4.1.1	Sistema de posicionamiento de elementos ópticos funcional, a) Vista frontal de un módulo con todos los elementos ensamblados, b) Vista del sistema ensamblado, con el primer módulo sin cubierta y saliente de la pantalla, c) Vista del sistema sin cubierta en el primer módulo y saliente de la fuente de alimentación y d) Captura del sistema con el láser acoplado en la cubierta del primer módulo, con el eje de alineación y pantalla encendida, sin cubierta en la porta muestra. . . . .	52
Figura 4.4.1	Escalas utilizadas para visualizar los resultados en términos de intensidad de luz. . . . .	56

Figura 4.4.2	Grafica de retardo aplicado por un retardador de media de onda de 780 nm, de acuerdo con la longitud de onda. . . . .	67
Figura A.1.1	Laser He-Ne de Thorlabs [1]. . . . .	96
Figura A.2.1	Motor 17HS08-1004S [2]. . . . .	98
Figura A.3.1	a) Polarizador lineal LPVIS100-MP, b) grafica de transmisión y extinción del haz de acuerdo con la longitud de onda de la fuente [3]. . . .	99
Figura A.4.1	a) Detector PDA36A, b) grafica de la curva de respuesta del sensor, de acuerdo con la longitud de onda [4]. . . . .	100
Figura A.5.1	Modulo ESP32-WROOM-32 [5]. . . . .	101
Figura A.6.1	a) Modulo TMC2208-V3.0 de BIGTREETECH, b) terminales del módulo y c) tabla de conexiones para seleccionar el modo de trabajo [6]. . .	103
Figura A.7.1	Pantalla táctil HMI Nextion de 4,3”, NX4827K043, a) Vista frontal, b) vista posterior [7]. . . . .	104

## Glosario de Abreviaturas y Símbolos

**Tabla 0.0.1:** Glosario de abreviaturas y símbolos empleados en el desarrollo del sistema.

Símbolo / Abreviatura	Descripción
$\lambda$	Longitud de onda (generalmente en nanómetros, nm).
$\lambda/4$	Lámina de retardo de cuarto de onda (introduce un desfase de $90^\circ$ entre componentes ortogonales).
$\lambda/2$	Lámina de retardo de media onda (introduce un desfase de $180^\circ$ ).
$\theta$	Ángulo de orientación de un elemento óptico respecto a un eje de referencia.
$B$	Campo magnético.
$E$	Campo eléctrico.
$\vec{P}$	Vector de Poynting (vector de propagación de los campos B y E).
$\varepsilon_0$	Permitividad dieléctrica del vacío.
$\mu_0$	Permeabilidad magnética del vacío.
$I$	Intensidad luminosa detectada.
$S$	Vector de Stokes, compuesto por cuatro parámetros: $S_0, S_1, S_2, S_3$ .
$S_0$	Componente total de la intensidad de luz.
$S_1$	Diferencia de intensidad entre polarización horizontal y vertical.
$S_2$	Diferencia de intensidad entre polarización a $+45^\circ$ y $-45^\circ$ .
$S_3$	Diferencia de intensidad entre polarización circular derecha e izquierda.
MM	Matriz de Mueller $4 \times 4$ que describe el efecto de un sistema óptico sobre el estado de polarización.
$h, v$	Polarización linealmente horizontal y vertical, respectivamente.
$+, -$	Polarización lineal a $45^\circ$ y $-45^\circ$ , respectivamente.
$r, l$	Polarización circular a la derecha e izquierda, respectivamente.

Símbolo / Abreviatura	Descripción
OEM	Onda Electromagnética.
SOE, SOS	Sistema óptico de entrada, Sistema óptico de salida.
CAD	Diseño Asistido por Computadora (Computer-Aided Design).
3D	Tres Dimensiones.
HMI	Interfaz Hombre-Máquina (Human-Machine Interface).
PCB	Placa de Circuito Impreso (Printed Circuit Board).
ESP32	Microcontrolador de 32 bits con conectividad Wi-Fi y Bluetooth.
PEM	Modulador Fotoelástico (Photo-Elastic Modulator).
FPGA	Matriz de puertas lógicas programable en campo (field-programmable gate array).
DAQ	Tarjeta de Adquisición de Datos (Data Acquisition).
PWM	Modulación por Ancho de Pulso (Pulse Width Modulation).
SAH	Muestreo Y Retención (Sample And Hold).
GUI	Interfaz Gráfica de Usuario (Graphical User Interface).
$\bar{e}$	Error promedio.
$m_{ij}$	Elemento de la Matriz de Mueller.
$\mu\text{m}$	Micrómetro ( $10^{-6}$ metros).
nm	Nanómetro ( $10^{-9}$ metros).
Hz	Hertz, unidad de frecuencia (ciclos por segundo).
rpm	Revoluciones por minuto.
mW	Milivati, unidad de potencia ( $10^{-3}$ vatios).

---

## Capítulo 1

---

# Introducción

En este primer capítulo se presenta un panorama general del diseño de un sistema mecatrónico programable para la caracterización y el control angular independiente de elementos ópticos en tándem con la finalidad de obtener características ópticas de muestras translúcidas. También se presenta la justificación del trabajo y sus objetivos.

### 1.1. Antecedentes

Las teorías sobre la naturaleza de la luz han sido objeto de estudio por pensadores y filósofos, desde la antigüedad hasta el siglo XXI. Antes de cristo, egipcios y griegos realizaron estudios básicos sobre el comportamiento de la luz y sus aplicaciones rudimentarias.

Después de cristo, en el siglo XVII, Galileo Galilei, contribuyó a la astronomía y la física e importantes observaciones sobre la luz influyendo indirectamente su comprensión y su propagación. Johannes Kepler, explicó cómo funcionan las lentes y la formación de imágenes en el ojo. Willebrord Snellius (Snell), descubrió la ley de la refracción cuando la luz cambia de dirección al pasar de un medio a otro. René Descartes, propuso una teoría de la luz como partículas que se propagan a través de un medio [8]. Pierre de Fermat, formuló el principio que establece que la luz recorre el camino más corto y en menor tiempo. Isaac Newton, demostró que la luz blanca está compuesta por una gama de colores mediante su experimento del prisma y propuso la teoría corpuscular de la luz [9]. Christiaan Huygens, propuso la teoría ondulatoria de la luz que la describe como onda que se propagan a través de un medio [10].

Aunque el siglo XVIII tuvo avances en óptica, muchos de los trabajos más importantes sobre la naturaleza de la luz se concentraron en los siglos anteriores y posteriores.

En el siglo XIX, Thomas Young, demostró el principio de interferencia de la luz. Augustin-Jean Fresnel, desarrolló la teoría ondulatoria de la luz, explicando fenómenos como la difracción [11]. Étienne-Louis Malus, descubrió la polarización de la luz por reflexión [12]. Hippolyte Fizeau, midió la velocidad de la luz en el aire. Léon Foucault, midió la velocidad de la luz en el agua y demostró que es menor que en el aire. Michael Faraday, descubrió la relación entre la luz y el magnetismo (efecto Faraday) [13]. James Clerk Maxwell, formuló las ecuaciones de Maxwell, que describen la luz como una onda electromagnética [14]. Heinrich Hertz, demostró experimentalmente la existencia de ondas electromagnéticas. George Biddell Airy, realizó estudios sobre la aberración de la luz. Hendrik Lorentz desarrolló la teoría electrónica de la luz. Albert Michelson, realizó el experimento de Michelson-Morley, que tuvo un impacto significativo en la teoría de la relatividad. Edward Morley, fue colaborador de Michelson en el experimento ya mencionado. George Gabriel Stokes, realizó contribuciones a la polarización y la fluorescencia [15]. Joseph Von Fraunhofer, descubrió las líneas de Fraunhofer en el espectro solar. Lord Rayleigh, realizó contribuciones a la dispersión de la luz.

En el siglo XX, Max Planck, propuso la teoría cuántica de la luz (fotones) [16]. Albert Einstein, explicó el efecto fotoeléctrico y desarrolló la teoría de la relatividad, que transformó nuestra comprensión de la luz y el espacio-tiempo. Niels Bohr, realizó estudios sobre la estructura atómica y la emisión de luz. Arthur Compton, demuestra la naturaleza de partícula de la luz. Charles Hard Townes, es el inventor del máser y el láser [17]. Theodore Maiman, construyó el primer láser. Roy J. Glauber, hizo contribuciones a la óptica cuántica.

En el siglo XXI, Nathalie Picqué, realizó contribuciones en el campo de la espectroscopia de peine de frecuencias. John L. Hall y Theodor W. Hänsch, desarrollaron la espectroscopia de peine de frecuencias, permitiendo mediciones de frecuencia óptica de alta precisión. Donna Strickland y Gérard Mourou, desarrollaron un método para generar pulsos de láser de alta intensidad [18]. Mikhail Lukins conocido por su trabajo pionero en óptica cuántica y física atómica, especialmente en el campo de la computación cuántica y la manipulación de la luz a nivel cuántico.

El siglo XX fue testigo de una revolución en la instrumentación científica, impulsada por avances en óptica, electrónica y, más tarde en mecatrónica. En el campo de la polarimetría, esto se tradujo en la transición de instrumentos manuales a sistemas automatizados, de alta precisión y fáciles de usar.

Los polarímetros modernos utilizan detectores electrónicos como fotodiodos que permitió mediciones de intensidad de luz más precisas y sensibles; los sistemas de amplificación y control facilitaron la conversión de señales ópticas en datos digitales y el software de adquisición de datos facilitó la conversión de señales ópticas en información digital y su análisis de datos complejos.

Los motores paso a paso y los servomotores permitieron el control preciso del posicionamiento angular de polarizadores de alta calidad y láminas de cuarto de onda de alta precisión. Los sistemas de retroalimentación y control permitieron la automatización de mediciones y la compensación de errores. El diseño de sistemas mecatrónicos integrados permitió la miniaturización y la portabilidad de los polarímetros que utilizan fuentes de luz láser que proporcionan luz polarizada con alta intensidad y coherencia.

Los polarímetros son instrumentos ópticos que miden el ángulo de rotación de la luz polarizada al pasar a través de una sustancia ópticamente activa. La rotación óptica es una propiedad de las moléculas quirales, que son moléculas que no son superponibles con su imagen especular.

La polarimetría se utiliza en una amplia gama de aplicaciones en: la Química, para la determinación de la concentración y la pureza de sustancias ópticamente activas; la Biología, para el estudio de la estructura y la función de biomoléculas; la Medicina, para el diagnóstico de enfermedades y el seguimiento de tratamientos; la Industria, para el control de calidad de productos ópticos y materiales; la Teledetección, para la caracterización de superficies y atmósferas. Finalmente, las tendencias en polarimetría incluyen: El desarrollo de polarímetros miniaturizados y portátiles para aplicaciones de campo; la integración de polarímetros con otros sensores y sistemas de imagen y en el uso de la polarimetría para la caracterización de materiales nanoestructurados.

En el ámbito de la investigación se han propuesto una variedad de arreglos ópticos, muchos de los cuales se basan en el formalismo matemático de Stokes-Mueller. A continuación, se mencionan algunos de los trabajos desarrollados en los últimos años que destacan la importancia y versatilidad de estas técnicas.

En el año 2009, Nirmalya Ghosh propuso una metodología de descomposición de la matriz de Mueller para aplicaciones biomédicas, como el monitoreo de cambios en los tejidos miocárdicos y mediciones de glucosa en la sangre [19,20]. En 2015, Y. Wang presentó un microscopio de luz polarizada basado en imágenes de matriz de Mueller, que incluye un generador y analizador de estados de polarización, utilizado para examinar tejidos cancerosos de cuello uterino e hígado humanos con fibrosis [21].

En 2016, Y. Wang complementó su trabajo anterior con el fin de lograr una detección por etapas de muestras patológicas de tejido hepático, desde cirrosis hasta el cáncer [22]. En 2018, el M. I. Cano Barrera implementó un microscopio para la medición cuantitativa de propiedades polarimétricas de muestras biológicas, utilizando los formalismos de Jones y Mueller [23].

Recientemente, en 2021, el equipo de trabajo de Huang desarrolló un dispositivo de matriz de Mueller basado en polarímetros de doble división de plano focal para la obtención de imágenes de polarización rápida, aplicado para sondear las propiedades de polarización de un frotis de

glóbulos rojos [24]. Además, se han realizado estudios para la inspección de tejidos vegetales, con el fin de obtener información sobre su estructura y organización celular [25].

Otra aplicación relevante de la instrumentación en esta rama es a través de endoscopios. En 2014, se adaptó un endoscopio estéreo para permitir la adquisición instantánea de imágenes y examinar los tejidos de interés [26]. Dos años después, Ji Qi presentó un endoscopio polarimétrico Mueller de alta definición, que aplica el formalismo de Stokes-Mueller y se utiliza para aplicaciones como el diagnóstico temprano de cáncer epitelial de amplio campo, detección de márgenes quirúrgicos y monitoreo de tejido [27].

En 2018, Yifan Fu desarrolló una estructura que permite medir la matriz de Mueller 3x3 de tejidos humanos ex-vivo, utilizando un generador de estados de polarización y el analizador en la misma base [28]. Recientemente, se ha elaborado un colposcopio utilizando el análisis de la luz polarizada, con el objetivo de ser una opción más accesible económicamente y portátil [29].

Además, se han realizado trabajos utilizando la polarimetría de Mueller mediante imágenes para el análisis de materia blanca cerebral sana y la detección de bordes de tumores cerebrales [30]. En el ámbito de la geología, la polarimetría se ha utilizado para el estudio de estructuras cristalinas [31]. En astronomía, la polarimetría es empleada para estudiar la transferencia radiactiva solar [32], elaborar aplicación en radiotelescopios [33] e indagar las propiedades de granos de polvo que causan dispersión y absorción en varios ambientes [34]. La actividad solar también es estudiada mediante el uso de polarímetros, aprovechando que está dominada por el análisis del campo magnético [35].

En la búsqueda de mejorar los dispositivos y sistemas existentes, varios investigadores han realizado contribuciones significativas en el campo de la polarimetría. Por ejemplo, en 2008, Rogelio Castro presentó un esparcómetro de resolución angular para el estudio de tejidos biológicos, utilizando el formalismo de Stokes-Mueller y moduladores fotoelásticos y polarizadores lineales [36]. En 2017, Castro retomó su trabajo y presentó un rediseño e implementación del software disponible para realizar el control de posición de manera remota, lo que permitió obtener una mejora en el diseño y la caracterización [37].

En 2018, Daniela Sotelo presentó un polarímetro dinámico para la caracterización de muestras translúcidas, que incluye un control desde Labview y Matlab y una visualización más amigable para el usuario [38]. En el mismo año, Daniel Berrones elaboró un sistema automatizado para controlar el perfil de intensidad de un espectro Raman al variar los estados de polarización del dispositivo para extraer características de algunos materiales [39].

En 2019, Pradipta Mukherjee propuso un polarímetro de matriz de Mueller completa, obtenida al combinar cuatro matrices parciales de Mueller de nueve elementos, girando placas de media onda en cuatro orientaciones dentro del diseño [40]. Dos años después, Bernard presentó

un polarímetro de bajo costo, utilizando una impresora 3D para construir la estructura [41]. En 2021, Wilkinson reportó un polarímetro basado en placa de onda giratoria, proporcionando un diseño compacto y utilizando un microcontrolador de Arduino [42]. En el mismo año, se presentó un polarímetro abierto, con un costo de 250 dólares y utilizando una impresora 3D, teniendo un dispositivo con un largo de 72 cm [43].

En el año 2023, se han realizado contribuciones en el campo de la biomedicina, específicamente en el análisis de la estructura secundaria de proteínas tumorales para la detección del cáncer de páncreas. Por ejemplo, se ha desarrollado un espectrómetro de dicroísmo elíptico portátil [44], que permite analizar características estructurales secundarias de la proteína tumoral. Además, Asha Adhiya ha presentado un dispositivo simple que permite obtener los estados de polarización posibles y utilizar el análisis de Stokes [45], este año se publicó el trabajo de Sara Peña en el libro de acta OPTOEL, el diseño que se presenta de un polarímetro de Stokes-Mueller, contiene bases del análisis de luz polarizada mediante una imagen en 2D captada por una cámara para el rango visible, donde los elementos ópticos utilizados para el generador de estados y analizador son semejantes al propuesto en este trabajo, logrando un error experimental de 10 % en toda la matriz [46].

La pandemia y sus variantes han generado complicaciones en los últimos años, lo que ha resaltado la importancia de comprender la virología del coronavirus a nivel estructural [47]. En este sentido, se ha demostrado el impacto que pueden tener las técnicas polarimétricas en el análisis de la estructura viral y la detección de enfermedades.

## 1.2. Justificación

En la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca (DICIS) se han diseñado y caracterizado dos versiones de polarímetros. La finalidad de ambos era obtener la característica óptica de una muestra utilizando el método de las 36 mediciones de acuerdo con el formalismo Stokes-Mueller. En ambos casos se utilizaron dos cabezas óptico-electrónicas con dos moduladores fotoelásticos asíncronos (PEM100 marca Hinds Instruments®)<sup>1</sup>. La sincronización de los dos PEM se realizó, en una primera versión, por medio de una FPGA Spartan-3<sup>2</sup>, y en la otra versión, por medio de una Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ) marca National Instruments® (NI) y programación en LabVIEW. Ambos dispositivos de control digital también se utilizaron para el control angular de motores de pasos y para la adquisición de datos a través de un fotodetector.

<sup>1</sup>El modelo PEM-100 ha sido sustituido por el fabricante por el modelo [PEM-200](#).

<sup>2</sup>El modelo Spartan-3 ha sido descontinuado por el fabricante y reemplazado por el modelo [Spartan-7](#).

Este trabajo propone utilizar la misma metodología de las 36 mediciones y el formalismo Stokes-Mueller por ser la más completa. La diferencia fundamental con las versiones anteriores es que el arreglo óptico no utilice los moduladores fotoelásticos y la tarjeta de adquisición de datos sino un arreglo discreto de dos polarizadores y dos láminas retardadoras por medio de un rediseño modular utilizando software de diseño CAD con el objetivo de hacer uso de una impresora 3D para la elaboración de los módulos y el mecanismo de posicionamiento angular. Además, se implementará un control digital independiente mediante una tarjeta digital y una pantalla táctil, lo que permitirá especificar las instrucciones para la medición y visualizar los resultados capturados por un fotodetector y compararlos con resultados propuestos por la literatura [38].

Finalmente, se pretende obtener un prototipo más compacto que utilice un programa propio sin depender de una computadora adicional, a diferencia del prototipo anterior, que depende de un monitor para exhibir los resultados y de un software controlado desde un ordenador para enviar las instrucciones.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo General:

Diseñar y construir un sistema electrónico-mecánico programable para el control angular de un prototipo óptico compuesto por una disposición en tándem de cuatro elementos, que incluya una fuente de luz monocromática, una base porta-muestras, un detector infrarrojo y una tarjeta de control con interfaz táctil, con el fin de realizar mediciones ópticas precisas y reproducibles mediante el formalismo de Stokes-Mueller.

### 1.3.2. Objetivos Específicos:

- Modelar en 3D y generar planos en 2D de las piezas del sistema utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD), para su posterior fabricación mediante impresión 3D.
- Ensamblar y ajustar mecánicamente cada módulo del sistema en tándem, así como realizar el alambrado y conexión de las tarjetas electrónicas necesarias para el control angular y adquisición de señales ópticas.

- Desarrollar y programar el firmware de las tarjetas digitales para controlar el posicionamiento angular de cada módulo, así como para la adquisición y procesamiento de la señal óptica detectada.
- Diseñar una interfaz gráfica de usuario que permita la programación, calibración, control del sistema y visualización de datos en una pantalla táctil de manera intuitiva y funcional.

## 1.4. Estructura del documento

Esta tesis se compone de cinco capítulos. En el Capítulo 2 se proporcionan los fundamentos teóricos básicos de electromagnetismo. El Capítulo 3 describe la metodología para el desarrollo experimental para llevar a cabo el control del arreglo propuesto. En el Capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos del sistema en muestras tanto caracterizadas como no caracterizadas y el margen de error presentado en las mediciones. Finalmente, en el Capítulo 5 se discuten las conclusiones del trabajo, así como recomendaciones y trabajos a futuro.

---

## Capítulo 2

---

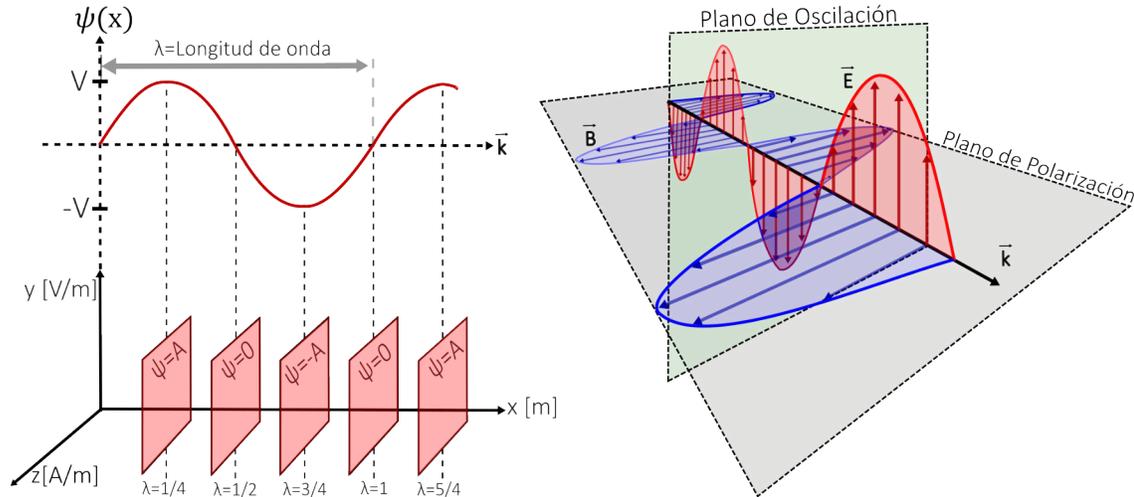
# Marco Téorico

Este Capítulo tiene el objetivo el de tratar conceptos de óptica, tales como: onda electromagnética e interacción con la materia, polarización, refracción, reflexión, esparcimiento, formalismo Stokes-Mueller, entre otros con el fin de facilitar la comprensión del presente trabajo.

En el Capítulo 1 se dio una reseña de la investigación sobre la naturaleza de la luz a lo largo de varios siglos, resaltando que en el siglo XIX fue crucial para la consolidación de la teoría ondulatoria de la luz gracias a los trabajos de Young, Fresnel y Maxwell, quien, con sus ecuaciones, demostró que la luz es una onda electromagnética, unificando así la óptica con el electromagnetismo. El siglo XX revolucionó la comprensión de la luz con la teoría cuántica, revelando su dualidad onda-partícula.

### 2.1. Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas (OEM) son transversales y se propagan en el vacío con una velocidad constante igual a la velocidad de la luz en el vacío ( $c = 3 \times 10^8$  m/s) y el medio de transmisión puede causar atenuación de ellas. Las ondas electromagnéticas transportan energía y momentum que se propaga en el espacio como resultado de la interacción entre los campos eléctrico y magnético. Los dos campos son perpendiculares entre sí y ambos perpendiculares a la dirección de propagación representada por el vector de unitario  $k$ .



**Figura 2.1.1:** Visualización de una onda electromagnética como ondas planas.

Las cuatro ecuaciones fundamentales en el vacío denominadas Ecuaciones de Maxwell establecen la relación entre el vector campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) y el vector campo magnético ( $\vec{B}$ ) se muestran en la Ecuación (2.1).

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0}; \\
 \nabla \cdot \vec{B} &= 0; \\
 \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\
 \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \left[ \vec{J}_c + \vec{J}_m + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right];
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

donde:  $\vec{E}$ , representa el vector de intensidad de campo eléctrico;  $\rho$ , la densidad volumétrica de carga eléctrica;  $\epsilon_0$ , la permitividad dieléctrica del vacío;  $\mu_0$ , la permeabilidad magnética del vacío;  $\vec{B}$ , es el vector inducción magnética;  $\vec{J}_c$ , es el vector de densidad de corriente eléctrica y  $\vec{J}_m$ , es el vector de densidad de corriente magnética.

Las Ecuaciones de Maxwell, nos muestran la relación entre el campo eléctrico ( $E$ ) y las cargas eléctricas, el campo magnético ( $B$ ) y las cargas en movimiento, un campo magnético variable en el tiempo genera un campo eléctrico y un campo eléctrico variable en el tiempo genera un campo magnético. Las componentes horizontal y vertical de una OEM plana se describen en las Ecuaciones (2.2) y (2.2), y su naturaleza periódica.

$$\vec{E}(z, t) = \hat{i} E_{max} \cos(kz - \omega t). \tag{2.2}$$

$$\vec{B}(z, t) = \hat{j}B_{max}\cos(kz - \omega t). \quad (2.3)$$

La Figura 2.1.2 muestra de forma gráfica cada componente y la dirección de su propagación.

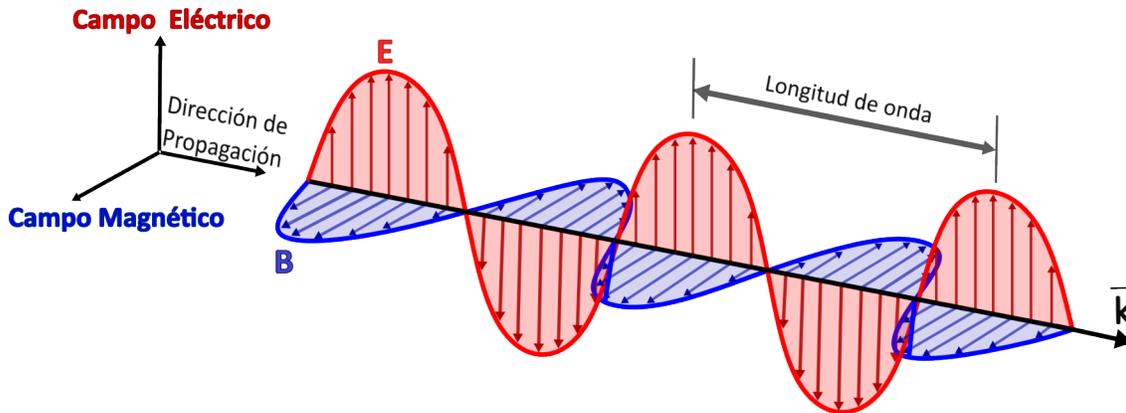


Figura 2.1.2: Onda electromagnética y sus componentes.

## 2.2. Interacción de la luz en la materia

Cuando la luz incide sobre un medio material (M), puede experimentar distintos procesos de interacción, tales como: Reflexión externa (Re), Esparcimiento (E), Absorción (A), Refracción (Rf), Reflexión interna (Ri) y Transmisión(T), como se ilustra en la Figura 2.2.1.

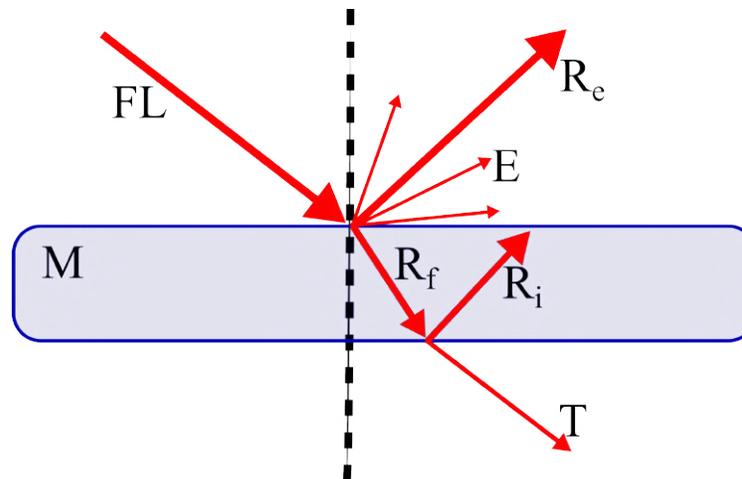
La energía que fluye a través del espacio como OEM es compartida por el campo eléctrico y el campo magnético. La energía transportada en la unidad de tiempo o expresada como la potencia por unidad de área cruzando una superficie cuya normal es paralela a la velocidad de propagación de la OEM se define como el vector de Poynting  $\vec{P}$  expresado en la Ecuación (2.4).

$$\vec{P} = \left(\frac{1}{\mu_0}\right) \vec{E} \times \vec{B} = c^2\epsilon_0\vec{E} \times \vec{B}. \quad (2.4)$$

La Irradiancia es la energía promedio por unidad de área y por unidad de tiempo que una OEM en forma de luz transfiere al incidir sobre una superficie. Esta magnitud es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico, como se muestra en la Ecuación (2.5).

$$I = \langle P \rangle_T = \frac{c\epsilon_0}{2} E_0^2 = \left(\frac{c}{\mu_0}\right) \langle B^2 \rangle_T = c\epsilon_0 \langle E^2 \rangle_T; \quad (2.5)$$

donde los paréntesis  $\langle \rangle_T$  indican un promedio en un intervalo T.



**Figura 2.2.1:** Interacción de la luz con un medio material  $M$ . La fuente de luz ( $FL$ ) emite un haz incidente que, al alcanzar la interfaz aire-material, puede dividirse en diferentes componentes:  $R_e$ , luz reflejada externamente en la superficie del material (reflexión especular);  $R_f$ , luz refractada que penetra al interior del medio;  $R_i$ , luz que sufre reflexión interna tras alcanzar una segunda interfaz dentro del material;  $T$ , luz transmitida que atraviesa completamente el medio;  $E$ , luz esparcida dentro del material debido a irregularidades, partículas o estructuras microscópicas; y  $A$ , luz absorbida por el medio, cuya energía se convierte en calor u otros procesos internos.

### 2.3. Polarización de la luz

En el espectro de la luz visible, el campo eléctrico presenta una intensidad significativamente mayor que el campo magnético. Como consecuencia, el campo eléctrico es considerado como el principal responsable de la interacción con la materia. Una onda luminosa está polarizada cuando el vector intensidad de campo eléctrico sigue una ley determinada, lo cual conduce a tener estados de polarización elíptica como un estado general y de la cual se desprenden los estados lineal y circular.

En este contexto, la dirección de la luz polarizada se define mediante la orientación del campo eléctrico. Esta relación entre el campo eléctrico y la polarización de la luz es fundamental para entender tanto fenómenos ópticos como sus aplicaciones en diversas áreas de la física y la ingeniería en varios métodos de diagnóstico no destructivo [48] aplicado a muestras de manera que los estados de polarización pueden ser la base del estudio óptico en diversos tipos de materiales [22].

### 2.3.1. Polarizaciones elíptica, circular y lineal

La polarización lineal y circular son casos especiales resultantes de la polarización elíptica, al menos por su descripción matemática. En general, las componentes del campo eléctrico vertical y horizontal se expresan por las Ecuaciones (2.6) y (2.7).

$$E_x(z, t) = \hat{i}E_{x_{max}}\cos(kz - \omega t + \varepsilon_1). \tag{2.6}$$

$$E_y(z, t) = \hat{j}E_{y_{max}}\cos(kz - \omega t + \varepsilon_2). \tag{2.7}$$

Considerando las ecuaciones anteriores, el principio de superposición y que la diferencia entre las fases iniciales  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  de las dos componentes que se superponen es  $\varepsilon = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ , podemos combinarlas algebraicamente con ayuda de relaciones trigonométricas de senos y cosenos de la suma y resta de ángulos, obteniendo la Ecuación (2.8) .

$$\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos(\varepsilon) = \text{sen}^2(\varepsilon); \tag{2.8}$$

la cual es una ecuación de una elipse. Si la elipse forma un ángulo  $\alpha$  con el sistema coordenado, como se observa en la Figura 2.3.1 el ángulo se calcula de la Ecuación (2.9).

$$\tan(2\alpha) = \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos(\varepsilon)}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2}. \tag{2.9}$$

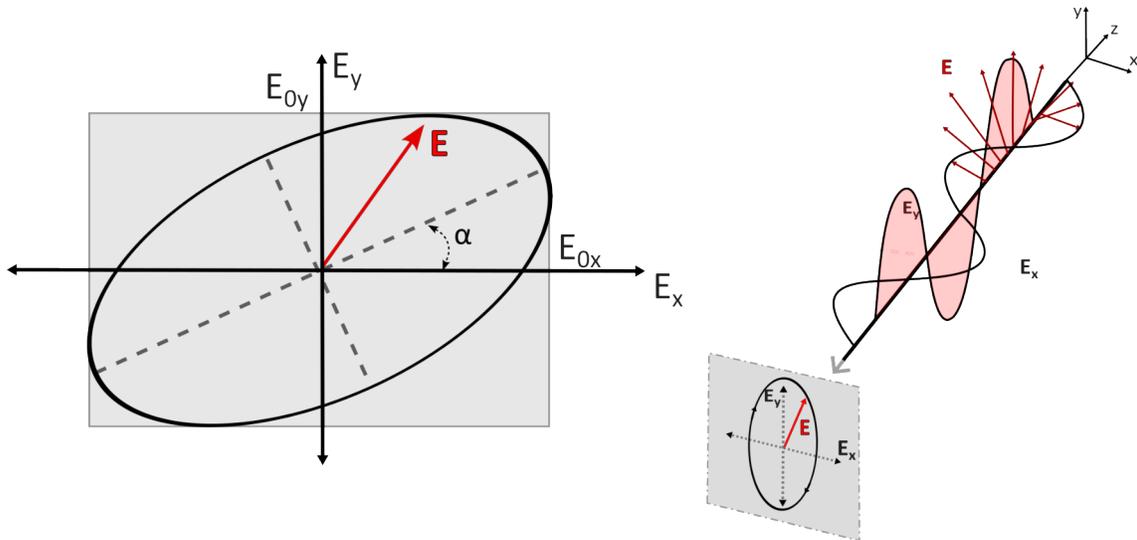


Figura 2.3.1: Elipse de polarización.

La Ecuación (2.8) es la representación general de la polarización de la luz a partir de la cual se puede derivar los estados de polarización lineal y circular.

Cuando  $\varepsilon = m\pi$ ,  $m \in \mathbb{Z}$  (números enteros)

$$\left(\frac{E_y}{E_x}\right) = \pm \left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}}\right). \tag{2.10}$$

Esta es la ecuación que describe a una línea recta de pendiente positiva o negativa por lo que la onda se dice que está linealmente polarizada cuando el vector intensidad de campo eléctrico describe una ley lineal en el plano de polarización.

Cuando  $\varepsilon = (2m + 1)\pi/2$ ,  $m \in \mathbb{Z}$  (números enteros)

$$\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 = 1. \tag{2.11}$$

Esta es la ecuación de una elipse. Bajo esta condición decimos que la luz está elípticamente polarizada. En el caso particular donde  $E_{0y} = E_{0x}$  estamos en presencia de la ecuación de una circunferencia y decimos que la luz se encuentra circularmente polarizada. Se observa de las Ecuaciones (2.10) y (2.11) que la elipse puede orientarse de varias formas dependiendo de los valores de las amplitudes de las componentes vertical y horizontal, así como del ángulo de orientación. Con las expresiones matemáticas y características de la polarización elíptica se logra obtener algunos de los casos de acuerdo con el desfase de las componentes como se muestra en la Figura 2.3.2.

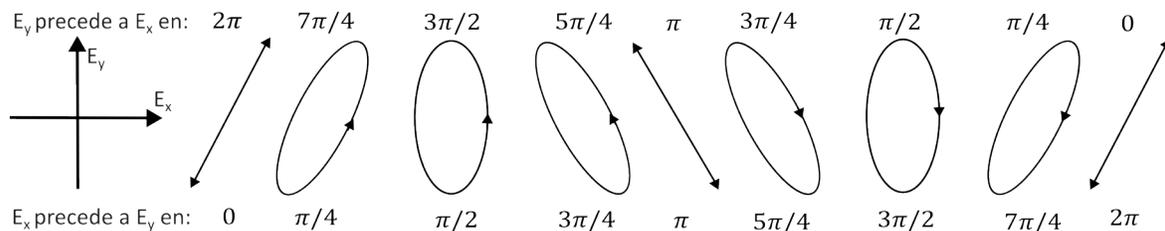


Figura 2.3.2: Luz elípticamente polarizada.

## 2.4. Procesos para obtener luz polarizada

Existen varias formas de obtener luz polarizada, las más comunes son: por reflexión, por difracción, por dispersión y por birrefringencia. Se puede observar las ventajas y desventajas de cada metodo en la Tabla 2.4.1.

- El dicroísmo es una propiedad óptica que presentan ciertos materiales, caracterizada por la existencia de coeficientes de absorción diferentes para la luz polarizada en direcciones perpendiculares. Esto permite que los materiales dicroicos absorban selectivamente la luz con vibraciones en el campo E a lo largo de una dirección específica, mientras que transmiten la luz a lo largo de una dirección perpendicular. Es importante destacar que el coeficiente de absorción de estos materiales es eficiente e independiente de la longitud de onda para la mayoría de los casos.

