



INAOE

**INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y
ELECTRÓNICA.**

Análisis de cambio de fase local por polarización implementando un SLM

por

ING. Guadalupe Nayeli Perez Esquivel

Tesis sometida como requisito parcial
para obtener el grado de

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ÓPTICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica**

AGOSTO 2018, Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Fermín Salomón Granados Agustín, INAOE

Dra. Brenda Villalobos Mendoza, CINVESTAV

©INAOE 2018

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes mencionando la fuente.



***Para mi madre con
todo mi cariño...***

AGRADECIMIENTOS

“Nadie logra el éxito sin ayuda de los demás. El sabio y el confiado reconocen esta ayuda con gratitud”.

Alfred North Whitehead

De una manera especial agradezco a mis asesores, el Dr. Fermín Salomón Granados Agustín y la Dra. Brenda Villalobos Mendoza, por su atención, dedicación, paciencia ilimitada e invaluable asesoría para la realización de esta tesis. También quiero agradecer a los sinodales, el Dr. Daniel Aguirre Aguirre, la Dra. Ma. Elizabeth Percino Zacarias y el Dr. Alejandro Cornejo Rodríguez por sus valiosos comentarios para la mejora de esta tesis. Además de a los técnicos Pedro Técuatl y Ana María Zárate, al INAOE por las facilidades prestadas durante mi estancia académica y al CONACYT por la beca otorgada con numero 777003 durante el periodo 2016-2018.

Un merecido agradecimiento a mi madre porque siempre estará en mi corazón, a mi hermana Perla por su cariño y palabras de aliento, a mi tía Lupe porque gracias a ella he llegado tan lejos, a Angel por todo su amor y confianza, a la familia Maldonado Reyes por su apoyo y finalmente a todas las personas que me han brindado una mano amiga para alcanzar esta meta.

RESUMEN

En este trabajo se muestra la implementación de una pantalla de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés) utilizada como elemento para medir de forma indirecta los defectos locales y globales en espejos montados en un brazo de un interferómetro tipo Twyman Green. Se muestra los pasos realizados para la caracterización de una LCD modelo XGA2P01 marca CRL-Opto, así como los diferentes estados de polarización obtenidos.

El procedimiento realizado fue seleccionar la longitud de onda a la cual la LCD tuviera un mayor comportamiento lineal, esto se realizó de forma experimental haciendo incidir cuatro diferentes longitudes de onda: rojo (633 nm), naranja (612 nm), violeta (405 nm) y verde (550 nm) y midiendo con un detector de la marca Thorlabs las diferentes intensidades producidas por cada laser al desplegar diferentes niveles de gris en el LCD.

Después se determinó de forma experimental la relación entre los niveles de gris y el cambio de fase del LCD al hacer incidir luz linealmente polarizada. El método empleado fue interferometría de desplazamiento de fase. En la LCD se desplegaron imágenes manteniendo un nivel de gris fijo en la mitad superior y en la mitad inferior el nivel de gris fue variando, posteriormente se realizó un procesamiento de la imagen e implementando un algoritmo se obtuvo la curva "Desplazamiento de fase vs nivel de gris".

Para ello la LCD se montó en uno de los brazos de un interferómetro Twyman Green y antes de obtener la curva característica de la LCD fue necesario la calibración del interferómetro eliminando la lente colimadora e iluminándolo con luz blanca convirtiéndolo en un interferómetro de Michelson con el objetivo de comprobar que los cambios de fase observados en los patrones de interferencia fueran producidos únicamente por el despliegue de los diferentes niveles de gris y no debido al espesor de la LCD.

De los resultados obtenidos, se observa que la técnica propuesta funciona correctamente para corregir defectos locales en la superficie bajo prueba, que produzcan desplazamientos de fase de hasta 1.5π .

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivo principal de la tesis.	2
1.2.1. Objetivos particulares.....	3
1.3. Estructura de la Tesis.....	3
CAPÍTULO 2. Polarización	5
2.1. Introducción.	6
2.2. Análisis teórico.	6
2.3. Análisis matemático.	10
2.4. Desarrollo experimental.....	12
2.5. Conclusiones.....	16
CAPÍTULO 3. Pantalla de cristal líquido como retardador variable.....	18
3.1. Introducción.	19
3.2. Pantalla de cristal líquido.	19
3.3. Ecuación de polarización de la LCD.....	24
3.4. Desarrollo experimental.....	24
3.5. Conclusiones.....	34
CAPÍTULO 4. Montaje y calibración deL interferómetro de Michelson.	36
4.1. Introducción.	37
4.2. Análisis teórico.	37
4.3. Análisis matemático.	40
4.4. Desarrollo experimental.....	41
4.5. Conclusiones.....	47
CAPÍTULO 5. Caracterización del SLM para compensar las deformaciones de superficies ópticas.....	48
5.1. Introducción.	49
5.2. Desarrollo experimental.....	49
5.3. Algoritmo para calcular el desfaseamiento.	51
5.4. Conclusiones.....	56
CAPÍTULO 6. Conclusiones generales y trabajo a futuro.	57

6.1. Conclusiones generales.	58
6.2. Trabajo a futuro.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Luz elípticamente polarizada.	7
Figura 2.2 Configuraciones de polarización.....	7
Figura 2.3 Polarizador de rejilla de alambre.	8
Figura 2.4 Polarizadores polaroid cruzados.....	9
Figura 2.5 Material con propiedades birrefringentes.....	10
Figura 2.6 Arreglo experimental y esquemático , S1 (laser rojo), FE (filtro espacial), L1 (lente colimadora), P1 (polarizador1), R1 (retardador), PA2 (polarizador analizador 2), L2 (lente colectora) y D1 (detector PM100A de ThorLabs).	12
Figura 2.7 Arreglo esquemático y resultados de variación de intensidad con polarizadores perpendiculares.	13
Figura 2.8 Comportamiento de la componente horizontal del campo.....	14
Figura 2.9 Arreglo esquemático y resultados de variación de intensidad polarizadores paralelos.	14
Figura 2.10 Representación de los diferentes estados de polarización.....	15
Figura 2.11 Comparación de a) resultados simulados y b) resultados experimentales.	16
Figura 3.1 Ejemplos de implementación de pantallas de cristal líquido.....	19
Figura 3.2 Estructura interna de una LCD con transistores.	20
Figura 3.3 Diferentes tipos de píxeles. a) Píxeles monocromáticos y b) Píxeles de color.	20
Figura 3.4 Botánico austriaco Friedrich Reinitzer, benzoato de colesterilo.....	21
Figura 3.5 Cristales líquidos termotrópicos.	22
Figura 3.6 Tipos de cristal líquido termotrópicos, (a) Nemático, (b) Colectérico y (c) Esmético.....	22
Figura 3.7 Cambio de orientación de las partículas al hacer incidir un campo eléctrico.	23
Figura 3.8 Cristal líquido nemático girado.	23
Figura 3.9 Cristal líquido nemático girado con campo eléctrico incidente.	24
Figura 3.10 Arreglo esquemático del experimento #2.	25
Figura 3.11 Imágenes proyectadas en la LCD.	25
Figura 3.12 Arreglos experimentales #2: F1 (laser), FE (filtro espacial), L1 (lente colimadora, P1 (polarizador), LCD (pantalla de cristal líquido, P2 (polarizador analizador), L2 (lente colectora) y D1 (detector de ThorLabs PM100).	25
Figura 3.13 Eje de los polarizadores cruzados.	26
Figura 3.14 Primeros resultados experimentales, laser naranja.....	26
Figura 3.15 Arreglo experimental #3.	27
Figura 3.16 Resultados experimento #3.	27
Figura 3.17 Arreglo esquemático polarizadores perpendiculares y grafica de resultados de niveles de gris vs intensidad.....	28
Figura 3.18 Arreglo esquemático, analizador paralelo al eje del polarizador.	28
Figura 3.19 Arreglo esquemático polarizadores paralelos y gráfica de resultados de niveles de gris vs intensidad.	29
Figura 3.20 Comparación de gráficas del nivel de gris vs intensidad, polarizadores paralelos y polarizadores perpendiculares.....	30

Figura 3.21 Comparación del ajuste lineal de datos OriginPro8 y MATLAB.....	30
Figura 3.22 Rangos lineales de las cuatro longitudes de onda con el analizador perpendicular.	31
Figura 3.23 Rangos lineales, ejes de los polarizadores paralelos.....	32
Figura 3.24 Comparación de las curvas obtenidas de los cuatro diferentes longitudes de onda.	32
Figura 3.25 Diferentes estados de polarización.....	33
Figura 3.26 Variación de estados de polarización.	33
Figura 3.27 Barrido más fino, rango 160-170.	34
Figura 4.1 Interferómetro de Young.....	38
Figura 4.2 Interferómetro de Michelson.	38
Figura 4.3 Franjas de interferencia interferómetro de Michelson a) Franjas de igual inclinación, b) Franjas intermedias y c) Franjas de igual espesor.	39
Figura 4.4 Diagrama esquemático del interferómetro de Twyman Green.	39
Figura 4.5 Arreglo experimental, interferómetro de Michelson; L (laser), FE (filtro espacial), DH (cubo divisor de haz), E1 (espejo fijo), E2 (espejo móvil).	41
Figura 4.6 Franjas de igual inclinación del interferómetro de Michelson.....	42
Figura 4.7 Franjas con un espejo inclinado.....	43
Figura 4.8 Patrón de interferencia; a) franjas con luz blanca y b) franjas con láser verde espejo inclinado, c) franjas sin el espejo inclinado.	43
Figura 4.9 Arreglo esquemático y arreglo experimental FB (fuente de luz blanca), PD (pantalla), CD (cubo divisor de haz), E1 (espejo fijo), E2 (espejo móvil) y PO-CO (portaobjetos-cubreobjetos).	44
Figura 4.10 Franjas de interferencia con luz blanca al introducir a) portaobjetos y b) cubreobjetos.	45
Figura 4.11 Arreglo esquemático y experimental del interferómetro de Michelson con luz blanca y con una pantalla de cristal líquido en uno de sus brazos.	45
Figura 4.12 Franjas de interferencia de luz blanca al introducir la pantalla de cristal líquido.	45
Figura 4.13 Escalones de $\lambda/4$ y $\lambda/2$	46
Figura 4.14 Arreglo esquemático y experimental del interferómetro de luz blanca con espejo escalón.	46
Figura 4.15.- Patrones de interferencia de los espejos con escalón.	47
Figura 5.1 Arreglo esquemático y experimental.....	50
Figura 5.2 Corrimiento de franjas, variando los niveles de gris.	51
Figura 5.3 Diagrama a bloques del programa.....	52
Figura 5.4 Procesamiento del interferograma a) imagen capturada b) escala de grises c) suavizado.	52
Figura 5.5 Selección de máximos.	53
Figura 5.6 Cálculo del desfase introducido por cada nivel de gris.....	53
Figura 5.7 Resultados de diez diferentes mediciones del cambio de fase.	54
Figura 5.8 Curva promedio y ajuste lineal.	54
Figura 5.9 Arreglo esquemático y experimental, S1 (fuente de luz blanca), PD (pantalla difusora), DH (divisor de haz), LCD (pantalla de cristal líquido), E1 (espejo1), ES (espejo escalón) y E2 (espejo2).	55
Figura 5.10 Resultados obtenidos de los escalones al introducir niveles de gris en la pantalla de cristal líquido.	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Matrices de Jones	11
Tabla 3-1 Resultados de las cuatro longitudes de onda	32
Tabla 4-1 Cálculo de DCO al introducir un portaobjetos y un cubreobjetos.....	44

CAPÍTULO 1. **INTRODUCCIÓN**

1.1. Antecedentes

Las pantallas de cristal líquido (Liquid Cristal Display, *LCD*) son utilizadas como moduladores espaciales de luz (Spatial Light Modulator, *SLM*) teniendo una amplia gama de aplicaciones como: control de láseres pulsados [1, 2], óptica difractiva, procesamiento óptico, óptica adaptativa, y almacenamiento holográfico de datos [3-6], entre otros. Debido a las propiedades birrefringentes del cristal líquido del cual está hecho el *SLM* se puede manipular la amplitud, fase y estado de polarización de la luz incidente.

Debido a sus múltiples aplicaciones, las Pantallas *LCDs* requieren de una minuciosa caracterización. Varios análisis de fase han sido reportados en el pasado en base al efecto de Talbot [7-8]. En el cual el campo de Fresnel de rejillas de fase binaria a un cuarto de la distancia de Talbot, presentan una distribución de intensidad binaria, cuya visibilidad depende de la fase de cada rendija de la rejilla.

También, se implementan métodos interferométricos. Es decir, en el análisis de las Franjas de interferencia de interferómetros como: Mach-Zehnder [9] o Fizeau [10]. Sin embargo, la desventaja de estos sistemas son la alta sensibilidad de vibraciones mecánicas debido a la cantidad de componentes ópticas que necesitan y que son interferómetros de trayectorias diferentes.

Debido a sus múltiples aplicaciones, las pantallas de cristal líquido o *LCDs* requieren de una minuciosa caracterización para explotar así todas las ventajas que éstas ofrecen. En la presente tesis se caracterizó una *LCD* montada en un brazo de un interferómetro tipo Twyman Green [11], esto con la finalidad de encontrar su curva característica y poder utilizarla en la prueba de diferentes componentes ópticas.

1.2. Objetivo principal de la tesis.

El objetivo de este trabajo es caracterizar una pantalla de cristal líquido para realizar mediciones de los defectos locales y globales de las superficies bajo prueba, de forma indirecta implementando la *SLM*. Dependiendo del nivel de gris necesario para compensar el defecto observado en el interferograma relacionarlo con la profundidad y el tamaño de los defectos de la superficie.

1.2.1. Objetivos particulares.

- Implementar un arreglo experimental con un retardador de cuarto de onda para conocer los diferentes estados de polarización obtenidos al iluminar con luz linealmente polarizada y girar el eje del retardador.
- Caracterizar el tiempo de estabilización para cada uno de los cuatro láseres: naranja (612 nm), rojo (633 nm), violeta (405 nm) y verde (550 nm).
- Determinación del rango lineal de las curvas de variación de intensidad obtenidas al desplegar diferentes niveles de gris en un rango de 0 a 250 en el SLM para cada laser.
- Montaje del interferómetro de Michelson iluminado con láser verde.
- Alineación y calibración del interferómetro de Michelson con luz blanca
- Introducción de un portaobjetos, un cubreobjetos y un espejo escalón en uno de los brazos del interferómetro de Michelson para realizar su caracterización.
- Modificación del interferómetro de Michelson a interferómetro de Twyman Green.
- Realizar la caracterización de la pantalla de cristal líquido implementando un algoritmo para relacionar cambio de fase con nivel de gris.
- Aplicar la curva de cambio de fase obtenida para el análisis de los espejos escalones previamente caracterizados.

1.3. Estructura de la Tesis

A continuación, se realiza una breve descripción del trabajo realizado en cada capítulo.