Para determinar la dirección de transmisión de un polarizador dicroico, se puede utilizar un segundo polarizador, denominado analizador. Al orientar el analizador a  $90^\circ$  con respecto al eje de transmisión del primer polarizador, se produce una extinción efectiva de la luz. Por el contrario, cuando los ejes de transmisión de ambos polarizadores coinciden, se obtiene la máxima transmisión de luz.

La relación entre la irradiancia transmitida y el ángulo relativo entre los ejes de transmisión de los polarizadores se describe mediante la ley de Malus, representado en la Figura 2.4.1. Esta ley establece que la irradiancia transmitida ( $I$ ) para cualquier ángulo relativo ( $\theta$ ) se puede calcular mediante la siguiente Ecuación:

$$I = I_0 \cos^2(\theta); \tag{2.12}$$

siendo  $I_0$  la intensidad máxima de la luz polarizada.

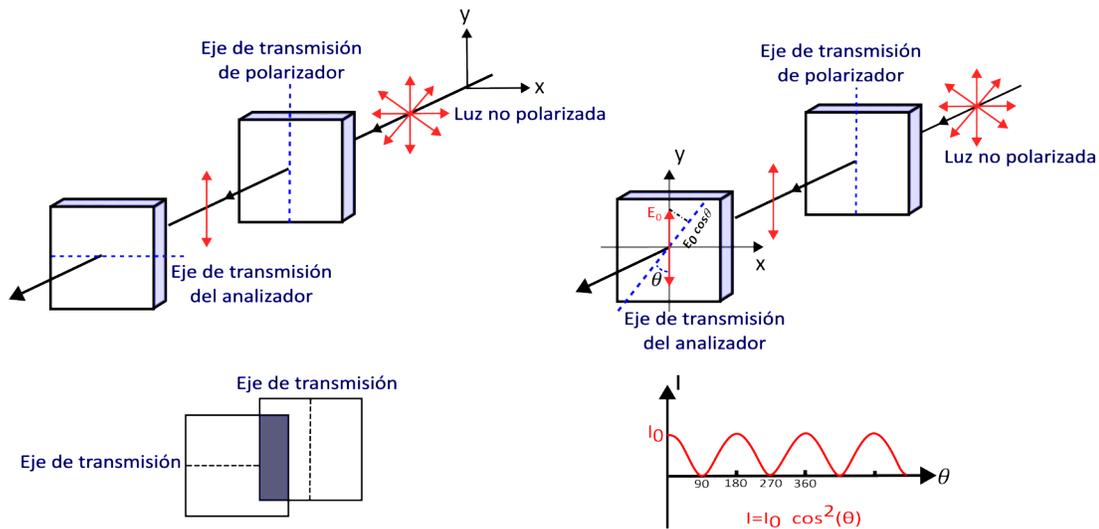


Figura 2.4.1: Ley de Malus.

- La reflexión de la luz en una superficie dieléctrica es un fenómeno común que puede inducir polarización. Si la onda incidente está compuesta por dos componentes ortogonales e incoherentes del campo eléctrico, solo la componente paralela al plano de incidencia se

ve afectada de forma particular. Cuando el ángulo entre la onda reflejada y la refractada es de  $90^\circ$ , la componente paralela al plano de incidencia no se refleja; solo se refleja la componente perpendicular al plano de incidencia, que es paralela a la superficie. El ángulo de incidencia para que esto ocurra se le llama ángulo de Brewster.

- La dispersión de la luz se refiere al proceso por el cual una onda incidente pierde energía debido a la interacción con partículas dispersantes, lo que conduce a la reemisión de la energía en múltiples direcciones. La dispersión de la luz por partículas pequeñas puede producir polarización de la luz, fenómeno que se debe a la interacción entre la luz y las partículas que la dispersan.

La eficiencia de la dispersión es mayor cuando los centros de dispersión son partículas cuyas dimensiones son pequeñas en comparación con la longitud de onda de la radiación incidente. En este caso, se habla de dispersión de Rayleigh. La ley de Rayleigh puede utilizarse para predecir la polarización de la luz dispersada, ya que la polarización se produce debido a que la luz dispersada en una dirección particular tiene una polarización diferente a la luz dispersada en otra dirección.

- La birrefringencia es un fenómeno que se produce en materiales anisotrópicos cristalinos, es decir, que tienen propiedades ópticas en diferentes direcciones. El material presenta dos índices de refracción para la luz polarizada, obteniéndose dos componentes con diferentes velocidades y direcciones de propagación.

## 2.5. Descripción matricial de la polarización.

Cuando la luz interactúa al propagarse a través de un medio, el estado de polarización, la intensidad y la dirección de propagación en el medio pueden cambiar y esto nos brinda información sobre las propiedades ópticas del medio [49].

En 1850, George Gabriel Stokes introdujo una representación matemática para describir los estados de polarización de la luz, conocida como formalismo de Stokes, la cual se muestra en la Ecuación (2.13). Esta representación es una alternativa para una descripción de luz incoherente y parcialmente polarizada en función de: las intensidades, del grado de polarización y de la forma de los parámetros de la elipse de polarización.

$$(S^x)_k^T = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]; \quad (2.13)$$

donde  $S_k$  representa a cada uno de los vectores de Stokes ( $k = 1, 2, 3, 4$ ) y T es la transpuesta de la matriz para presentar la ecuación matricial de manera horizontal. Para un haz monocromático,

**Tabla 2.4.1:** Ventajas y desventajas de los procesos de obtención de polarización.

Método de obtención	Ventajas	Desventajas
<b>Dicroísmo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo</li> <li>• Fácil de implementar</li> <li>• Alta relación de extinción (polarización eficaz)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perdida de intensidad significativa</li> <li>• Dependencia del ángulo de incidencia</li> <li>• Limitado rango de longitudes de onda</li> </ul>
<b>Reflexión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta eficiencia (poca perdida de intensidad)</li> <li>• Fácil de implementar</li> <li>• Bajo costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relación de extinción moderada (polarización parcial)</li> <li>• Dependencia del ángulo de incidencia</li> <li>• Limitado rango de longitudes de onda</li> </ul>
<b>Dispersión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta relación de extinción (polarización eficaz)</li> <li>• Amplio rango de longitudes de onda</li> <li>• No requiere ángulo de incidencia específico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complejo de implementar</li> <li>• Requiere precisión en la alineación</li> <li>• Alto costo</li> </ul>
<b>Birrefringencia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta relación de extinción (polarización eficaz)</li> <li>• Amplio rango de longitudes de onda</li> <li>• No requiere ángulo de incidencia específico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complejo de implementar</li> <li>• Dependencia del material utilizado</li> <li>• Alto costo</li> <li>• Requiere precisión en la alineación</li> </ul>

los parámetros de Stokes se expresan en función de magnitudes del campo eléctrico o de las intensidades por medio de las siguientes expresiones [50]:

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 = I_h + I_v; \tag{2.14}$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 = I_h - I_v; \tag{2.15}$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y}\cos(\alpha) = 2\sqrt{I_h I_v}\cos(\alpha); \tag{2.16}$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y}\sin(\alpha) = 2\sqrt{I_h I_v}\sin(\alpha); \tag{2.17}$$

donde  $I_h$  e  $I_v$  son la intensidad del haz en la dirección paralela (perpendicular) al plano de incidencia y  $\alpha$  indica la diferencia de fase entre las componentes vectoriales ortogonales del campo eléctrico.

En este formalismo, cualquier estado de polarización de la luz [40] (monocromática o cuasi-monocromática) puede ser representado por un vector de dimensión  $4 \times 1$ , conocido como vector de Stokes [51], [39]. Con el principio de conservación de energía, los parámetros de Stokes esparcidos (por reflexión o transmisión) obedecen la relación:

$$S_0^2 \geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2; \tag{2.18}$$

- $S_0$  representa la intensidad total de la luz, como se muestra en la Ecuación (2.14).
- $S_1$  describe la cantidad de polarización lineal horizontal (h) o vertical (v), como se indica en la Ecuación (2.15).
- $S_2$  describe la cantidad de polarización lineal a  $+45^\circ$  (+) o  $-45^\circ$  (-), según la Ecuación (2.16).
- $S_3$  describe la cantidad de polarización circular derecha (r) o izquierda (l) contenida en el haz, como se presenta en la Ecuación (2.17).

El vector columna de Stokes (S) en términos de intensidades ( $I_k$ ) son cantidades reales y las Ecuaciones (2.14)–(2.17) también se expresan de siguiente manera [52]:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_h + I_v \\ I_h - I_v \\ I_+ - I_- \\ I_r - I_l \end{bmatrix}; \tag{2.19}$$

donde los subíndices h, v, +, -, r y l fueron definidos anteriormente. Una representación de luz monocromática con polarización lineal y circular utilizando los vectores de Stokes es descrita en la siguiente Tabla 2.5.1 [53].

**Tabla 2.5.1:** Vectores de Stokes para algunos estados de polarización.

Estado de polarización	Horizontal (h)	Vertical (v)	$+45^\circ$ (+)	$-45^\circ$ (-)	Circular a la derecha (r)	Circular a la izquierda (l)
Vector de Stokes	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$

A continuación, se considerará la relación entre el vector de Stokes y la matriz de Mueller, introducida por el físico Hans Mueller en 1948.

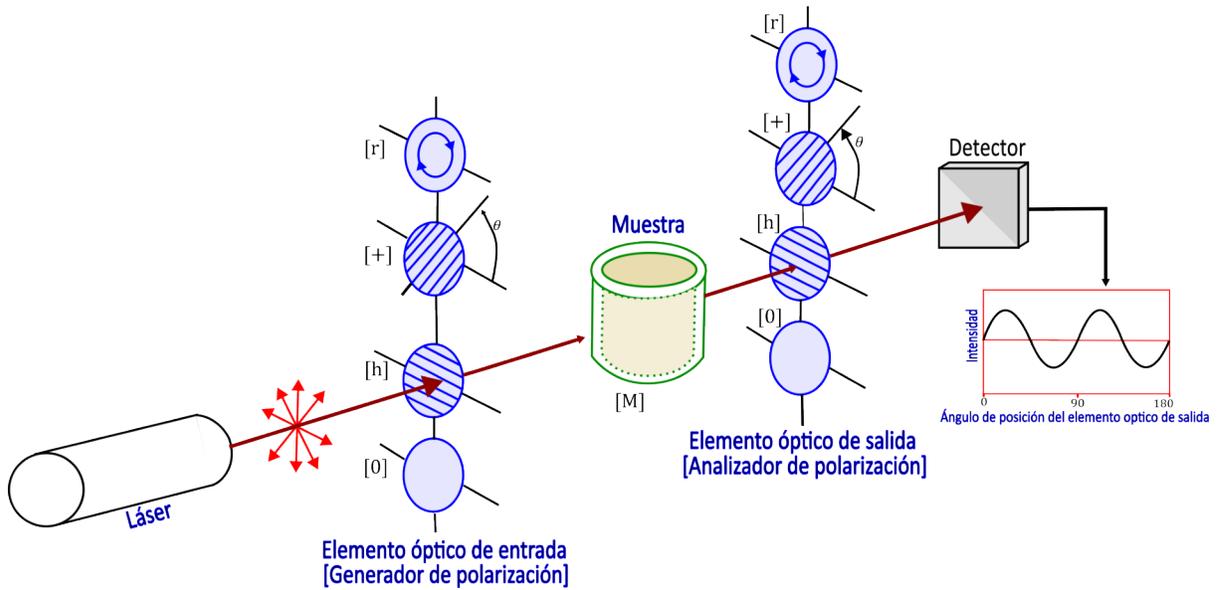
### 2.5.1. Matrices de Mueller.

El formalismo que explica como una interacción en un medio lineal de un vector de Stokes entrante ( $S$ ) a un vector de Stokes saliente ( $S'$ ), se llama la matriz de Mueller (**MM**) y se

representa por la Ecuación (2.20).

$$S' = M \cdot S = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix}; \quad (2.20)$$

donde M es una matriz de transformación de 4x4 y los vectores  $S_k$  y  $S'_k$  ( $k = 0,1,2,3$ ) son matrices de 4x1 respectivamente definidos anteriormente [50]. En el arreglo experimental de la Figura 2.5.1 se muestra la forma de interpretar y aplicar la Ecuación (2.20).



**Figura 2.5.1:** Sistema óptico experimental utilizado para medir todos los elementos de la Matriz Mueller.

Cuando un tipo de luz no polarizada pasa a través de un elemento óptico cuya salida es un tipo de luz polarizada lo definimos como un polarizador y cuando una luz polarizada pasa a través de un elemento óptico que provoca un retraso de fase de alguna de las dos componentes coherentes entonces tendremos un retardador de onda completa, de media onda o de un cuarto de onda.

De la Figura 2.5.1 trataremos dos casos, cuando el haz de la fuente de luz sin polarización o polarización aleatoria pasa a través de un polarizador lineal, la intensidad de la luz será resultado de una luz polarizada linealmente (h, +, v, -), si el eje de transmisión está en cuatro posiciones angulares ( $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  o  $135^\circ$ ) respectivamente cuyo vector de Stokes de salida  $S'$  corresponderá a las cuatro primeras columnas de la Tabla 2.5.1.

Un segundo caso sucede si el haz de la fuente de luz sin polarización o polarización aleatoria pasa a través de un arreglo polarizador – retardador de un cuarto de onda con eje rápido a  $45^\circ$  o  $-45^\circ$  con respecto al eje de transmisión del polarizador, el vector de Stokes de salida corresponderá a las últimas dos columnas de la Tabla 2.5.1, r y l respectivamente.

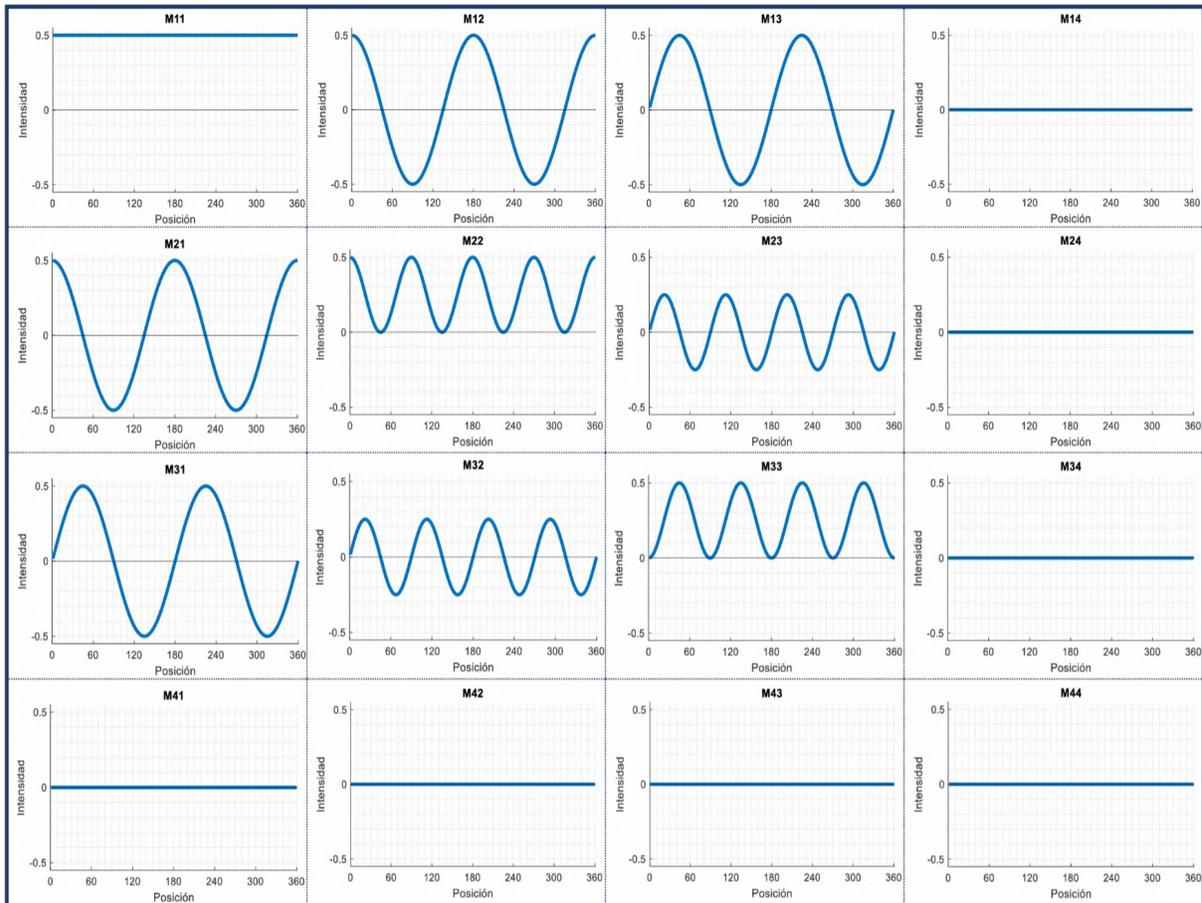
En concordancia con los dos párrafos anteriores, las expresiones de la matriz de Mueller de un polarizador lineal, de una lámina de retardo de cuarto de onda y de un elemento transparente serán mostradas a continuación [52]:

$$\text{MM Polarizador Lineal en } (\theta)^\circ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ \cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & 0 \\ \sin(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

$$\text{MM retardador de } \frac{\lambda}{4} \text{ en } (\theta)^\circ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & -\sin(2\theta) \\ 0 & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) & \cos(2\theta) \\ 0 & \sin(2\theta) & -\cos(2\theta) & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

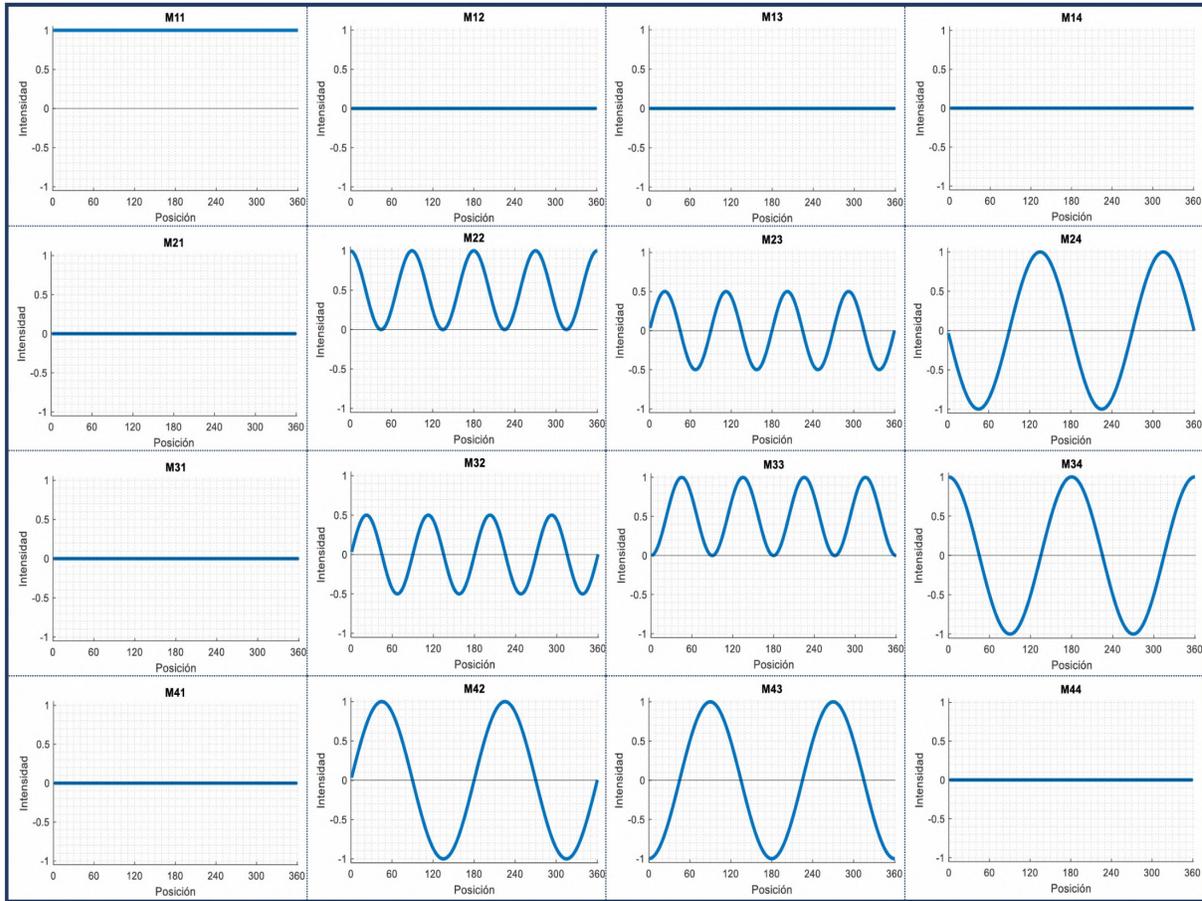
$$\text{MM para el vacío} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Al visualizar dinámicamente, en un dispositivo fotodetector, la Ecuación (2.21) al girar el polarizador entre  $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$  teniendo otro polarizador de referencia a  $0^\circ$ , se observan las variaciones mostradas en la Figura 2.5.2.



**Figura 2.5.2:** Los 16 elementos de la Matriz de Mueller para un polarizador lineal como muestra en función del ángulo del eje de transmisión  $\theta$ .

En la Ecuación (2.22) se gira el eje de transmisión de un retardador de cuarto de onda ( $\lambda/4$ ) entre  $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$  teniendo otro polarizador de referencia a  $0^\circ$  y se observan dinámicamente en el fotodetector las variaciones mostradas en la Figura 2.5.3. Es importante destacar que los elementos  $m_{22}$ ,  $m_{23}$ ,  $m_{32}$  y  $m_{33}$  exhiben un comportamiento idéntico al de los polarizadores.



**Figura 2.5.3:** Los 16 elementos de la Matriz de Mueller para una lámina de retardo  $\lambda/4$  como muestra en función del ángulo del eje de transmisión  $\theta$ .

Ahora, si en la Figura 2.5.1 agrupamos un polarizador y un retardador para formar el sistema óptico de entrada (SOE) antes de la muestra, y un retardador y un polarizador para formar el sistema óptico de salida (SOS), también conocido como analizador, tendremos un arreglo óptico para obtener 36 combinaciones de luz polarizada de las cuales 6 estados de polarización iluminan la muestra y 6 serán analizados y detectados por el fotodetector. En ambos casos, entrada y salida, son 4 polarizaciones lineales y 2 circulares respectivamente.

En general, si la luz pasa a través de un sistema en cascada como en la Figura 2.5.1, cada parte del sistema será descrito por una matriz individual,  $M_i$ , y la Ecuación (2.20) se expresará por la siguiente Ecuación:

$$S' = M_n \dots M_2 M_1 S. \tag{2.24}$$

Recordando que la MM representa la respuesta lineal a la polarización incidente [54], la expresión a determinar es en realidad la forma compacta de la Ecuación (2.20) y cada uno de los 16 elementos de la MM tienen la expresión de la Ecuación (2.25) [55].

(2.25)

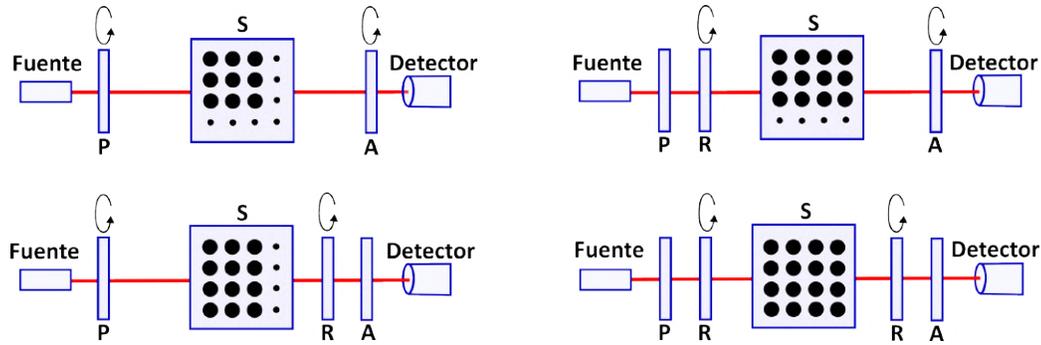
$m_{11}$	$m_{12}$	$m_{13}$	$m_{14}$
$\frac{1}{2}(I_{hh} + I_{hv} + I_{vh} + I_{vv})$	$\frac{1}{2}(I_{hh} + I_{hv} - I_{vh} - I_{vv})$	$\frac{1}{2}(I_{+h} + I_{+v} - I_{-h} - I_{-v})$	$\frac{1}{2}(I_{rh} + I_{rv} - I_{lh} - I_{lv})$
$m_{21}$	$m_{22}$	$m_{23}$	$m_{24}$
$\frac{1}{2}(I_{hh} - I_{hv} + I_{vh}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

donde los términos de la forma  $I_{ij}$  indican las irradiancias medidas por el detector cuando se tiene luz incidente con polarización  $i$  y la luz detectada corresponde al estado de polarización  $j$ . Este formalismo es válido para medir un sistema general, arbitrario y permite medir tanto en transmisión como en reflexión.

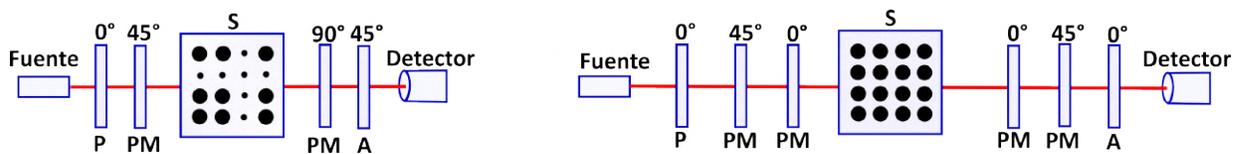
### 2.5.2. Descripción del diseño óptico mecánico.

El polarímetro es un instrumento que se compone de un generador y un analizador de los estados de polarización, lo que permite controlar y medir la polarización de la luz incidente y transmitida. La medición resultante es fundamental para el análisis de sistemas complejos que incluyen cambios en la polarización a lo largo de su propagación, como en el caso de las superficies metálicas, materiales biológicos y películas delgadas.

Existen diferentes tipos de polarímetros de MM, cada uno con sus propias características y ventajas. Los polarímetros de elementos rotativos utilizan la rotación mecánica de polarizadores o retardadores para obtener las mediciones deseadas, mostrado en la Figura 2.5.4. Por otro lado, los polarímetros de modulación de fase emplean un modulador electro-óptico para inducir un retardo variable en el tiempo, el arreglo se puede observar en la Figura 2.5.5 [50].



**Figura 2.5.4:** Polarímetros de elementos rotativos. P es un polarizador, A es un analizador, R es un retardador y S es la muestra. Los elementos medidos de la Matriz de Mueller se indican con puntos grandes.



**Figura 2.5.5:** Polarímetros de modulación de fase. Un polarímetro de modulador de fase/modulador de fase se muestra en (a); un polarímetro de doble modulador de fase se muestra en (b).

Con el polarímetro de elementos rotativos se obtiene información sobre las propiedades ópticas de un material o un sistema, entre estas propiedades se encuentran:

- **Propiedades de polarización:** Un polarímetro mide propiedades de polarización, como tipo y orientación. Esto es útil para caracterizar fibras ópticas, evaluar calidad de componentes ópticos y estudiar materiales anisotrópicos.
- **Retardancia:** Es la diferencia de fase entre componentes de la luz polarizada. Es crucial en la fabricación de dispositivos ópticos avanzados. También es relevante en estudios de materiales biológicos. La retardancia puede estar relacionada con la estructura interna y propiedades mecánicas del tejido.
- **Diatenuación:** La pérdida de intensidad de la luz polarizada debido a la interacción con un material, ocurre en materiales con propiedades ópticas asimétricas. Afecta películas delgadas, cristales y superficies metálicas. La medición de la Diatenuación mejora la eficiencia de dispositivos ópticos y detecta imperfecciones [56].

$$D(M) = \frac{\sqrt{m_{01}^2 + m_{02}^2 + m_{03}^2}}{m_{00}} \leq 0; \tag{2.26}$$

donde:  $m$  representa un elemento específico de la MM y  $D$  toma valores en el intervalo  $0 \leq D \leq 1$ . Cuando  $D = 0$ , solo la componente  $m_{00}$  contribuye a la salida del sistema óptico. Si  $D = 1$ , la transferencia de intensidad entre el haz incidente y el emergente es total.

- **Propiedades ópticas:** Un polarímetro mide propiedades ópticas de materiales. Estas incluyen índice de refracción, absorción y reflectividad. Estas mediciones son esenciales en diseño y fabricación de sistemas ópticos. Se aplican en lentes, espejos, recubrimientos ópticos y más.
- **Información sobre la estructura:** Revela detalles como la orientación molecular y presencia de defectos. La polarización de la luz es sensible a la estructura micro/nano. Se utiliza en análisis de películas delgadas, polímeros, materiales biológicos y superficies metálicas.
- **Información sobre la calidad:** Detecta impurezas, defectos y variaciones en la homogeneidad. La medición de Diatenuación y retardancia revela irregularidades. Esto es crucial para controlar la calidad en fabricación de dispositivos ópticos y componentes electrónicos.

Los polarímetros tienen aplicaciones industriales y científicas diversas. Se utilizan en investigación de líquidos ópticamente activos y análisis de lentes oftálmicas. También detectan contaminación en productos ópticos y desarrollan nuevos materiales con propiedades ópticas especializadas. Estas aplicaciones aprovechan la capacidad de los polarímetros para medir propiedades ópticas con precisión.

Para el desarrollo del presente trabajo, los estados de polarización deben ser generados por dispositivos ópticos como los polarizadores y las láminas de retardo. Estos dispositivos ópticos deben ser montados en estructuras mecatrónicas que permitan el posicionamiento angular programable por medio de una tarjeta digital.

Cada una de las monturas requeridas para la estructura óptica son diseñadas por medio del software Solidworks y posteriormente utilizando una impresora 3D para la construcción física de dichas monturas. El diseño y cálculo de cada pieza se realizará en base a estructuras comerciales y utilizando los mismos principios de funcionamiento, pero con un costo mucho menor.

El tamaño de cada pieza, cada engrane, cada tornillo sinfín, cada balero de soporte de los ejes de transmisión con sus tuercas de ajuste, cada contenedor y soporte de los circuitos diseñados, son construidos con las especificaciones y dimensiones estructurales adaptadas al diseño propuesto por los objetivos de esta tesis.

---

## Capítulo 3

---

# Metodología

En este Capítulo se describe el proceso de diseño del dispositivo, que comprendió la investigación y selección de componentes electrónicos, así como las consideraciones y estrategias implementadas durante el diseño y desarrollo de los módulos. Además, se detalla la programación realizada en lenguaje C para la tarjeta de control y adquisición de datos, la cual permite la intercomunicación con un display táctil. Este panel táctil permite seleccionar instrucciones y visualizar los resultados de 36 mediciones correspondientes a las distintas combinaciones de posición de ciertos elementos ópticos.

### **3.1. Elementos utilizados para la elaboración del sistema de posicionamiento angular**

Para iniciar el proceso de diseño del sistema, fue necesario considerar varios factores clave, incluyendo el tipo de motores, la tarjeta de control y el mecanismo de avance angular para los elementos ópticos. Además, se evaluó el arreglo óptico, compuesto por un sistema de posicionamiento de entrada y salida, una base para colocar las muestras y el fotodetector. Se decidió mantener el sensor ya disponible y utilizado en arreglos anteriores dentro de la universidad, así como el láser, dado que formaban parte del equipo existente y permitirían comparar los resultados obtenidos con los ya registrados en pruebas previas de trabajos de referencia.

#### **3.1.1. Fuente de luz**

Se seleccionó un láser de helio-neón (He-Ne) como fuente de luz de la marca Thorlabs modelo HRR170 el cual emite en una longitud de onda de 632.8 nm dentro del espectro visible

cercano al infrarrojo y con una potencia de 17 mW en modo TEM00. La elección de este rango de longitud de onda se basó en el tipo de muestra que se pretende analizar y evitar daños en la muestra. Las especificaciones técnicas del láser, se puede consultar el [Anexo A.1](#).

### 3.1.2. Motores

Los motores de pasos seleccionados fueron el modelo 17HS08-1004S cuya información técnica se proporciona en el [Anexo A.2](#). Este motor de pasos, comúnmente utilizado en impresoras 3D, ofrece un avance por paso de  $1.8^\circ$ , puede operar a un voltaje de 3.5 V, tiene un torque de 0.13 Nm y presenta dimensiones compactas.

### 3.1.3. Polarizadores

Se seleccionaron dos polarizadores lineales de la serie LPVIS, debido a su excelente rendimiento y características técnicas. Estos polarizadores ofrecen una tasa de extinción de 100000:1. Además, tienen una amplia temperatura ambiente de trabajo, desde  $-20^\circ\text{C}$  hasta  $120^\circ\text{C}$ . Otros aspectos por mencionar incluye su alto umbral de daño por láser y resistencia a la radiación UV.

El modelo específico elegido fue el LPVIS100-MP de la marca Thorlabs, cuyo rango de longitudes de onda de operación es de 550 a 1500 nm ([Anexo A.3](#)). Esta característica permite su utilización en una variedad de aplicaciones ópticas.

### 3.1.4. Retardadores

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se optó por una técnica alternativa para obtener polarización circular, en lugar de utilizar moduladores fotoelásticos como en trabajos previos. En su lugar, se emplearon láminas retardadoras fabricadas con materiales birrefringentes que presentan una diferencia en el índice de refracción entre dos ejes ortogonales (eje rápido y lento de la lámina). Esta diferencia modifica la velocidad de la luz polarizada.

Una placa de retardo de cuarto de onda está diseñada para crear un cambio de fase de un cuarto de longitud de onda ( $\lambda/4$ ) entre los ejes rápido y lento. Cuando un haz de entrada polarizado linealmente, con su plano de polarización alineado a  $45^\circ$  respecto a los ejes rápido o lento de la placa, atraviesa la placa, el haz de salida se polariza circularmente como se mencionó en el capítulo anterior. En este proyecto, se utilizó una lámina de cuarto de onda con una respuesta a la longitud de onda de 560 nm, modelo WF-OG4, suministrada por el distribuidor Alight, San Antonio, TX.

### 3.1.5. Fotodetector

Se seleccionó el fotodetector de la marca Thorlabs y modelo PDA36A cuyas características técnicas se describen en el [Anexo A.4.](#) La respuesta óptica de este fotodetector está en el rango de 350 nm a 1100 nm. Cuenta con un control de ganancia de ocho pasos, que permite ajustar la ganancia en incrementos de 10 dB por paso y la salida de voltaje puede programarse entre 0 V y 5 V, lo que facilita la integración con la tarjeta digital de adquisición de datos lo que garantiza una flexibilidad óptima en la configuración del sistema.

### 3.1.6. Tarjeta de control / adquisición

Inicialmente, el objetivo del diseño contemplaba la utilización de una tarjeta de control principal para enviar instrucciones a otras tarjetas en cada módulo. Sin embargo, se optó por una solución más integrada, utilizando una sola tarjeta para controlar todos los mecanismos, comunicarse con la pantalla táctil programable para recibir instrucciones y adquirir datos. Esta decisión permitió reducir costos y dimensiones finales de los módulos, aprovechando las características avanzadas del procesador.

En la actualidad, existen numerosos microcontroladores con diversas características y después de evaluar las opciones disponibles, se seleccionó el modelo ESP32-WROOM-32, una serie de bajo costo que integra un chip de wifi y bluetooth, ampliando las posibilidades de implementación en el proyecto. Este microcontrolador funciona a 3.3 VDC y cuenta con 34 pines digitales GPIO, un convertidor analógico-digital de 12 bits, una frecuencia de reloj de hasta 240 MHz y permite la comunicación UART, SPI y I2C.

Las especificaciones completas del ESP32-WROOM-32 se detallan en el [Anexo A.5.](#)

### 3.1.7. Drive para el control del motor

Se determinó que, para obtener mejores resultados en el posicionamiento del motor a pasos, era necesario utilizar drives que permitieran un control preciso del voltaje y corriente requeridos por el motor, sin afectar al microcontrolador. Se seleccionó el modelo TMC2208-V3.0 ([Anexo A.6.](#)), capaz de manejar corrientes de hasta 2A pico y voltajes de alimentación en el rango de 12 a 24 VDC.

En el diseño final del sistema a cada uno de los motores se le incorporó un drive para el mecanismo de avance angular. La forma de trabajo independiente de cada motor requiere dos señales de control: una para especificar la dirección y otra para el avance. Además, se tiene

la opción de configurar micro pasos en los motores para lograr una resolución angular aún más precisa. El controlador cuenta con un disipador de calor integrado y, en comparación con opciones de otros fabricantes, ofrece un funcionamiento silencioso de los motores.

### 3.1.8. Panel táctil

La pantalla táctil es de la marca Nextion, específicamente el modelo NX4827K043, que se consideró la opción más adecuada para este proyecto debido a sus dimensiones y especificaciones técnicas. Este panel permite la comunicación serial para enviar instrucciones al microcontrolador, lo que facilita la personalización de la interfaz gráfica tanto en la visualización como en la programación, gracias a su software propio.

El panel NX4827K043 cuenta con una pantalla de 4.3 pulgadas con una resolución de 480x272 píxeles. Además, incorpora una CPU ARM 7 con una frecuencia de reloj de 108 MHz, 8192 bytes de memoria RAM y 32 MB de memoria flash (Anexo A.7.).

## 3.2. Descripción del arreglo óptico

El arreglo óptico se diseñó considerando la información recopilada en el estado del arte, el cual establece que la obtención de diferentes estados de polarización se logra mediante la combinación de un polarizador lineal y una lámina de retardo en un sistema óptico de entrada (SOE) y otro de salida (SOS), como se presenta en la Figura 3.2.1. Se adaptó el diseño a las dimensiones específicas de los componentes disponibles.

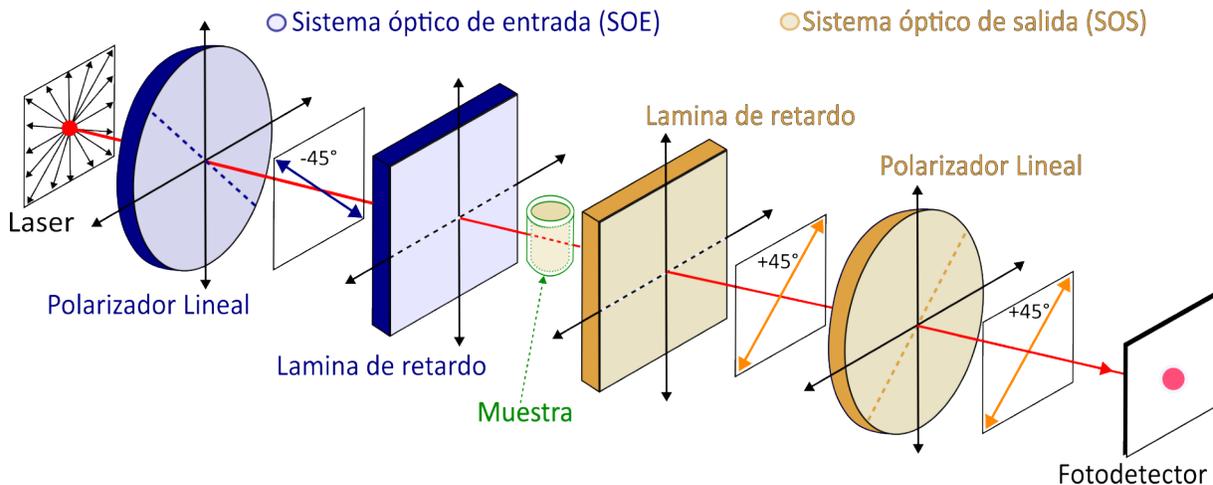


Figura 3.2.1: Arreglo óptico del polarímetro.

A continuación, se presentan las consideraciones clave que se tomaron en cuenta durante el proceso de diseño, mecanismo, programación y pruebas, con el objetivo de alcanzar los objetivos establecidos.

### 3.2.1. Diseño e impresión del dispositivo

La idea de desarrollar un sistema mecánico basado en un engranaje helicoidal se inspiró en el análisis del funcionamiento de los dispositivos de posicionamiento especializados NR360S y PRM1Z8 de la marca Thorlabs. Debido a su alto costo, se buscó replicar su funcionalidad de manera más económica sin comprometer la precisión. Al examinar el modelado 3D proporcionado por la misma marca, se observó que ambos dispositivos emplean engranajes helicoidales para lograr un posicionamiento preciso, lo que normalmente se conseguiría mediante sistemas de engranajes rectos con una relación específica, lo que implicaría un mayor número de ejes de rotación. Esta observación llevó a considerar la implementación de un engrane acoplado a un tornillo sin fin y a buscar formas de fabricarlo de manera más económica sin afectar los resultados.

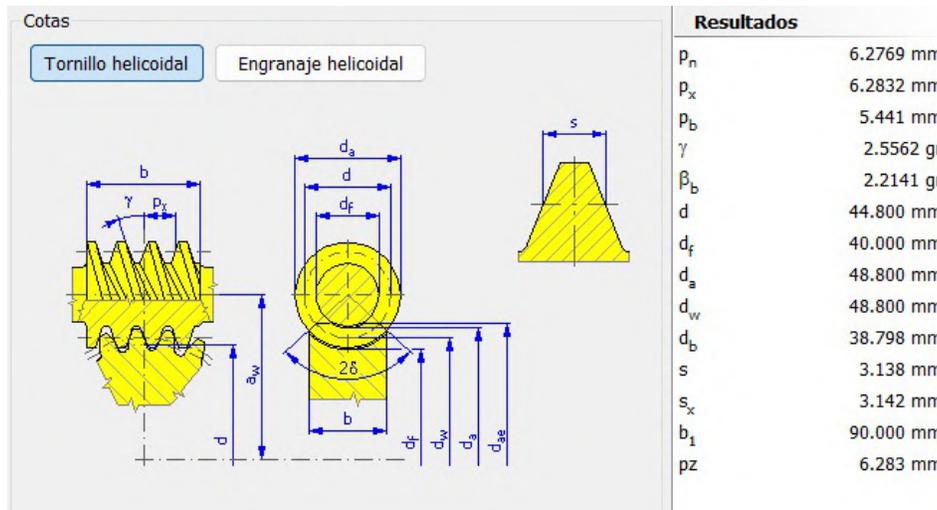
Para iniciar el diseño en CAD, se consideraron los siguientes elementos clave: la fuente de luz, los polarizadores, las láminas retardadoras y los motores. En particular, se utilizó el láser disponible en DICIS como fuente de luz, por lo que se requirió que los polarizadores y las láminas retardadoras tuvieran un coeficiente de transmisión alto para una longitud de onda de 632.8 nm, asegurando así que no se afectaran otras longitudes en los elementos. Además, se consideraron las dimensiones del motor NEMA17, las cuales se determinaron mediante mediciones precisas realizadas con un vernier en una unidad física del motor. Los valores obtenidos, junto con el diámetro de los polarizadores, fueron fundamentales para crear un primer diseño utilizando los programas “Inventor” y “SolidWorks”. Considerando la resolución angular del motor NEMA17, que es de hasta  $1.8^\circ$  por paso, se diseñó un mecanismo de movimiento angular basado en un tornillo sin fin y un engranaje helicoidal con una relación de avance de 90:1. Esto permitió mejorar la resolución angular a  $0.02^\circ$  por paso del motor.

Una vez establecido el diseño básico, se procedió a desarrollar el engranaje helicoidal mediante análisis mecánico y la interpretación de los valores necesarios para su diseño en SolidWorks. Aunque el primer modelo obtuvo resultados favorables, su complejidad requería un proceso de diseño lento. Por lo tanto, se optó por utilizar el software Inventor, que permite ingresar parámetros del engranaje, verificar la compatibilidad y dimensiones antes de visualizar el modelo, y proporciona automáticamente el engranaje y el tornillo sin fin.

Entre los parámetros principales en el diseño se encuentran el coeficiente de engranaje deseado y el ángulo de presión tangencial, establecidos en 90 y  $30^\circ$ , respectivamente, para lograr

una relación de dientes de 90:1. Esto implica que el tornillo sin fin debe realizar 90 vueltas para completar una vuelta del engranaje helicoidal. Además, se pueden agregar medidas para determinar la longitud del tornillo y el ancho de la cara del engranaje, aunque estos parámetros no se modificaron significativamente debido a las limitaciones dimensionales del proyecto. El software también permite calcular la velocidad y par torsión que el mecanismo puede soportar, obteniendo resultados de 1000 rpm y 0.955 Nm para el tornillo helicoidal, valores suficientes para la aplicación y con una vida útil de hasta 10.000 horas, entre otros parámetros que se pueden visualizar en la Figura 3.2.2.

Finalmente, el modelo 3D resultante se importó en SolidWorks, iniciando el reconocimiento de las operaciones realizadas para el diseño CAD y generando un archivo tipo objeto que se utiliza para seguir editándolo.



**Figura 3.2.2:** Parámetros resultantes en el software de inventor para el diseño del mecanismo de posicionamiento.

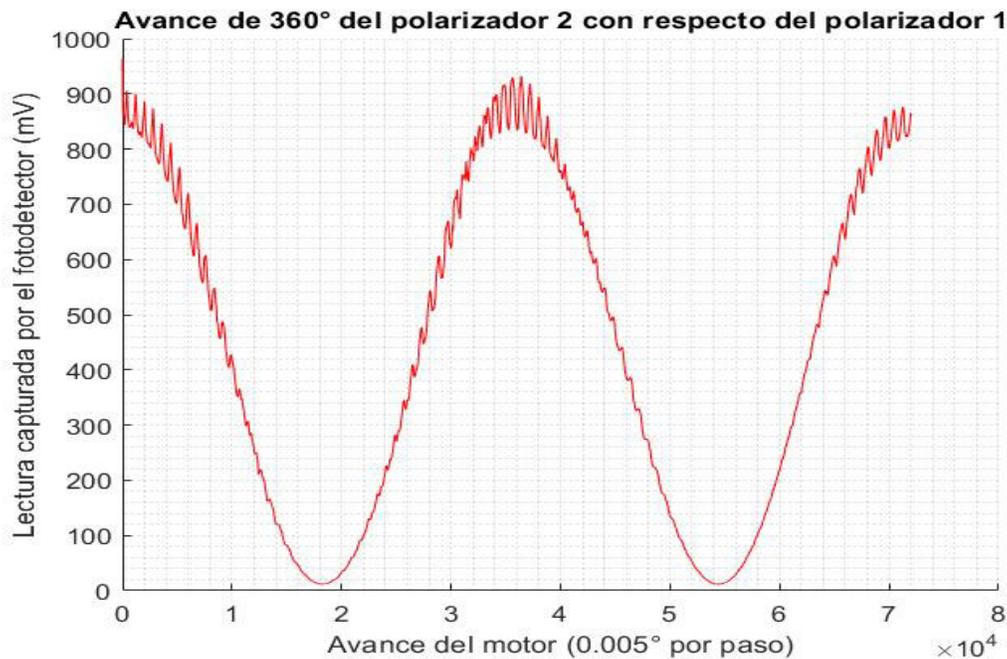
Dado que las dimensiones, distribución y diseño de los modelos 3D se basan en las magnitudes de los componentes utilizados, se diseñó un modelo compacto para realizar pruebas de modelado e impresión 3D. Para ello, se utilizó la impresora de resina de alta precisión Form3 Plus, obteniendo piezas pequeñas con alto nivel de detalles. Sin embargo, se presentaron problemas con las piezas finas, especialmente en el tornillo sin fin, debido al tiempo de impresión y la temperatura a la que se exponía la pieza, lo que causaba pandeo.

Además, la impresión en diferentes posiciones y con soportes adicionales afectaba la calidad de la pieza, dejando residuos y deformaciones en la cuerda que impedían un acoplamiento adecuado en el engranaje. A pesar de estos desafíos, se continuó con el diseño buscando mejorar los resultados. La limpieza y el manejo de la resina resultaron ser factores críticos, ya que requerían

una limpieza profunda y el tiempo expuesto en el ambiente no permitía retirar los residuos antes de que se solidificaran.

La acumulación de pequeños errores en el funcionamiento del mecanismo de avance y los errores en las lecturas, así como en el análisis dinámico, llevaron a concluir que el diseño compacto presentaba limitaciones. En particular, el desgaste del material y el pandeo del tornillo sin fin comprometían la estabilidad del ensamblaje.

En la siguiente imagen se muestra la señal obtenida con este primer diseño, donde se dejó un polarizador como referencia y se giró el segundo  $360^\circ$ , visualizando variaciones resultado de deformaciones físicas. Estas deformaciones podían variar en amplitud según el acoplamiento con el rodamiento y, en ocasiones, impedían un buen ensamblaje de los engranes, lo que contribuía a la no repetibilidad de las mediciones y la variabilidad de los resultados después de varias pruebas como se muestra en la Figura 3.2.3.

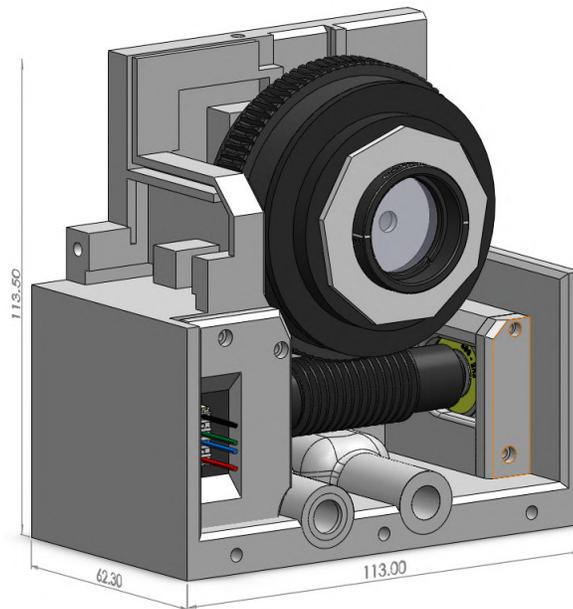


**Figura 3.2.3:** Captura de forma dinámica de la intensidad en un arreglo de dos polarizadores.

Tras analizar los resultados del primer diseño e identificar las fuentes de error, se tomó la decisión de rediseñar el modelo con el objetivo de mejorar la resistencia de las piezas y reorganizar los componentes del mecanismo para lograr una mayor estabilidad en el engranaje y el tornillo sin fin. El rediseño se realizó utilizando el software “SolidWorks”, que permitió explorar la posibilidad de combinar el diseño con la impresión 3D para crear piezas complejas desde cero o realizar modificaciones según sea necesario. Se creó un modelo para cada módulo,

considerando su posición y los elementos necesarios para funcionar de forma independiente.

En el diseño de los módulos, se priorizó el posicionamiento del mecanismo para mantener los elementos ópticos alineados y controlar la altura del láser y el fotodetector, asegurando que los planos de transmisión y recepción fueran paralelos y que el haz del láser incidiera de manera centrada en el sensor. En la siguiente Figura 3.2.4 se muestra el diseño de la base del primer módulo de posicionamiento, visualizado mediante modelaje 3D.



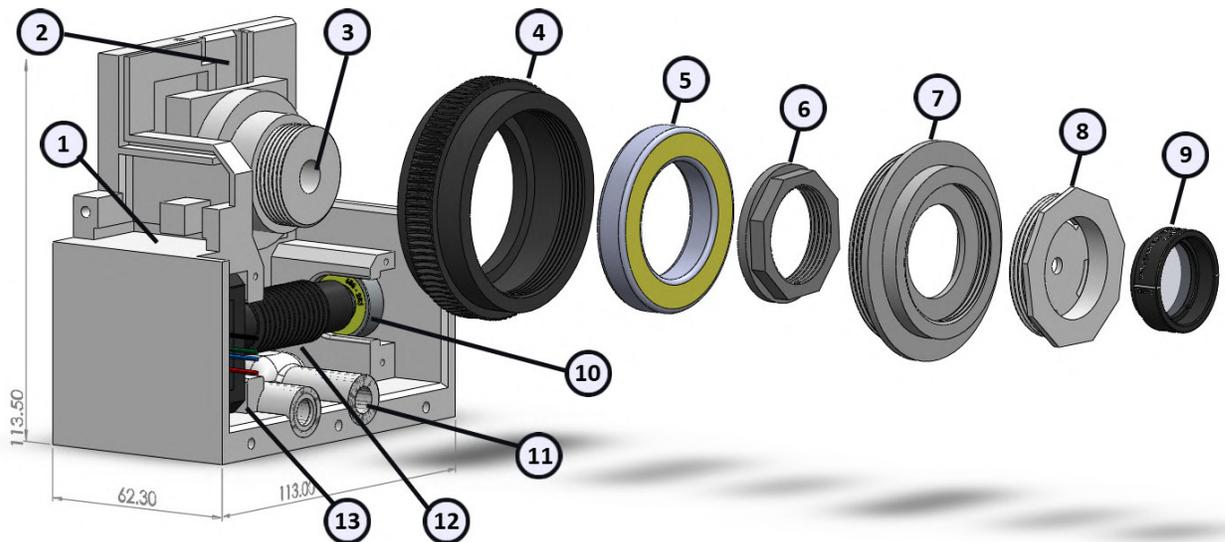
**Figura 3.2.4:** Ensamble de las piezas diseñadas en SolidWorks para un módulo de posicionamiento óptico.

Cada módulo presenta variaciones en su diseño según su posición y los elementos adicionales incorporados. Para mantener una mayor estabilidad en el módulo y evitar el desgaste, se realizaron ajustes en la impresión 3D como reforzar la estructura, especialmente en el eje que soporta el engranaje, y fijar la parte interior del rodamiento utilizando baleros marca Timken modelo 6907 para minimizar la fricción con el material.

Además, se fijó el mecanismo con una tuerca para evitar movimientos imprevistos en la cara del mecanismo, lo que facilitaría la alineación y evitaría problemas en el acoplamiento de los dientes del engranaje con el tornillo sin fin. Este último se rediseñó con dimensiones aumentadas en comparación con el primer diseño, inspirado en las proporciones del nanorotor NR360S, reduciendo así la probabilidad de pandeo gracias a una estructura más sólida. Se agregaron cubiertas para fijar el posicionamiento del motor y el soporte del eje del sin fin con otro balero marca Timken modelo 6200Z, así como una cubierta en el engranaje para asegurar el rodamiento 6907. Esta cubierta también permite acoplar una pieza que sirve para posicionar el elemento

óptico, diseñado para desacoplarse por partes y adaptarse a diferentes elementos ópticos según su aplicación.

La estructura mostrada en la Figura 3.2.5 incorpora consideraciones para la posición de un sensor que sirva como punto de referencia para el posicionamiento y la caracterización, así como un espacio para fijar el motor y la incorporación del circuito drive para el control del motor y el sensor de posición inicial. Finalmente, se agregó un espacio para insertar dos varillas aceradas que ayuden en la alineación del sistema, coincidiendo con la trayectoria del haz del láser, y se incorporaron insertos en la estructura para asegurar el acoplamiento con las tapas en cada módulo.



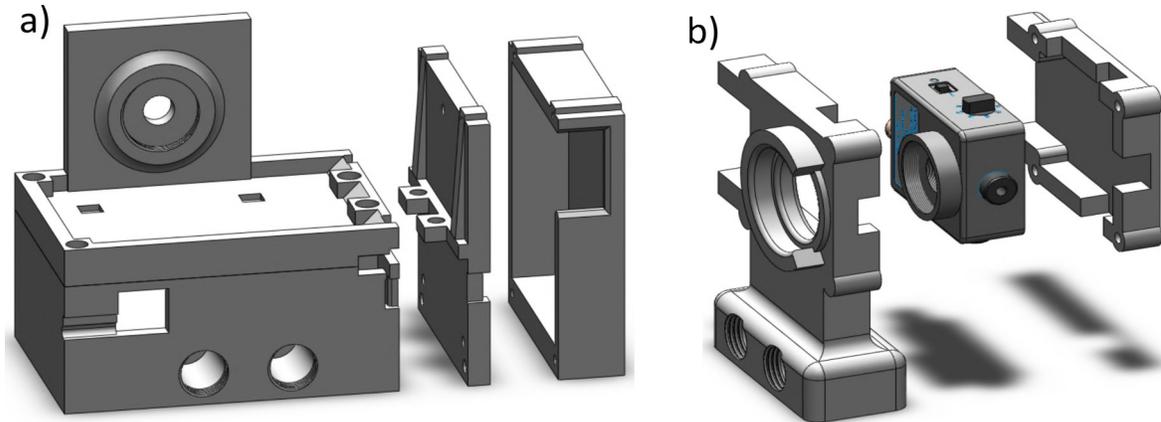
**Figura 3.2.5:** Estructura de un módulo de posicionamiento: 1) Compartimento para el control del motor, 2) Compartimento para el sensor de posición inicial, 3) Eje principal del haz y soporte para el rodamiento, 4) Engrane, 5) Rodamiento para el engrane, 6) Tuerca de seguridad, 7) Base para posicionar el soporte del elemento óptico, 8) Base para el elemento óptico adaptable, 9) Elemento óptico, 10) Rodamiento para el tornillo sin fin, 11) Eje de alineamiento del sistema, 12) Tornillo sin fin y 13) Motor Nema 17.

Otro factor que se modificó en función de la experiencia adquirida con el primer diseño fue la ubicación de la fuente de alimentación y el procesador, que inicialmente se encontraban en el último módulo junto con el fotodetector. Esta configuración afectó negativamente la distribución de las señales y líneas de alimentación a los drivers en cada estructura, complicando la detección de falsos contactos.

En el diseño final, se decidió ubicar el procesador en el módulo porta muestra, además de agregar un espacio dedicado a los módulos de alimentación, los cuales se situaron lo más

alejados posible de las señales de control y adquisición. Esta configuración centralizada facilitó la distribución de conexiones en todo el sistema.

Además, se diseñó un módulo compacto (Figura 3.2.6) para el fotodetector, cuyo objetivo principal era posicionar este elemento de manera precisa. Sin embargo, también se consideró la incorporación de un obturador para mitigar posibles reflejos y mejorar la alineación. Esto se logró visualizando la incidencia del haz del láser sobre la cara del fotodetector y optimizando su diseño para asegurar una alineación óptima.



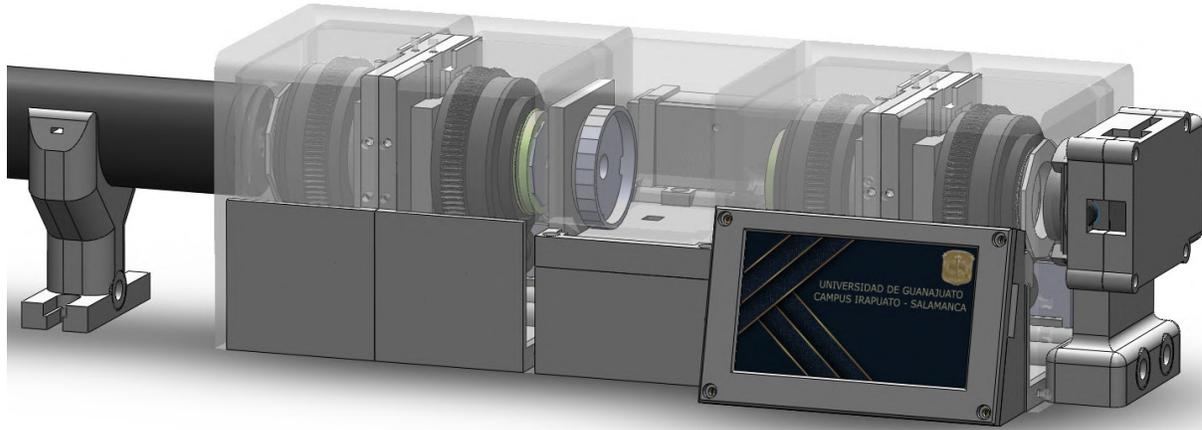
**Figura 3.2.6:** Estructura y piezas diseñadas para a) el módulo porta muestra y fuente de alimentación, b) sensor de adquisición.

Durante el desarrollo de los circuitos impresos para distribuir las conexiones de alimentación y señales a cada módulo, se consideraron diversas variables adicionales en el modelo 3D. Estas incluyeron la optimización de las dimensiones para la fijación de los circuitos, mediante acoplamiento directo con el impreso 3D o mediante la incorporación de conectores, con el objetivo de crear un sistema portátil y confiable. Además, se priorizó la minimización de falsos contactos y la reducción de la intervención del usuario en la parte electrónica al mínimo indispensable, con el objetivo de asegurar el funcionamiento correcto y seguro del sistema, garantizando así una operación eficiente y confiable.

Dentro de cada módulo, se incorporaron baleros lineales para facilitar el acoplamiento del eje de alineación. Además, en la tapa del primer módulo del SOE, se diseñó una ranura específica para acoplar la cara del láser, asegurando su posición correcta en términos de altura. También se crearon bases para asentar el láser, las cuales permiten el paso del eje de alineación. El sistema resultante tiene dimensiones de 37.2 cm de largo, 16.9 cm de ancho (debido al saliente del display y la base para la fuente de alimentación) y 11.8 cm de alto.

El sistema completo mostrado en la Figura 3.2.7 está diseñado principalmente para observar las características de muestras ópticamente activas, con líquidos y elementos ópticos como

condiciones iniciales consideradas para realizar la caracterización. Sin embargo, el diseño es versátil y permite realizar pruebas en modo de reflexión con muestras orgánicas, como se menciona en [57].

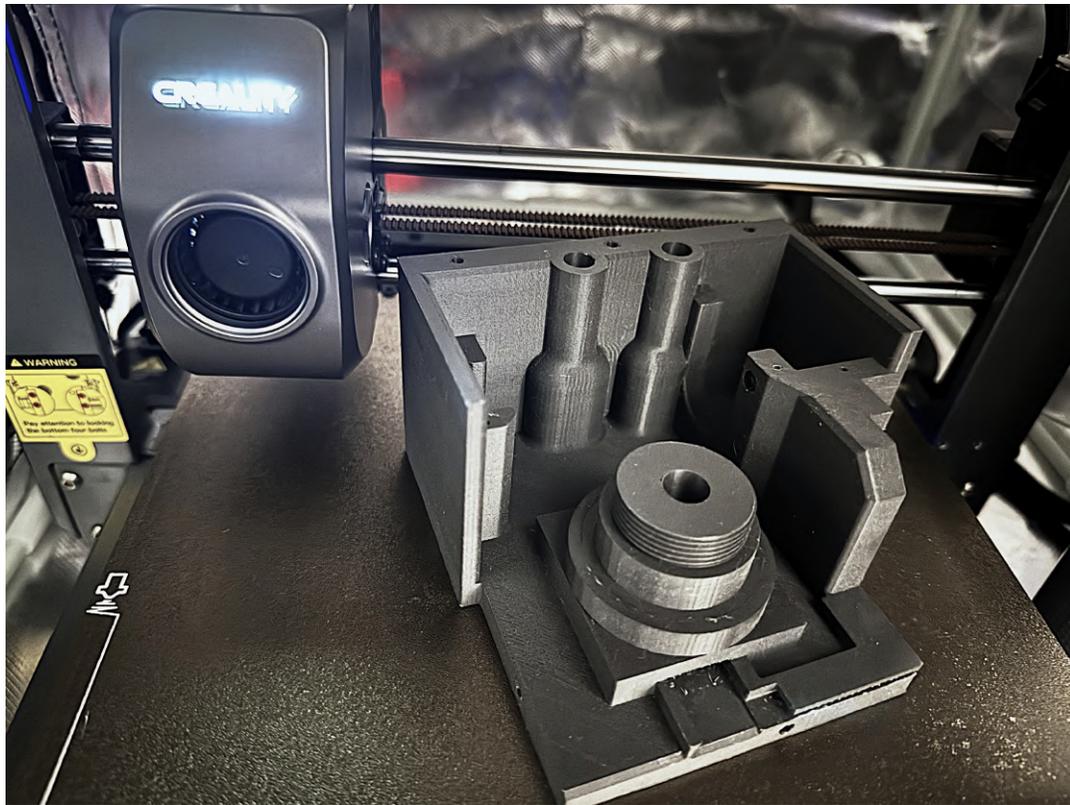


**Figura 3.2.7:** Ensamble del modelo final para sistema de posicionamiento óptico diseñado en SolidWorks.

En el proceso de fabricación de las piezas del rediseño, se optó por utilizar una impresora de filamento, con el objetivo de comparar los resultados con una versión más económica y evitar la etapa de limpieza de residuos asociada a la impresora de resina utilizada en el diseño inicial. En este caso, solo se requería remover los soportes, lo cual resultó ser más sencillo y menos perjudicial para la estructura.

La impresora utilizada fue una Creality Ender 3 V3, equipada con especificaciones que permiten fabricar piezas precisas bajo parámetros controlados de temperatura y velocidad, ajustados según el tipo de pieza a imprimir. Para optimizar los resultados, se realizaron varias piezas de prueba. Los resultados obtenidos cumplieron con los requisitos del trabajo, aunque se evidenció la necesidad de experiencia adicional para evitar el pandeo en las impresiones, ya que este fenómeno puede ser factor de la adherencia de la pieza y la velocidad de la impresora en áreas con cambios bruscos de trayectoria de  $90^\circ$ . Tras varias pruebas, se lograron obtener piezas de buena calidad y detalle como se muestra en la Figura 3.2.8.

El software utilizado para la impresión 3D fue “Creality Print”. Las piezas se fabricaron utilizando políácido láctico (PLA), un material de filamento económico y de alta calidad. El costo total de fabricación del sistema fue de aproximadamente 1,200 pesos mexicanos, debido al consumo de 950 m de material PLA (2.88 kg). Este costo es accesible considerando la complejidad del diseño, la cantidad de piezas y las dimensiones del sistema. Además, incluye el material utilizado para crear soportes que mejoran los resultados.



**Figura 3.2.8:** Captura de la pieza diseñada y elaborada en una impresora 3D.

La duración del proceso de impresión varía según las características de cada impresora, la altura de capa y la densidad de la estructura. En este caso, se requirieron 10 horas para imprimir una sola base de módulo, con una altura de capa de 0.1 mm y una densidad del 25 %. Los resultados fueron piezas con excelente resistencia a la manipulación, adecuadas para un sistema portátil. Además, se realizaron pruebas para optimizar los parámetros de impresión y asegurar un ajuste preciso entre las piezas, considerando el margen de error variable de cada impresora y la pieza específica. Esto permitió encontrar los parámetros ideales para obtener el mejor acoplamiento posible al ensamblar todo el sistema.

### 3.2.2. Arreglo electrónico-mecánico

Las dimensiones y especificaciones de los componentes electrónicos que son utilizados en el prototipo requirieron considerar la distribución de los voltajes de alimentación y de las señales de control por medio de conectores macho hembra para la electrónica de cada módulo, de los motores de pasos marca NEMA modelo 17HS08-1004S seleccionados y de los drives TCM2208-V3.0 descritos anteriormente y sus características eléctricas incluidas en los anexos mencionados anteriormente.

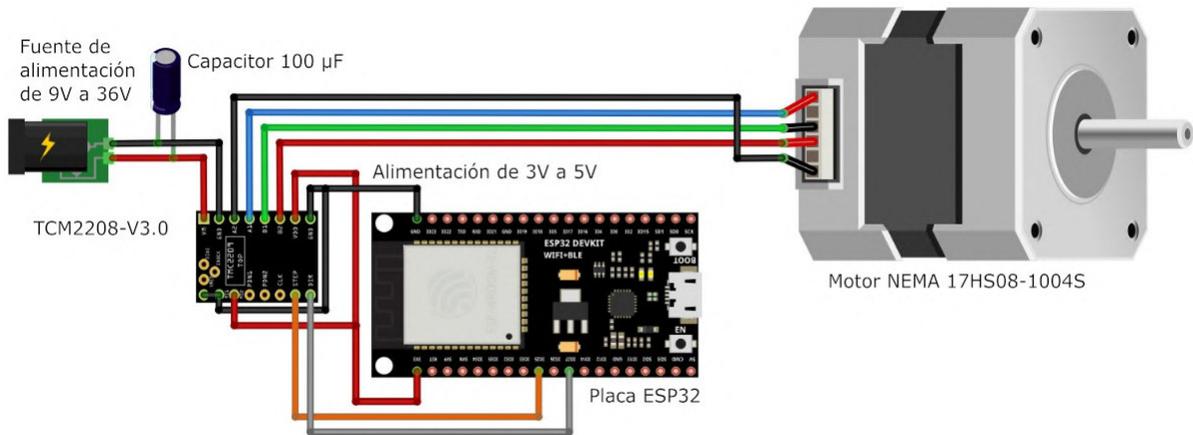
Como elemento de control para iniciar las primeras pruebas de funcionamiento se seleccionó el módulo ESP32, cuyas características cumplían con los requisitos del sistema en desarrollo. Además, su programación en C permitía una mayor compatibilidad con la mayoría de los paneles táctiles disponibles en el mercado, y su accesibilidad fue un factor adicional a su favor. Con los elementos seleccionados, se inició el proceso de identificación de las bobinas del motor para realizar la distribución correcta con el módulo de potencia o drive. Se buscaron las especificaciones técnicas para determinar la corriente máxima y ajustar el controlador, evitando el calentamiento excesivo en ambos componentes y asegurando su funcionamiento a largo plazo. Esto se logró experimentalmente mediante el ajuste de un potenciómetro incorporado en el controlador.

Posteriormente, se identificaron las conexiones necesarias para realizar las primeras pruebas de avance y posicionamiento del sistema mecánico. Estas conexiones se establecieron a través de dos señales principales definidas por la tarjeta de control: La señal de dirección se establece mediante un voltaje de 0VDC (sentido antihorario) o 5VDC (avance en sentido horario) y la señal de avance se define mediante cambios de estado de 0V a 5VDC, lo que corresponde a un paso (cambio en la secuencia de energización de las bobinas del motor).

Además, se cuenta con la opción de ajustar micro pasos mediante una energización más controlada entre las bobinas del motor mediante PWM, permitiendo hasta 16 avances antes de lograr un paso de  $1.8^\circ$  del motor. Se optó por la configuración de 4 avances por paso, lo que, combinado con el avance del engranaje helicoidal, resulta en un avance angular de  $0.005^\circ$  por cada paso. Esto se acerca a la resolución de elementos que se compran en los mercados especializados de motores de nanopasos.

Para la alimentación del drive se utilizaron dos voltajes utilizando: 5VDC para la alimentación del circuito digital del drive y 12 VDC energizar las bobinas del motor. El diagrama de conexiones de la primera etapa de pruebas de avance y posicionamiento se presenta en la Figura 3.2.9.

Con la configuración inicial establecida, se procedió a realizar la caracterización del sistema de avance mediante la realización de al menos cien giros seguidos. El objetivo era comprobar si el sistema podía llegar a un punto específico mediante una marca de referencia. Los resultados mostraron que el mecanismo podía retrasarse menos de  $1^\circ$  después de estas cien vueltas, lo que es despreciable considerando la resolución del sistema y la incorporación posterior de un sensor de posicionamiento inicial, que evitará la acumulación de errores por posición a largo plazo.



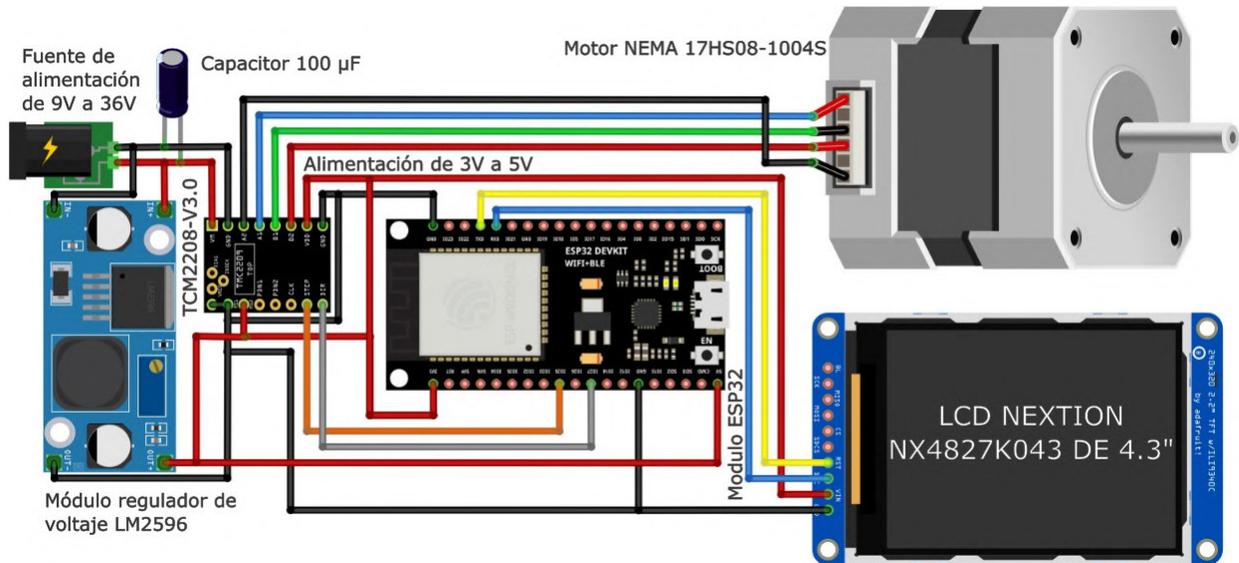
**Figura 3.2.9:** Primer diseño electrónico para el posicionamiento preciso del motor.

Posteriormente, se identificó la necesidad de dos voltajes para el funcionamiento del sistema sin usar una fuente de alimentación variable, como se realizó en la primera prueba. Para la etapa de alta potencia, se seleccionó una fuente DC con un eliminador que proporciona 12 V y 3 A. Esta capacidad de corriente se eligió considerando que la fuente de alimentación variable suministraba aproximadamente 300 mA para cada motor en funcionamiento, y se requería alimentar todo el sistema con esta fuente, incluyendo el sistema de baja potencia.