En el capítulo 1 se hace una breve introducción del trabajo realizado. Se describe el objetivo general, así como los objetivos particulares del mismo.

En el capítulo 2 se hace una introducción a los conceptos básicos de polarización, así como la familiarización al implementar un arreglo experimental para obtener los diferentes estados de polarización al girar un retardador de cuarto de onda. Además de realizar un análisis matemático con el objetivo de realizar simulaciones para comparar los resultados teóricos con los resultados experimentales.

En el capítulo 3 se implementa la pantalla de cristal líquido como retardador variable para determinar el mayor rango lineal de trabajo del SLM de forma experimental se iluminó por cuatro láseres con diferentes longitudes de onda: rojo ($633nm$), naranja ($612nm$), verde ($550 nm$) y Violeta ($405 nm$). Previamente se caracteriza el tiempo de estabilización para cada uno de los cuatro láseres y se obtuvo la curva de intensidad con respecto a nivel de gris.

En el capítulo 4 se describen los conceptos de interferometría, superposición de dos frentes de onda planos y tipos de interferómetros. Además, los principios de funcionamiento del interferómetro de Michelson. Se describe la metodología usada para realizar su calibración al ser iluminado con luz blanca, y se muestran las imágenes de los arreglos experimentales utilizados, las franjas de interferencia obtenidas al hacer la diferencia de camino óptico igual a cero, la caracterización de un portaobjetos, un cubreobjetos, y dos espejos con escalones de $\lambda/4$ y $\lambda/2$.

En el capítulo 5 se describe el algoritmo que se implementó para caracterizar el cambio de fase que introduce el LCD al modificar cada nivel de gris. Además, se muestra la curva obtenida para compensar el desplazamiento que introducen los escalones de $\lambda/4$ y $\lambda/2$, y finalmente se muestran imágenes de las franjas de interferencia al ser compensadas.

CAPÍTULO 2. POLARIZACIÓN

2.1. Introducción.

En este capítulo se realiza un breve análisis teórico de los principales conceptos de polarización de la luz, birrefringencia, absorción selectiva y representación matemática de los estados de polarización, además se detalla el arreglo experimental implementado para la obtención de los tres diferentes estados de polarización girando manualmente un retardador de cuarto de onda iluminado con luz polarizada linealmente. Se muestran los resultados obtenidos de dicho experimento, las curvas de variación de intensidad al ir modificando el ángulo de del eje del retardador con respecto al eje del polarizador y finalmente, se muestra la comparación con los resultados obtenidos en simulaciones realizadas con MatLab® implementando en primera aproximación los vectores de Jones.

2.2. Análisis teórico.

La luz es una onda transversal, es decir, las componentes de su campo eléctrico y campo magnético oscilan en direcciones perpendiculares a la dirección de propagación de la luz [14]. Algunos ejemplos sencillos son la luz proveniente del sol, los focos, las velas, etc. estas son denominadas luz no polarizada o luz polarizada al azar. Este tipo de ondas tiene la propiedad de poder ser filtrada, en otras palabras, se puede seleccionar una componente que vibre en un plano determinado denominándole luz polarizada. Algunos animales como las abejas, hormigas, escarabajos y las moscas de fruta entre otros son capaces de detectar la polarización de la luz del cielo y orientarse respecto a esta. [20]

La ecuación (1) muestra la ecuación general de la luz polarizada, la cual, describe una elipse inclinada (figura 2.1). Donde E_x es la componente del campo que va en el eje x, E_y es la componente del campo que va en el eje y, δ_y es la fase de la componente, E_y , E_{oy} la amplitud del campo de la componente E_x , E_{ox} es la amplitud del campo en la componente E_x , δ_y es la fase de E_y y δ_x es la fase de E_x . [13]

$$\left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)\cos(\delta_y - \delta_x) = \sin^2(\delta_y - \delta_x) \quad (1)$$

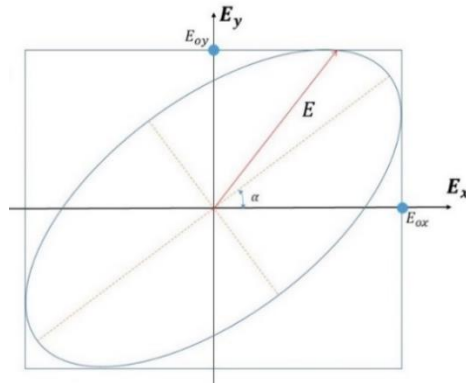


Figura 2.1 Luz elípticamente polarizada.

Pero existen dos casos particulares:

El primer caso se da cuando las componentes ortogonales del campo tienen un desfase ($\delta_y - \delta_x = 2m\pi$, donde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) y el estado de polarización que describe es una recta como se muestra en la Ecuación 2.

$$E_y = \frac{E_{oy}}{E_{ox}} E_x \quad (2)$$

Mientras que para el segundo caso $E_{ox} = E_{oy}$ y $\delta_y - \delta_x = \frac{m\pi}{2}$ donde $m = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots$, describiendo una circunferencia. ecuación (3). Y este se divide en dos tipos, polarización circular derecha y polarización circular izquierda dependiendo del sentido en que sus componentes giren. [14]

$$\left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

Algunas configuraciones de polarización se muestran en la figura 2.2.[14]

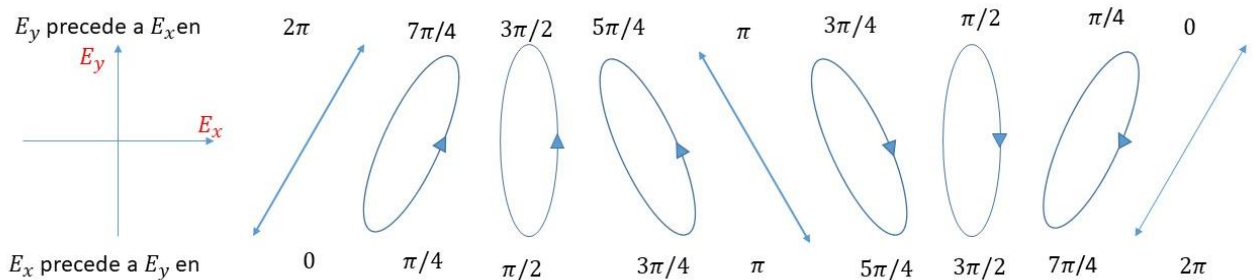


Figura 2.2 Configuraciones de polarización.

Los tres tipos de polarización circular, elíptica y lineal pueden ser representados entonces por dos componentes ortogonales con ciertas características.

Existen diferentes métodos para generar luz polarizada, el más implementado en los laboratorios es aprovechando la asimetría de ciertos materiales para seleccionar un estado de polarización y descartar los otros. [12]

El dicroísmo o absorción selectiva es la propiedad que además de separar la luz incidente en dos componentes ortogonales elimina o descarta una mientras que la parte que resta no sufre cambio alguno obteniendo a la salida del material polarización lineal, los artefactos que realizan este proceso son denominados “polarizadores”. [13]

El tipo de polarizador dicroico más sencillo de comprender es el de rejilla de alambre construido por primera vez en 1960 por G.R. Bird y M. Parrish Jr. al producir alambres de diámetro más pequeño que la longitud de onda mediante la evaporación de un flujo de átomos de oro. Al hacer incidir un campo eléctrico no polarizado sobre la rejilla, la componente del campo paralela al alambre impulsa los electrones de conducción generando una corriente que a su vez ocasiona calor de manera que la energía del campo incidente es transferida al alambre logrando anularla, mientras que la componente perpendicular queda esencialmente inalterada (figura 2.3). [17]

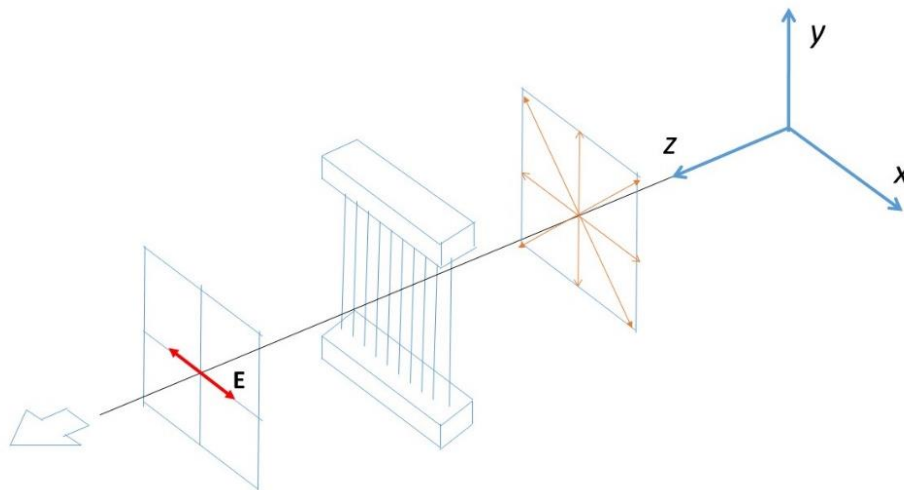


Figura 2.3 Polarizador de rejilla de alambre.

Mientras que el tipo más común de polarizador es la lámina H inventada en 1938 por E.H. Land puede ser considerada como una versión química de la rejilla de alambre. Para su fabricación se emplea una hoja de alcohol polivinílico debido a sus

moléculas alargadas y delgadas, la cual es sometida a calor y es estirada logrando que las moléculas se giren para tener casi la misma orientación en dirección a la fuerza de estiramiento. Después es pegada a una hoja de acetato de celulosa rígida para evitar que se contraiga y posteriormente es sumergida en una solución líquida rica en yodo, con la finalidad de que este se fije a las largas moléculas generando largas y delgadas cadenas, finalizando el proceso con el lavado, secado y cortado en pedazos de la lámina. [13]

Por lo tanto, las láminas H absorben las vibraciones eléctricas paralelas a su eje de alineación mientras que su eje de transmisión es perpendicular a la dirección de estiramiento. La figura 2.4 muestra dos polarizadores con sus ejes cruzados, donde se puede observar que la luz que sale después de ellos es nula. [20]

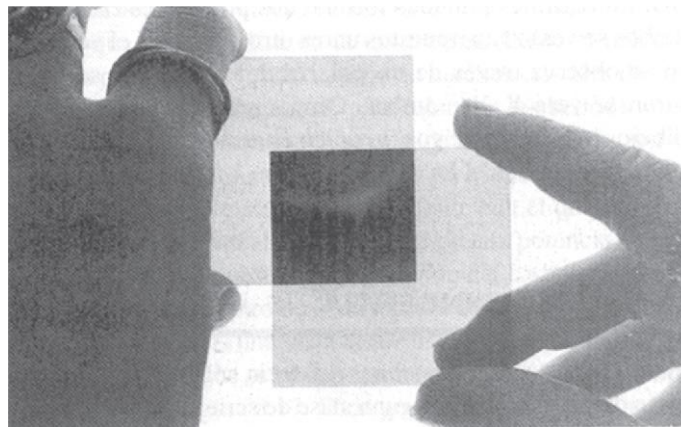


Figura 2.4 Polarizadores polaroid cruzados.

Algunas sustancias tienen la propiedad de además de separar las componentes en dos, estas se encuentran con diferentes índices de refracción ocasionando que las componentes se separen y tengan un desfase. Un material que exhibe dos índices diferentes de refracción es denominado birrefringente, algunos ejemplos típicos son la calcita, turmalina, cuarzo, etc., figura 2.5. [13]

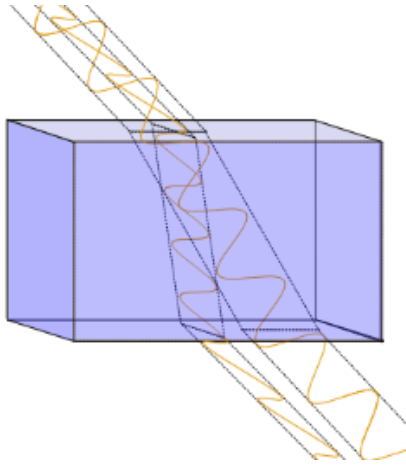


Figura 2.5 Material con propiedades birrefringentes.

Los retardadores son convertidores de forma de polarización y están hechos de material birrefringente que es cortado paralelamente a su eje óptico, logrando que las componentes del campo incidente tengan un desfase dependiente del espesor del material.

Comercialmente existen tres tipos principales de retardadores:

Los retardadores de onda completa introducen un desfase de 2π y son implementados como filtro, debido a que dejan pasar solo una longitud de onda específica y son denominados cromáticos.

Los retardadores de media onda introducen un desfase de π al colocarlo después de polarización lineal, rota el vector de polarización 2θ .

Y por último los retardadores de cuarto de onda, los cuales introducen un desfase de $\frac{\pi}{2}$ logrando con ello que al hacer incidir luz polarizada linealmente a 45° respecto del eje del retardador se obtenga luz circularmente polarizada. [13]

2.3. Análisis matemático.

Una representación matemática de diferentes estados de polarización y algunos elementos ópticos fue realizada en 1941 por el físico norteamericano R. Clark Jones, en la tabla 2.1 se muestran algunas de estas representaciones [12]. Donde θ y α son los ángulos rotados respecto al eje horizontal y ϕ el desfase introducido.

Tabla 2.1 Matrices de Jones

	Matriz de Jones
Polarización P_h horizontal	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
Polarización P_v vertical	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
Polarización P_{45° a 45°	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
Polarización P_{-45° a -45°	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$
Polarización R	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$
Polarización L	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$
Polarizador horizontal	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
Polarizador vertical	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
Matriz de rotación	$\begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$
Polarizador horizontal rotado	$\begin{pmatrix} \cos(\alpha)^2 & \cos(\alpha) * \sin(\alpha) \\ \cos(\alpha) * \sin(\alpha) & \sin(\alpha)^2 \end{pmatrix}$
Polarizador vertical rotado	$\begin{pmatrix} \sin(\alpha)^2 & \cos(\alpha) * \sin(\alpha) \\ \cos(\alpha) * \sin(\alpha) & \cos(\alpha)^2 \end{pmatrix}$
Retardador	$\begin{pmatrix} e^{+i\phi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi/2} \end{pmatrix}$
Retardador rotado (θ, ϕ)	$\begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + i\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos(2\theta) & i\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin(2\theta) \\ i\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin(2\theta) & \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) - i\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos(2\theta) \end{pmatrix}$
Retardador de cuarto de onda rotado	$\begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i}{\sqrt{2}}\cos(2\theta) & \frac{i}{\sqrt{2}}\sin(2\theta) \\ \frac{i}{\sqrt{2}}\sin(2\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{i}{\sqrt{2}}\cos(2\theta) \end{pmatrix}$

2.4. Desarrollo experimental.

Para la obtención experimental de diferentes estados de polarización, se implementó un retardador de cuarto de onda iluminado con luz linealmente polarizada y se giró manualmente. La figura 2.6 muestra el arreglo esquemático y experimental conformado por un láser rojo 633 nm, un filtro espacial, una lente colimadora de distancia focal 10 cm, dos polarizadores, un retardador de cuarto de onda, una lente de 15 cm de distancia focal y un detector PM100 de ThorLabs.