Para suministrar los 5 VDC necesarios para la ESP32, el sensor de posicionamiento inicial y el panel táctil, se agregó un módulo regulador de voltaje LM2596. El siguiente paso fue realizar estos cambios y agregar el display. Se seleccionó la LCD NX4827K043 de 4.3" de la marca Nextion, considerando sus dimensiones, especificaciones eléctricas y compatibilidad con la tarjeta ESP32. Esta pantalla incorpora un software propio para diseñar la interfaz, pero requiere programación adicional para establecer una comunicación adecuada con el lenguaje principal de la tarjeta de control.

Para el manejo de este tipo de pantalla táctil fue necesario investigar sobre sus instrucciones y la forma de compartir información y conexión con la tarjeta controladora ESP32. Además, para cargar el programa de la tarjeta en la LCD, se requiere comunicación serial mediante las terminales RX y TX con la tarjeta de control. Sin embargo, para configurar la comunicación efectiva y enviar instrucciones una vez cargada la interfaz, fue necesario invertir las conexiones serial entre la LCD y la tarjeta de control.

En la siguiente Figura 3.2.10, se presenta las conexiones utilizadas para realizar las primeras pruebas de control de posicionamiento a partir del control desde una interfaz diseñada en la pantalla táctil.



**Figura 3.2.10:** Diseño electrónico para el control del motor mediante instrucciones con un panel táctil.

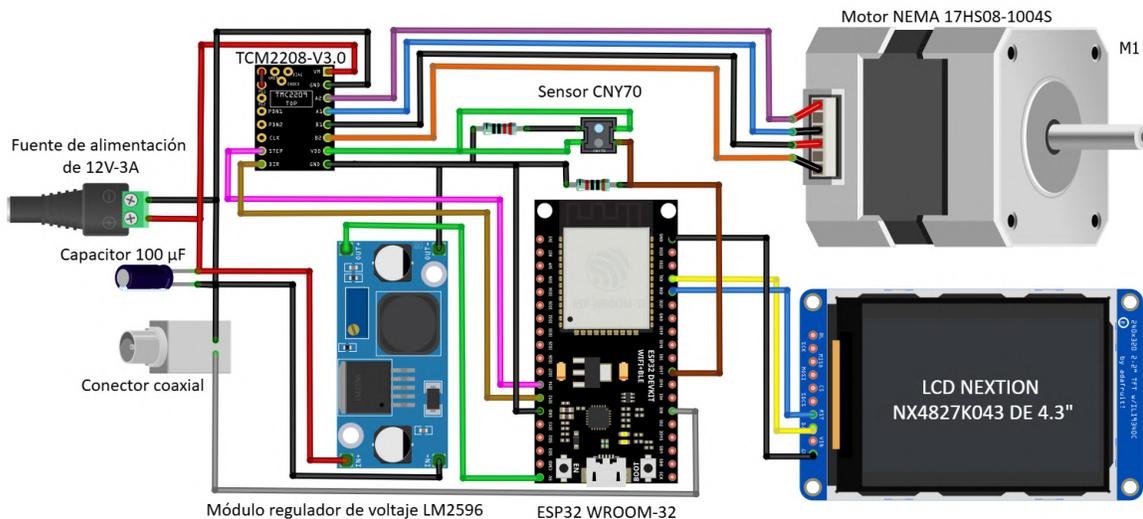
La siguiente etapa en el diseño del circuito consistió en incorporar un sensor que permitiera controlar el posicionamiento inicial, asegurando que el sistema comenzara siempre en el mismo lugar y estableciendo un punto de referencia fiable. Además, debido a la falta de control exacto en la alineación del eje de transmisión de los polarizadores y las láminas, este sensor permitiría encontrar las posiciones adecuadas de los elementos ópticos para trabajar de manera más precisa.

Inicialmente, se consideró la incorporación de un interruptor mecánico, pero finalmente se seleccionó el sensor óptico CNY70 debido a su compactibilidad y ángulo de detección. Esto permitió agregar la marca de detección directamente en el engranaje, evitando la necesidad de agregar componentes adicionales al diseño. Con la incorporación de este sensor, se procedió a caracterizar las posiciones iniciales y la repetitibilidad en los resultados.

Las pruebas de posicionamiento mostraron una excelente repetibilidad en las mediciones, lo que confirmó la efectividad de este componente en el sistema. Además, se agregó la conexión BNC con cable coaxial (Figura 3.2.11) para transmitir la lectura del sensor PDA36A y realizar las primeras pruebas de adquisición de datos. Según las especificaciones del sensor, proporciona una señal de salida de 0V a 5V DC en condición de ganancia a 0 dB.

Para la adquisición de datos, se seleccionó la tarjeta ESP32, que cuenta con canales analógico-digitales. Sin embargo, considerando que el convertidor analógico-digital (ADC) incorporado en la tarjeta solo admite señales de hasta 3.3 V con resolución de 12 bits, se evaluó la necesidad de agregar un acondicionador de señal adicional. No obstante, tras analizar la intensidad máxima del láser mediante un osciloscopio y medir la respuesta del sensor PDA36A, se observó que

el voltaje máximo alcanzado fue de 2 V sin elementos ópticos y de 1.2 V con elementos ópticos. Dado que estos valores están por debajo del límite de 3.3 V, no fue necesario agregar nada adicionalmente.



**Figura 3.2.11:** Diseño electrónico final utilizado con conexión para un solo módulo de posicionamiento.

En párrafos anteriores se ha comentado que la señal lumínica que llega al fotodetector y que es convertida a un voltaje de salida tiene una variación de entre 0 y 2.5 VDC. Esta señal con el ruido inherente es acondicionada y amplificada por el circuito electrónico integrado en el módulo del fotodetector. Este ruido tiene su mayor amplitud cuando la señal de salida del fotodetector es máxima y puede ser observada en la Figura 3.2.3.

La fuente de luz láser es relativamente estable una vez que ha transcurrido algún tiempo de calentamiento de alrededor de 20 minutos y si la señal es observada con un osciloscopio, para solo ver la componente de alta frecuencia, se nota que hay picos de una señal periódica de alrededor de 8.33 KHz y amplitud de una decena de milivolts inmersa en otra señal de ruido de menor amplitud. El período de los picos observados es de  $120 \mu s$  que no forman parte de la información de las mediciones y por tanto deben ser eliminadas ya que contribuyen con lecturas no estables.

Existen varias técnicas de eliminación de ruido de alta frecuencia entre las que se pueden mencionar los filtros pasivos, los filtros activos, el filtrado digital o las técnicas del muestreo y retención (Sample and Hold, SAH). La complejidad y los retardos que conlleva la selección del método de filtrado nos llevó a considerar el último método por lo que se incorporó un circuito de SAH con el objetivo de obtener una señal de salida estable para ser aplicada a la entrada del convertidor analógico/digital de la ESP32. Se seleccionó el circuito SAH LF398 de Texas

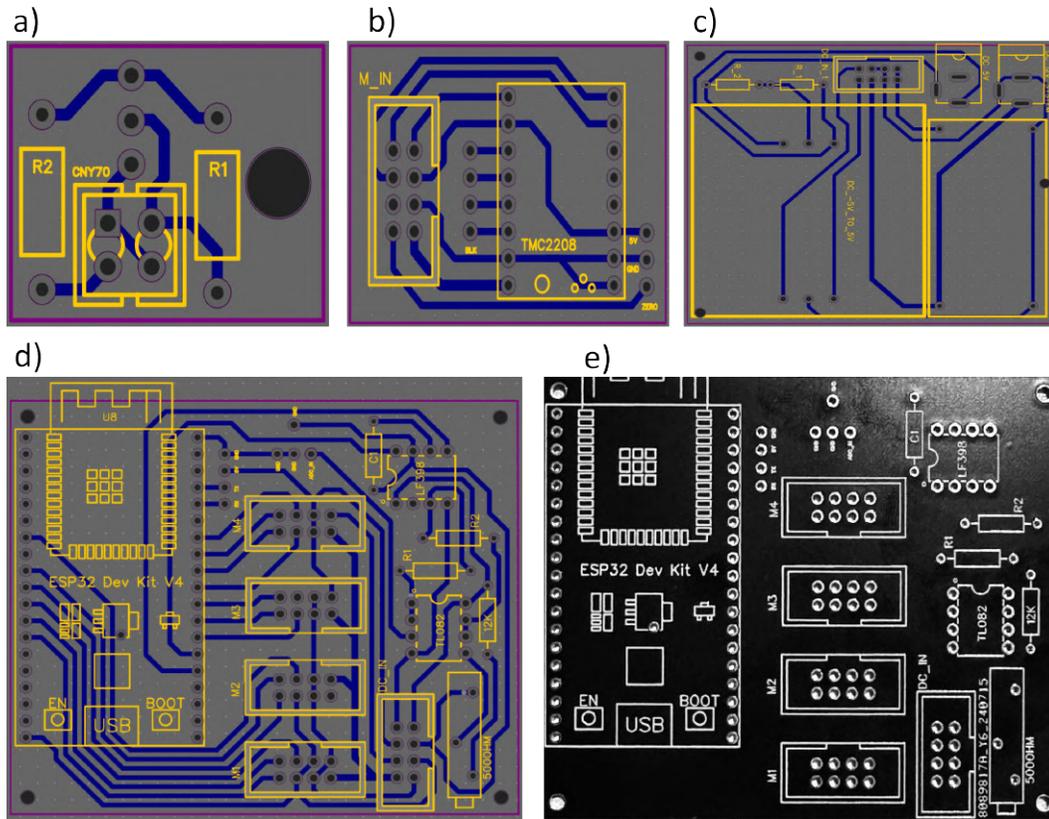
Instruments (TI), que emplea tecnología Bi-FET para garantizar precisión y rapidez.

Se ajustó el tiempo de activación o muestreo del SAH a alrededor de  $120 \mu s$  mediante instrucciones de programa y una salida digital de la ESP32 para asegurar una sincronización estable. Además de la implementación anterior, se incorporó un circuito integrado TL082 con el objetivo de proporcionar un desplazamiento de offset en la señal de entrada leída. Esto se debió a que la tarjeta ESP32 requiere un nivel mínimo de 100 mV para realizar una lectura precisa en el convertidor analógico-digital (ADC). Para ajustar este nivel mínimo, se utilizó un potenciómetro (trimpot) de 10 vueltas, lo que permitió calibrar la señal de entrada y asegurar una lectura precisa y confiable por parte del convertidor.

Una vez completadas las pruebas, se procedió al diseño de los circuitos impresos, considerando cuatro placas diferentes con funcionalidades específicas. La primera placa alberga las fuentes de alimentación, incluyendo un regulador adicional para suministrar el voltaje negativo requerido por el circuito integrado TL082.

La placa principal incorpora el circuito de muestreo y retención (SAH) y la tarjeta de control ESP32. Se diseñó la distribución para mantener una distancia segura entre la tarjeta y las señales de 12V. El tercer diseño corresponde al driver de los motores de pasos TCM2208, que incluye el conector para el cable del motor y las señales necesarias para el funcionamiento del cuarto módulo, destinado al sensor CNY70.

La intercomunicación entre los módulos se logra mediante conectores IDC en la placa principal, lo que facilita el ordenamiento de los cables y evita contactos incorrectos. En la Figura 3.2.12, se presenta la distribución obtenida en el diseño utilizando el software EasyEDA, que también permite enviar las placas a fabricación con resultados de alta calidad.



**Figura 3.2.12:** Diseño del PCB utilizado para cada placa utilizada: a) Diseño para la fuente de alimentación, b) controlador para el motor y distribución para el sensor de posición inicial, c) placa para el sensor CNY70, d) placa de distribución de conexiones y tarjeta principal de control y e) PCB impreso (vista superior).

### 3.2.3. Programación del dispositivo

La tarjeta de control ESP32 se programó utilizando el lenguaje de programación C, en el que se implementó una secuencia de posicionamiento y adquisición de datos acorde con cada una de las etapas descritas en la sección anterior sobre los circuitos.

En general, el programa sigue un flujo lógico que involucra varias etapas, las cuales se ejecutan según las condiciones y funciones definidas para cumplir con los requisitos del sistema. Estas etapas están diseñadas para realizar la tarea específica establecida por el usuario. La secuencia principal implementada para obtener finalmente un resultado visual, en la pantalla táctil, de la MM se muestra en el diagrama de la Figura 3.2.13.

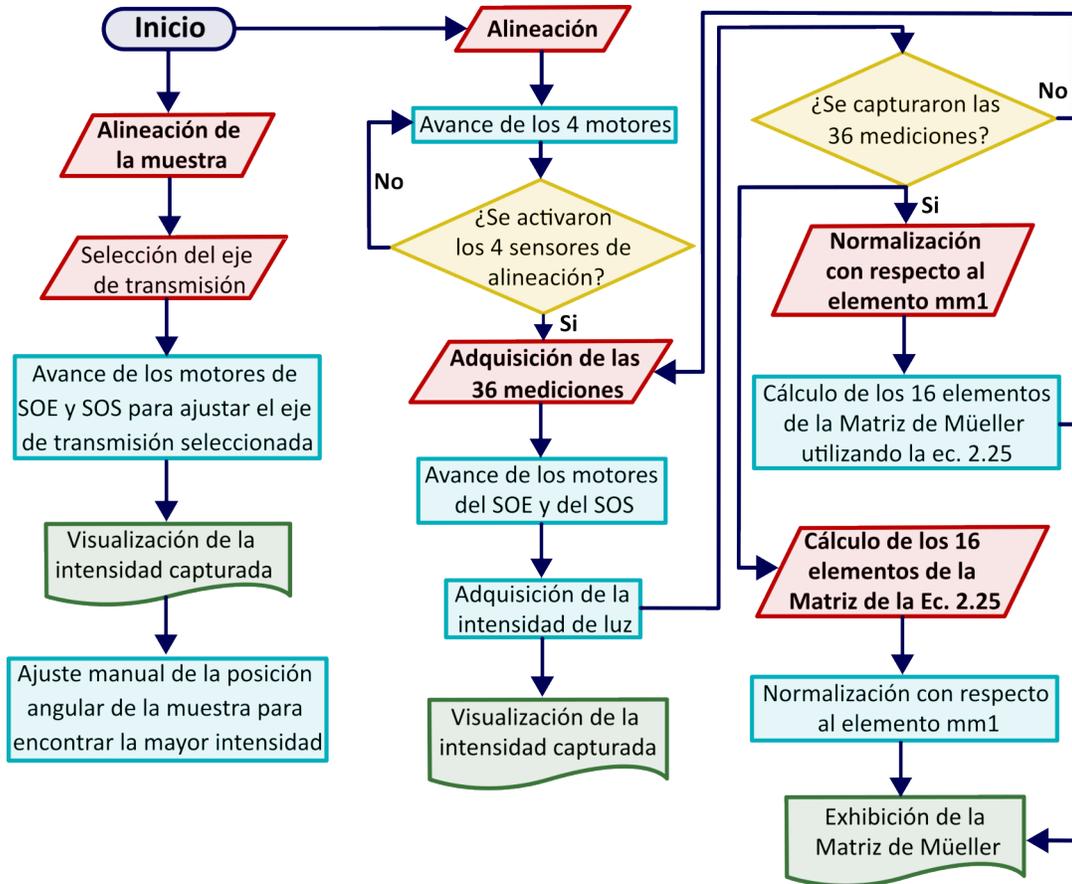


Figura 3.2.13: Proceso de captura de la Matriz de Mueller con el dispositivo.

Después del ensamblado mostrado en la Figura 3.2.7, la alineación inicial de cada etapa del arreglo óptico se llevó a cabo usando el procedimiento descrito a continuación se activaron dos motores de pasos junto con sus engranes ensamblados a su con puntos de referencia marcados y ser detectados por medio de los sensores ópticos CNY70 colocados en los puntos específicos de los contenedores impresos en 3D.

El objetivo es alinear los ejes de transmisión de dos polarizadores para luego realizar un análisis dinámico de la señal adquirida durante un giro de 360° del segundo polarizador, almacenando los datos en un archivo de texto y visualizándolos gráficamente en el software Matlab para poder identificar la intensidad máxima incidente sobre el fotodetector, que se logra cuando los ejes de transmisión de los polarizadores están alineados.

Una vez alineados los polarizadores, se agregó la primera lámina de retardo y se repitió el procedimiento, manteniendo fijos los ejes de transmisión de los polarizadores y realizando un giro de 360° en la lámina de retardo de un cuarto de onda. Posteriormente, se identificó la posición de alineación y se concluyó con el mismo proceso para la segunda lámina de retardo.

Este enfoque permite aplicar la alineación del sistema de manera rápida, ya que los cuatro elementos se pueden posicionar simultáneamente, ahorrando tiempo en el proceso. Para controlar el avance de los motores, se utilizó un ciclo for que definía la cantidad de pasos necesarios para completar un giro de  $360^\circ$  (72,000 pasos) y utilizando una salida digital de la ESP32 para cada paso. Posteriormente, se verificaron las combinaciones angulares de los 4 motores para fijar en la salida del SOE para lograr los 4 estados de polarización lineal y 2 circulares y con el SOS analizar estos mismos 6 estados.

Con la combinación de diferentes posiciones angulares se obtuvo de la salida del fotodetector la señal correspondiente a cada una. La salida del fotodetector fue aplicada a la entrada del SAH para posteriormente meterla al convertidor analógico digital (ADC) de la tarjeta digital y registrar 100 muestras de estas señales para posteriormente promediarlas, realizar el proceso de normalización para tener lecturas con magnitudes entre 0 y 1 y guardarlas en un archivo con extensión .txt.

Con los 36 valores normalizados de irradiancia obtenidos, se calcularon los 16 valores de cada elemento de la MM de la Ecuación (2.25). Este último archivo de texto es transmitido mediante comunicación serial a la pantalla táctil por medio del software CoolTerm. Con este programa, se emplearon funciones que adaptaban la secuencia de adquisición de datos según el número de pasos necesarios para cambiar de una combinación a otra de manera óptima. Además, los datos capturados se almacenaron en una cadena para permitir su posterior acceso y se implementó la funcionalidad para exhibir los datos en cada parte de la secuencia, trabajando en conjunto con la pantalla LCD y un sistema de etiquetas para identificar correctamente la posición de impresión. Esto se logró mediante un ciclo for y etiquetas que identifican a cada elemento. A continuación, se presenta el diseño de la interfaz de usuario.

### 3.2.4. Diseño de la interfaz del usuario

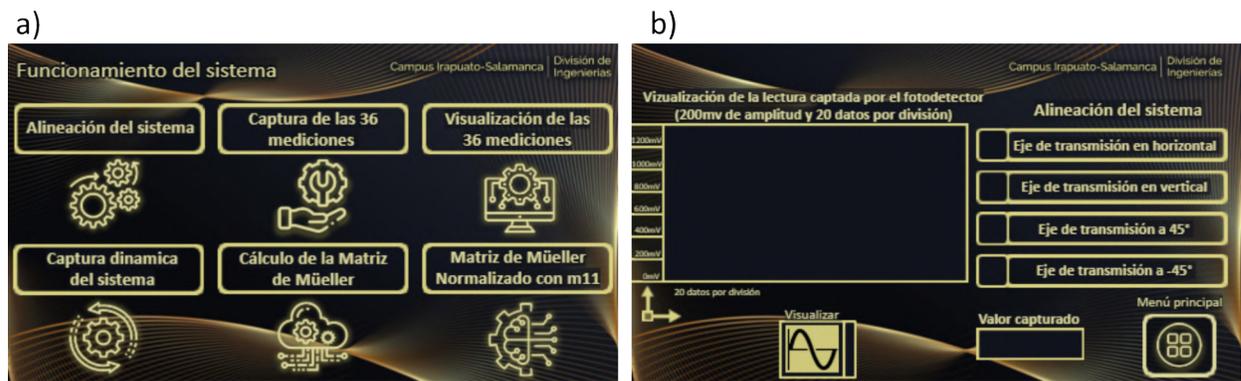
La pantalla Nextion constituye una solución óptima para la creación de una interfaz hombre-máquina (HMI) integrada, ya que combina un procesador incorporado con una pantalla táctil de memoria y el software Nextion Editor. Este último permite el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario (GUI) de HMI mediante el uso de componentes visuales (gráficos, texto, botones, etc.) e instrucciones basadas en texto ASCII.

En el modelo Enhanced, los componentes de la interfaz pueden interactuar entre sí de manera específica, lo que se logra mediante la programación de instrucciones de texto ASCII. La pantalla HMI se conecta al microcontrolador a través de una interfaz serial TTL (5V, TX, RX, GND), lo que permite la transmisión de identificadores de eventos y la comunicación efectiva entre ambos dispositivos. El diseño del sistema se fundamentó en la identificación de los pro-

cesos esenciales para el cálculo de la matriz y la incorporación de funcionalidades adicionales destinadas a facilitar la alineación y la interacción con el usuario.

En este sentido, se diseñó una pantalla de inicio que proporciona opciones para iniciar procesos de adquisición y cálculo (Figura 3.2.14a), así como para procesar datos de secuencias previamente capturadas. El menú de la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) ofrece al usuario un menú con seis opciones.

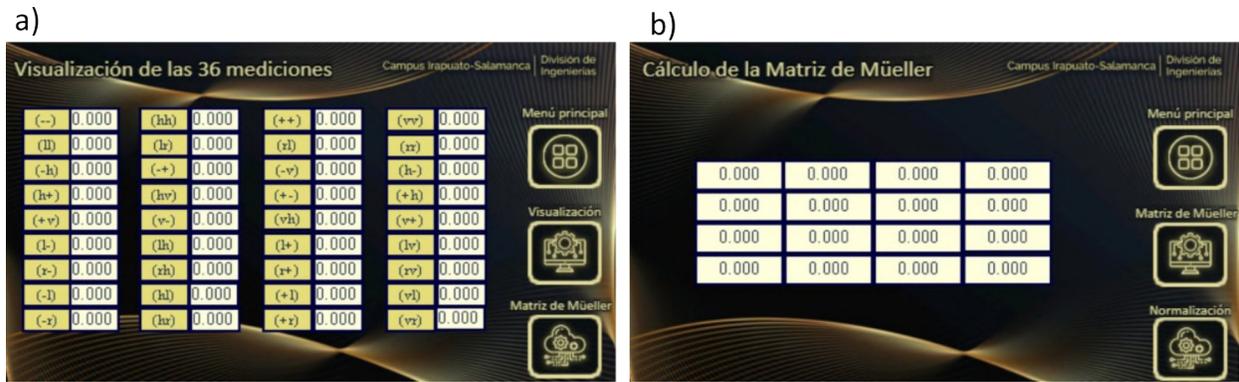
La primera opción permite realizar la alineación de una muestra cuyo resultado depende del posicionamiento angular de los elementos ópticos, tales como polarizadores y láminas de retardo. Además, esta opción proporciona una representación gráfica en tiempo real de la intensidad capturada, lo que permite visualizar la intensidad máxima cuando los elementos ópticos se alinean con el eje de transmisión del sistema (Figura 3.2.14b).



**Figura 3.2.14:** Interfaz del usuario diseñada en Nextion Editor: a) menú principal, b) pantalla de alineación para la muestra.

Posteriormente, se diseñaron varias pantallas adicionales para facilitar la interacción del usuario. Entre ellas, se encuentra la pantalla de captura de las 36 combinaciones, que permite visualizar mediante indicadores la combinación específica de elementos ópticos seleccionada y monitorear el progreso de la adquisición.

A continuación, se presenta una pantalla para la normalización de estos valores (Figura 3.2.15a). Luego, se encuentra la pantalla de cálculo de la MM, que utiliza los valores normalizados anteriormente (Figura 3.2.15b). Además, se incluye una pantalla adicional que permite la normalización directa de los valores obtenidos de la matriz resultante de las operaciones necesarias con los valores capturados .



**Figura 3.2.15:** Interfaz del usuario diseñada en Nextion Editor: a) pantalla de adquisición de datos y b) pantalla de cálculo de la Matriz de Mueller.

Para complementar la información, se agregó una interfaz que permite al usuario visualizar gráficamente la captura dinámica de intensidades al girar uno o dos elementos ópticos simultáneamente. Esto proporciona una mayor comprensión de la relación entre la muestra y las diferentes incidencias de luz polarizada. Finalmente, se incluye una pantalla que presenta algunas de las matrices de Mueller conocidas en la literatura, ofreciendo una referencia adicional para el usuario.

Las Figuras precedentes muestran las pantallas diseñadas en el software Nextion Editor. Como se puede observar, estas pantallas cuentan con etiquetas en cada recuadro, las cuales resaltan de un color amarillo e identifican los elementos necesarios para su funcionamiento. Se utilizó una imagen prediseñada como fondo y se superpusieron botones con identificadores, los cuales definen una función específica a realizar y un valor asociado a imprimir.

La tarjeta ESP32 interpreta estos valores como funciones a ejecutar. Para visualizar los resultados, se utilizaron recuadros para mostrar datos numéricos. En el código en lenguaje C, se imprimen los valores de forma serial, incluyendo el identificador del botón, el valor a imprimir y el dato numérico correspondiente. La única diferencia al enviar un valor para la gráfica es que se debe utilizar un formato específico, agregando el comando 'add' seguido del identificador de la gráfica, el canal donde agregar el dato y, finalmente, el dato numérico.

Además, se consideró que, para trabajar con esta LCD, cada dato a graficar se representará como un píxel en el avance temporal y la amplitud. Para ello, se implementó un escalado según el número de píxeles del recuadro de la figura y el valor máximo visualizable. De esta manera, se logró crear un HMI asociable que cubre las opciones necesarias para que el usuario pueda obtener la huella óptica de una muestra ópticamente activa.

### 3.2.5. Estados de polarización

El diseño del arreglo óptico debe cumplir con la tarea de realizar 36 mediciones al aplicar luz con polarización lineal y circular a una muestra para poder analizarla y detectar como una muestra a influido en las características de la luz pasando por la muestra proporcionando información de sus características ópticas. Cada una de las 36 mediciones debe ser una combinación específica del posicionamiento angular por medio de los motores del SOE y SOS controlada de una forma automática por medio de la tarjeta digital y el programa en lenguaje C utilizado para ello.

En la Tabla 3.2.1, se muestran las combinaciones y posicionamiento que deben cumplir los componentes del SOE (P1 y L1) y del SOS (L2 y P2), para medir 16 valores de irradiancia que corresponden a estados de polarización lineal en una muestra de aire. También se muestra la magnitud de la irradiancia normalizada que debe ser obtenida idealmente.

**Tabla 3.2.1:** Combinación de estados de polarización lineal en el SOE y en el SOS.

Medición		Posicionamiento angular				Valor de irradiancia teórica (normalizado)
SOE	SOS	P1	L1	L2	P2	
h	h	0°	0°	0°	0°	Máximo (1)
+	+	45°	45°	45°	45°	
v	v	90°	90°	90°	90°	
-	-	-45°	-45°	-45°	-45°	
h	+	0°	0°	45°	45°	Medio (0.5)
+	h	45°	45°	0°	0°	
h	-	0°	0°	-45°	-45°	
-	h	-45°	-45°	0°	0°	
v	+	90°	90°	45°	45°	
+	v	45°	45°	90°	90°	
v	-	90°	90°	-45°	-45°	
-	v	-45°	-45°	90°	90°	
h	v	0°	0°	90°	90°	Mínimo (0)
v	h	90°	90°	0°	0°	
+	-	45°	45°	-45°	-45°	
-	+	-45°	-45°	45°	45°	

La irradiancia máxima normalizada se establece en 1, valor que se alcanza cuando los ejes de transmisión de todos los componentes del sistema están alineados. Se observa que cuando el eje de transmisión del SOE y el SOS presentan una diferencia angular de 45°, la irradiancia se reduce a 0.5. Por otro lado, cuando estos ejes están desfasados 90°, se produce una atenuación total de la luz, debido a la naturaleza de la polarización lineal.

En la Tabla 3.2.2, se agruparon las combinaciones entre la generación por el SOE y análisis por el SOS de los 16 estados de polarización lineales y circulares. El método para posicionar los elementos ópticos del arreglo experimental es similar al explicado anteriormente con la combinación de estados de polarización lineal ya que el programa diseñado para esto es controlado por la misma tarjeta digital con la intención de que sus instrucciones cumplan con este objetivo. Los valores obtenidos se realizan utilizando al aire como el elemento de muestra. En esta ocasión los ejes de transmisión de las láminas retardadoras no están alineadas con los de los polarizadores como se observa en la Tabla.

**Tabla 3.2.2:** Combinación de estados de polarización lineal y circular.

Medición		Posicionamiento angular				Valor de irradiancia teórica (normalizado)
SOE	SOS	P1	L1	L2	P2	
h	r	0°	0°	45°	0°	Medio (0.5)
h	l	0°	0°	-45°	0°	
r	h	0°	45°	0°	0°	
l	h	0°	-45°	0°	0°	
+	r	45°	45°	45°	0°	
+	l	45°	45°	-45°	0°	
r	+	0°	45°	45°	45°	
l	+	0°	-45°	45°	45°	
v	r	90°	90°	45°	0°	
v	l	90°	90°	-45°	0°	
r	v	0°	45°	90°	90°	
l	v	0°	-45°	90°	90°	
-	r	-45°	-45°	45°	0°	
-	l	-45°	-45°	-45°	0°	
r	-	0°	45°	-45°	-45°	
l	-	0°	-45°	-45°	-45°	

En la Tabla 3.2.3, se agruparon las 4 combinaciones de los estados de polarización circulares con la programación angular de los elementos que conforman el SOE y el SOS siguiendo con la misma metodología expuesta anteriormente.

**Tabla 3.2.3:** Combinación de estados de circular.

Medición		Posicionamiento angular				Valor de irradiancia teórica (normalizado)
SOE	SOS	P1	L1	L2	P2	
r	r	0°	45°	45°	0°	Máximo (1)
l	l	0°	-45°	-45°	0°	
r	l	0°	45°	-45°	0°	Mínimo (0)
l	r	0°	-45°	45°	0°	

---

## Capítulo 4

---

# Resultados

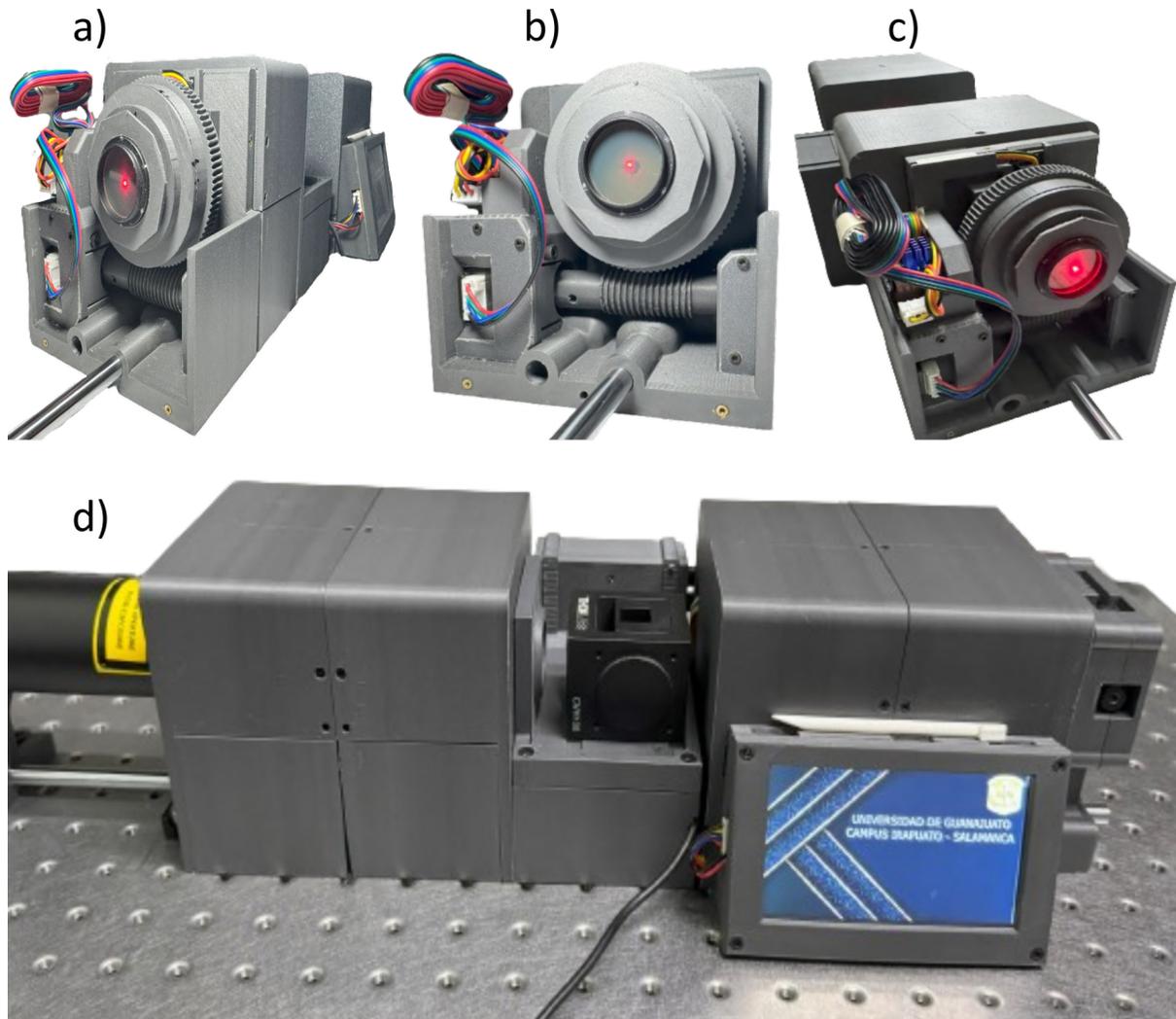
Después de haber presentado los conceptos básicos necesarios para comprender los aspectos considerados en el desarrollo del dispositivo, así como las consideraciones que se tuvieron en cuenta durante el proceso de diseño, ahora es momento de presentar los resultados obtenidos con el instrumento opto-mecánico.

A continuación, se presentarán las matrices de Mueller para algunas muestras conocidas en la literatura, así como para otras muestras seleccionadas para observar su actividad óptica. Además, se analizará el error que presenta el dispositivo bajo ciertas condiciones, con el fin de evaluar su rendimiento y precisión.

### 4.1. Sistema mecatrónico funcional

Se han mencionado las consideraciones en el diseño, impresión, circuitos electrónicos, programación y visualización, pero ahora es el momento de presentar los resultados y las imágenes del dispositivo funcional. El objetivo principal de esta tesis es demostrar que el dispositivo puede proporcionar resultados óptimos sin requerir una alineación compleja y ser confiable en sus resultados, con un diseño robusto que permita su movimiento en secciones.

En la siguiente Figura 4.1.1 se presenta la forma en que se acoplan los módulos y el mecanismo una vez impreso en 3D, así como la distribución de la electrónica sobre el módulo.



**Figura 4.1.1:** Sistema de posicionamiento de elementos ópticos funcional, a) Vista frontal de un módulo con todos los elementos ensamblados, b) Vista del sistema ensamblado, con el primer módulo sin cubierta y saliente de la pantalla, c) Vista del sistema sin cubierta en el primer módulo y saliente de la fuente de alimentación y d) Captura del sistema con el láser acoplado en la cubierta del primer módulo, con el eje de alineación y pantalla encendida, sin cubierta en la porta muestra.

Como se puede apreciar en la Figura anterior, se logró diseñar un sistema con una robustez que permite un mejor control en el ajuste y sujeción de los elementos ópticos sobre un plano, sin presentar movimientos debidos a deformaciones. Esto permite evitar reflejos y minimizar la acumulación de errores significativos causados por la distancia entre la fuente de luz y el sensor óptico. Además, cada módulo cuenta con cubiertas que protegen contra partículas de polvo y evitan la influencia de otras fuentes de luz en las mediciones.

Es importante destacar que las conexiones incorporadas en cada módulo están distribuidas de manera estratégica en una parte específica del dispositivo, lo que evita cualquier contacto con el mecanismo de avance. Esto se logra mediante la incorporación de paredes o compartimentos en las tapas de los módulos. La tarjeta de control se encuentra protegida de posibles contactos en la parte central del sistema y en la parte inferior del módulo donde se agrega la muestra, y se ha retirado del compartimento que alberga la fuente de energía del mecanismo.

Además, se puede observar cómo el eje de alineación entre módulos se integra de manera efectiva, lo que permite acoplar todos los elementos de manera correcta. A pesar de que todo el sistema fue diseñado desde cero y fabricado mediante impresión 3D, los componentes como el engranaje, el tornillo sin fin y la pantalla táctil se acoplan de manera precisa con el dispositivo, y este funciona de forma independiente, sin requerir la conexión a una computadora.

## 4.2. Condiciones de iniciales

Al igual que en cualquier trabajo realizado o dispositivo elaborado, es fundamental especificar las condiciones de trabajo bajo las cuales se obtuvieron los resultados presentados en este capítulo. Con el fin de garantizar la reproducibilidad y validez de los resultados, y para proporcionar una comprensión clara de los parámetros y limitaciones que se tuvieron en cuenta durante la realización del estudio.