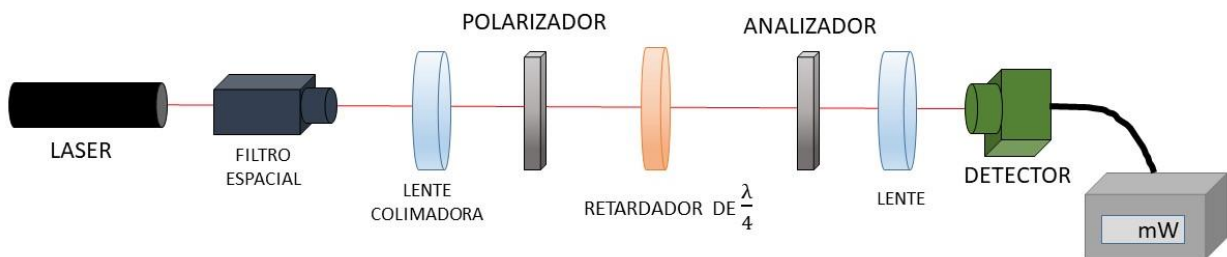
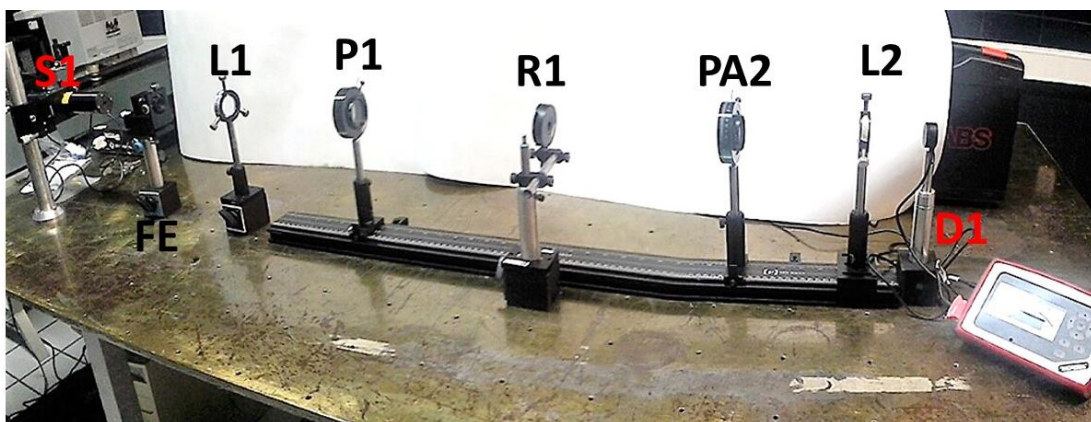


Figura 2.6 Arreglo experimental y esquemático, S1 (láser rojo), FE (filtro espacial), L1 (lente colimadora), P1 (polarizador1), R1 (retardador), PA2 (polarizador analizador 2), L2 (lente colectora) y D1 (detector PM100A de ThorLabs).

Inicialmente los polarizadores se colocaron con sus ejes perpendiculares entre ellos para encontrar un valor mínimo de intensidad con el detector. Después se introdujo el retardador de cuarto de onda, este se giró hasta que en el detector se encontrara un mínimo de intensidad (figura 2.7a). La interpretación al obtener este valor fue que el eje del retardador coincidía con el del polarizador, por lo tanto, el eje del retardador era paralelo a la polarización lineal incidente. Se tomó como referencia

a este punto del retardador y como “punto inicial o ángulo cero”. Posteriormente se fue girando el retardador con cambios de 5° grados entre cada una de las mediciones de intensidad hasta llegar a 180° obteniendo la gráfica que se muestra en la figura 2.7 b).

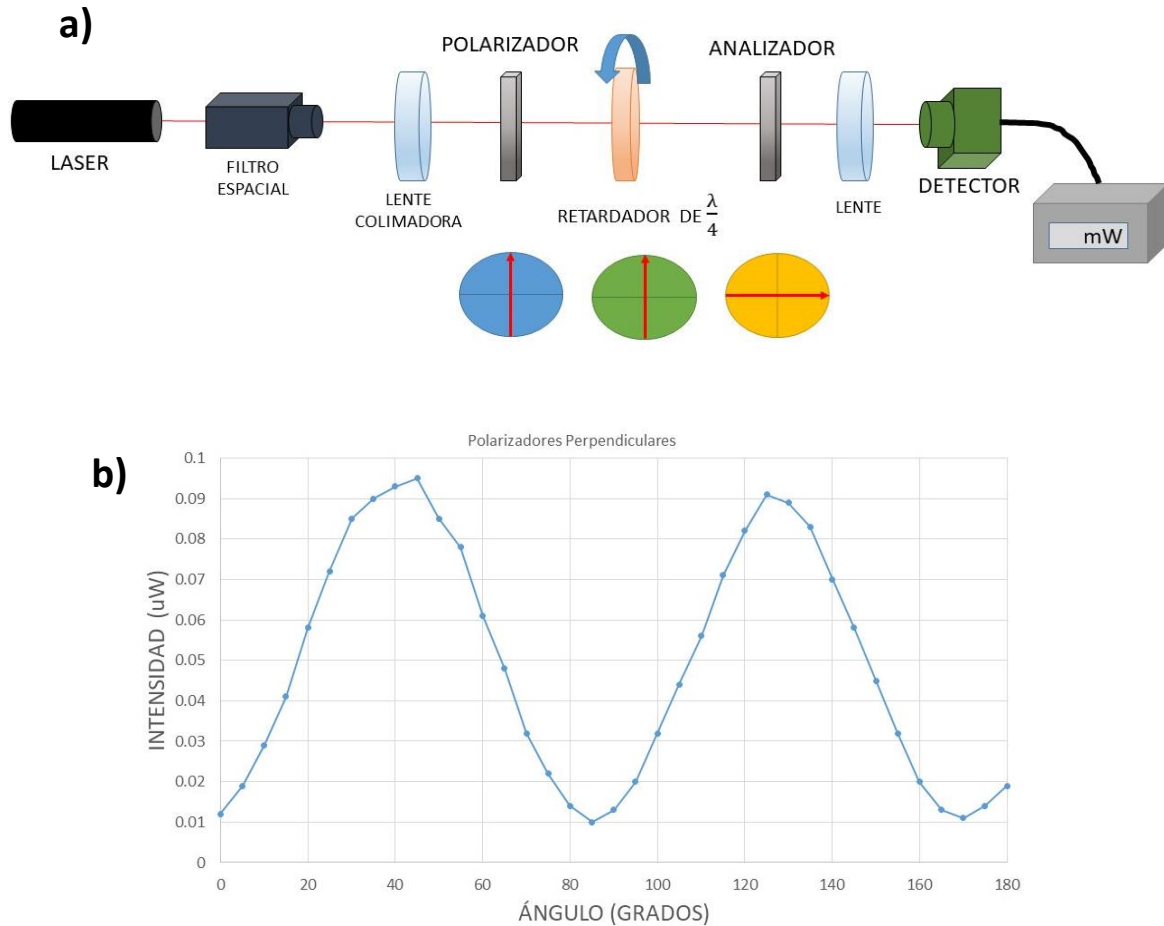


Figura 2.7 Arreglo esquemático y resultados de variación de intensidad con polarizadores perpendiculares.

En la figura 2.8 se realiza una interpretación de la gráfica de intensidad obtenida en la figura 2.7 b), el eje del analizador o eje perpendicular la amplitud al comienzo es cero, y mientras se fue aumentando el ángulo del retardador la intensidad va creciendo hasta que llega a un valor máximo en 45° y 135°, comienza a disminuir hasta volverse nuevamente nulo en 90° y 180° teniendo un comportamiento repetitivo.

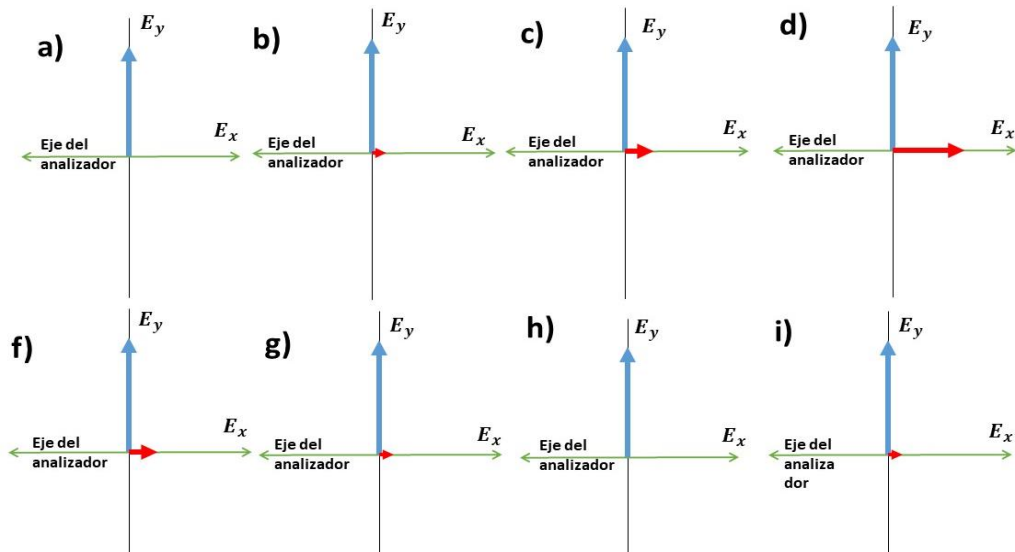


Figura 2.8 Comportamiento de la componente horizontal del campo.

Posteriormente para conocer el comportamiento de la componente vertical el analizador es colocado con su eje paralelo al del polarizador encontrando un máximo de intensidad, después se introduce el retardador de cuarto de onda en el punto de referencia. La interpretación ahora es que los ejes del polarizador, el retardador y el analizador se encontraban paralelos (figura 2.9 a)). La figura 9b) muestra las variaciones de intensidad al ir aumentando el ángulo del retardador en intervalos de 5° grados.

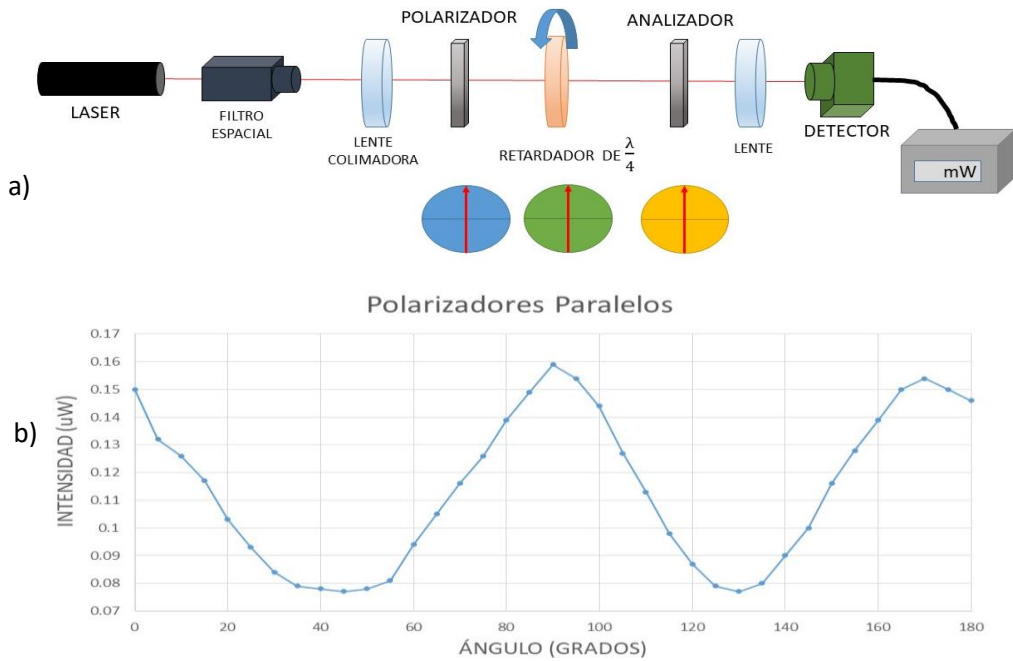


Figura 2.9 Arreglo esquemático y resultados de variación de intensidad polarizadores paralelos.

Realizando un análisis de los resultados del comportamiento de ambas componentes ortogonales se observó que mientras la componente horizontal aumenta, la componente vertical disminuye recordando que los retardadores de cuarto de onda generan un desfase fijo de $\frac{\pi}{2}$ obteniendo así los diferentes estados de polarización.

Cuando el eje del retardador se encuentra en el punto inicial existe polarización lineal, mientras se va cambiando el ángulo comienza a aparecer la componente horizontal mientras la componente vertical va disminuyendo obteniendo entonces polarización elíptica hasta que ambas componentes se vuelven de igual magnitud cuando el ángulo entre los ejes del polarizador y el retardador es de 45° obteniendo ahora polarización circular, después la componente horizontal vuelve a disminuir y la vertical a aumentar obteniendo nuevamente polarización elíptica hasta que la componente horizontal desaparece obteniendo polarización lineal en 90° .

Las variaciones de intensidad son repetitivas, es decir al girar el retardador de cuarto de onda de $\frac{m\pi}{2}$, dónde $m=0,1,2,3\dots$ obtenemos polarización lineal, mientras que para $\frac{m\pi}{4}$ dónde $m = 0,1,3,5 \dots$ se obtiene polarización circular y entre estos se presenta polarización elíptica. (figura 2.10).