1. **Alineación del polarímetro con el láser:** Es importante destacar que el dispositivo está diseñado para lograr una alineación precisa y controlada en un tiempo mínimo. Para lograr esto, se considera primeramente la alineación del eje de transmisión sobre los elementos ópticos desde la fuente de luz láser. Esta alineación se logra a partir del primer módulo y el láser seleccionado para este trabajo, ya que el diseño incluye una ranura donde se acopla el cabezal del láser.

Una vez identificado el punto de incidencia del haz del láser con el fotodetector del módulo final y el obturador como referencia del punto central del sensor, se pueden ajustar los parámetros necesarios para asegurar una alineación óptima. Además, se incorporan ejes que atraviesan todo el dispositivo, lo que ayuda a mantener todos los módulos alineados sobre un punto central, minimizando así los errores por reflejo y reduciendo el tiempo necesario para encontrar la posición óptima del polarímetro.

2. **Temperatura del lugar de trabajo y de la fuente de luz:** Es importante destacar que las pruebas se llevaron a cabo en un entorno en el que no se tenía un control preciso sobre la temperatura ambiental, la cual oscilaba entre un rango de 15 °C y 25 °C. Esta variabilidad en la temperatura podría tener un impacto en el tiempo necesario para estabilizar el láser,

ya que, según las especificaciones del fabricante, se requiere un mínimo de 30 minutos para lograr una estabilización óptima del dispositivo después de su encendido.

3. **Alineación de los elementos ópticos:** Como se ha mencionado anteriormente, una vez que se ha completado la alineación del dispositivo, se lleva a cabo un proceso de posicionamiento para garantizar que los elementos ópticos utilizados estén perfectamente alineados en su eje de transmisión, herramienta que ya se caracterizó en el mismo dispositivo para asegurar resultados más precisos y confiables.
4. **Factores adicionales que influyeron en los resultados:** Además de la falta de control sobre la temperatura ambiental del lugar de trabajo, es importante considerar que los resultados presentados se obtuvieron en un entorno que presentaba ciertas limitaciones. En particular, el edificio en el que se realizaron las mediciones estaba sujeto a vibraciones significativas producidas por su estructura, lo que afectaba la estabilidad de las mediciones.

Además, la mesa de trabajo utilizada era rígida y carecía de amortiguación, lo que la hacía susceptible a las vibraciones del edificio. Estos factores se reflejaron claramente en la visualización de las señales con el osciloscopio, y se comprobaron al observar cómo el aumento del flujo de personas en el área, especialmente cerca de las escaleras, afectaba las mediciones.

Otro aspecto que se observó con el osciloscopio es que la fuente de luz presentaba oscilaciones debidas a ruido y fluctuaciones en la salida del láser He-Ne. Según la documentación técnica del fabricante, estas fluctuaciones pueden ser causadas por factores ambientales o por la fuente de alimentación. Para mitigar este efecto, se implementó un circuito de muestreo que permitió reducir el impacto de estas oscilaciones en los resultados y mejorar la precisión de las mediciones.

### 4.3. Proceso de adquisición

El polarímetro desarrollado presenta una interfaz de usuario intuitiva y amigable, que incluye algunas matrices conocidas en la literatura. Esto permite tener un punto de referencia para comparar los resultados obtenidos con los valores ideales y calcular el error del dispositivo de manera precisa. De esta forma, se puede evaluar el rendimiento del polarímetro y determinar su precisión y confiabilidad en la medición de parámetros ópticos.

1. Considerando las condiciones iniciales de trabajo, se recomienda realizar una alineación del sistema cada vez que el dispositivo se enciende por primera vez. Esto permite posicio-

nar todos los elementos ópticos en el mismo eje de transmisión, que ya ha sido caracterizado para los polarizadores y láminas utilizadas. Además de ser una opción disponible para el usuario, esta herramienta permite posicionar todos los elementos en distintos ejes de transmisión de prueba en la pantalla “Alineación del sistema”, con el fin de lograr posicionar algún otro elemento óptico a un ángulo específico de los cuatro posibles en este arreglo.

Por ejemplo, cuando se posicionó un polarizador como muestra a  $45^\circ$ , se ajustó el eje de transmisión a  $45^\circ$ . Luego, se presionó el botón de visualizar en la pantalla, lo que permitió obtener con el fotodetector y la tarjeta digital 150 datos en tiempo real con el objetivo de determinar la posición correcta de la muestra cuando la amplitud mostrada en la gráfica de la Figura 3.2.14b alcance su valor máximo. De esta manera, se puede asegurar que el dispositivo esté configurado para realizar mediciones precisas.

2. Una vez que se ha establecido la posición angular deseada de la muestra (si es necesario), se puede regresar al menú principal para iniciar el segundo paso del proceso de adquisición de la MM de la muestra. La pantalla “Captura de las 36 muestras” muestra las combinaciones del SOE y el SOS con etiquetas claras. Al presionar el botón “Capturar”, el sistema comienza a realizar un barrido automático para las diferentes posiciones, y se enciende un indicador que especifica la posición que se está capturando en ese momento.

Además, se agrega un recuadro adicional para especificar la acción a realizar una vez que se hayan obtenido todos los valores. El sistema también proporciona la opción de visualizar los resultados en la pantalla “Visualización de las 36 mediciones”, lo que permite observar la irradiancia capturada en cada combinación y detectar cualquier problema potencial.

Es importante destacar que los valores se expresan en unidades de volts y se normalizan antes de ser visualizados, lo que permite mostrar valores entre 0 y 1. Esta normalización es esencial para obtener una visualización más precisa y cercana a la MM, sin modificar los datos originales.

3. Es importante destacar que la interfaz solo muestra los resultados después de realizar las operaciones necesarias para procesar los datos, lo que se logra de manera casi instantánea gracias a las características de la tarjeta de control. De esta forma, se proporciona la MM final en la pantalla “Cálculo de la matriz de Mueller”, donde se presentan los valores de la polarización que dominan en ciertos parámetros.

La matriz de Müller que se presenta es el resultado de realizar operaciones con los datos normalizados. Sin embargo, la interfaz también ofrece la opción de visualizar una matriz de Mueller alternativa, que se obtiene tomando los valores capturados inicialmente

y realizando las operaciones con estos, sin normalizarlos hasta el final. En este caso, la normalización se aplica solo al final, utilizando el valor en la posición  $m_{11}$  de la matriz como referencia.

Esto permite a los usuarios comparar los resultados obtenidos con y sin normalización, lo que puede ser útil para analizar y comprender mejor las propiedades ópticas de las muestras.

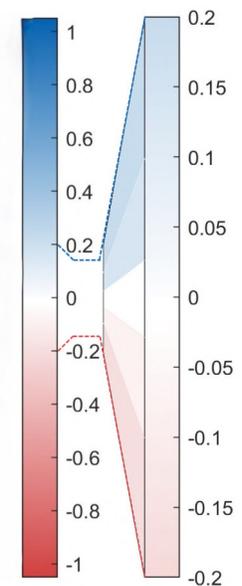
## 4.4. Muestras analizadas

Aunque en la historia del arte hay una gran variedad de propuestas de dispositivos polarimétricos, este trabajo pretende aportar una variante mecatrónica basada en diseños realizados en trabajos anteriores en DICIS dando continuidad a un trabajo inicial de un esparcímetero de resolución angular con el objetivo de construcción modular y robusta utilizando técnicas de impresión 3D, utilización de tarjetas digitales con capacidad de suficientes puertos de entrada/salida, de transmisión/recepción en serie para la conexión con pantallas táctiles y con fuentes de alimentación conmutadas por ser más eficientes y pequeñas.

Al final, el prototipo como cualquier equipo debe ser alimentado por una sola toma de corriente alterna (CA). A continuación, se presentan los resultados de la operación del arreglo óptico mecatrónico construido al utilizarse como muestras: el aire, un polarizador y una lámina retardadora en diferentes posiciones angulares. Los resultados de la medición de 36 valores de irradiancia son obtenidos de forma automática y exhibidos en una pantalla táctil por medio de la MM.

En las Tablas mostradas abajo muestran la MM ideal, los valores medidos y normalizados y el error obtenido con respecto a la matriz ideal. En estas secciones también se muestran de una forma alterna los valores mediante una paleta de colores como se ilustra en la Figura 4.4.1 y reflejados como fondo en la MM.

Es importante destacar que, para evaluar la precisión de las matrices presentadas, se establecerá el máximo error como el elemento que exhiba la mayor desviación con respecto a su valor ideal. Además, se calculará el error promedio ( $\bar{e}$ ) mediante la ecuación:



**Figura 4.4.1:** Escalas utilizadas para visualizar los resultados en términos de intensidad de luz.

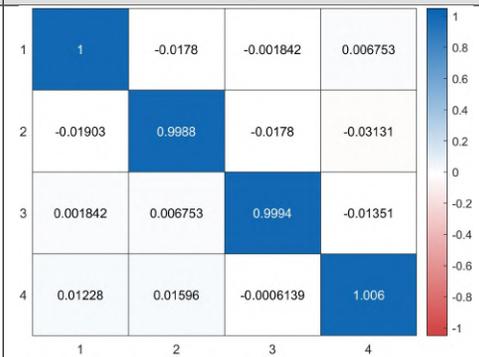
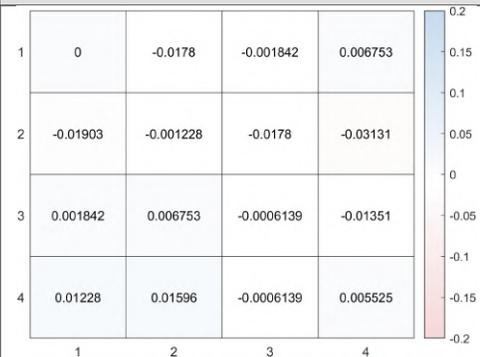
$$\bar{e} = \frac{1}{16} \sum_{n=1}^{16} |M_{n_{ideal}} - M_n|; \tag{4.1}$$

donde n representa el número total de elementos de la matriz (n = 16);  $M_{n_{ideal}}$  corresponde a los valores ideales de la MM y  $M_n$  se refiere a los valores obtenidos experimentalmente.

### 4.4.1. Aire

El aire como un elemento de muestra en la caracterización del dispositivo es útil para considerarlo como una medición de referencia debido a que, de acuerdo con la literatura, la MM presenta una estructura peculiar, ya que idealmente los elementos normalizados en la diagonal principal tienen un valor de 1 y los elementos restantes son 0 como se muestra en la Tabla 4.4.1.

**Tabla 4.4.1:** Matriz de Mueller para el aire a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.

a) MM Ideal	b) MM Capturada	c) Error en cada elemento
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		

También se observa que el valor del elemento  $m_{11}$  de la MM, como en la Ecuación (2.25), corresponde a la intensidad de la luz incidente no polarizada sobre el dispositivo. Por otro lado, los valores de los elementos  $m_{22}$  representan la intensidad de la polarización lineal (horizontal o vertical),  $m_{33}$  la intensidad de la polarización lineal (45° o -45°) y  $m_{44}$  la intensidad de polarización circular (izquierda o derecha). Por consiguiente, la presencia de valores inferiores a 1 indica una reducción en la transmisión para todos los casos.

En términos generales, estos cuatro valores proporcionan información sobre el hecho de que el aire, al ser un medio isotrópico, no afecta la intensidad ni la polarización de la luz que atraviesa, ya que carece de propiedades ópticas direccionales. En la matriz ideal del aire, los valores de 0 representan la ausencia de conversión de polarización. En el marco de este trabajo,

se realizaron al menos 50 capturas de la MM para el aire a manera de comprobar la repetibilidad del dispositivo.

En la Tabla 4.4.1 se presenta un ejemplo representativo de al menos una de las tres capturas seleccionadas para este estudio (como se detalla en la Tabla 4.4.2), con el objetivo de evaluar la fiabilidad general del mecanismo.

Este análisis inicial del aire constituye el punto de partida para realizar la caracterización e identificar patrones en las capturas de los 16 elementos de la matriz. La representación visual de los resultados se realiza mediante una matriz, donde los colores azules indican valores positivos y los colores rojos indican valores negativos (dato que tomara más relevancia para otras muestras), según la barra de colores adjunta. La tonalidad de los colores varía en función del valor del elemento de la matriz, que se encuentra normalizada con respecto al elemento  $m_{11}$ .

En la Tabla 4.4.1, se observa en la tercera columna el error entre la matriz capturada y la matriz ideal, destacando los elementos que presentan una mayor desviación y el signo de dicha desviación. La representación de los errores se realiza utilizando una escala de colores similar a la empleada en la Figura 4.4.1. En la Tabla 4.4.2 se presentan tres capturas realizadas en días distintos, las cuales exhiben un comportamiento diferenciado, particularmente en los elementos  $m_{33}$  y  $m_{44}$ .

**Tabla 4.4.2:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una muestra (aire) en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0110 & 0.0116 & 0.0031 \\ 0.0110 & 1.0000 & -0.0080 & -0.0067 \\ -0.0006 & 0.0092 & 0.9829 & -0.0141 \\ 0.0049 & 0.0122 & -0.0031 & 0.9939 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.0178 & -0.0018 & 0.0068 \\ -0.0190 & 0.9988 & -0.0178 & -0.0313 \\ 0.0018 & 0.0068 & 0.9994 & -0.0135 \\ 0.0123 & 0.0160 & -0.0006 & 1.0055 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0005 & -0.0060 & 0.0044 \\ 0.0005 & 1.0000 & -0.0126 & -0.0296 \\ 0.0022 & 0.0142 & 1.0104 & 0.0219 \\ 0.0093 & 0.0104 & -0.0027 & 1.0372 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0074</b>	<b>0.0096</b>	<b>0.0101</b>

Este comportamiento del error sugiere que el control del medio ambiente debe considerarse como una posibilidad ya que es probable que influya en las lecturas resultantes. Entre otros factores podemos mencionar a: el polvo en el medio ambiente, vibraciones, luz ambiental, alineación, calidad de los componentes ópticos, regulación de voltaje en las fuentes de alimentación, variación en la intensidad de la fuente de luz, entre otros.

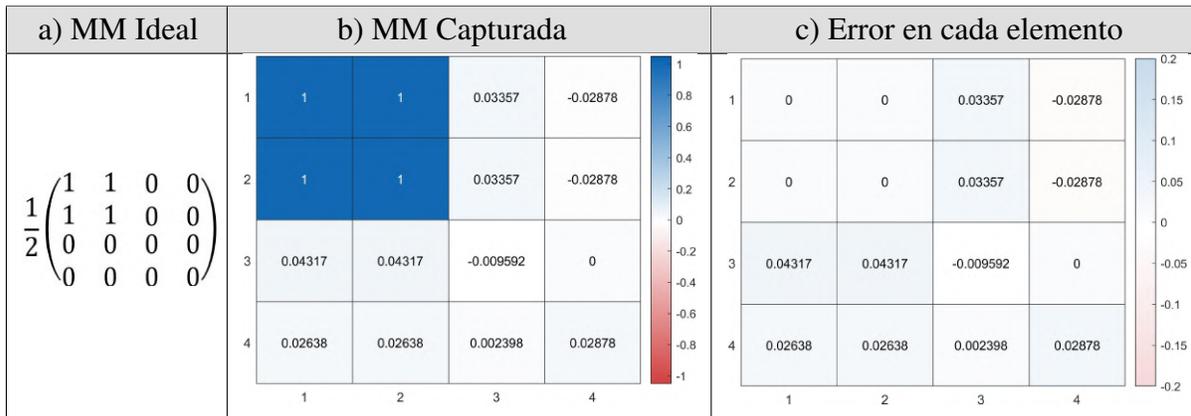
Estos factores son importantes, sin embargo, hay que destacar que el error calculado para estas capturas es de hasta 1.01 %, lo que representa un valor relativamente bajo en comparación con otros estudios similares que han utilizado aire como elemento de muestra y, por lo tanto, aunque no debe descartarse en el resultado final consideramos que fue un buen punto de partida para realizar mediciones en más muestras.

### 4.4.2. Polarizador lineal a 0°.

En la literatura especializada, se encuentran las matrices de Mueller de un polarizador lineal con eje de transmisión orientado a 0°, 45°, 90° y -45° obtenidos a partir de condiciones ideales. Las expresiones ideales nos permiten compararse con los resultados de la MM obtenidos de nuestro prototipo, así como observar variaciones en magnitud de otros elementos con respecto a los obtenidos con los del aire.

Cabe destacar que la incorporación de un elemento óptico adicional en el camino de una fuente de luz como lo es el haz de un láser requiere considerar una atenuación adicional en la intensidad registrada en el fotodetector. Otra atenuación puede estar en función de la orientación del polarizador lineal dentro del arreglo óptico como es el caso de introducir un polarizador como muestra, sin embargo, en el proceso de normalización se hace el ajuste para tener valores proporcionales a aquellos reportados en la literatura, como se observa en la Tabla 4.4.3.

**Tabla 4.4.3:** Matriz de Mueller para un polarizador a 0°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Los resultados presentados en la Tabla 4.4.3 resalta la actividad óptica de un polarizador lineal resaltándose en los elementos  $m_{12}$  y  $m_{21}$  en concordancia con la literatura y la tercera columna muestra el alejamiento de estos valores normalizados con la matriz ideal. En la Tabla 4.4.4 se presentan la repetibilidad en tres capturas realizadas en distintos días.

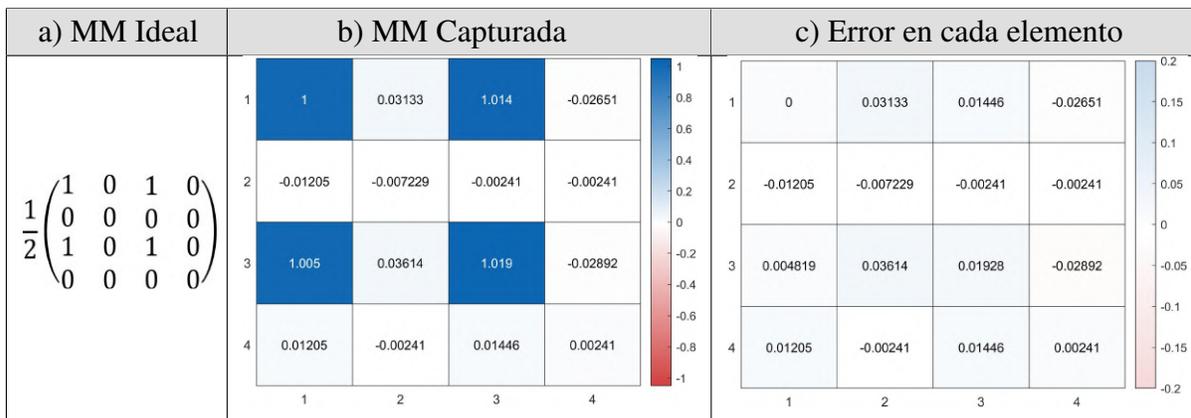
**Tabla 4.4.4:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a 0° en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 1.0000 & -0.0315 & -0.0202 \\ 1.0000 & 1.0000 & -0.0315 & -0.0202 \\ -0.0337 & -0.0337 & -0.0090 & 0.0045 \\ 0.0270 & 0.0270 & 0.0000 & 0.0270 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 0.0336 & -0.0288 \\ 1.0000 & 1.0000 & 0.0336 & -0.0288 \\ 0.0432 & 0.0432 & -0.0096 & 0.0000 \\ 0.0234 & 0.0264 & 0.0024 & 0.0288 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 0.0376 & -0.0306 \\ 1.0000 & 1.0000 & 0.0376 & -0.0306 \\ 0.0424 & 0.0424 & 0.0071 & -0.0047 \\ 0.0188 & 0.0188 & 0.0024 & 0.0329 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0166</b>	<b>0.0190</b>	<b>0.0191</b>

### 4.4.3. Polarizador lineal a 45°

Con la colocación en el porta muestras de un polarizador con el eje de transmisión a 45° (Figura 3.2.14b), se obtuvo la MM y presentada en la Tabla 4.4.5. En ella, se observa que la intensidad máxima de la luz incidente sobre el fotodetector, después de pasar por la muestra, se reduce a la mitad con respecto a un polarizador cuyo eje de transmisión está a 0°. Las intensidades máximas se presentaron en los elementos de la MM,  $m_{11}$ ,  $m_{13}$ ,  $m_{31}$  y  $m_{33}$  como se muestra en la segunda columna de la Tabla, mientras en la tercera columna se presenta un error en estas posiciones con respecto a la matriz ideal.

**Tabla 4.4.5:** Matriz de Mueller de un polarizador a 45°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



En la Tabla 4.4.5 se observa que el error promedio es menor en comparación con el obtenido en la posición del polarizador lineal a 0°, obteniendo un valor de 1.47 % como máximo de estas mediciones. Las mediciones en tres días consecutivos se muestran en la Tabla 4.4.6.

**Tabla 4.4.6:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a 45° en diferentes días.

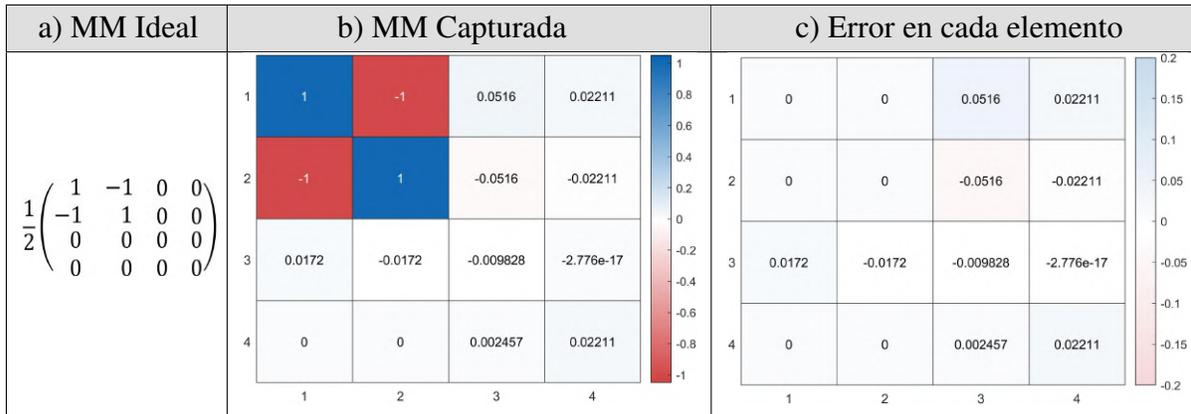
MM normalizado con el elemento m11	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0332 & 1.0047 & -0.0355 \\ -0.0095 & 0.0000 & -0.0047 & 0.0024 \\ 0.9929 & 0.0355 & 1.0237 & -0.0355 \\ 0.0095 & 0.0000 & 0.0118 & 0.0000 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0313 & 1.0145 & -0.0265 \\ -0.0120 & -0.0072 & -0.0024 & -0.0024 \\ 1.0048 & 0.0361 & 1.0193 & -0.0289 \\ 0.0120 & -0.0024 & 0.0145 & 0.0024 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0337 & 1.0192 & -0.0264 \\ -0.0096 & -0.0048 & -0.0048 & -0.0024 \\ 1.0096 & 0.0337 & 1.0288 & -0.0288 \\ 0.0168 & -0.0024 & 0.0144 & 0.0000 \end{pmatrix}$
Error promedio	<b>0.0133</b>	<b>0.0136</b>	<b>0.0147</b>

### 4.4.4. Polarizador lineal a 90°

Ahora la muestra es un polarizador lineal con su eje de transmisión a 90°, la MM como se muestra en la Tabla 4.4.7. Se observa que las posiciones con mayor actividad óptica correspon-

den de forma similar a las observadas en los elementos que los del polarizador a 0°, sin embargo, los elementos de la MM,  $m_{12}$  y  $m_{21}$  son negativos.

**Tabla 4.4.7:** Matriz de Mueller de un polarizador a 90°, a) valor ideal, b) capturada y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Los elementos  $m_{13}$  y  $m_{23}$  presentan valores idénticos, pero con signo opuesto que es resultado de la combinación de polarización de mediciones y sumas algebraicas de irradiancias en posiciones angulares de +45° o -45° tanto en el SOE como como posiciones angulares horizontal (h) y vertical (v) en el SOS. En la Tabla 4.4.8 se muestran los valores de MM en lapsos de tiempo de un día.

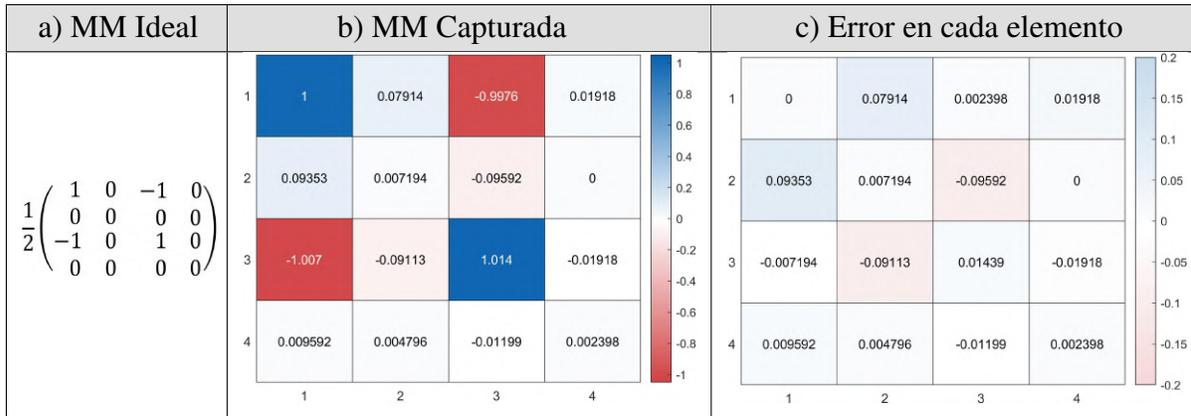
**Tabla 4.4.8:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a 90° en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.9955 & 0.0313 & 0.0157 \\ -1.0000 & 0.9955 & -0.0313 & -0.0157 \\ 0.0179 & -0.0134 & 0.0022 & 0.0000 \\ 0.0022 & -0.0022 & 0.0022 & 0.0157 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -1.0000 & 0.0516 & 0.0221 \\ -1.0000 & 1.0000 & -0.0516 & -0.0221 \\ 0.0172 & -0.0172 & -0.0098 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0025 & 0.0221 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -1.0000 & 0.0491 & 0.0270 \\ -1.0000 & 1.0000 & -0.0491 & -0.0270 \\ 0.0147 & -0.0147 & -0.0025 & -0.0025 \\ -0.0025 & 0.0025 & -0.0025 & 0.0270 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0099</b>	<b>0.0135</b>	<b>0.0138</b>

### 4.4.5. Polarizador lineal a -45°

En el porta muestras ahora es colocado un polarizador cuyo eje de transmisión esta inclinado con un ángulo de - 45° o de 135° en el sentido contrario de las manecillas del reloj. La MM se muestra en la Tabla 4.4.9, aquí observamos que las posiciones con mayor actividad óptica tienen una similitud a las observadas en los elementos que los del polarizador a 45° con los elementos de la MM,  $m_{31}$  y  $m_{13}$  son negativos.

**Tabla 4.4.9:** Matriz de Mueller de un polarizador a  $-45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Se destacan los colores tenues en las posiciones  $m_{12}$ ,  $m_{21}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{23}$ ,  $m_{32}$ , resaltados en la Tabla 4.4.9, y que al analizar la Tabla 4.4.10, que presenta tres mediciones en días distintos, se observa que la desviación se mantiene constante en estos elementos de la matriz. Aunque se identifican cuatro con un aumento en el error en comparación con las muestras anteriores, el error máximo obtenido es de 2.95 %.

Como se ha mencionado, las matrices de Mueller permiten un análisis más completo de las propiedades ópticas de una muestra, especialmente en medios anisotrópicos. A partir de un estudio profundo de las ecuaciones de Maxwell, es posible describir la evolución de la polarización de la luz y modelar fenómenos como el dicroísmo y la birrefringencia mediante una matriz determinista [58]. Con este modelado se puede mencionar que los elementos  $m_{12}$ ,  $m_{21}$ , presentan dicroísmo lineal horizontal o vertical, mientras que  $m_{23}$  y  $m_{32}$  presentan birrefringencia circular.

**Tabla 4.4.10:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a  $-45^\circ$  en diferentes días.

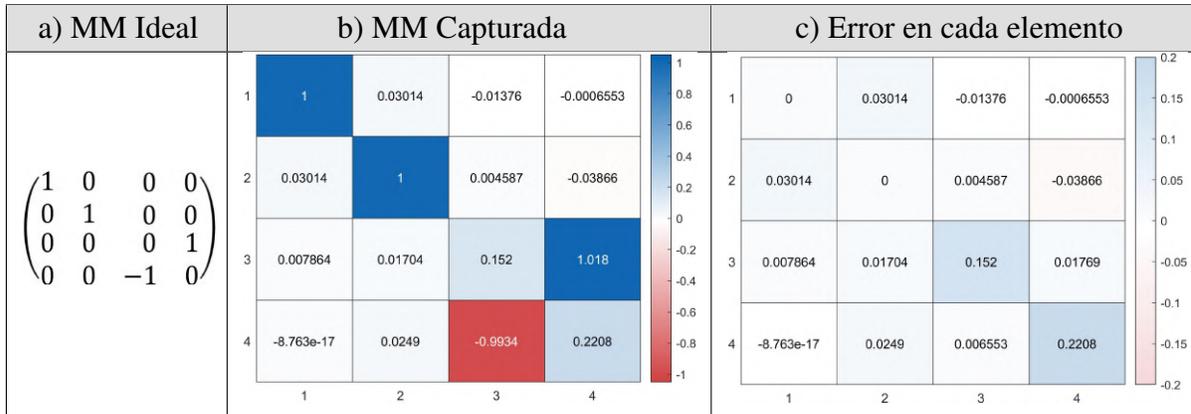
<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0788 & -1.0024 & 0.0191 \\ 0.0931 & 0.0024 & -0.0907 & 0.0000 \\ -1.0072 & -0.0907 & 1.0024 & -0.0167 \\ 0.0095 & 0.0000 & -0.0072 & 0.0024 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0791 & -0.9976 & 0.0192 \\ 0.0935 & 0.0072 & -0.0959 & 0.0000 \\ -1.0072 & -0.0911 & 1.0144 & -0.0192 \\ 0.0096 & 0.0048 & -0.0120 & 0.0024 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0857 & -0.9929 & 0.0167 \\ 0.0952 & 0.0000 & -0.0929 & 0.0024 \\ -1.0119 & -0.0976 & 1.0071 & -0.0286 \\ 0.0048 & 0.0048 & -0.0119 & 0.0048 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0264</b>	<b>0.0286</b>	<b>0.0295</b>

#### 4.4.6. Lámina de retardo $\lambda/4$ a $0^\circ$

Los resultados obtenidos para una mica retardadora de cuarto de onda con eje rápido orientado a  $0^\circ$  se muestran en la Tabla 4.4.11, donde la actividad óptica más significativa está en los elementos  $m_{11}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{34}$  y  $m_{43}$ . Estos resultados sugieren cambios en la polarización lineal a

circular y viceversa. Sin embargo, se identifican valores que resaltan como desviación del valor ideal en los elementos  $m_{33}$  y  $m_{44}$  de la MM, características de su contribución a la polarización lineal y circular en esta muestra.

**Tabla 4.4.11:** Matriz de Mueller de un retardador de cuarto de onda a  $0^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Este elemento de muestra tiene un comportamiento un poco diferente a uno de un fabricante establecido de muestras translúcidas que no necesariamente se comportan como ideales. También cabe mencionar que se realizó una pieza en 3D para su colocación en el portamuestras y las variaciones podrían deberse al introducir imperfecciones en la sujeción del material. Es notable que solo dos elementos presentan desviaciones sobresalientes en comparación con los demás. El error promedio es de 3.58 %, presentados en la Tabla 4.4.12. Asimismo, los elementos  $m_{33}$  y  $m_{44}$  corresponden a la absorción isotrópica, asociada a la despolarización lineal a  $\pm 45^\circ$  y circular, respectivamente. Las mediciones de estos elementos en diferentes días se presentan en la siguiente Tabla.

**Tabla 4.4.12:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $0^\circ$  en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0280 & -0.0182 & -0.0007 \\ 0.0293 & 0.9987 & 0.0039 & -0.0371 \\ 0.0078 & 0.0156 & 0.1594 & 1.0046 \\ 0.0033 & 0.0280 & -1.0020 & 0.2225 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0301 & -0.0138 & -0.0007 \\ 0.0301 & 1.0000 & 0.0046 & -0.0387 \\ 0.0079 & 0.0170 & 0.1520 & 1.0177 \\ 0.0000 & 0.0249 & -0.9934 & 0.2208 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0300 & -0.0087 & 0.0000 \\ 0.0314 & 0.9987 & 0.0047 & -0.0427 \\ 0.0067 & 0.0160 & 0.1574 & 1.0233 \\ 0.0013 & 0.0267 & -0.9940 & 0.2161 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0351</b>	<b>0.0353</b>	<b>0.0358</b>

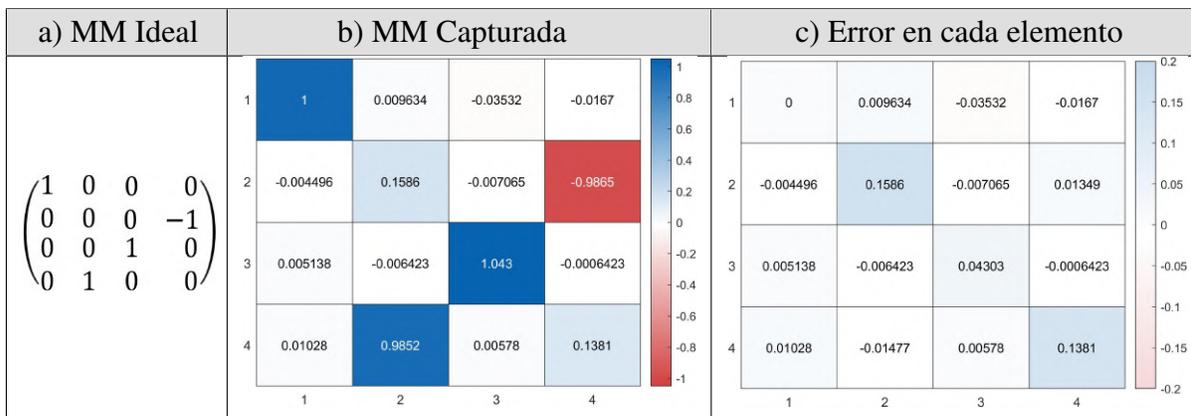
A continuación, se incluyen tres resultados más con esta lámina retardadora del párrafo anterior pero su eje rápido es colocado en diferentes posiciones angulares adicionales. Como en el caso previo, se incluyen la MM ideal, la matriz obtenida por el dispositivo, el error en cada

uno de los 16 elementos de la matriz. Estos tres conjuntos de datos se resumen en la primera Tabla. En la segunda Tabla, se muestran las variaciones observadas en las mediciones realizadas durante tres días consecutivos.

#### 4.4.7. Lámina de retardo $\lambda/4$ a $45^\circ$

Los elementos  $m_{24}$  y  $m_{42}$  de la MM de la muestra reflejan la birrefringencia lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x-y (es decir, a  $\pm 45^\circ$ ). Por otro lado, el elemento  $m_{33}$  esta relacionado con la absorción isotrópica de la muestra. Observando lo anterior en la Tabla 4.4.13 se puede comparar el comportamiento con respecto a la MM ideal.

**Tabla 4.4.13:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Se observa que los elementos  $m_{22}$  y  $m_{44}$  presentan las mayores desviaciones dentro de la matriz, correspondiendo a la absorción isotrópica en polarización lineal horizontal o vertical y circular, respectivamente. Por otro lado, la Tabla 4.4.14 muestra la repetibilidad de las mediciones, con un error no mayor al 3 %.

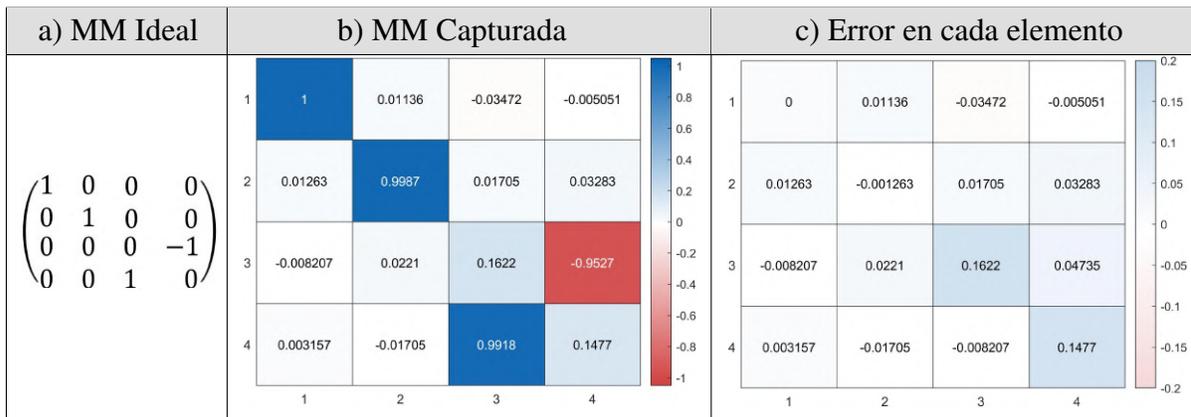
**Tabla 4.4.14:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $45^\circ$  en diferentes días.

MM normalizado con el elemento m11	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0136 & -0.0291 & -0.0110 \\ -0.0071 & 0.1597 & -0.0071 & -0.9884 \\ 0.0032 & -0.0071 & 1.0362 & -0.0045 \\ 0.0200 & 0.9948 & 0.0032 & 0.1390 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0096 & -0.0353 & -0.0167 \\ -0.0045 & 0.1586 & -0.0071 & -0.9865 \\ 0.0051 & -0.0064 & 1.0430 & -0.0006 \\ 0.0103 & 0.9852 & 0.0058 & 0.1381 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0181 & -0.0206 & -0.0097 \\ -0.0052 & 0.1613 & -0.0077 & -1.0006 \\ 0.0194 & -0.0026 & 1.0368 & -0.0135 \\ 0.0213 & 0.9826 & 0.0084 & 0.1374 \end{pmatrix}$
	Error promedio	0.0286	0.0293

### 4.4.8. Lámina de retardo $\lambda/4$ a $90^\circ$

Los elementos  $m_{34}$  y  $m_{43}$  de la MM de la muestra, presentada en la Tabla 4.4.15, reflejan la birrefringencia lineal a lo largo de los ejes x-y. Por su parte, el elemento  $m_{22}$  está asociado a la absorción isotrópica de la muestra.

**Tabla 4.4.15:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $90^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Los elementos  $m_{33}$  y  $m_{44}$  presentan la mayor desviación en las mediciones al compararse con la MM correspondiente a una lámina ubicada a  $90^\circ$ , evidenciando una absorción isotrópica sobre los mismos estados de polarización que en la posición de  $0^\circ$ . A continuación, se presenta la Tabla 4.4.16 con los resultados obtenidos al comparar las mediciones realizadas en diferentes días, donde se registró un error promedio de hasta 3.36 %.

**Tabla 4.4.16:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $90^\circ$  en diferentes días.

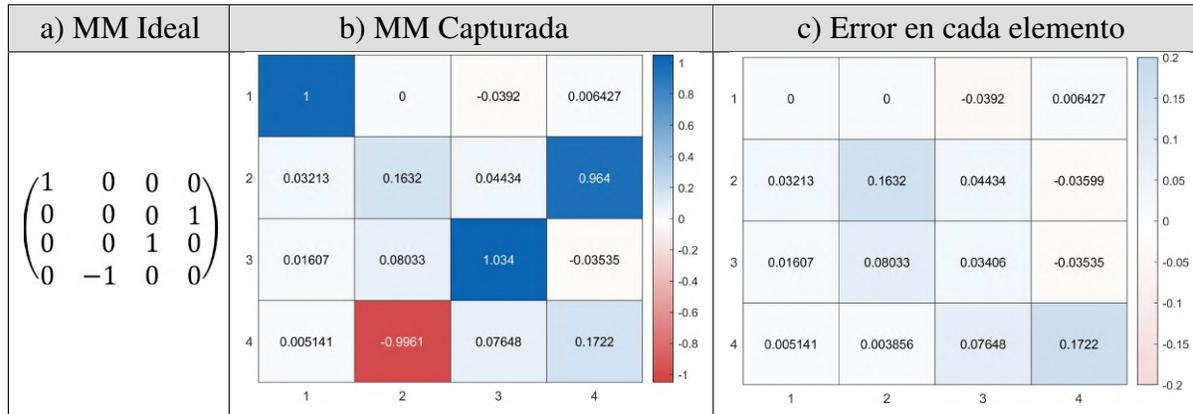
MM normalizado con el elemento m11	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0120 & -0.0297 & -0.0032 \\ 0.0133 & 0.9987 & 0.0171 & 0.0310 \\ -0.0114 & 0.0190 & 0.1701 & -0.9684 \\ 0.0032 & -0.0171 & 0.9981 & 0.1474 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0114 & -0.0347 & -0.0051 \\ 0.0126 & 0.9987 & 0.0170 & 0.0328 \\ -0.0082 & 0.0221 & 0.1622 & -0.9527 \\ 0.0032 & -0.0170 & 0.9918 & 0.1477 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0125 & -0.0344 & -0.0056 \\ 0.0138 & 0.9988 & 0.0169 & 0.0356 \\ -0.0119 & 0.0181 & 0.1625 & -0.9469 \\ 0.0038 & -0.0150 & 0.9944 & 0.1475 \end{pmatrix}$
Error promedio	<b>0.0318</b>	<b>0.0332</b>	<b>0.0336</b>

### 4.4.9. Lámina de retardo $\lambda/4$ a $-45^\circ$

Los elementos  $m_{24}$  y  $m_{42}$  de la MM de la muestra reflejan la birrefringencia lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x-y. Por otro lado, el elemento  $m_{33}$  está asociado a la absorción

isotrópica de la muestra. En la Tabla 4.4.17 se presenta el comportamiento registrado para esta posición de la lámina.

**Tabla 4.4.17:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $-45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



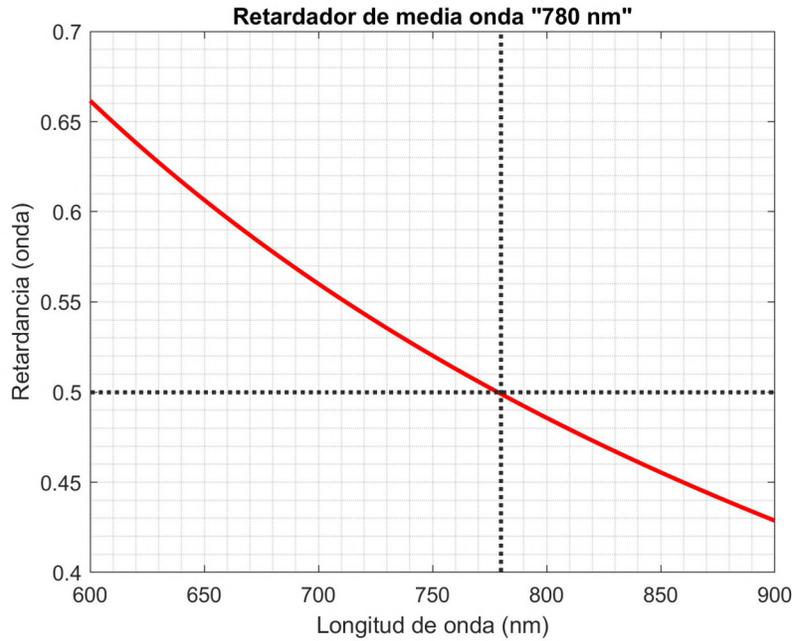
Ahora bien, la interpretación de los elementos con mayor desviación mostrados anteriormente sugiere la presencia de despolarización en los componentes correspondientes, específicamente en los elementos  $m_{22}$  y  $m_{44}$ . Esto se debe a que dichos elementos están asociados a las combinaciones de polarización lineal horizontal y vertical ( $m_{22}$ ) y polarización circular ( $m_{44}$ ), respectivamente. A continuación, en la Tabla 4.4.18 se observa el comportamiento de la muestra en diferentes días, siendo los dos últimos los que presentan mayor similitud en los resultados.

**Tabla 4.4.18:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $-45^\circ$  en diferentes días.

MM normalizado con el elemento m11	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.0032 & -0.0349 & 0.0071 \\ 0.0265 & 0.1595 & 0.0219 & 0.9458 \\ 0.0077 & 0.0491 & 1.0426 & -0.0071 \\ 0.0155 & -0.9813 & 0.0465 & 0.1659 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0000 & -0.0392 & 0.0064 \\ 0.0321 & 0.1632 & 0.0443 & 0.9640 \\ 0.0161 & 0.0803 & 1.0341 & -0.0353 \\ 0.0051 & -0.9961 & 0.0765 & 0.1722 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.0051 & -0.0428 & 0.0147 \\ 0.0332 & 0.1622 & -0.0568 & 0.9457 \\ 0.0096 & -0.0338 & 1.0294 & 0.0785 \\ 0.0096 & -0.9955 & -0.0473 & 0.1718 \end{pmatrix}$
Error promedio	<b>0.0413</b>	<b>0.0466</b>	<b>0.0471</b>

#### 4.4.10. Lámina de retardo $\lambda/2$ WPH10M-780

En la Figura 4.4.2 se muestra la hoja de datos de la lámina WPH10M-780 mostrando la variación del retardo con respecto a la longitud de onda de la fuente de luz. Esta lámina presenta un retardo de  $\lambda/2$  para una longitud de onda de 780 nm y podemos observar que para una longitud de onda de 633 nm el retardo aproximado es de  $224.7^\circ$ .



**Figura 4.4.2:** Grafica de retardo aplicado por un retardador de media de onda de 780 nm, de acuerdo con la longitud de onda.

Como se puede observar en la Tabla 4.4.19 los resultados de los elementos de la MM ideal [59] con la matriz medida presentan una mayor desviación en  $m_{33}$ ,  $m_{34}$ ,  $m_{43}$  y  $m_{44}$ . Los valores anteriores pueden ayudarnos en el caso de querer conocer el retardo que realiza una muestra a un haz de luz cuya respuesta a la longitud de onda sea parte del estudio.

**Tabla 4.4.19:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de media onda a 780 nm, retardando a  $224.7^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.

a) MM Ideal	b) MM Capturada	c) Error en cada elemento																																																		
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0.07928</td><td>-0.003331</td><td>-0.006662</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.07928</td><td>1</td><td>0.09793</td><td>-0.03997</td></tr> <tr><td>3</td><td>-0.009993</td><td>0.03797</td><td>-0.7761</td><td>-0.5963</td></tr> <tr><td>4</td><td>-0.01466</td><td>-0.09727</td><td>0.6063</td><td>-0.7335</td></tr> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> </table>	1	1	0.07928	-0.003331	-0.006662	2	0.07928	1	0.09793	-0.03997	3	-0.009993	0.03797	-0.7761	-0.5963	4	-0.01466	-0.09727	0.6063	-0.7335		1	2	3	4	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0.07928</td><td>-0.003331</td><td>-0.006662</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.07928</td><td>0</td><td>0.09793</td><td>-0.03997</td></tr> <tr><td>3</td><td>-0.009993</td><td>0.03797</td><td>-0.06535</td><td>0.1071</td></tr> <tr><td>4</td><td>-0.01466</td><td>-0.09727</td><td>-0.09713</td><td>-0.02271</td></tr> <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr> </table>	1	0	0.07928	-0.003331	-0.006662	2	0.07928	0	0.09793	-0.03997	3	-0.009993	0.03797	-0.06535	0.1071	4	-0.01466	-0.09727	-0.09713	-0.02271		1	2	3	4
1	1	0.07928	-0.003331	-0.006662																																																
2	0.07928	1	0.09793	-0.03997																																																
3	-0.009993	0.03797	-0.7761	-0.5963																																																
4	-0.01466	-0.09727	0.6063	-0.7335																																																
	1	2	3	4																																																
1	0	0.07928	-0.003331	-0.006662																																																
2	0.07928	0	0.09793	-0.03997																																																
3	-0.009993	0.03797	-0.06535	0.1071																																																
4	-0.01466	-0.09727	-0.09713	-0.02271																																																
	1	2	3	4																																																

Aunque la matriz obtenida mantiene cierta similitud con la matriz ideal, en este caso no se

hace referencia al error promedio, sino a una desviación respecto al valor ideal del 4.74 %. En la Tabla 4.4.20 se hicieron dos mediciones adicionales en diferentes días.

**Tabla 4.4.20:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de media onda en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0596 & -0.0052 & -0.0052 \\ 0.0596 & 1.0000 & 0.0956 & -0.0354 \\ -0.0144 & 0.0367 & -0.7741 & -0.5868 \\ -0.0183 & -0.0956 & 0.5986 & -0.7302 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0793 & -0.0033 & -0.0067 \\ 0.0793 & 1.0000 & 0.0979 & -0.0400 \\ -0.0100 & 0.0380 & -0.7761 & -0.5963 \\ -0.0147 & -0.0973 & 0.6063 & -0.7335 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0456</b>	<b>0.0474</b>

### 4.4.11. Agua destilada

Otro elemento de muestra para la obtención de la MM fue el agua destilada ya que el reporte ideal encontrado en la literatura [60] muestra un comportamiento similar al del aire al ser un material isotrópico. La Tabla 4.4.21 muestra los valores obtenidos y las mediciones realizadas en días diferentes se muestra en la Tabla 4.4.22.

**Tabla 4.4.21:** Matriz de Mueller del agua destilada, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.

a) MM Ideal	b) MM Capturada	c) Error en cada elemento
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		

Dado que se trata de un elemento que no requiere ser posicionado con respecto a un eje de transmisión, se observa un comportamiento más estable en las mediciones, con un error de hasta 1.66 %.

**Tabla 4.4.22:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller del agua destilada en diferentes días.

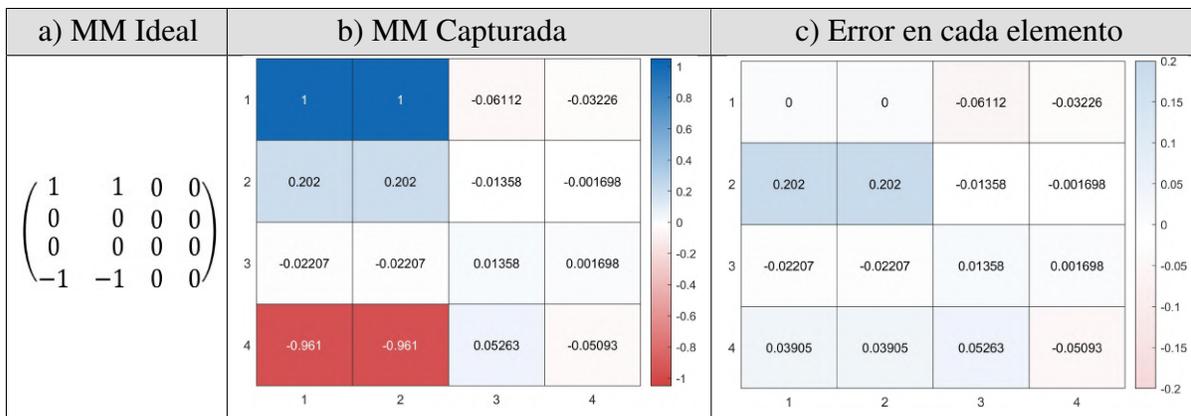
<b>MM normalizado con el elemento <math>m_{11}</math></b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0223 & 0.0183 & -0.0014 \\ 0.0223 & 0.9973 & -0.0061 & -0.0677 \\ -0.0020 & 0.0074 & 0.9973 & -0.0183 \\ 0.0122 & 0.0691 & -0.0027 & 0.9993 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0200 & 0.0124 & 0.0021 \\ 0.0200 & 0.9972 & -0.0083 & -0.0725 \\ -0.0007 & 0.0090 & 0.9972 & -0.0283 \\ 0.0083 & 0.0635 & 0.0021 & 1.0069 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0173 & 0.0138 & 0.0000 \\ 0.0173 & 0.9972 & -0.0083 & -0.0704 \\ 0.0000 & 0.0097 & 0.9993 & -0.0276 \\ 0.0131 & 0.0683 & -0.0021 & 1.0138 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0160</b>	<b>0.0162</b>	<b>0.0166</b>

A continuación, los resultados de la MM son obtenidos para varios elementos de muestra que son combinaciones de un polarizador y una lámina retardadora para diferentes posiciones angulares. Los valores ideales son obtenidos de la literatura [55] y con las mediciones del polarímetro se obtiene la MM real y también se incluyen mediciones en días diferentes.

#### 4.4.12. Polarizador lineal a 0° y Lámina de retardo $\lambda/4$ a -45°

Esta muestra combinada nos proporciona un comportamiento de un polarizador circular, específicamente un polarizador circular izquierdo, siempre y cuando se cumplan las condiciones de posicionamiento de referencia establecidas. Para esta muestra la MM medida con el polarímetro se presenta en la Tabla 4.4.23.

**Tabla 4.4.23:** Matriz de Mueller de un polarizador lineal a 0° y una lámina de retardo de cuarto de onda a -45°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Al observar los elementos  $m_{m21}$  y  $m_{22}$ , se identifican los errores más destacados de la muestra. Estos reflejan, respectivamente, el dichroísmo lineal a lo largo de los ejes x-y y la absorción isotrópica. El error promedio obtenido es de hasta el 4.71 % y se incluyen en la Tabla 4.4.24 las

mediciones de la muestra realizadas en dos días continuos. Este valor ha sido más alto, lo que refleja un desajuste entre los dos elementos utilizados como muestra para el análisis.

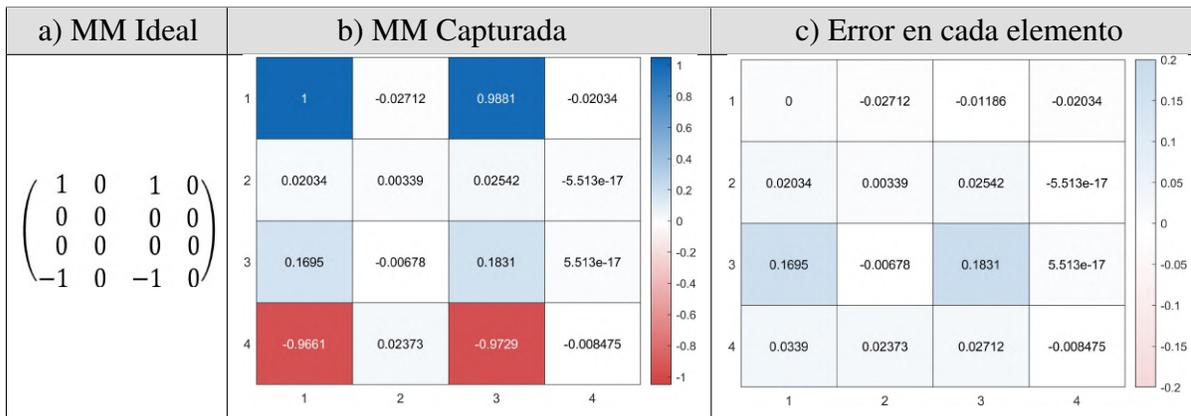
**Tabla 4.4.24:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a 0° y una lámina de retardo de cuarto de onda a -45°, en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 1.0000 & -0.0635 & -0.0343 \\ 0.1870 & 0.1870 & -0.0086 & -0.0034 \\ -0.0343 & -0.0343 & 0.0086 & -0.0034 \\ -0.9708 & -0.9708 & 0.0583 & -0.0446 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 1.0000 & -0.0611 & -0.0323 \\ 0.2020 & 0.2020 & -0.0136 & -0.0017 \\ -0.0221 & -0.0221 & 0.0136 & 0.0017 \\ -0.9610 & -0.9610 & 0.0526 & -0.0509 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0453</b>	<b>0.0471</b>

### 4.4.13. Polarizador lineal a 45° y Lámina de retardo λ/4 a 0°

El elemento  $m_{13}$  de la MM de la muestra refleja la birrefringencia lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x-y. El elemento  $m_{41}$  refleja el dicroísmo lineal, mientras que el elemento  $m_{43}$  la birrefringencia lineal a lo largo de los ejes x-y. Estos elementos son los más característicos de la muestra y pueden observarse en la Tabla 4.4.25.

**Tabla 4.4.25:** Matriz de Mueller de un polarizador lineal a 45° y una lámina de retardo de cuarto de onda a 0°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Ahora bien, si nos enfocamos en los elementos con mayor desviación, destacan los elementos  $m_{31}$  y  $m_{33}$ , correspondientes al dicroísmo lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x-y, y a la absorción anisotrópica para estados de polarización en esos mismos ejes, respectivamente. A continuación, en la Tabla 4.4.26 se presenta la repetición de las mediciones en esta configuración, registrando un error de hasta 3.51 %.

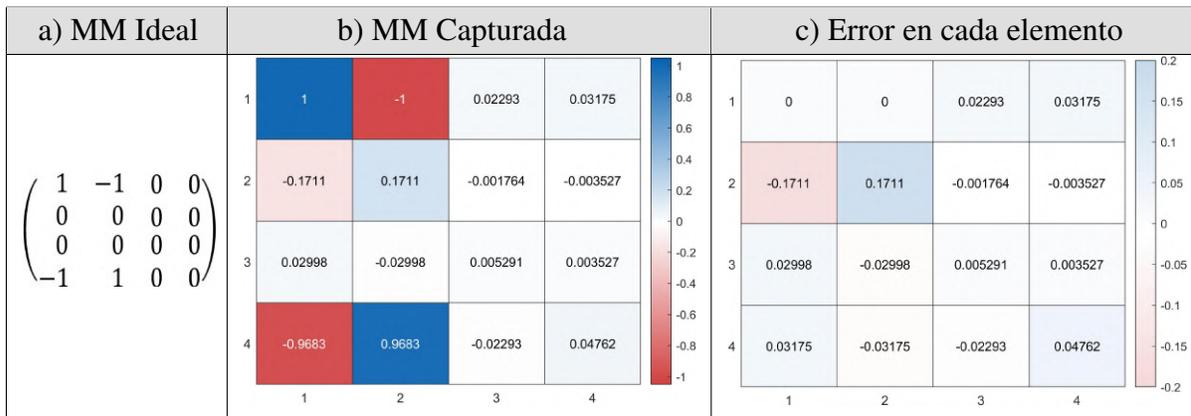
**Tabla 4.4.26:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a 45° y una lámina de retardo de cuarto de onda a 0°, en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.0255 & 0.9898 & -0.0238 \\ 0.0187 & -0.0017 & 0.0221 & 0.0000 \\ 0.1664 & -0.0068 & 0.1698 & -0.0034 \\ -0.9626 & 0.0187 & -0.9660 & -0.0102 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.0271 & 0.9881 & -0.0203 \\ 0.0203 & 0.0034 & 0.0254 & 0.0000 \\ 0.1695 & -0.0068 & 0.1831 & 0.0000 \\ -0.9661 & 0.0237 & -0.9729 & -0.0085 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0343</b>	<b>0.0351</b>

#### 4.4.14. Polarizador lineal a 90° y Lámina de retardo λ/4 a 45°

En la Tabla 4.4.27, se observa que el elemento  $m_{12}$  de la MM de la muestra refleja el di-croísmo lineal a lo largo de los ejes x–y. Por su parte, el elemento  $m_{41}$  también representa di-croísmo lineal, mientras que el elemento  $m_{42}$  está asociado a la birrefringencia lineal sobre las bisectrices de los ejes x–y.

**Tabla 4.4.27:** Matriz de Mueller de un polarizador lineal a 90° y una lámina de retardo de cuarto de onda a 45°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Se destacan los elementos  $m_{21}$  y  $m_{22}$  como aquellos con mayor desviación. Estos resultados se atribuyen, respectivamente, al di-croísmo lineal a lo largo del eje horizontal y vertical, y a la absorción isotrópica. En la siguiente Tabla 4.4.28 se observa que, en las mediciones reportadas, se llegó a obtener un error promedio de 3.78 %.

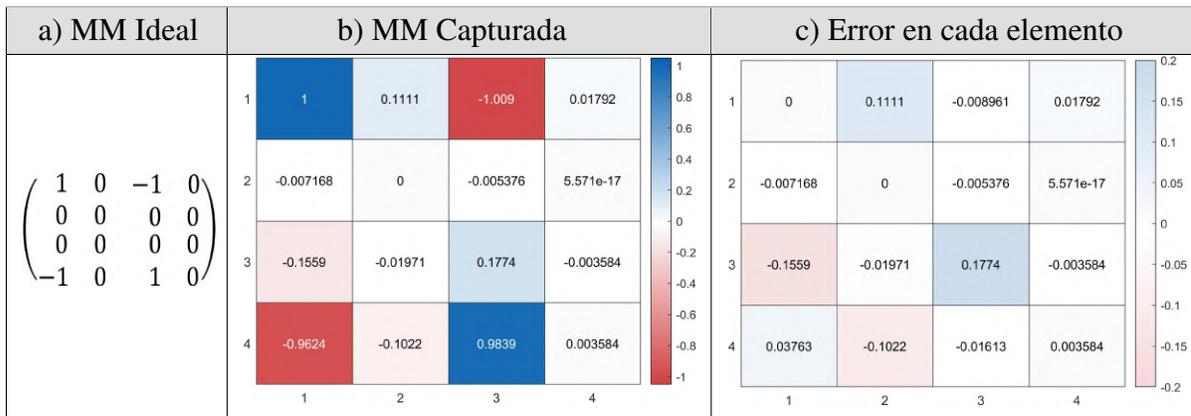
**Tabla 4.4.28:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a 90° y una lámina de retardo de cuarto de onda a 45°, en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -1.0000 & 0.0279 & 0.0331 \\ -0.1638 & 0.1638 & 0.0000 & -0.0017 \\ 0.0314 & -0.0314 & 0.0070 & 0.0035 \\ -0.9843 & 0.9843 & -0.0261 & 0.0505 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -1.0000 & 0.0229 & 0.0317 \\ -0.1711 & 0.1711 & -0.0018 & -0.0035 \\ 0.0300 & -0.0300 & 0.0053 & 0.0035 \\ -0.9683 & 0.9683 & -0.0229 & 0.0476 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0357</b>	<b>0.0378</b>

#### 4.4.15. Polarizador lineal a -45° y Lámina de retardo λ/4 a 90°

El elemento  $m_{13}$  de la MM de la muestra refleja el dicroísmo lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x-y. El elemento  $m_{41}$  también representa dicroísmo lineal, mientras que el elemento  $m_{43}$  está asociado a la birrefringencia lineal en las mismas direcciones. Estos efectos pueden observarse al destacar dichos elementos en la segunda columna de la Tabla 4.4.29.

**Tabla 4.4.29:** Matriz de Mueller de un polarizador lineal a -45° y una lámina de retardo de cuarto de onda a 90°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Centrando ahora la atención en los elementos con mayor desviación, se destaca un comportamiento asociado a distintos efectos ópticos: dicroísmo lineal a lo largo de los ejes horizontal/vertical en el elemento  $m_{12}$ ; dicroísmo lineal a lo largo de los ejes  $\pm 45^\circ$  en  $m_{31}$ ; absorción isotrópica en  $m_{33}$ ; y finalmente, birrefringencia lineal en los ejes  $\pm 45^\circ$  en el elemento  $m_{42}$ . A continuación, se presenta la Tabla 4.4.30 con los resultados correspondientes a dos días distintos, donde se registró un error del 4.17 %.

**Tabla 4.4.30:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a  $-45^\circ$  y una lámina de retardo de cuarto de onda a  $90^\circ$ , en diferentes días.

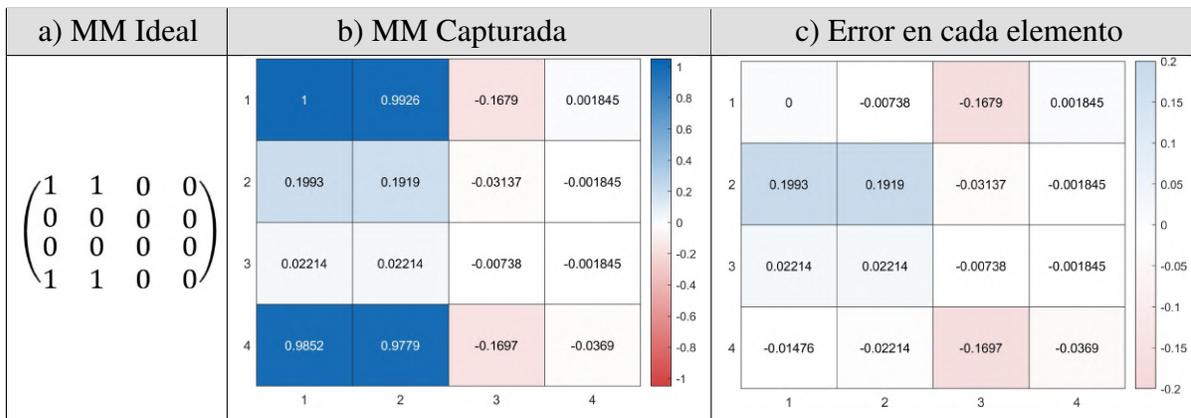
<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.1123 & -1.0109 & 0.0018 \\ -0.0036 & 0.0000 & 0.0036 & 0.0018 \\ -0.1540 & -0.0199 & 0.1685 & 0.0018 \\ -0.9764 & -0.1105 & 1.0072 & -0.0036 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.1111 & -1.0090 & 0.0179 \\ -0.0072 & 0.0000 & -0.0054 & 0.0000 \\ -0.1559 & -0.0197 & 0.1774 & -0.0036 \\ -0.9624 & -0.1022 & 0.9839 & 0.0036 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0389</b>	<b>0.0417</b>

#### 4.4.16. Polarizador lineal a $0^\circ$ y Lámina de retardo $\lambda/4$ a $45^\circ$

. Este arreglo, compuesto por un polarizador a  $0^\circ$  y una lámina de retardo de cuarto de onda con su eje rápido a  $45^\circ$ , funciona como un polarizador circular derecho, cuando se utiliza como muestra. Para las pruebas realizadas, se observa que los elementos principales se destacan de forma similar a las cuatro configuraciones anteriores, con la diferencia en el signo de algunos componentes, como visualiza en la Tabla 4.4.31.

En este caso, el elemento  $m_{13}$  de la MM de la muestra refleja la birrefringencia lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x-y. El elemento  $m_{41}$  representa el dicroísmo lineal, mientras que el elemento  $m_{43}$  corresponde a la birrefringencia lineal a lo largo de los ejes x-y.

**Tabla 4.4.31:** Matriz de Mueller de un polarizador lineal a  $0^\circ$  y una lámina de retardo de cuarto de onda a  $45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Los elementos que se alejan más de lo reportado en la literatura son:  $m_{13}$ , que representa el dicroísmo lineal sobre los ejes  $\pm 45^\circ$ ;  $m_{21}$ , asociado al dicroísmo lineal en los ejes x-y;  $m_{22}$ , correspondiente a la absorción isotrópica; y los elementos relacionados con la birrefringencia lineal a lo largo de los ejes x-y. Se observa una relación en la magnitud de estos elementos, lo que sugiere que será necesario un análisis más especializado para interpretar adecuadamente su

comportamiento. Para esta muestra, se obtuvo un error del 5.62 %, el cual se reporta en la Tabla 4.4.32.

**Tabla 4.4.32:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a 0° y una lámina de retardo de cuarto de onda a 45°, en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.9891 & -0.1739 & 0.0000 \\ 0.1703 & 0.1667 & -0.0254 & 0.0000 \\ 0.0163 & 0.0127 & -0.0145 & -0.0036 \\ 0.9891 & 0.9819 & -0.1649 & -0.0417 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.9926 & -0.1679 & 0.0018 \\ 0.1993 & 0.1919 & -0.0314 & -0.0018 \\ 0.0221 & 0.0221 & -0.0074 & -0.0018 \\ 0.9852 & 0.9779 & -0.1697 & -0.0369 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0519</b>	<b>0.0562</b>

### 4.4.17. Polarizador lineal a 45° y Lámina de retardo λ/4 a 90°

El elemento  $m_{13}$  MM de la muestra refleja el dicroísmo lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x–y. El elemento  $m_{41}$  también representa dicroísmo lineal, mientras que el elemento  $m_{43}$  está asociado a la birrefringencia lineal en las bisectrices de los ejes x–y. En la Tabla 4.4.33 se resaltan los valores positivos correspondientes a estos elementos.

**Tabla 4.4.33:** Matriz de Mueller de un polarizador lineal a 45° y una lámina de retardo de cuarto de onda a 90°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.

a) MM Ideal	b) MM Capturada				c) Error en cada elemento				
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	1	0.09124	0.9745	0.02555	0	0.09124	-0.02555	0.02555	
	2	-0.04745	-0.007299	-0.0365	0.00365	-0.04745	-0.007299	-0.0365	0.00365
	3	0.1369	0.01277	0.1515	0.007299	0.1369	0.01277	0.1515	0.007299
	4	0.9653	0.08942	0.9507	-0.03102	-0.03467	0.08942	-0.04927	-0.03102
		1	2	3	4				

Los elementos  $m_{12}$ ,  $m_{31}$ ,  $m_{33}$  y  $m_{42}$  presentan una mayor desviación dentro de las mediciones, lo cual puede asociarse a distintos fenómenos ópticos. El elemento  $m_{12}$  corresponde al dicroísmo lineal sobre los ejes horizontal o vertical;  $m_{31}$  está relacionado con el dicroísmo lineal a lo largo de los ejes  $\pm 45^\circ$ ;  $m_{33}$  refleja la absorción isotrópica para estados de polarización en los ejes  $\pm 45^\circ$ ; y finalmente,  $m_{42}$  representa la birrefringencia lineal a lo largo de esos mismos ejes. Se obtuvo un error promedio de hasta un máximo de 4.69 %, como se observa en la Tabla 4.4.34.

**Tabla 4.4.34:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a 45° y una lámina de retardo de cuarto de onda a 90°, en diferentes días.

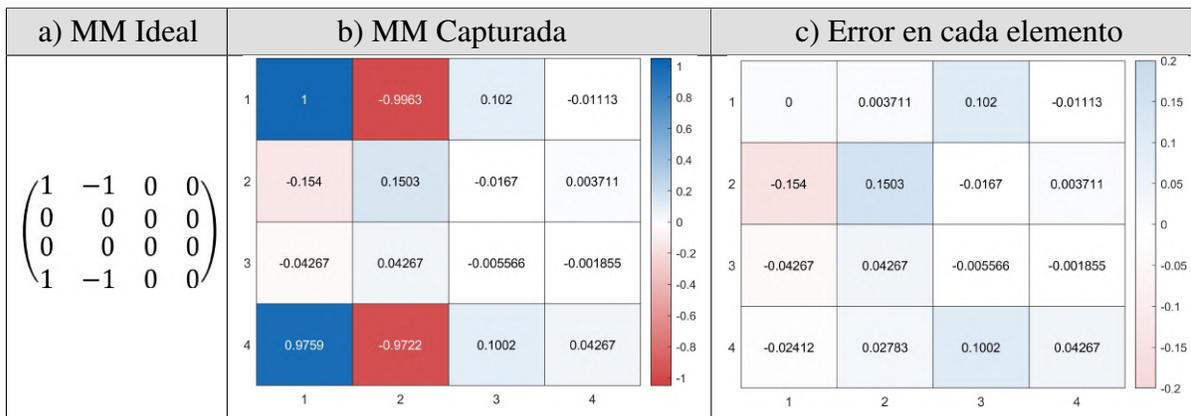
<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0936 & 0.9890 & 0.0294 \\ -0.0495 & -0.0092 & -0.0349 & 0.0000 \\ 0.1303 & 0.0055 & 0.1358 & 0.0037 \\ 0.9853 & 0.0899 & 0.9761 & -0.0294 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0912 & 0.9745 & 0.0255 \\ -0.0474 & -0.0073 & -0.0365 & 0.0036 \\ 0.1369 & 0.0128 & 0.1515 & 0.0073 \\ 0.9653 & 0.0894 & 0.9507 & -0.0310 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0413</b>	<b>0.0469</b>

#### 4.4.18. Polarizador lineal a 90° y Lámina de retardo λ/4 a -45°

El elemento  $m_{12}$  de la MM de la muestra refleja el dicroísmo lineal a lo largo de los ejes x–y. Por su parte, el elemento  $m_{41}$  también representa dicroísmo lineal, mientras que el elemento  $m_{42}$  está asociado a la birrefringencia lineal en las bisectrices de los ejes x–y. Estos elementos de la matriz han resultado característicos para proporcionar información sobre el tipo de elemento que se está analizando.

En estos casos, han correspondido de forma ideal al comportamiento de un polarizador circular, con un cambio en el eje de referencia, tal como ha sido presentado por Bickel [55]. Esto permite identificar posibles deformaciones o desajustes en la muestra analizada, dado que está compuesta por dos elementos ópticos. Esto permite identificar posibles deformaciones o desajustes en la muestra analizada. A continuación, se presenta la matriz capturada en la Tabla 4.4.35.

**Tabla 4.4.35:** Matriz de Mueller de un polarizador lineal a 90° y una lámina de retardo de cuarto de onda a -45°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Los elementos que más resaltan en cuanto a la desviación respecto a lo ideal son el elemento  $m_{13}$ , que representa el dicroísmo lineal sobre los ejes  $\pm 45$ ;  $m_{21}$ , asociado al dicroísmo lineal en los ejes x–y;  $m_{22}$ , correspondiente a la absorción isotrópica; y los elementos relacionados con

la birrefringencia lineal a lo largo de los ejes x–y. En la Tabla 4.4.36 se observa que para esta muestra se obtuvo un error del 4.56 %.