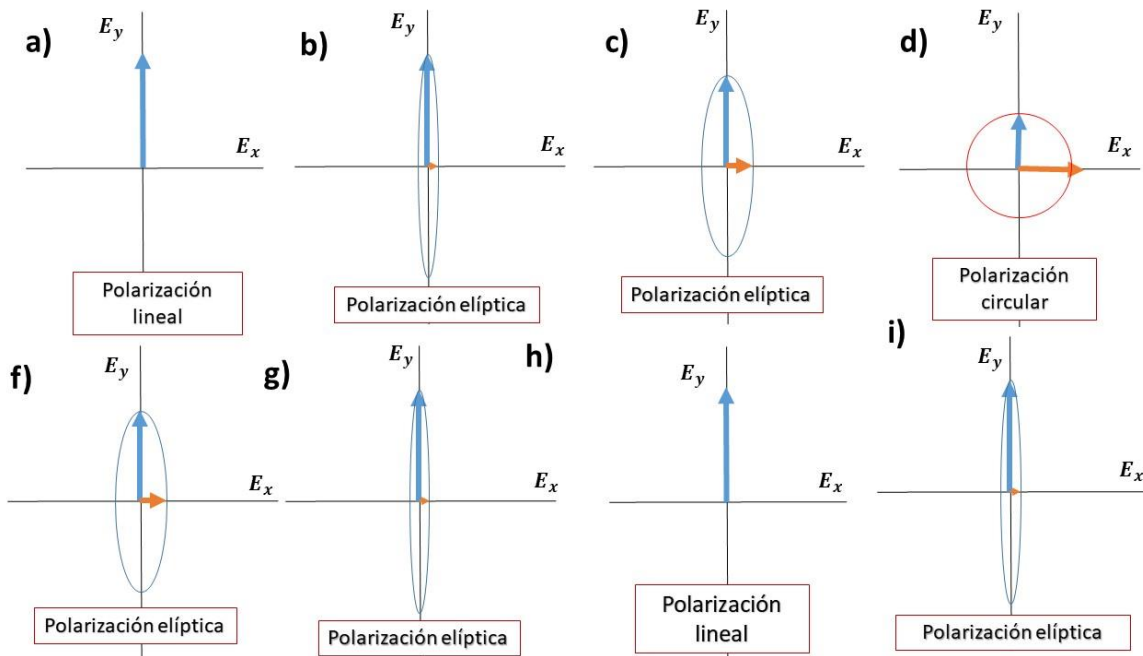


Figura 2.10 Representación de los diferentes estados de polarización.

Para realizar un análisis matemático se implementaron las matrices de Jones para el polarizador horizontal, el polarizador vertical y el retardador de cuarto de onda. (tabla 2.1).

Se desarrolló un algoritmo en Matlab para simular los diferentes estados de polarización mientras el eje del retardador va variando implementando ambos casos cuando los ejes de los polarizadores estaban paralelos (P_h)(P_R)(P_v) y cuando están perpendiculares (P_h)(P_R)(P_h) después variando en un ciclo para el ángulo θ en un rango de 0 a 2π y graficando la intensidad como el cuadrado del campo resultante se obtienen las siguientes gráficas de la figura 2.11.

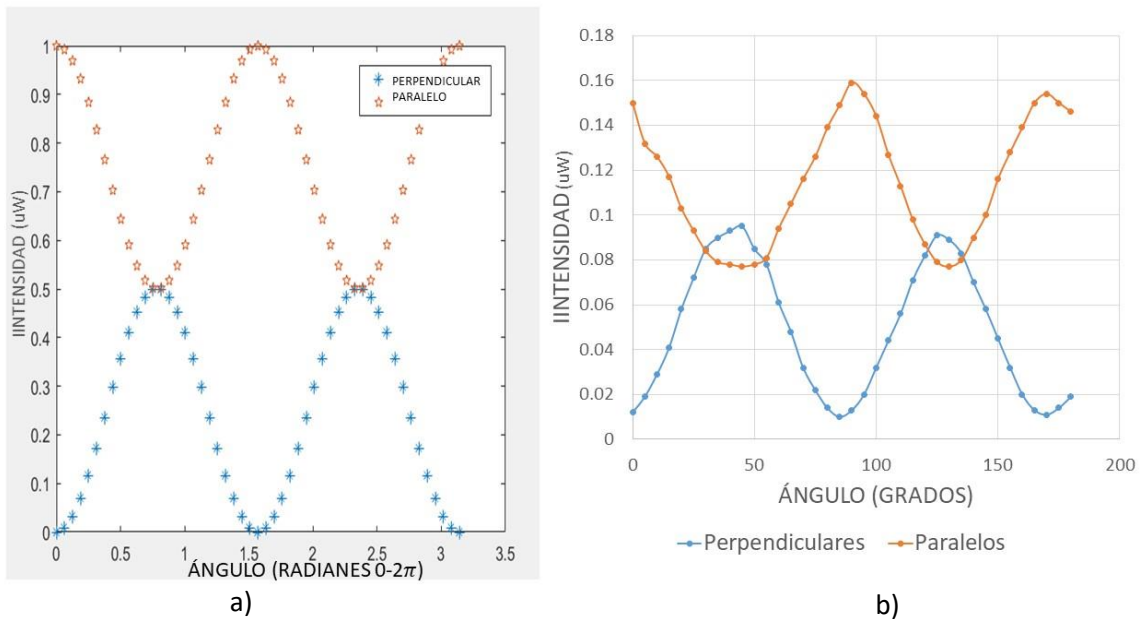


Figura 2.11 Comparación de a) resultados simulados y b) resultados experimentales.

2.5. Conclusiones.

Al realizar una comparación con los datos experimentales y los datos simulados se observa que son parecidas entre sí, pero al ser un caso ideal el que se está simulando y a primera aproximación con las matrices de Jones, es evidente que las gráficas no corresponderán en su totalidad, debido a que en la realidad ni los polarizadores ni el retardador tienen un comportamiento perfecto, por lo tanto es claro que los resultados difieran un poco entre sí, sin embargo se puede observar la gran similitud entre los resultados teóricos y los resultados experimentales.

Además, al analizar las gráficas del comportamiento de las dos componentes del campo eléctrico se puede observar que es posible la obtención de los tres diferentes estados de polarización girando manualmente el retardador a un ángulo determinado, por ejemplo al colocar el retardador a un ángulo de 45 grados con luz incidente linealmente polarizada se genera polarización circular a la salida del retardador, como puede verse en las gráficas de la figura 2.11 (a) y (b) donde ambas componentes tienen el mismo valor de magnitud.

CAPÍTULO 3. PANTALLA DE CRISTAL LÍQUIDO COMO RETARDADOR VARIABLE.

3.1. Introducción.

En este capítulo se realiza un breve análisis teórico de las pantallas de cristal líquido, su historia, los tipos y características del cristal líquido además del arreglo experimental utilizado para la manipulación de los estados de polarización implementando una pantalla de cristal líquido como retardador variable. Se muestran los resultados de variación de intensidad al cambiar los niveles de gris de 0 a 250 en pasos de 10 niveles de gris al iluminar la pantalla con cuatro diferentes longitudes de onda rojo (633 nm), naranja (612 nm), violeta (405 nm) y verde (532 nm), además de la curva de caracterización del tiempo de estabilización de cada uno de ellos.

3.2. Pantalla de cristal líquido.

Las pantallas de cristal líquido son pantallas delgadas y planas formadas por un número de píxeles colocados delante de una fuente de luz. Comenzaron a utilizarse como pantallas para pequeños dispositivos como calculadoras y relojes, pero ahora son la alternativa preferencial para pantallas de ordenadores, televisiones y celulares. figura 3.1. [15]



Figura 3.1 Ejemplos de implementación de pantallas de cristal líquido.

En la figura 3.2 podemos observar la estructura interna de una pantalla de cristal líquido controlando la carga eléctrica que se le suministra a cada uno de los píxeles con transistores.

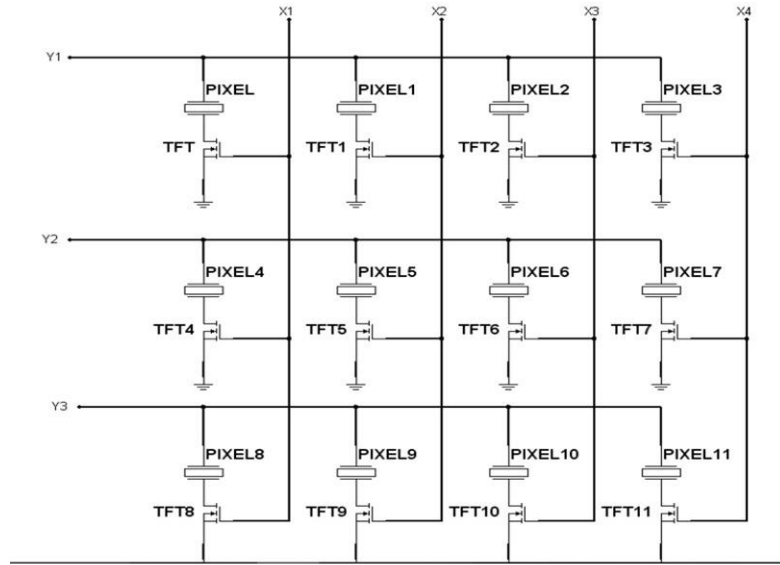


Figura 3.2 Estructura interna de una LCD con transistores.

Existen dos tipos de píxeles, los monocromáticos conformados por el cristal líquido colocado entre dos vidrios con electrodos de óxido de indio donde se le suministra el campo eléctrico, dos polarizadores con sus ejes perpendiculares entre ellos y la fuente de iluminación. El segundo tipo son los píxeles de color que en principio es el mismo sándwich, pero se le agrega un filtro de color como se muestra en la figura 3.3.[19]

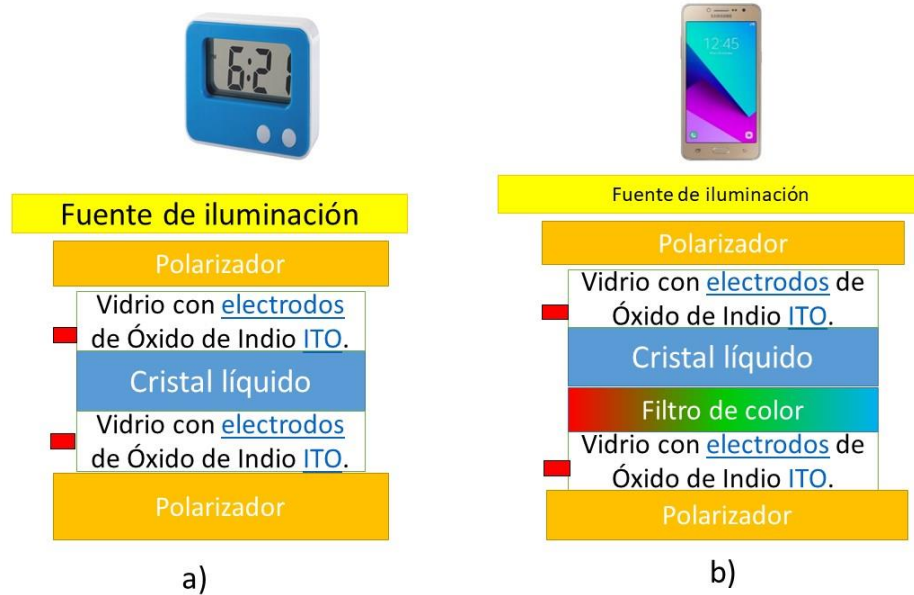


Figura 3.3 Diferentes tipos de píxeles. a) Píxeles monocromáticos y b) Píxeles de color.

Actualmente las pantallas de cristal líquido han recibido considerable atención debido a que se han implementado como moduladores espaciales de luz en diversos campos de la óptica tales como óptica difractiva, procesado óptico, óptica adaptativa, almacenamiento holográfico de datos, entre muchos otros. En estas aplicaciones la LCD es utilizada para controlar amplitud, fase o estado de polarización de un haz incidente y esto se debe a que el material o cristal líquido con el que están fabricadas tiene propiedades birrefringentes. [21]

El cristal líquido fue descubierto en 1888 por el botánico austriaco Friedrich Reinitzer quien se encontraba estudiando el benzoato de colesterilo y se dio cuenta que, al calentar el sólido, este pasaba por dos puntos de fusión, el primero en 145° donde la sustancia toma una apariencia lechosa y el segundo a 179° donde ahora la sustancia se volvía cristalina, figura 3.4.[15]

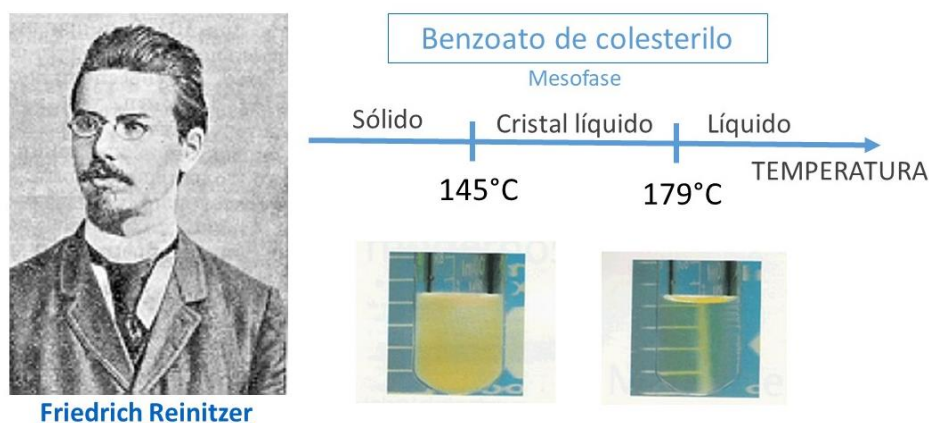


Figura 3.4 Botánico austriaco Friedrich Reinitzer, benzoato de colesterilo.

En 1889 el cristalógrafo Otto Lehman analizó la sustancia y determinó que algunas moléculas no se derretían directamente, éstas pasaban a través de una fase en la que tenían la cualidad de fluir, conservando la estructura molecular y las propiedades ópticas de un cristal, y las denominó “cristal líquido”. [18]

Los cristales líquidos se dividen en dos familias fundamentales:

Los liotrópicos en los cuales la mesofase o estado de cristal líquido se presenta en una disolución generalmente acuosa a determinadas concentraciones. Muchas moléculas orgánicas son cristales líquidos liótropos, esta compatibilidad abre el campo de las aplicaciones de los cristales líquidos a la medicina (fármacos), la biotecnología (sensores biológicos, detectores de sistemas víricos, etc.) o la industria alimenticia (colorantes, estabilizadores, etc.). Otras aplicaciones de estos

compuestos se pueden ver en la industria textil o en la elaboración de detergentes y jabones.

El segundo tipo son los termotrópicos los cuales presentan la mesofase al calentar o enfriar la sustancia. Estos se dividen en dos tipos, los discóticos y como su nombre lo indica su forma es de discos; y los calamíticos que tienen una forma de bastones y son los más implementados en aplicaciones electro-ópticas, figura 3.5.

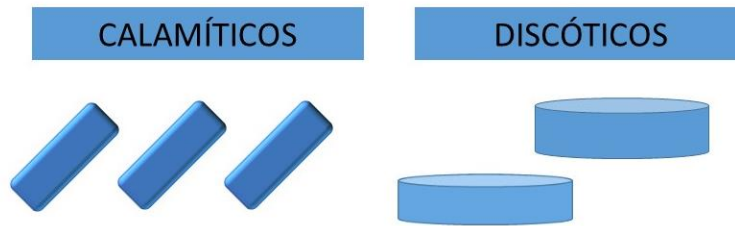


Figura 3.5 Cristales líquidos termotrópicos.

En 1922 George Friedel cristalógrafo y mineralista clasificó los cristales líquidos termotrópicos calamíticos en tres grandes clases de acuerdo con su arreglo molecular:[15]

- Nemático, las moléculas muestran un desorden de posición, pero una orientación fija, figura 6 (a).
- Colestérico, que consta de capas de cristales orientadas en forma nemática y rotadas un determinado ángulo respecto de las siguientes, figura 6 (b).
- Esmético, muestra una estratificación regular y posición al azar de las partículas, a pesar su orientación fija, figura 6 (c).