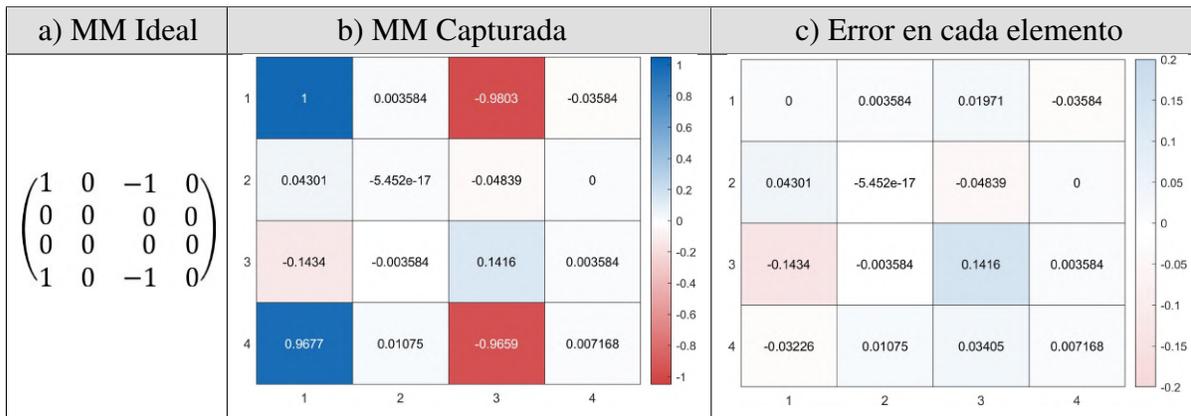
**Tabla 4.4.36:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a 90° y una lámina de retardo de cuarto de onda a -45°, en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.9963 & 0.1136 & -0.0223 \\ -0.1397 & 0.1359 & -0.0130 & 0.0037 \\ -0.0391 & 0.0391 & -0.0074 & -0.0019 \\ 0.9944 & -0.9907 & 0.1080 & 0.0447 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.9963 & 0.1020 & -0.0111 \\ -0.1540 & 0.1503 & -0.0167 & 0.0037 \\ -0.0427 & 0.0427 & -0.0056 & -0.0019 \\ 0.9759 & -0.9722 & 0.1002 & 0.0427 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0429</b>	<b>0.0456</b>

### 4.4.19. Polarizador lineal a -45° y Lámina de retardo λ/4 a 0°

Para esta última muestra, correspondiente a un polarizador circular derecho conformado por dos elementos ópticos en las posiciones mencionadas, se obtuvo que el elemento  $m_{13}$  de la MM refleja el dicroísmo lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x–y. El elemento  $m_{41}$  representa también dicroísmo lineal, mientras que el elemento  $m_{43}$  está asociado a la birrefringencia lineal sobre las mismas bisectrices. Lo anterior puede observarse en la Tabla 4.4.37.

**Tabla 4.4.37:** Matriz de Mueller de un polarizador lineal a -45° y una lámina de retardo de cuarto de onda a 0°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Ahora se destacan únicamente dos elementos que presentan la mayor desviación respecto al comportamiento ideal. Tanto  $m_{31}$  como  $m_{33}$  se ven afectados bajo la polarización a  $\pm 45^\circ$ , asociándose específicamente al dicroísmo lineal y a la absorción isotrópica, respectivamente. En la Tabla 4.4.38, se observa cómo estos elementos influyen en los resultados, obteniéndose un error de hasta 3.29 %.

**Tabla 4.4.38:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de un polarizador lineal a  $-45^\circ$  y una lámina de retardo de cuarto de onda a  $0^\circ$ , en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0054 & -0.9732 & -0.0376 \\ 0.0519 & -0.0054 & -0.0465 & -0.0018 \\ -0.1413 & -0.0018 & 0.1342 & 0.0018 \\ 0.9732 & 0.0072 & -0.9642 & 0.0018 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0036 & -0.9803 & -0.0358 \\ 0.0430 & 0.0000 & -0.0484 & 0.0000 \\ -0.1434 & -0.0036 & 0.1416 & 0.0036 \\ 0.9677 & 0.0108 & -0.9659 & 0.0072 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0329</b>	<b>0.0329</b>

#### 4.4.20. Lámina de retardo $\lambda/4$ a $45^\circ$ y polarizador lineal a $0^\circ$

Este es un nuevo elemento de muestra, correspondiente a un analizador de polarización circular izquierda, con el cual se obtiene un comportamiento característico en los elementos de la MM, en comparación con un generador. En la Tabla 4.4.39 se resalta que el elemento  $m_{14}$  de la MM de la muestra refleja el dicroísmo circular; el elemento  $m_{21}$  representa el dicroísmo lineal a lo largo de los ejes x-y; y el elemento  $m_{24}$ , la birrefringencia lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x-y.

**Tabla 4.4.39:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $45^\circ$  y polarizador lineal a  $0^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.

a) MM Ideal	b) MM Capturada	c) Error en cada elemento
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		

Para esta muestra se destacan varios elementos que presentan valores alejados del comportamiento ideal, lo cual puede atribuirse a que la muestra no se encontraba en su ajuste más óptimo, ya que fue improvisada utilizando dos elementos ópticos separados. Los elementos con mayor magnitud son  $m_{12}$ ,  $m_{22}$  y  $m_{44}$ , los cuales reflejan, respectivamente, dicroísmo lineal a lo largo de los ejes x-y, y absorción isotrópica asociada a los estados de polarización horizontal, vertical y circular.

**Tabla 4.4.40:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a 45° y polarizador lineal a 0°, en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.2182 & 0.0070 & -0.9581 \\ 1.0000 & 0.2182 & 0.0070 & -0.9581 \\ -0.0890 & -0.0192 & -0.0017 & 0.0785 \\ 0.0157 & -0.0017 & 0.0000 & -0.1675 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.2083 & 0.0104 & -0.9497 \\ 0.9965 & 0.2049 & 0.0139 & -0.9462 \\ -0.0955 & -0.0191 & 0.0035 & 0.0764 \\ 0.0174 & 0.0035 & -0.0017 & -0.1667 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0567</b>	<b>0.0581</b>

### 4.4.21. Lámina de retardo $\lambda/4$ a 90° y polarizador lineal a 45°

El elemento  $m_{14}$  de la MM de la muestra refleja el dicroísmo circular. El elemento  $m_{31}$  representa el dicroísmo lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x-y, mientras que el elemento  $m_{34}$  está asociado a la birrefringencia lineal a lo largo de los ejes x-y. Los elementos mencionados se presentan en las primeras dos columnas de la Tabla 4.4.41.

**Tabla 4.4.41:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a 90° y polarizador lineal a 45°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.

a) MM Ideal	b) MM Capturada	c) Error en cada elemento
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		

En la tercera columna se observa que dos elementos destacan debido a que presentan una desviación moderada, correspondiendo al dicroísmo lineal para los ejes  $\pm 45^\circ$  y a la absorción isotrópica para estados de polarización en  $\pm 45^\circ$ . Obteniendo un error del 4.2 %, como resultado de las desviaciones observadas en dichos elementos y que se observa en la Tabla 4.4.42.

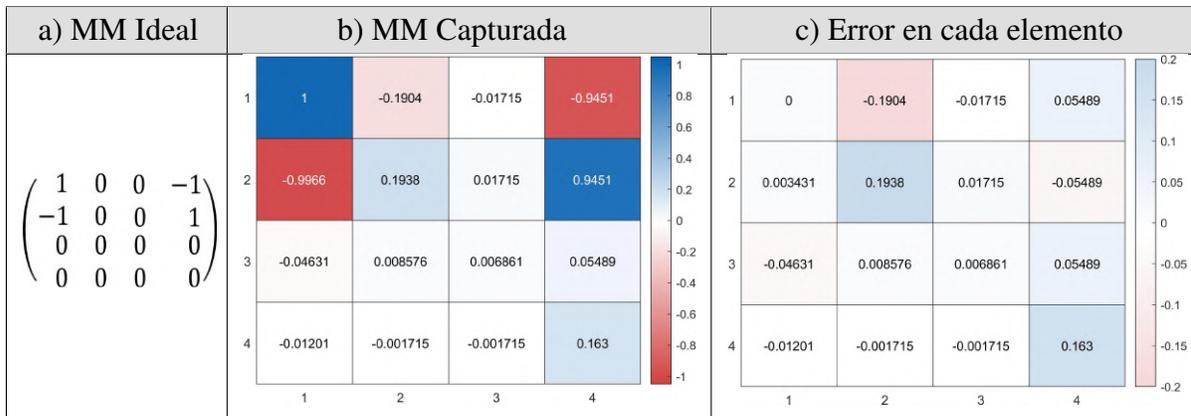
**Tabla 4.4.42:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a 90° y polarizador lineal a 45°, en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.0053 & 0.2124 & -0.9487 \\ 0.0265 & -0.0018 & 0.0071 & -0.0248 \\ 1.0124 & -0.0071 & 0.2124 & -0.9628 \\ 0.0071 & 0.0000 & -0.0018 & -0.0212 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.0035 & 0.2211 & -0.9246 \\ 0.0246 & 0.0035 & 0.0070 & -0.0263 \\ 1.0000 & -0.0070 & 0.2228 & -0.9421 \\ 0.0053 & 0.0018 & -0.0018 & -0.0140 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0393</b>	<b>0.0420</b>

### 4.4.22. Lámina de retardo $\lambda/4$ a $-45^\circ$ y polarizador lineal a $90^\circ$

El elemento  $m_{14}$  de la MM de la muestra refleja el dicroísmo circular. El elemento  $m_{21}$  representa el dicroísmo lineal a lo largo de los ejes x-y, mientras que el elemento  $m_{24}$  está asociado a la birrefringencia lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x-y. También se destaca el cambio de signo como una característica específica de esta muestra, lo cual se muestra en la Tabla 4.4.43.

**Tabla 4.4.43:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $-45^\circ$  y polarizador lineal a  $90^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Se observa en la Tabla 4.4.44 que se alcanzó un error del 5.17 % en una de las mediciones, destacando una desviación considerable en los elementos  $m_{12}$ ,  $m_{22}$  y  $m_{44}$ . Estos elementos reflejan, respectivamente, dicroísmo lineal sobre los ejes horizontal y vertical, absorción isotrópica para estados de polarización horizontal y vertical, y absorción isotrópica para polarización circular.

**Tabla 4.4.44:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $-45^\circ$  y polarizador lineal a  $90^\circ$ , en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.1807 & -0.0052 & -0.9587 \\ -0.9931 & 0.1807 & 0.0086 & 0.9552 \\ -0.0448 & 0.0103 & 0.0034 & 0.0568 \\ -0.0103 & 0.0034 & -0.0017 & 0.1583 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.1904 & -0.0172 & -0.9451 \\ -0.9966 & 0.1938 & 0.0172 & 0.9451 \\ -0.0463 & 0.0086 & 0.0069 & 0.0549 \\ -0.0120 & -0.0017 & -0.0017 & 0.1630 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0473</b>	<b>0.0517</b>

### 4.4.23. Lámina de retardo $\lambda/4$ a $0^\circ$ y polarizador lineal a $-45^\circ$

En la última posición de esta muestra, se observa que el elemento  $m_{14}$  de la MM refleja el dicroísmo circular. El elemento  $m_{31}$  representa el dicroísmo lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x–y, mientras que el elemento  $m_{34}$  está asociado a la birrefringencia lineal a lo largo de los ejes x–y. Los elementos mencionados se pueden observar en la Tabla 4.4.45.

**Tabla 4.4.45:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $0^\circ$  y polarizador lineal a  $-45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.

a) MM Ideal	b) MM Capturada	c) Error en cada elemento
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		

En la Tabla 4.4.46 se observa que el error promedio para esta muestra alcanza un 3.96 %. Esto se debe a que los elementos de la matriz  $m_{13}$  y  $m_{24}$  presentan una desviación moderada, atribuible al dicroísmo lineal a lo largo de los ejes de transmisión  $\pm 45^\circ$  y a la birrefringencia lineal en los ejes x–y, respectivamente. Sin embargo, existen dos elementos cuyos valores son ideales, lo que contribuye a que el error total no supere el observado en el caso anterior.

**Tabla 4.4.46:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a 0° y polarizador lineal a -45°, en diferentes días.

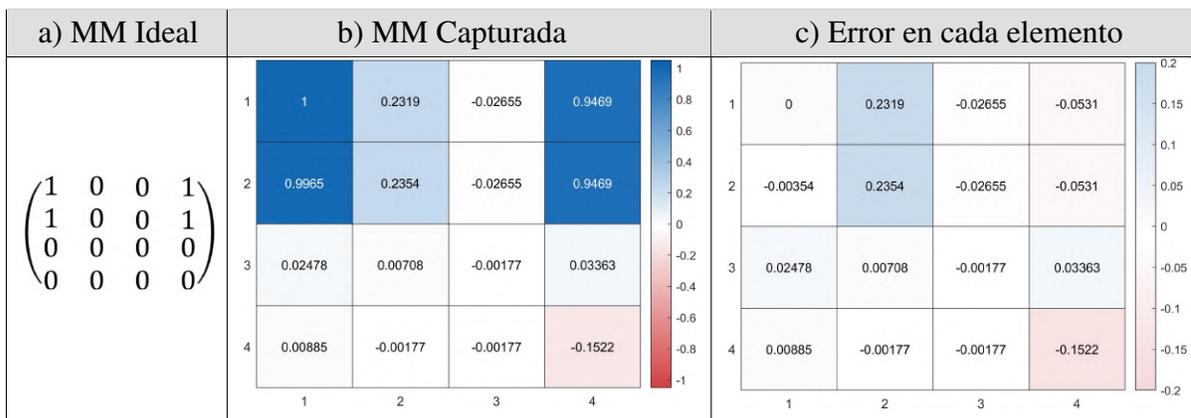
<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0106 & -0.1862 & -0.9787 \\ -0.0638 & 0.0035 & 0.0124 & 0.0674 \\ -0.9982 & -0.0124 & 0.1879 & 0.9982 \\ -0.0018 & 0.0018 & 0.0000 & 0.0106 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0247 & -0.1837 & -0.9717 \\ -0.0707 & 0.0000 & 0.0141 & 0.0671 \\ -1.0018 & -0.0336 & 0.1873 & 0.9894 \\ -0.0035 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0088 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0365</b>	<b>0.0396</b>

#### 4.4.24. Lámina de retardo $\lambda/4$ a -45° y polarizador lineal a 0°

Ahora se procede al análisis de una muestra conformada igualmente por dos elementos ópticos. De forma similar a la muestra anterior, al disponer una lámina de retardo de cuarto de onda seguida de un polarizador lineal en ese orden, se obtiene un analizador y no un generador de polarización. En este caso, debido a que la lámina se posiciona con su eje rápido a -45° respecto al eje de transmisión del polarizador lineal, el sistema funciona como un analizador de polarización circular derecha.

El elemento  $m_{14}$  de la MM de la muestra refleja el dicroísmo circular. El elemento  $m_{21}$  representa el dicroísmo lineal a lo largo de los ejes x-y, mientras que el elemento  $m_{24}$  está asociado a la birrefringencia lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x-y. Lo anterior puede observarse en la Tabla 4.4.47.

**Tabla 4.4.47:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a -45° y polarizador lineal a 0°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



En la matriz se puede observar que los elementos  $m_{12}$ ,  $m_{22}$  y  $m_{44}$  presentan una desviación destacada, reflejando respectivamente el dicroísmo lineal en los ejes horizontal y vertical, la absorción isotrópica para la polarización en los mismos ejes y para la polarización circular. Esto

indica que la posición de ambos elementos ópticos con que se realizó la muestra no fue la más óptima, resultando en un error del 5.39 %, como se observa en la Tabla 4.4.48.

**Tabla 4.4.48:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $-45^\circ$  y polarizador lineal a  $0^\circ$ , en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.1978 & -0.0288 & 0.9712 \\ 0.9964 & 0.2014 & -0.0288 & 0.9712 \\ 0.0234 & 0.0090 & -0.0090 & 0.0360 \\ 0.0108 & 0.0000 & 0.0000 & -0.1511 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.2319 & -0.0265 & 0.9469 \\ 0.9965 & 0.2354 & -0.0265 & 0.9469 \\ 0.0248 & 0.0071 & -0.0018 & 0.0336 \\ 0.0088 & -0.0018 & -0.0018 & -0.1522 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0473</b>	<b>0.0539</b>

### 4.4.25. Lámina de retardo $\lambda/4$ a $0^\circ$ y polarizador lineal a $45^\circ$

El elemento  $m_{14}$  de la MM de la muestra refleja el dicroísmo circular. El elemento  $m_{31}$  representa el dicroísmo lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x–y, mientras que el elemento  $m_{34}$  está asociado a la birrefringencia lineal a lo largo de los ejes x–y. Lo anterior se observa en las primeras dos columnas de la Tabla 4.4.49.

**Tabla 4.4.49:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $0^\circ$  y polarizador lineal a  $45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.

a) MM Ideal	b) MM Capturada				c) Error en cada elemento			
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	1	2	3	4	1	2	3	4
	1	0.05926	0.1593	1.006	0	0.05926	0.1593	0.005556
	-0.1111	-0.01481	-0.01852	-0.1093	-0.1111	-0.01481	-0.01852	-0.1093
	1.015	0.06296	0.15	1.015	0.01481	0.06296	0.15	0.01481
	-0.003704	0	-0.003704	0.02593	-0.003704	0	-0.003704	0.02593
	1	2	3	4	1	2	3	4

Aunque se observan más elementos con desviaciones en comparación con el comportamiento ideal, estas no son de gran magnitud como en el caso anterior. Los elementos  $m_{13}$ ,  $m_{21}$ ,  $m_{24}$  y  $m_{33}$  reflejan, respectivamente, el dicroísmo lineal sobre los ejes  $\pm 45^\circ$ , el dicroísmo lineal en los ejes horizontal/vertical, la birrefringencia lineal en los ejes  $\pm 45^\circ$  y la absorción isotrópica para la polarización circular. Como resultado, se obtiene un error del 4.71 %, el cual se puede observar en la Tabla 4.4.50.

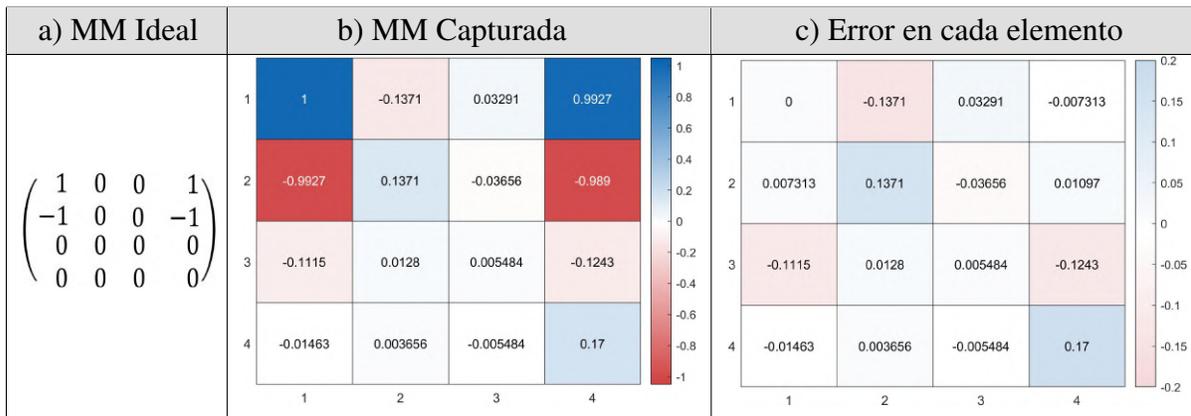
**Tabla 4.4.50:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a 0° y polarizador lineal a 45°, en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0664 & 0.1550 & 1.0018 \\ -0.1107 & -0.0111 & -0.0148 & -0.1052 \\ 1.0111 & 0.0701 & 0.1476 & 1.0185 \\ -0.0055 & 0.0018 & -0.0018 & 0.0221 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0593 & 0.1593 & 1.0056 \\ -0.1111 & -0.0148 & -0.0185 & -0.1093 \\ 1.0148 & 0.0630 & 0.1500 & 1.0148 \\ -0.0037 & 0.0000 & -0.0037 & 0.0259 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0465</b>	<b>0.0471</b>

#### 4.4.26. Lámina de retardo $\lambda/4$ a 45° y polarizador lineal a 90°

El elemento  $m_{14}$  de la MM de la muestra refleja el dicroísmo circular. El elemento  $m_{21}$  representa el dicroísmo lineal a lo largo de los ejes x–y, mientras que el elemento  $m_{24}$  está asociado a la birrefringencia lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x–y. Este comportamiento puede observarse en la Tabla 4.4.51.

**Tabla 4.4.51:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a 45° y polarizador lineal a 90°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Después de identificar los elementos característicos de la muestra, se procede a analizar aquellos que presentan una desviación respecto al comportamiento ideal. Los elementos que más sobresalen son  $m_{12}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{31}$ ,  $m_{34}$  y  $m_{44}$ , en los cuales se refleja el dicroísmo lineal sobre los ejes horizontal/vertical y  $\pm 45^\circ$ , la absorción isotrópica para estados de polarización horizontal, vertical y circular, así como la birrefringencia lineal a lo largo de los ejes x–y. Se observa un error del 5.11 %, el cual puede apreciarse con mayor detalle en la Tabla 4.4.52.

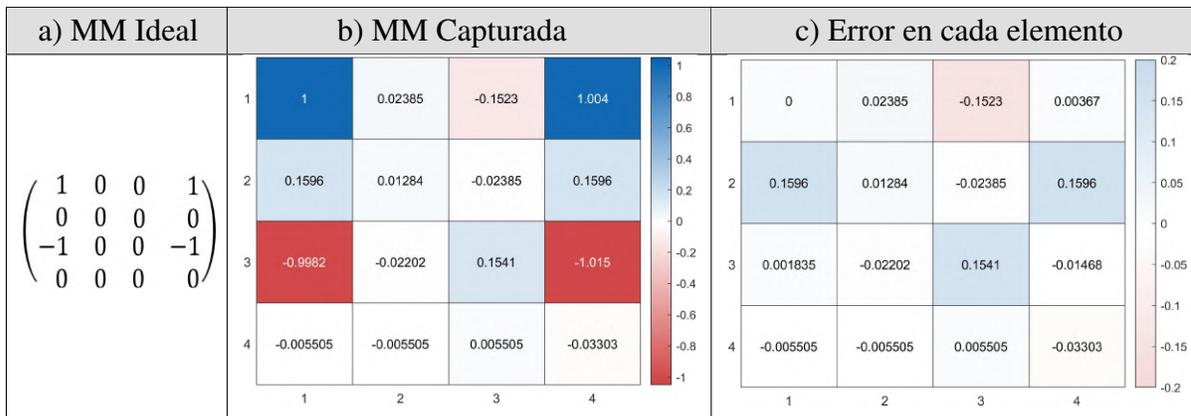
**Tabla 4.4.52:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a 45° y polarizador lineal a 90°, en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.1193 & 0.0294 & 1.0147 \\ -0.9963 & 0.1156 & -0.0294 & -1.0110 \\ -0.1156 & 0.0128 & -0.0055 & -0.1266 \\ -0.0165 & 0.0018 & -0.0018 & 0.1725 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & -0.1371 & 0.0329 & 0.9927 \\ -0.9927 & 0.1371 & -0.0366 & -0.9890 \\ -0.1115 & 0.0128 & 0.0055 & -0.1243 \\ -0.0146 & 0.0037 & -0.0055 & 0.1700 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0485</b>	<b>0.0511</b>

### 4.4.27. Lámina de retardo $\lambda/4$ a 90° y polarizador lineal a -45°

Al cambiar la posición de los elementos ópticos, se obtiene un comportamiento distinto que caracteriza a este sistema como un analizador de polarización circular derecha. Los elementos característicos en este caso son: el elemento  $m_{14}$  de la MM, que refleja el dicroísmo circular; el elemento  $m_{31}$ , que representa el dicroísmo lineal a lo largo de las bisectrices de los ejes x-y; y el elemento  $m_{34}$ , asociado a la birrefringencia lineal a lo largo de los ejes x-y. Los resultados correspondientes se presentan en la Tabla 4.4.53.

**Tabla 4.4.53:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a 90° y polarizador lineal a -45°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Se observa que los elementos que presentan un comportamiento fuera de lo esperado son:  $m_{13}$ , asociado al dicroísmo lineal sobre los ejes  $\pm 45^\circ$ ;  $m_{21}$ , que refleja dicroísmo lineal sobre los ejes x-y;  $m_{24}$ , correspondiente a la birrefringencia lineal en los mismos ejes; y  $m_{33}$ , que indica una absorción isotrópica debida a la polarización en  $\pm 45^\circ$ . Estos efectos contribuyen a un error del 4.86 %, reportado en la Tabla 4.4.54.

**Tabla 4.4.54:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda 90° y polarizador lineal a -45°, en diferentes días.

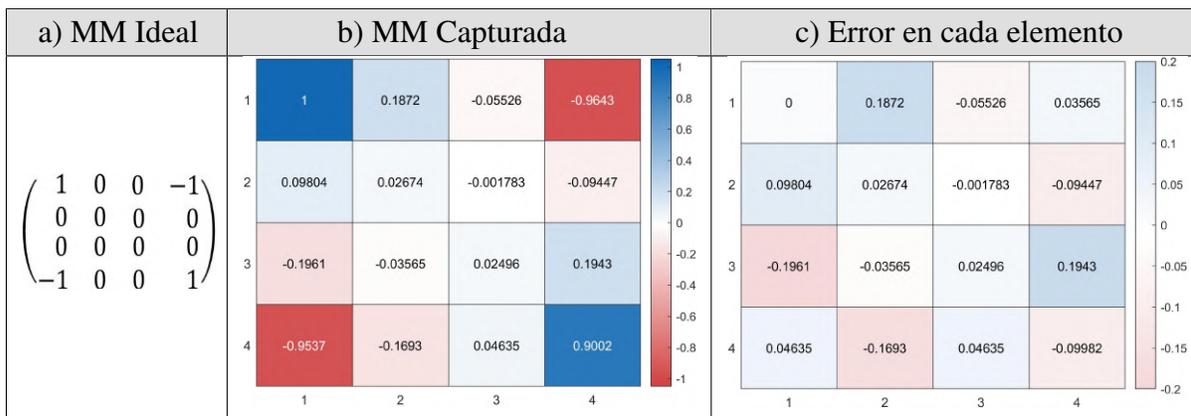
<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0222 & -0.1444 & 1.0093 \\ 0.1593 & 0.0037 & -0.0222 & 0.1611 \\ -1.0111 & -0.0259 & 0.1333 & -1.0167 \\ -0.0093 & -0.0019 & -0.0056 & -0.0333 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0239 & -0.1523 & 1.0037 \\ 0.1596 & 0.0128 & -0.0239 & 0.1596 \\ -0.9982 & -0.0220 & 0.1541 & -1.0147 \\ -0.0055 & -0.0055 & 0.0055 & -0.0330 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0475</b>	<b>0.0486</b>

### 4.4.28. Lámina de retardo de $\lambda/4$ a 45°, polarizador lineal a 0° y Lámina de retardo de $\lambda/4$ a -45°

Dentro de la literatura se encuentra reportada la MM correspondiente a un polarizador circular. Para reproducir dicha configuración utilizando los elementos ópticos disponibles, se diseñó un arreglo compuesto por una lámina de retardo de cuarto de onda, seguida de un polarizador lineal y posteriormente otra lámina de retardo con las mismas especificaciones. La orientación de las láminas de retardo determina la dirección del polarizador circular resultante. En este primer caso, la configuración corresponde a un polarizador circular a la derecha.

El elemento  $m_{14}$  de la MM de la muestra refleja el dicroísmo circular. El elemento  $m_{41}$  refleja el dicroísmo lineal, mientras que el elemento  $m_{44}$  representa la absorción isotrópica de la muestra. En la siguiente Tabla 4.4.55 se puede observar el comportamiento característico en los elementos mencionados.

**Tabla 4.4.55:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a 45°, un polarizador lineal a 0° y una lámina de retardo de cuarto de onda a -45°, a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.



Se observa que varios elementos presentan desviaciones, lo cual se debe a que la muestra está compuesta por tres elementos ópticos, donde la alineación entre cada uno puede afectar los

resultados. Esta situación podría evitarse al utilizar un solo elemento óptico con esta configuración. Los elementos con mayor desviación que destacan son:  $m_{12}$ , que refleja el dicroísmo lineal sobre los ejes horizontal/vertical;  $m_{31}$ , correspondiente al dicroísmo lineal sobre los ejes  $\pm 45^\circ$ ;  $m_{34}$ , asociado a la birrefringencia lineal sobre los ejes x-y; y  $m_{42}$ , que representa la birrefringencia lineal sobre los ejes  $\pm 45^\circ$ . Se obtuvo un error del 8.2 %, presentado en la Tabla 4.4.56, el cual refleja un desajuste en la alineación interna de la muestra entre sus componentes.

**Tabla 4.4.56:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $45^\circ$ , un polarizador lineal a  $0^\circ$  y una lámina de retardo de cuarto de onda a  $-45^\circ$ , en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento <math>m_{11}</math></b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.1920 & -0.0616 & -0.9801 \\ 0.1014 & 0.0181 & -0.0036 & -0.0960 \\ -0.1703 & -0.0290 & 0.0127 & 0.1703 \\ -0.9783 & -0.1848 & 0.0580 & 0.9058 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.1872 & -0.0553 & -0.9643 \\ 0.0980 & 0.0267 & -0.0018 & -0.0945 \\ -0.1961 & -0.0357 & 0.0250 & 0.1943 \\ -0.9537 & -0.1693 & 0.0463 & 0.9002 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0771</b>	<b>0.0820</b>

#### 4.4.29. Lámina de retardo de $\lambda/4$ a $-45^\circ$ , polarizador lineal a $0^\circ$ y Lámina de retardo de $\lambda/4$ a $45^\circ$

Ahora bien, para esta configuración particular en la orientación de los ejes rápidos de las láminas de retardo, se obtiene un polarizador circular a la izquierda. En este caso, el elemento  $m_{14}$  de la MM refleja el dicroísmo circular; el elemento  $m_{41}$ , el dicroísmo lineal; y el elemento  $m_{44}$ , la absorción isotrópica de la muestra. Se observa en la Tabla 4.4.57 cómo los elementos mencionados caracterizan el tipo de polarizador resultante, en comparación con la muestra anterior.

**Tabla 4.4.57:** Matriz de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $-45^\circ$ , un polarizador lineal a  $0^\circ$  y una lámina de retardo de cuarto de onda a  $45^\circ$ , a) valor ideal, b) capturado y exhibido con el dispositivo y c) error en cada elemento capturado con respecto al ideal.

a) MM Ideal	b) MM Capturada	c) Error en cada elemento
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		

Para este último elemento presentado, se observan varias desviaciones respecto a los valores ideales, destacando los siguientes componentes: los elementos  $m_{12}$  y  $m_{21}$ , que reflejan el dicroísmo lineal sobre los ejes x-y;  $m_{13}$  y  $m_{31}$ , asociados al dicroísmo lineal sobre los ejes  $\pm 45^\circ$ ;  $m_{24}$  y  $m_{42}$ , que indican birrefringencia lineal sobre los ejes  $\pm 45^\circ$ ; y  $m_{34}$ , correspondiente a la birrefringencia lineal sobre los ejes horizontal/vertical. Como resultado, se obtuvo un error del 7.79 %, presentado en la Tabla 4.4.58, el cual es menor en comparación con la muestra anterior, considerando las magnitudes de los elementos involucrados.

**Tabla 4.4.58:** Repetibilidad y error de las matrices de Mueller de una lámina de retardo de cuarto de onda a  $-45^\circ$ , un polarizador lineal a  $0^\circ$  y una lámina de retardo de cuarto de onda a  $45^\circ$ , en diferentes días.

<b>MM normalizado con el elemento m11</b>	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.1449 & -0.0972 & 0.9187 \\ 0.1131 & 0.0141 & -0.0124 & 0.1060 \\ -0.1307 & -0.0177 & 0.0106 & -0.1060 \\ 0.9611 & 0.1343 & -0.0989 & 0.8975 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.1579 & -0.1035 & 0.9123 \\ 0.1193 & 0.0140 & -0.0123 & 0.1088 \\ -0.1263 & -0.0211 & 0.0070 & -0.1105 \\ 0.9632 & 0.1421 & -0.0912 & 0.8930 \end{pmatrix}$
<b>Error promedio</b>	<b>0.0755</b>	<b>0.0779</b>

---

## Capítulo 5

---

# Conclusiones y trabajo a futuro

En este capítulo, se presentan las conclusiones y observaciones generales derivadas del trabajo realizado. Además, se establecen las líneas de investigación futura, a partir de los resultados obtenidos.

### 5.1. Conclusiones y observaciones

En este trabajo se logró el diseño, construcción e implementación de un sistema mecatrónico programable capaz de realizar el posicionamiento angular preciso de elementos ópticos dispuestos en tándem. El sistema integra de manera efectiva una fuente de luz monocromática, una plataforma porta-muestras, un fotodetector y una interfaz gráfica con pantalla táctil, lo cual permite la adquisición automatizada de datos ópticos y la visualización directa de resultados en tiempo real.

A través del uso de materiales impresos en 3D y módulos electrónicos programables, se consiguió desarrollar una solución de bajo costo, modular y fácilmente replicable. Esta implementación no solo reduce significativamente los costos asociados con la adquisición de equipamiento especializado, al tiempo que ofrece una gran flexibilidad y adaptabilidad en diversas aplicaciones. En comparación con diseños anteriores, cuyo costo aproximado era superior a \$10,500, y con modelos comerciales como el POL-200 de ScienceMed <sup>1</sup>, que opera únicamente con polarización lineal para medir la concentración de sustancias en un tubo de muestra y tiene un costo aproximado de \$5,250, el sistema completo desarrollado en este trabajo se elaboró bajo un presupuesto aproximado de \$4,500.

---

<sup>1</sup>Se adjunta la fuente utilizada para el [POL-200](#).

El sistema desarrollado permite aplicar el formalismo de Stokes-Mueller para la obtención de matrices de Mueller a partir de 36 mediciones. Los resultados resultaron ser comparables con valores ideales reportados en la literatura científica, validando su funcionamiento con distintos elementos ópticos y muestras tanto biológicas como no biológicas.

Asimismo, se comprobó la repetibilidad del sistema en mediciones realizadas en diferentes días, lo cual respalda su confiabilidad para tareas de caracterización óptica. La arquitectura abierta del prototipo lo convierte en una herramienta versátil y útil tanto para propósitos de investigación como para actividades de docencia en instrumentación óptica y polarimetría.

## 5.2. Trabajo a Futuro

A partir de los resultados obtenidos, se identifican diversas oportunidades para mejorar y extender el sistema desarrollado. Entre las principales líneas de trabajo a futuro se proponen las siguientes:

1. **Automatización completa de las secuencias de medición:** Implementar un control secuencial programado que ejecute las 36 posiciones angulares necesarias para la reconstrucción de la matriz de Mueller, eliminando intervenciones manuales y errores de operación.
2. **Optimización del tiempo de adquisición mediante algoritmos metaheurísticos:** Dado que los movimientos del sistema implican transiciones entre múltiples posiciones angulares, es factible aplicar algoritmos como Recocido Simulado (Simulated Annealing), Colonia de Hormigas o Algoritmos Genéticos para minimizar la distancia angular total recorrida por los motores. Esta optimización permitiría reducir los tiempos muertos, disminuir el consumo energético, y prolongar la vida útil del sistema mecánico, especialmente en secuencias repetitivas de medición.
3. **Validación inteligente de posicionamiento angular:** Utilizar los datos adquiridos de intensidad óptica para verificar si el sistema ha alcanzado correctamente la posición esperada. Esto podría lograrse mediante un modelo de referencia basado en aprendizaje supervisado, que compare la forma y valor de la señal con una base de datos o patrón calibrado. Si los valores difieren significativamente del modelo esperado, el sistema podría lanzar una alerta de posible error en el posicionamiento o una necesidad de recalibración.
4. **Procesamiento de datos en tiempo real y retroalimentación en la interfaz:** Integrar un microprocesador o microcontrolador auxiliar que realice los cálculos del vector de Stokes y la matriz de Mueller directamente durante la adquisición, permitiendo la visualización

inmediata de resultados y reduciendo la dependencia del procesamiento posterior.

5. **Expansión multiespectral del sistema:** Incorporar fuentes de luz ajustables o multiespectrales (LEDs, láseres sintonizables) y detectores con sensibilidad variable, lo cual permitiría caracterizar con mayor precisión materiales con dispersión o absorción dependiente de la longitud de onda.
6. **Aplicación del sistema en entornos clínicos o industriales:** Miniaturizar el sistema y desarrollar una carcasa robusta que permita su uso portátil o en condiciones de laboratorio exigentes. Esto facilitaría aplicaciones biomédicas, industriales y educativas en tiempo real.
7. **Desarrollo de una base de datos de referencia:** Registrar y sistematizar las matrices de Mueller obtenidas de distintos materiales y configuraciones, para facilitar la identificación automática de materiales o la comparación con modelos teóricos.
8. **Integración con técnicas de inteligencia artificial:** Emplear redes neuronales o modelos híbridos para predecir el comportamiento óptico de una muestra a partir de un subconjunto de mediciones, reduciendo aún más el tiempo necesario para caracterización completa.