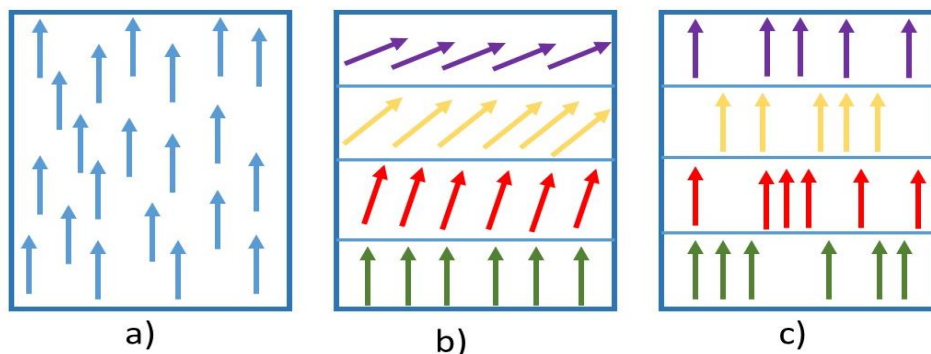


Figura 3.6 Tipos de cristal líquido termotrópicos, (a) Nemático, (b) Colestérico y (c) Esmético.

En general, los cristales líquidos son bastante absorbentes en la región UV, como lo son la mayoría de las moléculas orgánicas. En los regímenes visibles e infrarrojo cercano, hay relativamente pocas bandas de absorción, y por lo tanto los cristales líquidos son bastante transparentes en estos regímenes. Hay, por supuesto, grandes variaciones entre los miles de cristales líquidos "descubiertos" o diseñados hasta el momento, por lo tanto, es posible identificar cristales líquidos con la absorción / transparencia deseada para una longitud de onda particular de interés.

En 1970 se demostró que la corriente eléctrica de baja intensidad cambia la estructura interna de la mesofase (figura 3.7), también llamada "estado mesomórfico", lo que provoca variaciones en las propiedades ópticas.

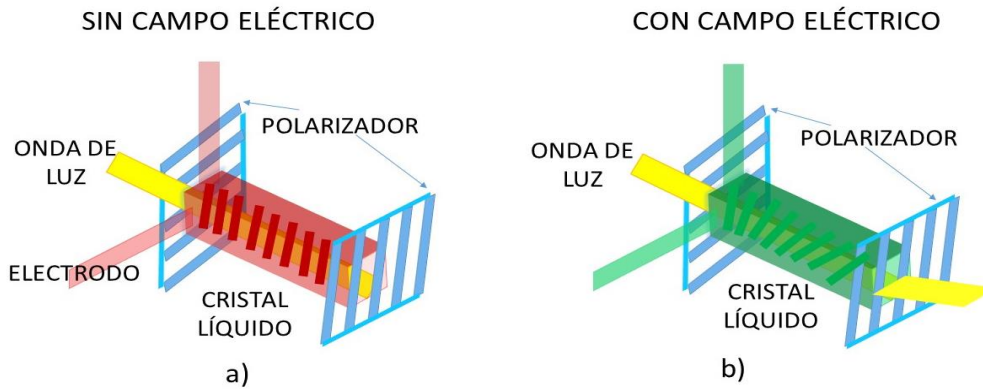


Figura 3.7 Cambio de orientación de las partículas al hacer incidir un campo eléctrico.

Comercialmente, el tipo de cristal más utilizado es el nemático girado, en el cual una de las placas de vidrio es girada levemente ocasionando que sus moléculas adopten la forma de los peldaños de una escalera de caracol. Generalmente el ángulo girado entre las placas es de 90° , Figura 3.8.

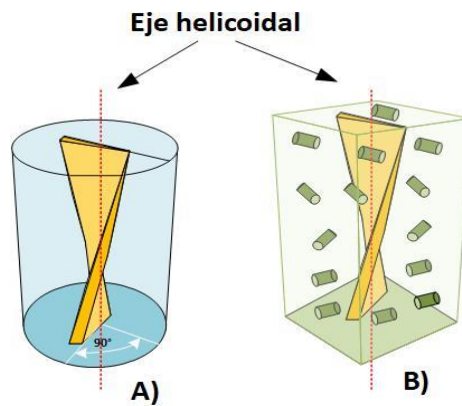


Figura 3.8 Cristal líquido nemático girado.

El principio de funcionamiento es que al aplicar un campo eléctrico las moléculas se alinean de tal manera que no cambia la orientación del estado de polarización mientras que al eliminar este campo las partículas se orientan de tal forma que giran la luz polarizada 90°, figura 3.9. [18]

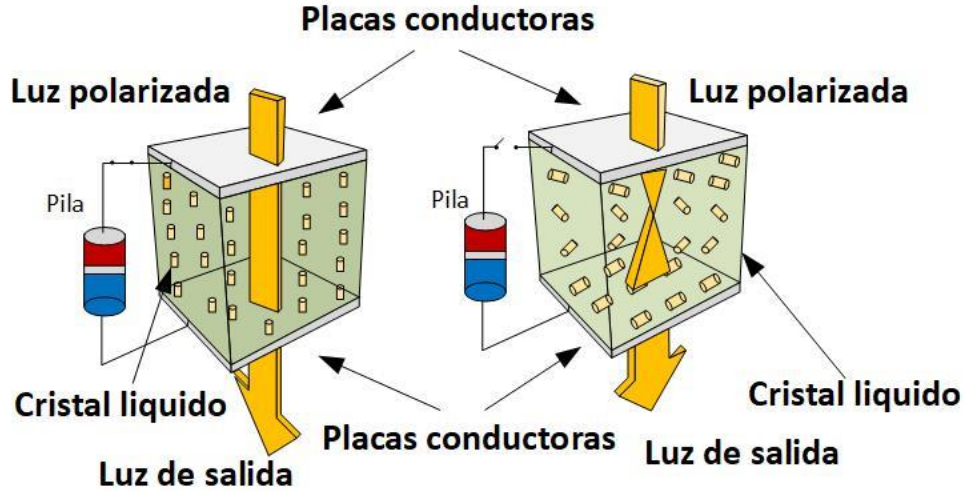


Figura 3.9 Cristal líquido nemático girado con campo eléctrico incidente.

3.3. Ecuación de polarización de la LCD.

Implementando las matrices de R. Clark Jones, la pantalla de cristal líquido es representada como un retardador que depende de un ángulo θ el cual varía dependiendo la orientación de las moléculas y un desfase ϕ obtenido al modificar el nivel de gris.

$$J_{LCD}(\theta, \phi) = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + i\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos(2\theta) & i\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin(2\theta) \\ i\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin(2\theta) & \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) - i\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos(2\theta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

3.4. Desarrollo experimental.

Para realizar la verificación experimental de la manipulación de los diferentes estados de polarización se implementó el experimento descrito en el capítulo 2, reemplazando el retardador de cuarto de onda por la pantalla de cristal líquido XGA2p01 de CRL-Opto la cual cuenta con una resolución de 1024x768 píxeles, las dimensiones de pixel activo son de 23x13um y es del tipo nemático girado, figura 3.10.

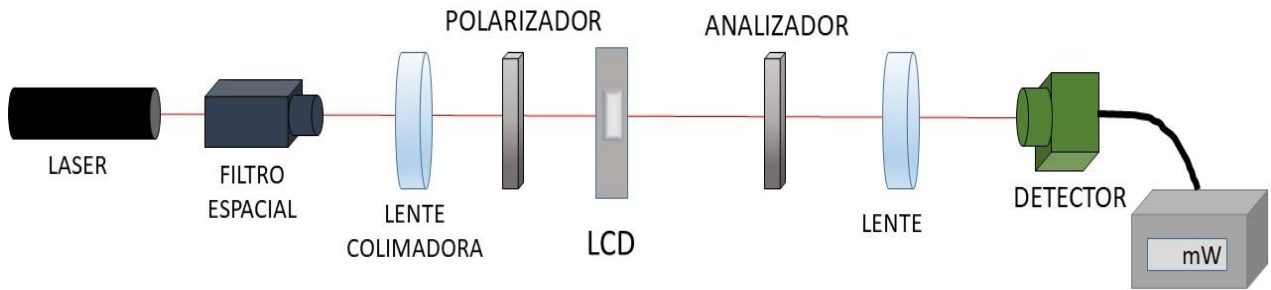


Figura 3.10 Arreglo esquemático del experimento #2.

Las imágenes de niveles de gris que se proyectaron en la pantalla de cristal líquido se realizaron en MatLab®, primero se generó una matriz del tamaño de la LCD y después a todos los píxeles se les asignó un valor uniforme de 0 a 255, figura 3.11.

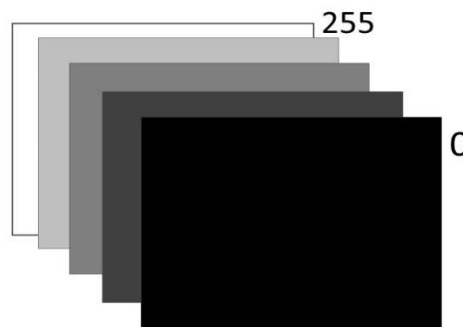


Figura 3.11 Imágenes proyectadas en la LCD.

Debido a que se desconocía la longitud de onda en la que la LCD tenía un mayor comportamiento lineal de trabajo, se decidió probar de manera experimental cuatro diferentes longitudes de onda: rojo 633 nm, naranja 612 nm, violeta 405 nm y verde 550 nm. En la figura 3.12 muestra el arreglo experimental implementado.

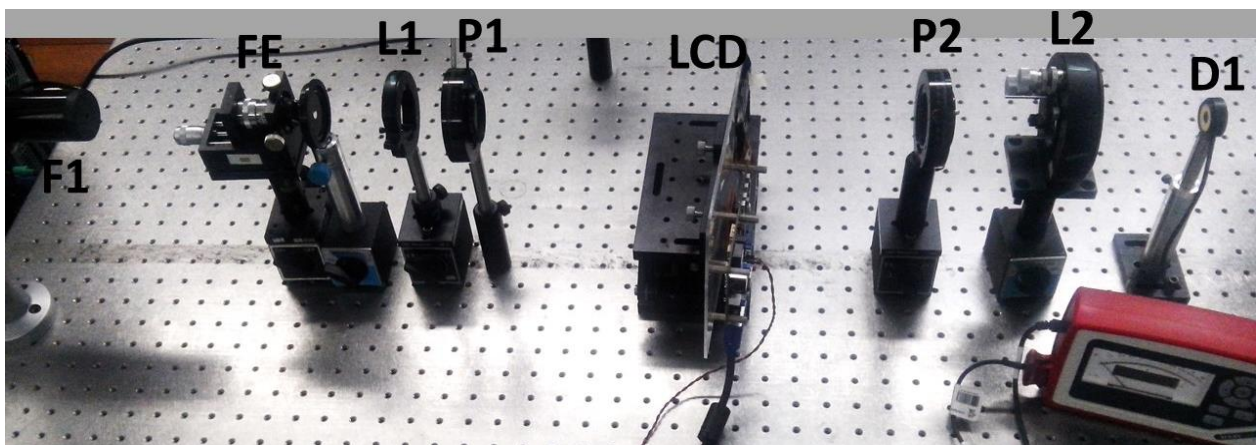


Figura 3.12 Arreglos experimentales #2: F1 (laser), FE (filtro espacial), L1 (lente colimadora, P1 (polarizador), LCD (pantalla de cristal líquido, P2 (polarizador analizador), L2 (lente colectora) y D1 (detector de ThorLabs PM100).

Siguiendo los pasos realizados en el experimento, descrito en el Capítulo 2, antes de introducir la LCD los polarizadores se colocan con sus ejes perpendiculares, encontrando en el detector un valor mínimo para después introducir la LCD e ir variando los niveles de gris de 0 a 250 en pasos de 10 en niveles de gris, figura 3.13.

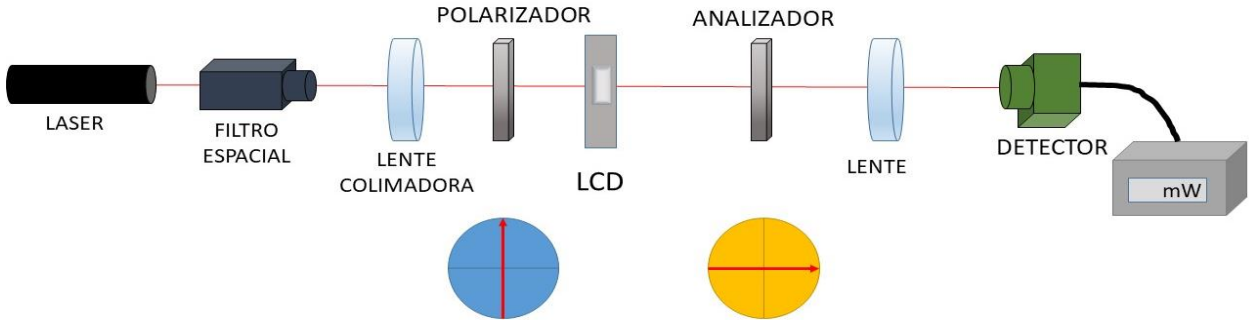


Figura 3.13 Eje de los polarizadores cruzados.

De los primeros resultados obtenidos al iluminar con el láser naranja se observó que los datos no tenían repetividad, figura 3.14 (a). Después de un determinado tiempo estos se volvían repetitivos como se muestra en la figura 3.14(b), por lo que se decidió realizar primero un experimento adicional, para caracterizar el tiempo de estabilización de los cuatro láseres.

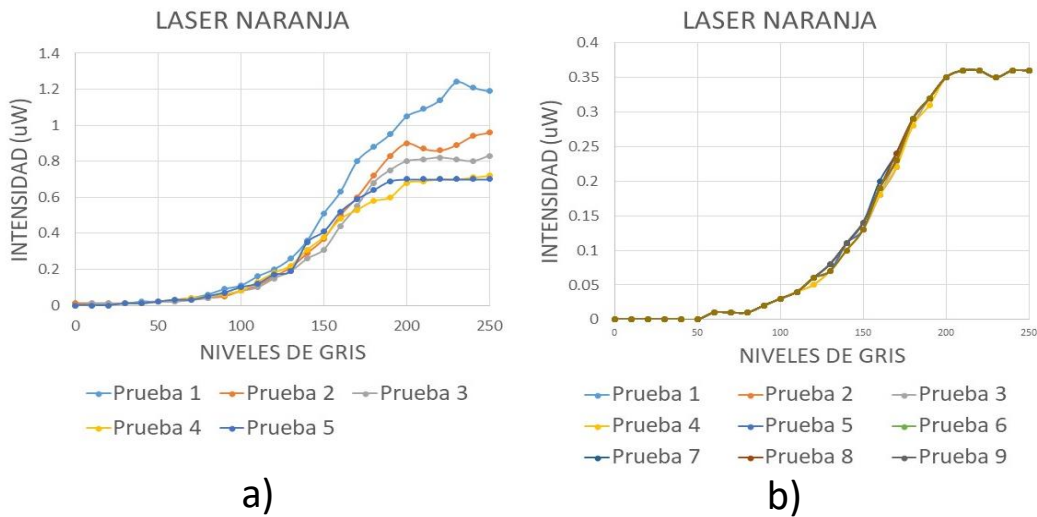


Figura 3.14 Primeros resultados experimentales, laser naranja.

En la caracterización de tiempo de estabilización del láser, la pantalla de cristal líquido se colocó en el nivel de gris 150, esto tomando en cuenta las gráficas previas en donde se observó que este valor se encontraba en la parte media del

comportamiento lineal, por lo que se procedió a tomar datos de la variación de intensidad con respecto del tiempo manteniendo la SLM fija en este valor de gris, figura 3.15.

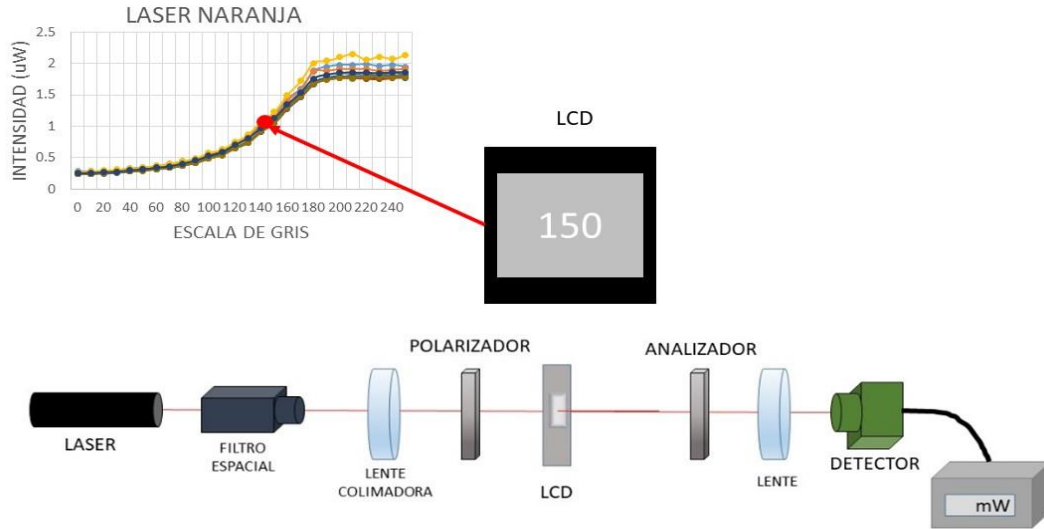


Figura 3.15 Arreglo experimental #3.

La figura 3.16 muestra el comportamiento para las cuatro diferentes longitudes de onda, en el caso del láser violeta (405 nm), al ser de estado sólido no tiene variaciones significativas de intensidad, para el caso del láser rojo (633 nm) y el naranja (612 nm) comienzan a estabilizarse después de 50 minutos y para el verde (550 nm) fue necesario un tiempo de espera de una hora y media.

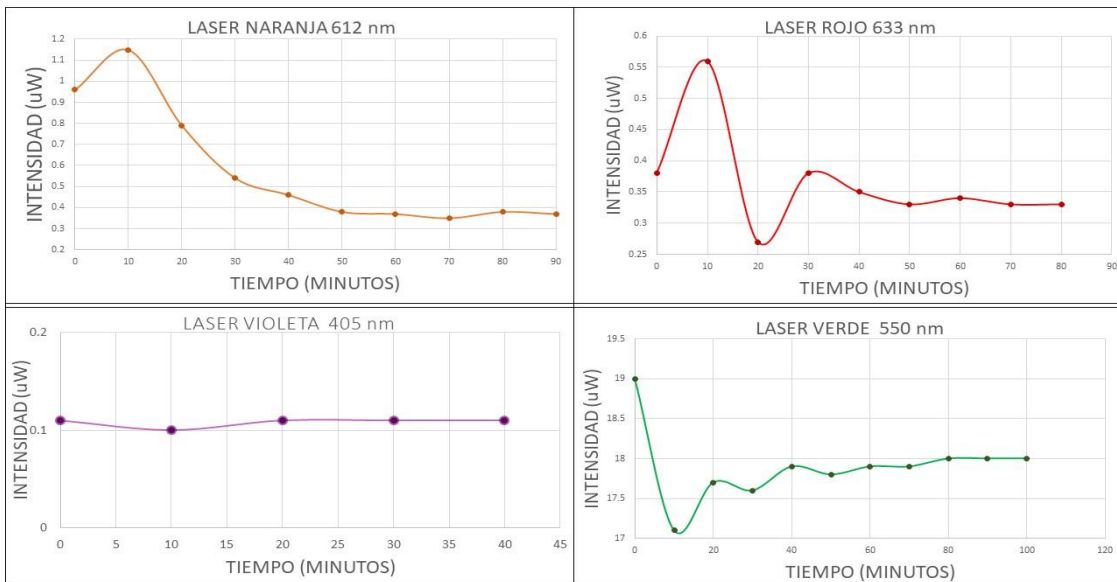


Figura 3.16 Resultados experimento #3.

Después de realizar la caracterización del tiempo de estabilización de los láseres se retomó nuevamente el experimento con los polarizadores perpendiculares y se comenzó a cambiar los niveles de gris de la pantalla de 0 a 250 con pasos de 10 en niveles de gris. Para cada longitud de onda se realizaron 10 mediciones con el objetivo de obtener la curva promedio que se muestra en la figura 3.17.

ANALIZADOR PERPENDICULAR

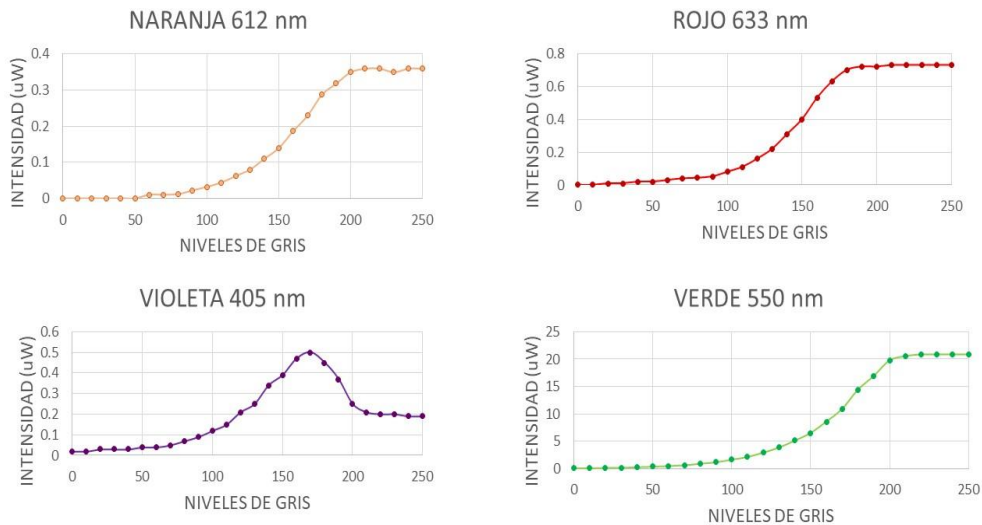


Figura 3.17 Arreglo esquemático polarizadores perpendiculares y grafica de resultados de niveles de gris vs intensidad.

Para medir la componente vertical, el analizador se colocó con su eje paralelo al eje de polarización de la luz incidente, obteniendo en el detector un valor máximo y se introdujo el SLM, el arreglo esquemático se muestra en la figura 3.18.

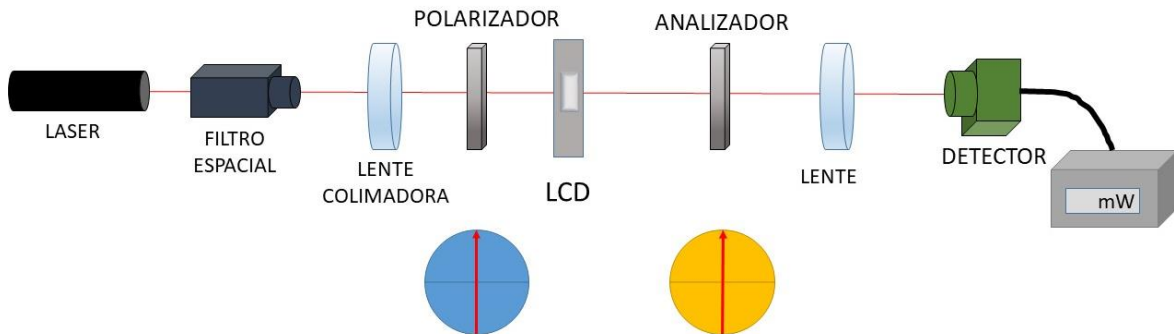


Figura 3.18 Arreglo esquemático, analizador paralelo al eje del polarizador.

También se tomaron 10 mediciones para cada una de las cuatro longitudes de onda, la figura 3.19 muestra las curvas promedio obtenidas.

ANALIZADOR PARALELO

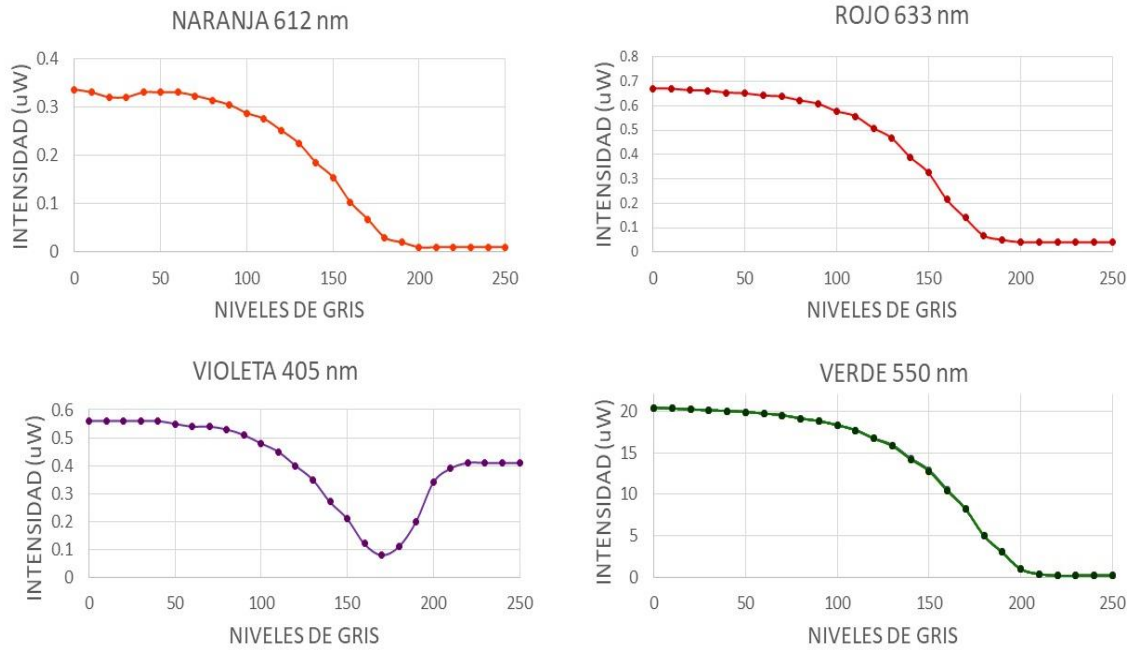
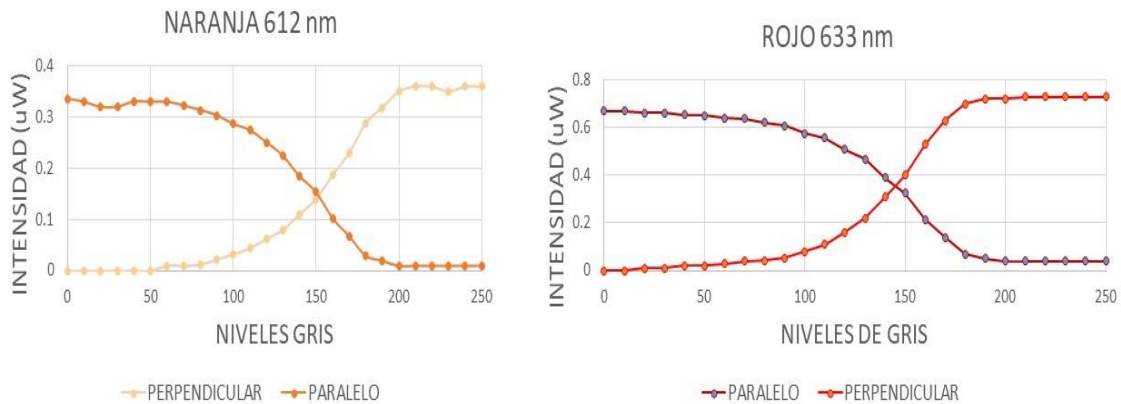


Figura 3.19 Arreglo esquemático polarizadores paralelos y gráfica de resultados de niveles de gris vs intensidad.

Al realizar la comparación entre los cambios de intensidad de las componentes del campo, al variar los niveles de gris, se observa que al igual que en el caso del retardador de cuarto de onda descrito en el Capítulo 2, mientras una componente aumenta la otra disminuye existiendo una simetría en las gráficas obtenidas. Como se muestra en la figura 3.20, el comportamiento de la LCD al ser iluminada por el láser violeta (405 nm) es diferente a comparación con las otras tres curvas, esto se debe que al ser el cristal líquido una molécula orgánica este tiene mayor absorción en el ultravioleta, como se mencionó anteriormente.



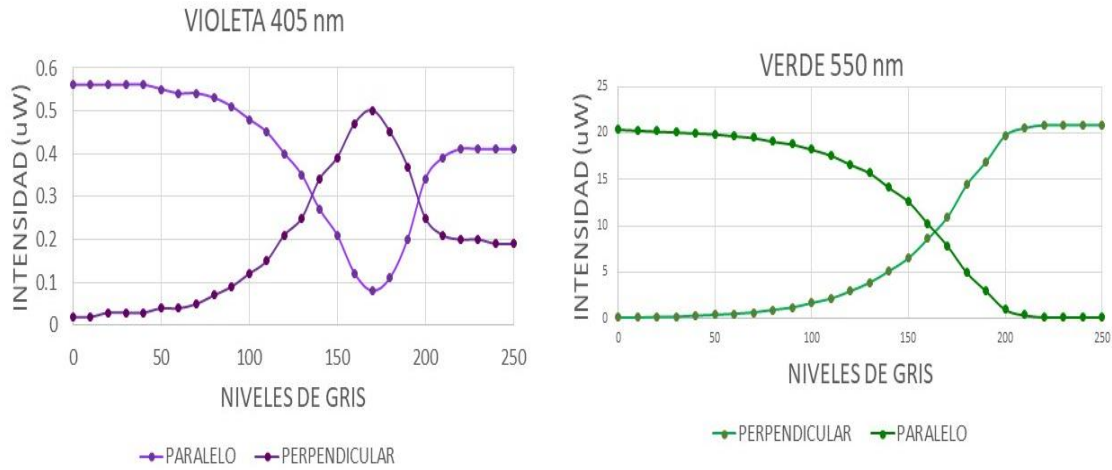


Figura 3.20 Comparación de gráficas del nivel de gris vs intensidad, polarizadores paralelos y polarizadores perpendiculares.