---

# Bibliografía

- [1] Thorlabs Inc., *Red HeNe Laser Systems (High Power) Operating Manual*. Thorlabs, n.d. Disponible en: <https://www.thorlabs.com>.
- [2] STEPPERONLINE, *STEPPER MOTOR 17HS08-1004S Operating Manual*. STEPPERONLINE, n.d. Disponible en: <https://www.omc-stepperonline.com>.
- [3] Thorlabs Inc., *LPVIS100-MP-Ø25.0 mm Manual*. Thorlabs, n.d. Disponible en: <https://www.thorlabs.com>.
- [4] Thorlabs Inc., *PDA36A(-EC) Si Switchable Gain Detector User Guide*. Thorlabs, n.d. Disponible en: <https://www.thorlabs.com>.
- [5] Espressif Systems, *ESP32-WROOM-32 Datasheet*, 2023. Disponible en: <https://www.espressif.com>.
- [6] BIGTREETECH, *TMC2208-V3.0 Stepper Motor Driver Manual*. BIGTREETECH, n.d. Disponible en: <https://www.bigtree-tech.com>.
- [7] Nextion, *Pantalla táctil HMI Nextion de 4.3", NX4827K043*. Nextion, n.d. Disponible en: <https://nextion.tech>.
- [8] R. Descartes, "La dioptrique (1637)," *Oeuvres de Descartes*, vol. 6, 1974. Edición moderna.
- [9] I. Newton, "*Opticks: Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*". William Innys at the West-End of St. Paul's, 2 ed., 1730. Seventh impression.
- [10] C. Huygens, "*Traité de la lumière: Où y sont expliquées les causes de ce qui luy arrive dans la réflexion et dans la réfraction, et particulièrement dans l'étrange réfraction du cristal d'Islande*". Paris: Gressner & Schramm, 1885.
- [11] A. Fresnel, "Mémoire sur la diffraction de la lumière," *Mémoires de l'Académie des Sciences*, pp. 339–475, 1819. Incluye 1 lámina; AQ 210.

- [12] E. L. Malus, “Sur une propriété de la lumière réfléchie,” *Mémoires de Physique et de Chimie de la Société d’Arcueil*, vol. 2, pp. 143–158, 1809.
- [13] M. Faraday, “Experimental Researches in Electricity.—Fifteenth Series,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 129, pp. 1–12, 1839.
- [14] J. C. Maxwell, “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 155, pp. 459–512, 1865.
- [15] G. G. Stokes, “On the Change of Refrangibility of Light,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 142, pp. 463–562, 1852.
- [16] M. Planck, “*Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*”. Berlin: Springer, 1978.
- [17] C. H. Townes and A. L. Schawlow, “*Microwave Spectroscopy*”. Mineola, NY: Courier Corporation, 2013.
- [18] D. Strickland and G. Mourou, “Compression of Amplified Chirped Optical Pulses,” *Optics Communications*, vol. 55, no. 6, pp. 447–449, 1985.
- [19] N. Ghosh, M. F. Wood, S. hong Li, R. D. Weisel, B. C. Wilson, R.-K. Li, and I. A. Vitkin, “Mueller Matrix Decomposition for Polarized Light Assessment of Biological Tissues,” *Journal of Biophotonics*, vol. 2, no. 3, pp. 145–156, 2009.
- [20] N. Ghosh and I. A. Vitkin, “Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook,” *Journal of Biomedical Optics*, vol. 16, no. 11, p. 110801, 2011.
- [21] 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.
- [22] 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,” *Journal of Biomedical Optics*, vol. 21, no. 7, pp. 071112–071112, 2016.
- [23] C. A. Cano Barrera, “*Diseño e implementación de un microscopio de luz polarizada para la medición cuantitativa de propiedades polarimétricas en muestras biológicas*”. PhD thesis, Universidad EAFIT, 2018.
- [24] T. Huang, R. Meng, J. Qi, Y. Liu, X. Wang, Y. Chen, R. Liao, and H. Ma, “Fast Mueller Matrix Microscope Based on Dual DoFP Polarimeters,” *Optics Letters*, vol. 46, no. 7, pp. 1676–1679, 2021.

- [25] A. V. Eeckhout, E. Garcia-Caurel, T. Garnatje, J. C. Escalera, M. Durfort, J. Vidal, J. J. Gil, J. Campos, and A. Lizana, “Polarimetric imaging microscopy for advanced inspection of vegetal tissues,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 3913, 2021.
- [26] N. T. Clancy, S. Arya, J. Qi, D. Stoyanov, G. B. Hanna, and D. S. Elson, “Polarised stereo endoscope and narrowband detection for minimal access surgery,” *Biomedical Optics Express*, vol. 5, no. 12, pp. 4108–4117, 2014.
- [27] J. Qi and D. S. Elson, “A High Definition Mueller Polarimetric Endoscope for Tissue Characterisation,” *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, p. 25953, 2016.
- [28] Y. Fu, Z. Huang, H. He, H. Ma, and J. Wu, “Flexible 3X3 Mueller Matrix Endoscope Prototype for Cancer Detection,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 7, pp. 1700–1712, 2018.
- [29] M. Gonzalez, K. A. Montejo, K. Krupp, V. Srinivas, E. DeHoog, P. Madhivanan, and J. C. Ramella-Roman, “Design and implementation of a portable colposcope Mueller matrix polarimeter,” *Journal of Biomedical Optics*, vol. 25, no. 11, p. 116006, 2020.
- [30] O. Rodríguez-Núñez, P. Schucht, E. Hewer, T. Novikova, and A. Pierangelo, “Polarimetric visualization of healthy brain fiber tracts under adverse conditions: ex vivo studies,” *Biomedical Optics Express*, vol. 12, no. 10, pp. 6674–6685, 2021.
- [31] A. B. Poole and I. Sims, “*Concrete Petrography: A Handbook of Investigative Techniques* . CRC Press, 2016.
- [32] Y. Takano and K.-N. Liou, “Solar radiative transfer in cirrus clouds. Part I: Single-scattering and optical properties of hexagonal ice crystals,” *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 46, no. 1, pp. 3–19, 1989.
- [33] C. Heiles, P. Perillat, M. Nolan, D. Lorimer, R. Bhat, T. Ghosh, M. Lewis, K. O’Neil, C. Salter, and S. Stanimirovic, “Mueller matrix parameters for radio telescopes and their observational determination,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 113, no. 788, p. 1274, 2001.
- [34] M. A. Vázquez, “*Diseño y construcción de un polarímetro para el cercano infrarrojo*”. PhD thesis, Tesis de Maestría, INAOE, 2012.
- [35] D. Ren, Z. Han, and J. Guo, “A High-Efficiency and High-Accuracy Polarimeter for Solar Magnetic Field Measurements,” *Solar Physics*, vol. 295, no. 8, p. 109, 2020.

- [36] R. C. Sánchez, R. M. Celorio, L. M. López, J. V. Durán, A. V. Corona, D. Hernández-Fusillier, B. G. Rolóna, and R. Rodríguez-Cruza, “Especímetro de resolución angular para tejidos biológicos,” *Revista Cubana de Física*, vol. 25, no. 2-A, pp. 70–74, 2008.
- [37] R. C. Sánchez, “Diseño y caracterización de un especímetro de resolución angular,”
- [38] D. R. Sotelo *et al.*, “Polarímetro Dinámico para la Caracterización de Muestras No Traslúcidas Bajo el Formalismo Stokes-Mueller,” 2018. Tesis / Reporte.
- [39] J. D. Berrones, “Diseño y construcción de sistema automatizado de polarización para controlar el perfil de intensidad de un espectro Raman,” 2018.
- [40] P. Mukherjee, S. Ishida, N. Hagen, and Y. Otani, “Implementation of a complete Mueller matrix polarimeter using dual photoelastic modulators and rotating wave plates,” *Optical Review*, vol. 26, pp. 23–32, 2019.
- [41] P. Bernard and J. D. Mendez, “Low-cost 3D-printed polarimeter,” 2020.
- [42] T. Wilkinson, C. Maurer, C. Flood, G. Lander, S. Chafin, and E. Flagg, “Complete Stokes vector analysis with a compact, portable rotating waveplate polarimeter,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 92, no. 9, p. 093101, 2021.
- [43] A. J. Harvie and J. C. de Mello, “The open polarimeter: a high-resolution instrument made from inexpensive optomechanical parts,” *Chemistry-Methods*, vol. 1, no. 3, pp. 148–156, 2021.
- [44] A. Bauer, S. Elamurugan, S. A. Tolba, E. Nega, I. T. L. Jr, W. Xia, D. Sun, *et al.*, “A portable elliptical dichroism spectrometer targeting secondary structural features of tumorous protein for pancreatic cancer detection,” *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 222, p. 114934, 2023.
- [45] A. Adhiya, M. Shah, A. Pandya, and R. Kaur, “A Simple Device for Simultaneous Measurement of Stokes Polarization Parameters,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023.
- [46] S. P. Gutiérrez, M. B. García, and S. Royo, “Polarímetro de imagen para la medida del vector completo de Stokes y de la matriz de Mueller en el rango del visible,” in *Conectando la academia y la industria: Libro de actas OPTOEL 2023*, p. 39, Editorial Universidad de Sevilla, 2024.
- [47] S. Ku, B. B. Hunakunti, A. L. Gratiet, A. Gogoi, and N. Mazumder, “Stokes–Mueller Polarization-Based Analysis of Model SARS-CoV-2 Virions,” *Lasers in Medical Science*, vol. 38, no. 1, p. 35, 2023.

- [48] L. Jiancheng, L. Zhenhua, X. Chong, W. Qinghua, and H. Anzhi, “Experimental Investigation of Backscattered Mueller Matrices of Turbid Media,” in *2007 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, pp. 1048–1052, IEEE, 2007.
- [49] W. D. Furlan, M. M. Corral, A. P. Martí, and G. S. Tortosa, “*Instrumentos Ópticos y Optométricos: Teoría y Prácticas*”. Educació. Sèrie Materials, Publicacions de la Universitat de València, 2011.
- [50] D. H. Goldstein, “*Polarized Light*”. CRC Press, 2017.
- [51] E. Hecht, “*Optics, 5th Edition*”. Addison-Wesley, 2002.
- [52] R. A. Chipman, W.-S. T. Lam, and G. Young, “*Polarized Light and Optical Systems*”. Optical Sciences and Applications of Light, CRC Press, 2018.
- [53] D. Malacara, “*Óptica Básica*”. Ediciones Científicas Universitarias, Fondo de Cultura Económica, 2015.
- [54] G. Atondo-Rubio, R. Espinosa-Luna, and A. Mendoza-Suárez, ““Mueller matrix determination for one-dimensional rough surfaces with a reduced number of measurements”,” *Optics Communications*, vol. 244, no. 1-6, pp. 7–13, 2005.
- [55] W. S. Bickel and W. M. Bailey, “Stokes vectors, Mueller matrices, and polarized scattered light,” *American Journal of Physics*, vol. 53, no. 5, pp. 468–478, 1985.
- [56] R. Espinosa-Luna, S. Hinojosa-Ruíz, and G. Atondo-Rubio, “Manejo e interpretación polarimétrica de las matrices de Mueller,” *Revista Mexicana de Física*, 2009.
- [57] D.-L. Almanza-Ojeda, D. Rodriguez-Sotelo, R. Castro-Sanchez, R. Martinez-Celorio, and M.-A. Ibarra-Manzano, “Stokes Dynamic Polarimeter for Non-Organic and Organic Samples Characterization,” *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2155, 2022.
- [58] J. GARCIA GUTIERREZ, “ANÁLISIS DE POLARIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN LUZ-MATERIA EN MEDIOS ANISOTRÓPICOS,” 2008.
- [59] D. Goldstein and D. H. Goldstein, “*Polarized Light, Revised and Expanded*”. Optical Engineering, CRC Press, 2003.
- [60] J. Freudenthal, “Intuitive interpretation of Mueller matrices of transmission,” *Hinds Instruments, Inc*, p. 6, 2018.

---

## Apéndice A

---

# Especificaciones Técnicas del Equipo.

### A.1. Láser He-Ne HRR170.

La marca Thorlabs® ofrece una selección de láseres de Helio-Neón (He-Ne) de 632.8 nm (rojo) con potencias de 0.8 mW a 22.5 mW y un haz gaussiano fundamental. El modelo utilizado cuenta con un haz de salida polarizado aleatoriamente (no polarizado) y se puede observar en la Figura A.1.1. El estado de polarización de un haz láser no polarizado aleatoriamente no es realmente una fuente no polarizada, sino más bien un único estado de polarización que cambia en una escala de tiempo de nanosegundos, las especificaciones más importantes se observan en la Tabla A.1.1.



Figura A.1.1: Láser He-Ne de Thorlabs [1].

**Tabla A.1.1:** Especificaciones del láser He-Ne de Thorlabs.

ESPECIFICACIONES	VALOR	ESPECIFICACIONES	VALOR
Longitud de onda	633 nm	Resistencia en serie en carcasa	94 kΩ
Potencia de salida mínima*	17 mW	Choque	15 g durante 11 ms
Potencia de salida máxima	25 mW	Peso	840 grams
Encendido 3 segundos después de encender**	>75%	<b>Dimensiones</b>	
Polarización	Aleatorio	Longitud	660.4 ± 1 mm (26 ± 0.04")
Estructura del modo	TEM <sub>00</sub> > 99%	Diámetro	44.5 ± 0.5 mm (1.75 ± 0.02")
Diámetro del haz 1/e <sup>2</sup>	0.98 mm	Clasificación CDRH	IIIb
Divergencia del haz	0.82 mrad	CE	3B
Espaciado de modo longitudinal	252 MHz		
Desviación del haz después de 30 minutos de calentamiento	<0.2 mrad	*Calentamiento de 30 minutos hasta la potencia de salida mínima específica  ** Retardo CDRH de 3 a 5 segundos incorporado en todos los modelos de fuente de alimentación, tiempo < 5 seg.	
Deriva del haz a largo plazo	<0.5 mrad		
Ruido (30Hz -10 MHz)	<1% RMS		
Voltaje de arranque	<10 kVDC		
Voltaje de funcionamiento	3500 VDC		
Corriente de funcionamiento	7 mA		
ESPECIFICACIÓN AMBIENTAL	OPERANDO	NO OPERANDO	
Temperatura	-20 a 70 °C	-40 a 80 °C	
Humedad	≤ 80%	≤ 95%	
Altitud	0 a 3,000 m	0 a 6,000 m	

## A.2. Motor paso a paso híbrido, Nema 17HS08-1004S STEP-PERINLINE.

El motor paso a paso híbrido de STEPPERONLINE combina las características de los motores de reluctancia variable y de los motores con imanes permanentes. El estator se activa electromagnéticamente, similar a un motor de reluctancia variable, mientras que el rotor está magnetizado axialmente como un motor de imán permanente.

Este motor convierte señales eléctricas en movimiento angular preciso, funcionando como un actuador de alta precisión, el modelo se puede observar en la Figura A.2.1 y cuyas especificaciones se muestran en la Tabla A.2.1.

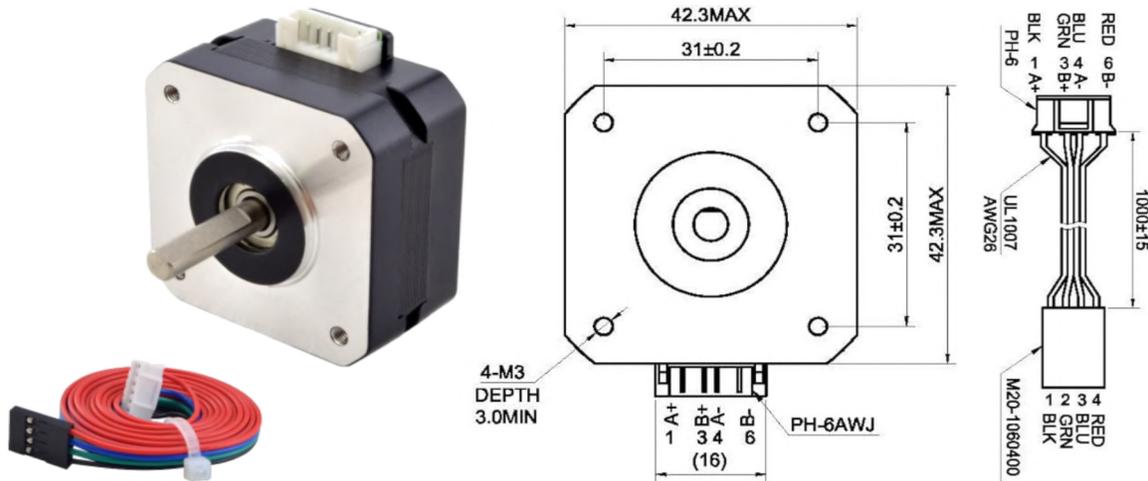


Figura A.2.1: Motor 17HS08-1004S [2].

Tabla A.2.1: Especificaciones del motor Nema 17 de STEPPERONLINE y secuencia de avance.

ESPECIFICACIÓN ELÉCTRICA	VALOR
Tipo de motor	Paso a paso bipolar
Angulo de paso	1.8 grados
Par de sujeción	17Ncm (24.07 oz.in)
Corriente nominal	1A
Resistencia de fase a 25°C	3.7 ohmios ±10%
Inductancia a 1KHz	4.5 mH ± 20%
Clase de aislamiento	B 130°C [266 °F]
Precisión de paso	±5%
Peso	0.14 Kg
Temperatura ambiental	-10 °C a 50°C

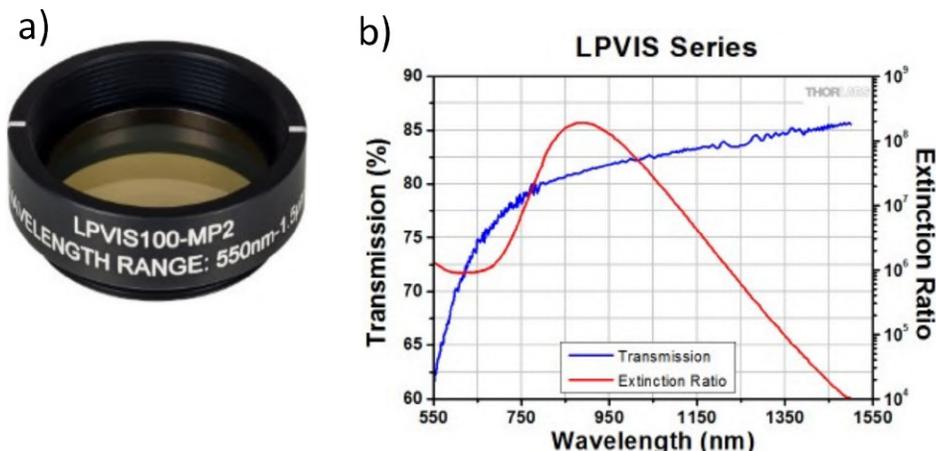
STEP	A	B	A\	B\	↓ CW	↑ CCW
1	+	+	-	-		
2	-	+	+	-		
3	-	-	+	+		
4	+	-	-	+		

### A.3. LPVIS100-MP - Polarizador lineal SM1 de Ø 25,0 mm, 550 - 1500 nm

Los polarizadores de película lineal de nanopartículas (NP) están compuestos por NP elipsoides incrustadas en un vidrio de silicato de sodio. Cada polarizador no montado cuenta con dos marcas negras que indican su eje de transmisión. Estos polarizadores de nanopartículas ofrecen un rendimiento superior en comparación con los polarizadores tradicionales basados en polímeros.

Aunque ambos tipos absorben la luz polarizada perpendicularmente al eje de transmisión, las nanopartículas presentan una resistencia significativamente mayor al daño y un rango de temperatura de funcionamiento más amplio que los polarizadores de película convencionales, se

adjunta la Figura A.3.1 donde se puede observar su comportamiento y el modelo, así como en la Tabla A.3.1 se adjunta más información proporcionada por el fabricante.



**Figura A.3.1:** a) Polarizador lineal LPVIS100-MP, b) grafica de transmisión y extinción del haz de acuerdo con la longitud de onda de la fuente [3].

**Tabla A.3.1:** Especificaciones del Polarizador lineal LPVIS100-MP de Thorlabs.

ESPECIFICACIÓN	VALOR
Rango de longitud de onda	550 a 1500 nm
Relación de extinción	>100 000:1 @ 600 a 1200 nm >10 000:1 @ 550 a 1500 nm
Distorsión del frente de onda	< 3λ @ 633 nm
Paralelismo	<20 arcmin
Angulo de aceptación	±20°
Apertura libre	∅ 22.5mm
Umbral de daño del láser:	
• Bloque continuo	10 W/cm <sup>2</sup>
• Paso continuo	25 W/cm <sup>2</sup>
Temperatura de operación	-20 °C a +120°C
Grosor del polarizador	260µm ± 50 µm
Calidad de la superficie	ISO 10110 - 07: 5/2 X0.4 por ∅ 10mm  MIL - O - 13830A: 20 - 20 SCRATCH/DIG

## A.4. PDA36A - Detector de ganancia conmutable Si

El PDA36A es un fotodetector de silicio de alta sensibilidad con ganancia ajustable, diseñado para detectar señales ópticas en un rango de 350 a 1100 nm. Un interruptor giratorio de

ocho posiciones permite seleccionar la ganancia en incrementos de 10 dB. La salida amortiguada está diseñada para manejar cargas de  $50 \Omega$  con niveles de señal de hasta 5 V, para mas detalles se adjunta la Tabla A.4.1. La carcasa del detector incluye un acoplador roscado extraíble y un anillo de retención compatible con accesorios roscados de 1" de Thorlabs, lo que facilita el montaje de ópticas externas, filtros de luz, aperturas y mecanismos de montaje utilizando accesorios de montaje de jaula, mostrado en la Figura A.4.1.

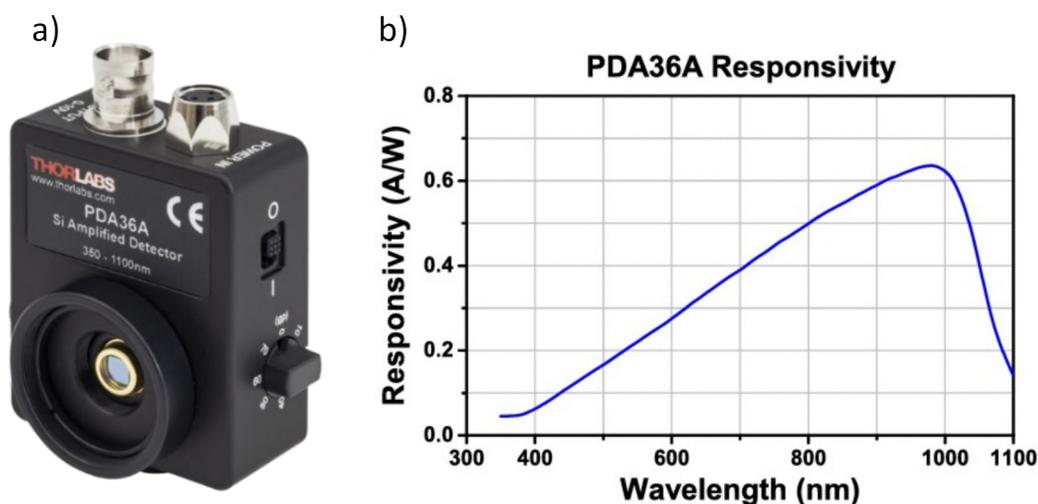


Figura A.4.1: a) Detector PDA36A, b) grafica de la curva de respuesta del sensor, de acuerdo con la longitud de onda [4].

Tabla A.4.1: Especificaciones del Detector PDA36A de Thorlabs.

ESPECIFICACIÓN ELECTRICA	VALOR	ESPECIFICACIÓN GENERAL	VALOR
Detector	Si PIN	Fuente de alimentación de AC	Convertor AC-DC
Área activa	3.6 x 3.6 mm (13 mm <sup>2</sup> )	Potencia de entrada	31W 100-200 VAC (50 a 60Hz) 220-240 VAC (50 a 60 Hz)
Rango de longitud de onda	350 a 1100 nm	Temperatura de operación	0 a 40°C
Amplificador GBP	600 MHz	Salida	BNC (Acoplamiento DC)
Impedancia de salida	50 $\Omega$	<b>AJUSTE DE 0 dB</b>	
Corriente de salida máxima	100 mA	Ganancia (Hi-Z)	$1.51 \cdot 10^3 \text{ V/A} \pm 2\%$
Impedancia de carga	50 $\Omega$ a Hi-Z	Ganancia (50 $\Omega$ )	$0.75 \cdot 10^3 \text{ V/A} \pm 2\%$
Rango de ajuste de ganancia	0 dB a 70 dB	Ancho de banda	10 MHz
Pasos de ganancia	8x10 dB pasos	Ruido (RMS)	300 $\mu\text{V}$
Voltaje de salida	0 a 5 V (50 $\Omega$ ) 0 a 10 V (Hi-Z)	Offset	$\pm 3 \text{ mV (Típico)}$ $\pm 10 \text{ mV (Máximo)}$

## A.5. Modulo ESP32-WROOM-32

El ESP32-WROOM-32 es un módulo MCU versátil que combina Bluetooth, Bluetooth LE y Wi-Fi, diseñado para una amplia gama de aplicaciones, desde redes de sensores de bajo consumo hasta tareas exigentes como codificación de voz y transmisión de música. En su núcleo se encuentra el chip ESP32-D0WDQ6, que ofrece escalabilidad y adaptabilidad. Cuenta con dos núcleos de CPU independientes y una frecuencia de reloj ajustable entre 80 MHz y 240 MHz. Además, incorpora un coprocesador de bajo consumo para realizar tareas que no requieren gran potencia de cálculo, ahorrando energía. El ESP32 también integra una amplia variedad de periféricos, incluyendo sensores táctiles capacitivos, interfaz de tarjeta SD, Ethernet, SPI de alta velocidad, UART, I2S e I2C, como se puede observar en la Figura A.5.1 y sus especificaciones eléctricas se adjuntan en la Tabla A.5.1.

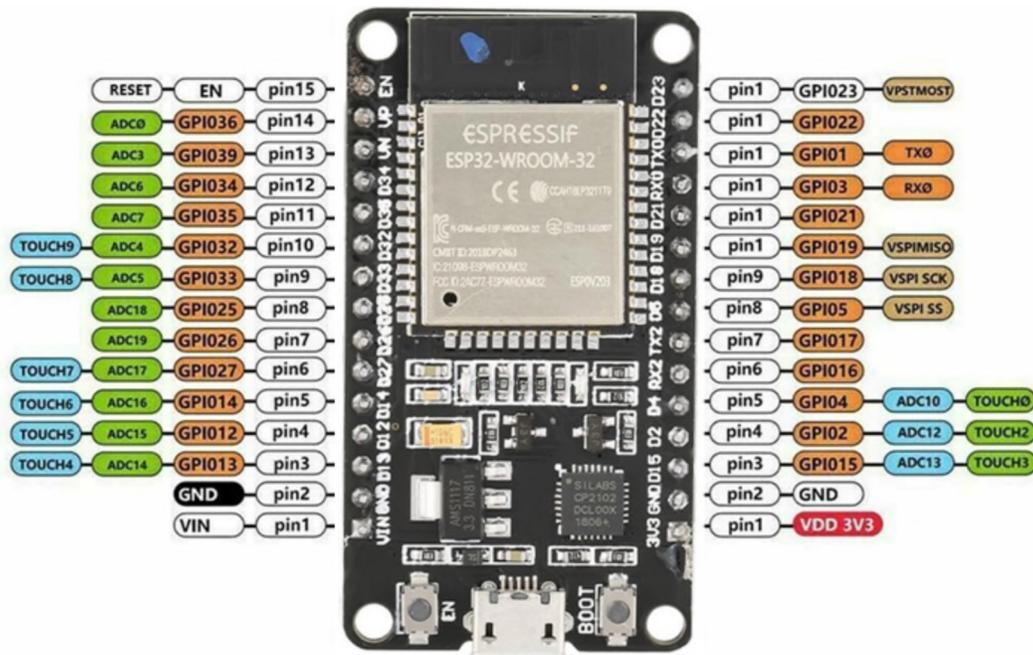


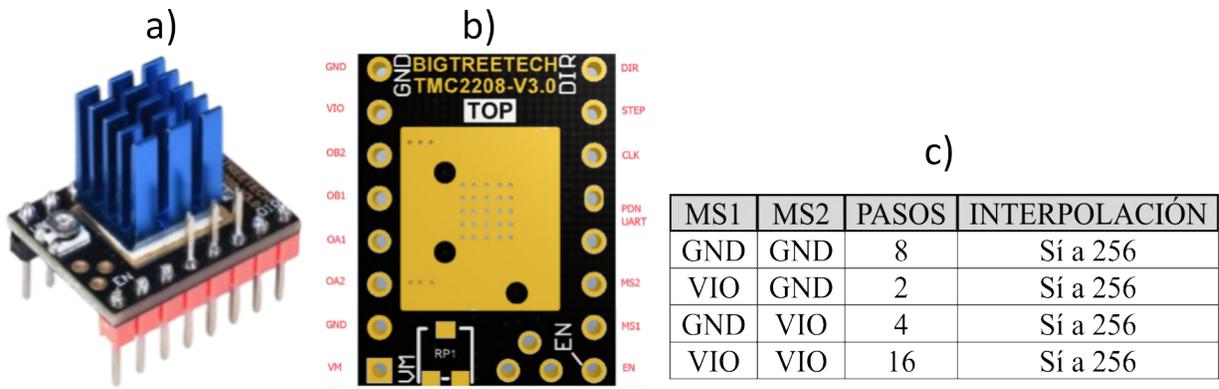
Figura A.5.1: Modulo ESP32-WROOM-32 [5].

**Tabla A.5.1:** Especificaciones del Módulo ESP32-WROOM-32.

ESPECIFICACIÓN ELECTRICA	VALOR	ESPECIFICACIÓN WI-FI	VALOR
Voltaje de alimentación	3.3 V (máx 3.6V)	Rango de frecuencia	2.4 GHz a 2.5 GHz
Consumo de corriente:		Protocolos	802.11 b/g/n (802.11n @150 Mbps), A-MPDU and A-MSDU.
• Típico	80 mA	Potencia de transmisión Tx	14 dBm máx.
• Modo de bajo consumo	5 $\mu$ A	Sensibilidad	-69 dBm a -98 dBm
Frecuencia de reloj	40 MHz	ESPECIFICACIÓN BLUETHOOT	VALOR
ESPECIFICACIÓN CPU	VALOR	Recepción	NZIF @-97 dBm.
Microprocesador Tensilica Xtensa 32 bits LX6 hasta 240 MHz	2 unidades	Protocolos	Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE.
Memoria ROOM	448 KB	Transmisión	Class-1, class-2 y class-3.
Memoria Flash	16 MB	AFH Audio CVSD y SBC	
Memoria SRAM	520 KB		
RTC slow SRAM	8KB		
RTC fast SRAM	8KB		
eFuse	1 Kbit		
Interfaces: SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR, pulse counter, GPIO, Sensor táctil capacitivo, ADC, DAC.			
Sensor Hall integrado.			
Antena integrada (onboard).			
Rango de temperatura: -40 °C ~ +85 °C.			
Dimensiones: 18 mm x 25.5 mm x 3.10 mm.			

## A.6. Drive TMC2208-V3.0 BIGTREETECH.

El TMC2208-V3 de BIGTREETECH es uno de los controladores paso a paso más avanzados para impresoras 3D. Está diseñado para trabajar con motores que requieren una corriente de accionamiento continua de 1,2 A y una corriente máxima de 2 A, con un rango de voltaje de 4,75 V a 36 V, como se menciona en la Tabla A.6.1. Este controlador ofrece 256 micropasos, lo que permite un movimiento muy suave y preciso. Además, es compatible con el modo StealthChop, que reduce significativamente el ruido de los motores paso a paso al eliminar las fluctuaciones de PWM y el ruido de regulación. El TMC2208 también cuenta con una mejor disipación térmica y un rendimiento de enfriamiento, lo que permite un trabajo más intenso y prolonga la vida útil del controlador (Figura A.6.1).



**Figura A.6.1:** a) Módulo TMC2208-V3.0 de BIGTREETECH, b) terminales del módulo y c) tabla de conexiones para seleccionar el modo de trabajo [6].

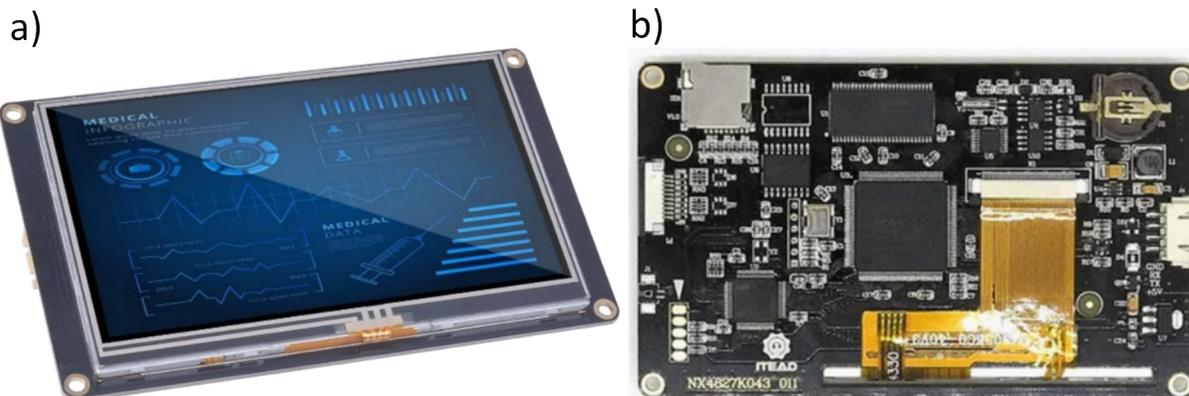
**Tabla A.6.1:** Especificaciones del TMC2208-V3.0.

<b>ESPECIFICACIONES</b>
Rango de voltaje de alimentación: 4.75 V a 36V DC
Corriente continua por fase: 1.3 A, pico de corriente 2A
Tecnología CoolStep™ de ajuste dinámico actual, puede ahorrar el 70% de la energía.
Tecnología stealthChop2: aceleración / deceleración más rápida del motor
DCStep™, tecnología de detección de bloqueo stallGuard2™
Cambio automático de StealthChop y spreadCycle dependiendo de la velocidad
Hardware compatible con StepStick y Pololu A4988 Stepper Driver
Interfaz de configuración avanzada UART

## A.7. Pantalla táctil HMI Nextion de 4,3”, NX4827K043.

El Nextion Enhanced NX4827K043 (Figura A.7.1) es una pantalla HMI TFT de 4,3” de alta performance, con 16 MB de almacenamiento de datos Flash, 1024 bytes de EEPROM y 3584 bytes de RAM. Además, cuenta con compatibilidad GPIO. Siendo una solución integral de interfaz hombre-máquina (HMI) que facilita la interacción entre humanos y procesos, máquinas, aplicaciones o dispositivos. Se aplica principalmente en el ámbito del Internet de las cosas (IoT) y la electrónica de consumo, y es una excelente alternativa para reemplazar las pantallas LCD y LED Nixie tradicionales. Nextion combina hardware (placas TFT) y software (editor de Nextion) para facilitar el diseño de interfaces. La placa TFT se comunica mediante un solo puerto serie y el editor ofrece variedad de componentes. La función de arrastrar y soltar reduce el tiempo de programación y permite crear GUI de manera rápida y sencilla, con fácil adaptación

a proyectos existentes mediante un UART, algunas de sus especificaciones se presentan en la Tabla A.7.1.



**Figura A.7.1:** Pantalla táctil HMI Nextion de 4,3”, NX4827K043, a) Vista frontal, b) vista posterior [7].

**Tabla A.7.1:** Especificaciones de la pantalla táctil NX4827K043.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	VALOR	ESPECIFICACIONES AMBIENTALES	VALOR
Color	64K 65536 colores	Temperatura de trabajo (5V, Humedad 60%)	-20 a 70 °C
Tamaño del diseño	120(L)×74(W)×6.2(H)	Temperatura de almacenamiento	-30 a 85 °C
Resolución	480×272 pixeles	Humedad de trabajo (25°C)	10% a 90% RH
Tipo táctil	Resistivo	ESPECIFICACIONES DE MEMORIA	
Luz de fondo	LED	Memoria FLASH (Almacenar fuentes e imágenes)	32 MB
Vida útil de la retroiluminación (promedio)	>30.000 horas	Almacenamiento de usuario (EEPROM)	1024 BYTE
Brillo	230 nit	Memoria RAM (Almacenar variables)	8192 BYTE
Peso	93,8 g	Búfer de instrucciones (Búfer de instrucciones)	1024 BYTE
CARACTERÍSTICAS ELECTRÓNICAS		VALOR	
Voltaje de funcionamiento	4.75 a 7 V DC	Velocidad de MCU	108 MHz
Corriente de funcionamiento	250 mA con el brillo al 100% 15 mA en modo de reposo		
Fuente de alimentación recomendada	5V, 1A, DC		