Para la selección de la longitud de onda con mayor rango lineal se realizaron dos ajustes de los datos obtenidos utilizando los programas comerciales MatLab® y OriginPro8®. La figura 3.21 muestra los resultados obtenidos al realizar el ajuste de una línea recta, se comprobó que ambos programas obtuvieron los mismos datos, por lo que se decidió utilizar el programa de Origin®, en el cual se tiene la posibilidad de que dentro de la gráfica puedes seleccionar los datos del rango, mientras que para Matlab® es necesario introducir solo los valores determinados del rango en el que deseas que se aproxime la recta.

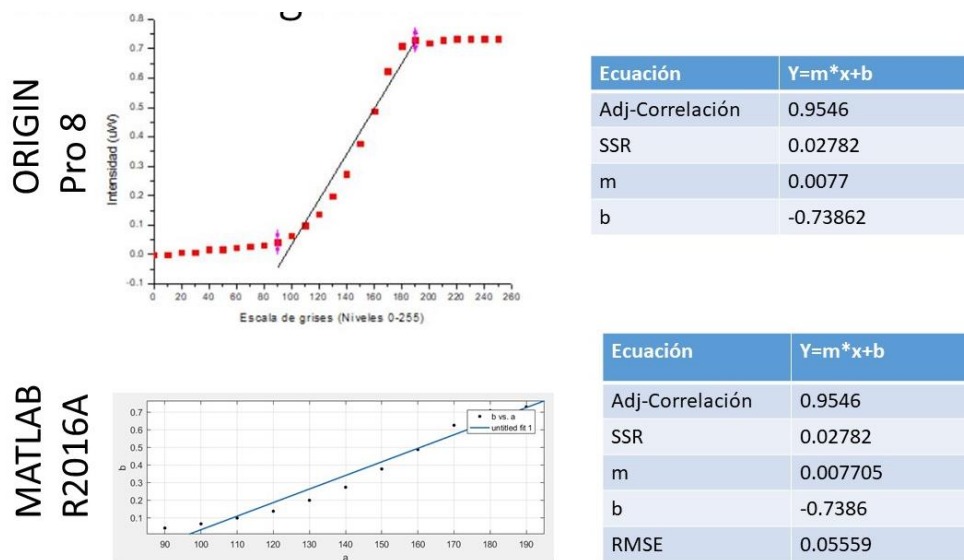


Figura 3.21 Comparación del ajuste lineal de datos OriginPro8 y MATLAB.

Para las cuatro longitudes de onda se buscó que el ajuste lineal tuviera un rango mayor al 95%. Los resultados de los rangos de gris fueron: para el láser naranja de 90-210, para el láser rojo 90-200, para el láser violeta 70-160 y para el láser verde de 120-200, figura 3.22.

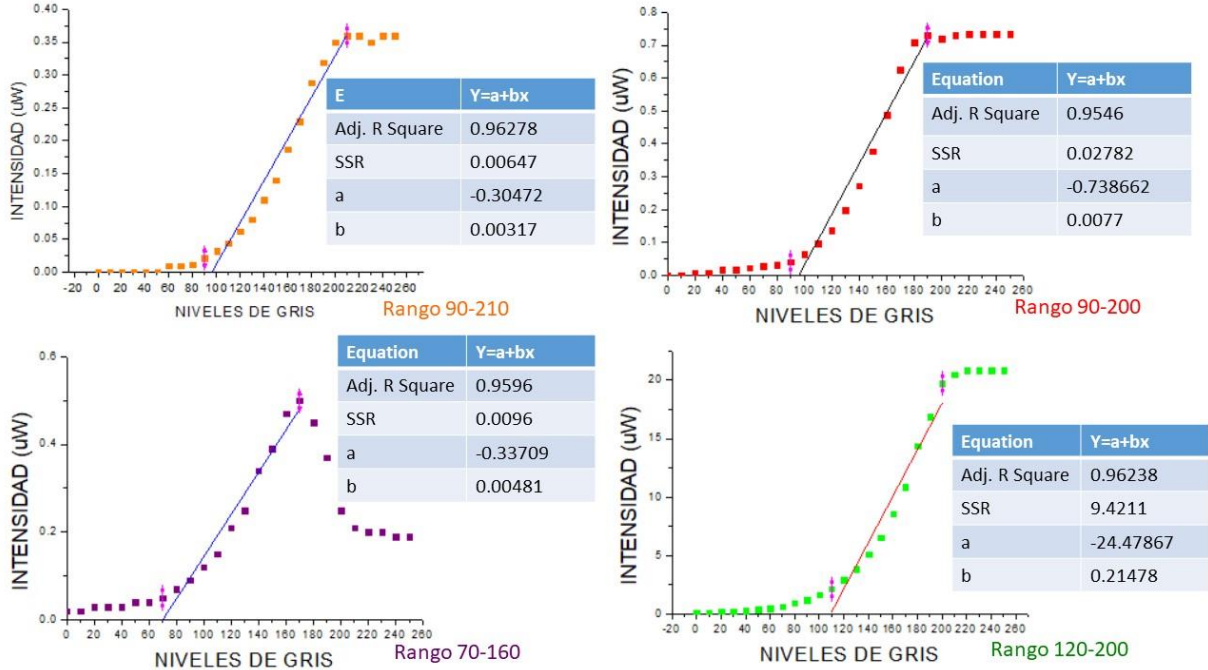
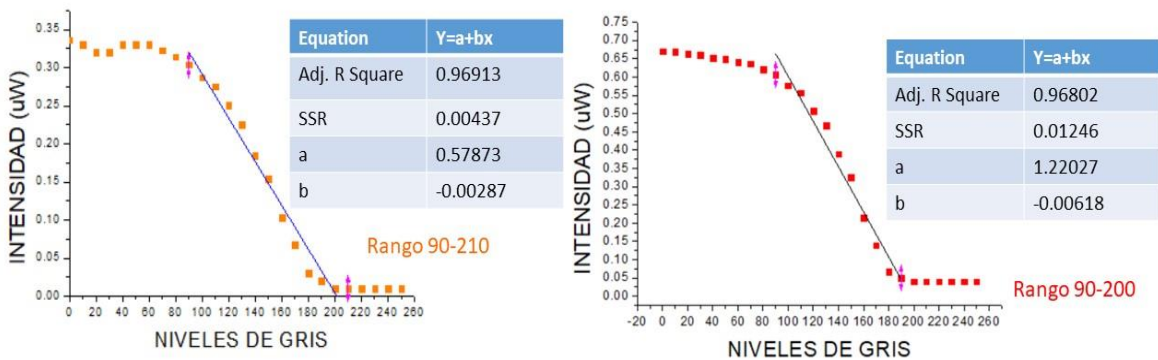


Figura 3.22 Rangos lineales de las cuatro longitudes de onda con el analizador perpendicular.

Para comprobar la existencia de simetría de las gráficas obtenidas se realizó el ajuste lineal de las gráficas de la figura 3.19, cuando el analizador es colocado paralelo al eje del polarizador. Se obtuvo que la pendiente fue la misma solo que con signo opuesto por lo que se puede asegurar entonces que al aumentar una componente la otra disminuye, figura 3.23.



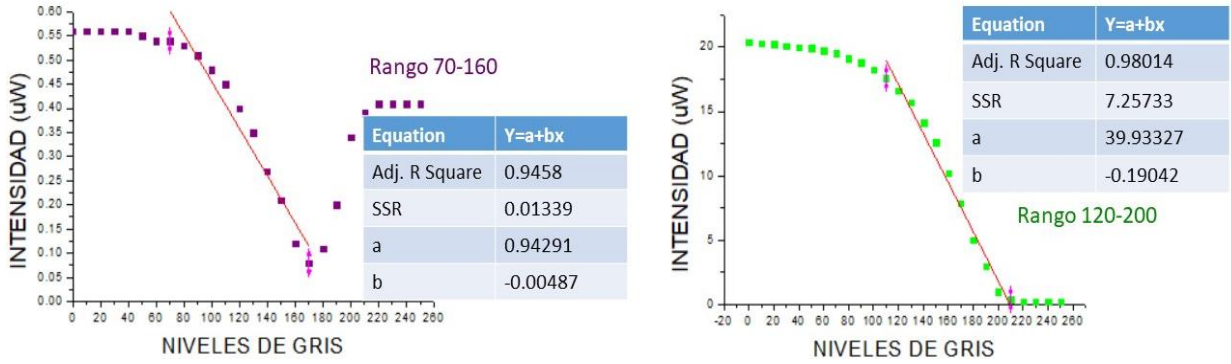


Figura 3.23 Rangos lineales, ejes de los polarizadores paralelos.

Los rangos lineales entonces para las longitudes de onda fueron:

Tabla 3-1 Resultados de las cuatro longitudes de onda

Laser	Rango en niveles de gris	Total de niveles de gris
Naranja	90-210	120
Rojo	90-200	110
Violeta	70-160	90
Verde	120-200	80

La figura 3.24 muestra la comparación entre las gráficas de intensidad al variar el nivel de gris de las cuatro longitudes de onda. Con el objetivo de observar mejor la comparación de las cuatro curvas obtenidas, el eje de intensidad se cambió a escala logarítmica para una mejor apreciación.

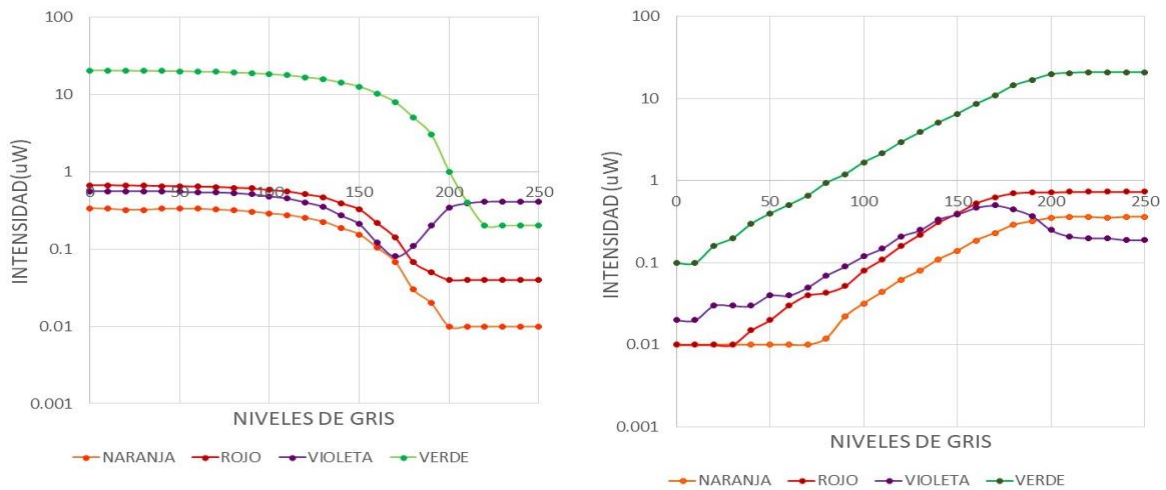


Figura 3.24 Comparación de las curvas obtenidas de los cuatro diferentes longitudes de onda.

Aun cuando el mayor rango lineal se obtuvo con el láser naranja fue el láser verde el que fue seleccionado como el que mejor funciona con este modelo de SLM debido a que presentó un mayor rango dinámico de variaciones de intensidades, por lo que el siguiente paso fue realizar un análisis de los diferentes estados de polarización observados en las curvas promedio, como se muestra en la figura 3.25.

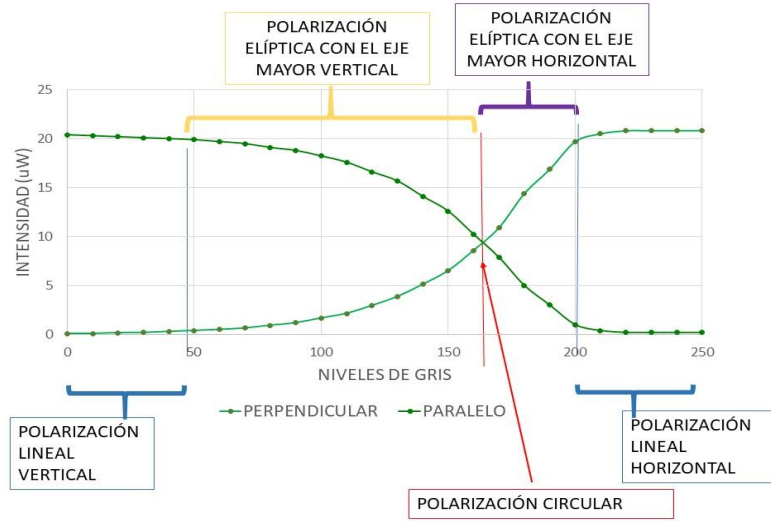


Figura 3.25 Diferentes estados de polarización.

De la figura 3.25 se observa que en el rango de 0 a 50 el modulador no introduce cambio de fase, por lo tanto la polarización lineal incidente se mantiene, pero de 50-160 comienza a aumentar la componente horizontal mientras que la componente vertical disminuye obteniendo en este rango polarización elíptica con el eje mayor vertical, en alguna parte del rango 160 a 170 la magnitud de las componentes es la misma por lo que se tiene polarización circular, para 170 a 200 ahora el eje horizontal sigue aumentando mientras que el eje vertical disminuye obteniendo entonces polarización elíptica con el eje mayor horizontal, después de 200 la componente vertical desaparece completamente obteniendo entonces polarización lineal horizontal como se muestra en la figura 3.26.

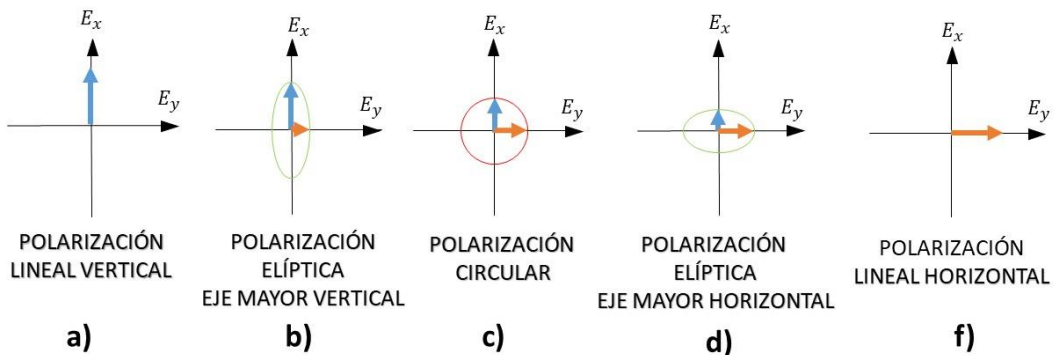


Figura 3.26 Variación de estados de polarización.

Para conocer en que parte del rango de 160-170 de niveles de gris se tiene polarización circular se realizó un barrido más fino con pasos de 1 nivel de gris entre mediciones como se muestra en la figura 3.27. Se observó que las variaciones de intensidad para el LCD no son lineales, sino que cambian cada cuatro niveles de gris.

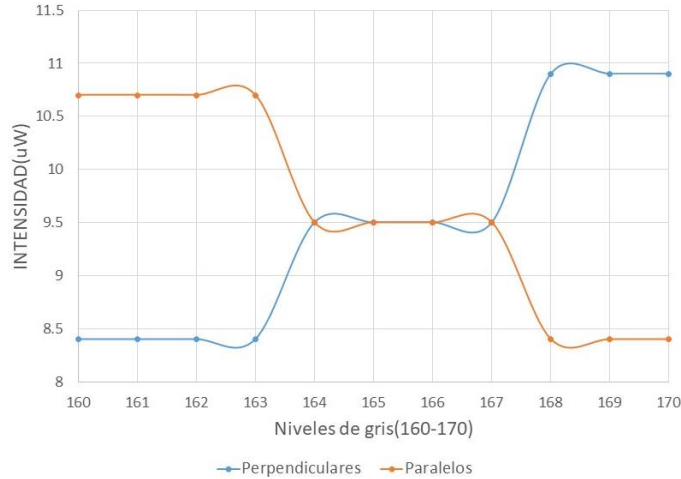


Figura 3.27 Barrido más fino, rango 160-170.

3.5. Conclusiones.

Partiendo de la idea de que una pantalla de cristal líquido puede ser vista como un retardador variable, se realizó el experimento para la verificación de la manipulación de los estados de polarización modificando solamente los niveles de gris sin necesidad de girar manualmente como era en el caso del retardador de cuarto de onda.

Se obtuvieron gráficas de comportamiento muy similar al iluminar con el láser rojo, naranja y verde, en el caso del violeta y de acuerdo a la literatura se encontró que el cristal líquido es bastante absorbente en esta región por lo tanto se corrobora que al ser iluminado con este laser la curva de comportamiento sea tan diferente a las otras tres.

Los tiempos de estabilización para cada uno de los cuatro láseres también fueron diferentes siendo el violeta el único en el que se podrían tomar medidas desde que este era prendido, para el caso del naranja y el rojo su tiempo de estabilización fue de 50 minutos y el verde de una hora y media.

Al realizar la comparación de las gráficas de intensidad obtenidas, también se

observó la diferencia de variación de intensidad que había entre las cuatro longitudes de onda y se optó por utilizar el láser verde el cual obtuvo un mayor rango dinámico en variación de intensidad, esto con la finalidad de ser implementado ahora para realizar la caracterización de cambio de fase vs nivel de gris, la cual será abordada en el Capítulo 5 y para la que previamente se montó un interferómetro Twyman Green que se describirá con mayor detalle en el Capítulo 4.

CAPÍTULO 4. MONTAJE Y CALIBRACIÓN DEL INTERFERÓMETRO DE MICHELSON.

4.1. Introducción.

En este capítulo se describe el montaje y calibración de un interferómetro de Michelson para después ser convertido a un interferómetro Twyman Green, además se realiza un breve análisis teórico de interferencia, tipos de interferómetros, tipos de franjas y se muestran los interferogramas obtenidos al iluminar con un láser de luz verde y después una fuente de luz blanca para la obtención de las franjas de distancia absoluta.

4.2. Análisis teórico.

La interferencia es la superposición de dos o más ondas que producen como resultado una perturbación, que es la suma de las contribuciones de estas. Existen algunas consideraciones para que se logre la interferencia.

- a) Coherencia espacial, está relacionada con los tamaños de las fuentes de iluminación y la separación que existe entre ellas, mientras mayor sea la separación menor será la coherencia espacial.
- b) Coherencia temporal, es la frecuencia en la que vibran los frentes de onda, mientras más monocromáticas sean las fuentes luminosas más grande será su tiempo de coherencia y también más grande su tren de ondas.
- c) Los estados de polarización deben ser compatibles.
- d) Intensidades relativamente parecidas $I_1 \approx I_2$

Cuando todas las condiciones se cumplen se forma un diagrama de interferencia compuesto por franjas oscuras y brillantes denominado interferograma.

Los sistemas interferométricos se dividen en dos grandes grupos:

Los interferómetros de división de *frente de onda* donde los dos haces que interfieren se pueden obtener a partir de un frente de onda primario, con cualquiera de los dos procedimientos siguientes: dividiendo el frente de onda en dos lateralmente sin cambiar su irradiancia o dividiendo su frente de onda en dos mientras su irradiancia también se divide en dos preservando su extensión lateral.

Este tipo de interferómetros se pueden lograr por medio de difracción, reflexión o refracción. El ejemplo más conocido es el interferómetro de Young o de doble rendija que se muestra en la figura 4.1, al llegar el frente de onda a las rendijas ocurre el fenómeno de difracción y ambas funcionan como fuentes puntuales secundarias. [13]

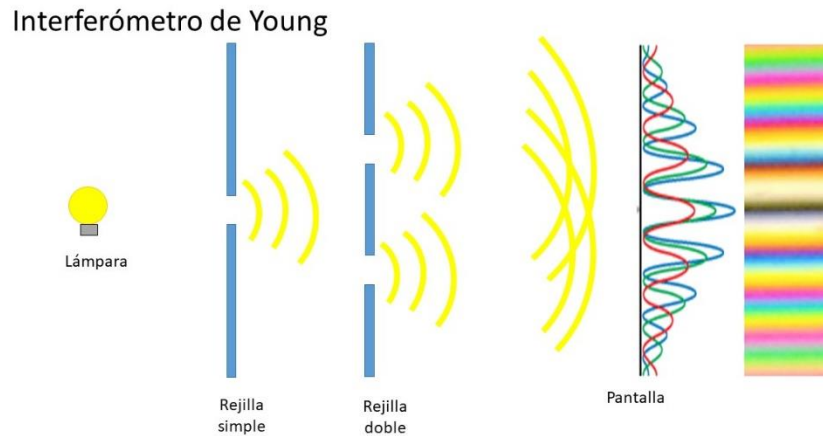


Figura 4.1 Interferómetro de Young.

Los interferómetros de división de amplitud en los cuales el frente de onda primario se divide en dos segmentos que viajan por caminos diferentes antes de recombinarse y después interferir. Un ejemplo de este tipo de interferómetros es el de Michelson el cual implementa una fuente extendida, un divisor de haz, un compensador como se muestra en la figura 4.2. [14]

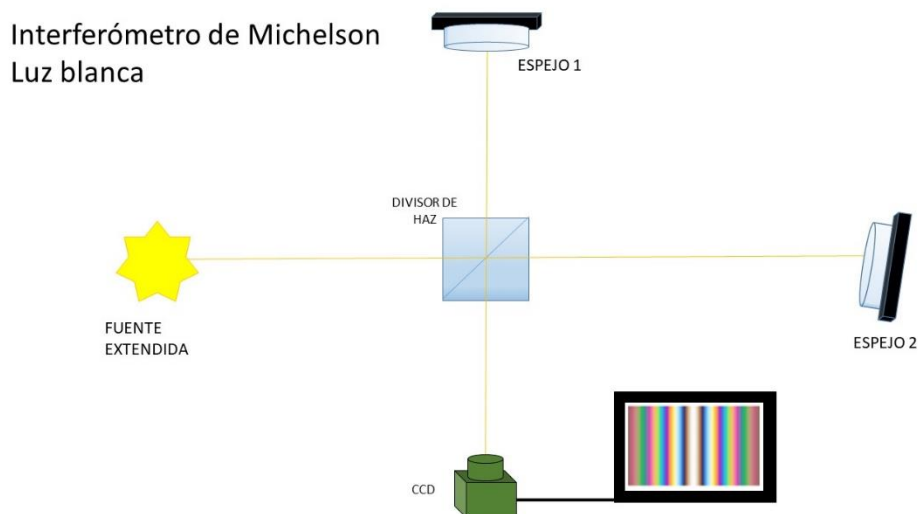


Figura 4.2 Interferómetro de Michelson.

En este interferómetro se reconocen tres tipos principales de franjas. Las franjas de igual inclinación o con frecuencia denominadas de Haidinger figura 4.3 (a), ocurren cuando las imágenes de la fuente extendida están paralelas una de la otra encontradas como franjas circulares en un interferómetro compensado mientras que en uno que no esté compensado la inclinación de la placa divisora del haz les da forma de elipse. Si las imágenes de la fuente forman un ángulo entre si diferente de

cero las franjas observadas estrictamente con el ojo colocado al infinito son de igual grueso también llamadas franjas de Newton, ver figura 4.3 (b) y existe un tercer tipo intermedio donde las franjas son arcos con su convexidad hacia la parte más angosta de la cuña esto ocurre cuando las imágenes de la fuente no son paralelas y el ojo no se encuentra al infinito figura 4.3 (c).

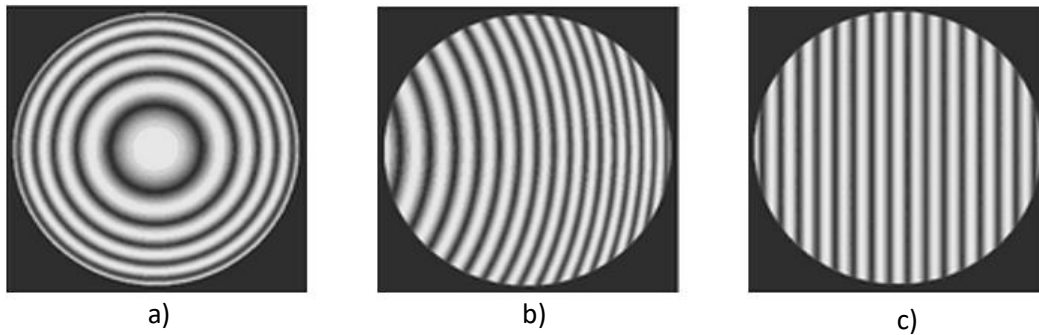


Figura 4.3 Franjas de interferencia interferómetro de Michelson a) Franjas de igual inclinación, b) Franjas intermedias y c) Franjas de igual espesor.

El interferómetro de Twyman Green es una modificación del interferómetro de Michelson en 1916, con la finalidad de medir la calidad de varias superficies ópticas, fue inventado y patentado por F. Twyman y A. Green para realizar pruebas a prismas y objetivos de microscopio, más tarde en 1919 se adaptó para realizar pruebas lentes de cámara. En las variaciones realizadas se colocó una lente colimadora para obtener la superposición de dos frentes de onda planos y otra lente adicional antes del CCD como se muestra en la figura 4.4.

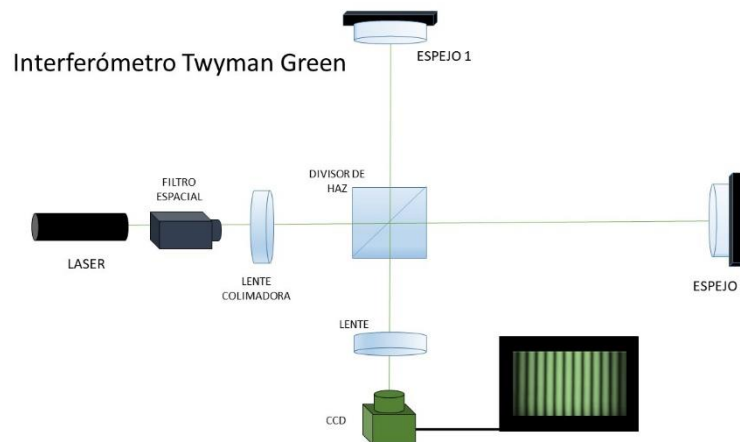


Figura 4.4 Diagrama esquemático del interferómetro de Twyman Green.

Al no tener una limitación respecto al tamaño de los espejos y lentes que pueden probarse, este interferómetro es uno de los más implementados para la realización de pruebas ópticas. [14]

4.3. Análisis matemático.

La interferencia de dos frentes de onda planos se describe en la ecuación 5. Para simplificar el análisis matemático entonces el campo eléctrico resultante de la suma de dos campos. [13]

$$E = E_1 + E_2 = E_{01}\hat{a}_1 e^{i\omega t + \alpha_1} + E_{02}\hat{a}_2 e^{i\omega t + \alpha_2} \quad (5)$$

Sin embargo, los detectores ópticos no son sensibles al campo eléctrico sino a la intensidad. Ecuación 6.

$$I \propto |E_1 + E_2| \quad (6)$$

Realizando la suma del campo. Ecuación 7

$$I \propto I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \hat{a}_1 \cdot \hat{a}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (7)$$

Dependiendo de $\alpha_1 - \alpha_2$ la irradiancia puede ser mayor, menor o igual a la suma de las dos irradiancias de los campos.

Se tiene un máximo de irradiancia cuando $\alpha_1 - \alpha_2 = 2m\pi$ donde $m = \pm 1, \pm 2 \dots$ dando como resultado que $\cos(\alpha_1 - \alpha_2) = 1$ y es denominado interferencia constructiva.

$$I \propto I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (8)$$

Mientras que si $\alpha_1 - \alpha_2 = \frac{m\pi}{2}$, dónde $m = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots$, el $\cos(\alpha_1 - \alpha_2) = 0$ y se tiene una irradiancia igual a la suma de la irradiancia de cada campo por separado

$$I \propto I_1 + I_2 \quad (9)$$

Para la irradiancia mínima $\alpha_1 - \alpha_2 = m\pi$, dónde $m = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots$, por lo tanto $\cos(\alpha_1 - \alpha_2) = -1$ denominada como interferencia destructiva

$$I \propto I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \hat{a}_1 \cdot \hat{a}_2 \quad (10)$$

Resumiendo, entonces

$$\cos(\alpha_1 - \alpha_2) = 1 \rightarrow \text{Interferencia constructiva total}$$

$0 < \cos(\alpha_1 - \alpha_2) < 1 \rightarrow$ *Interferencia constructiva*

$-1 < \cos(\alpha_1 - \alpha_2) < 0 \rightarrow$ *Interferencia destructiva*

$\cos(\alpha_1 - \alpha_2) = -1 \rightarrow$ *Interferencia destructiva total*

Para obtener franjas brillantes $\alpha_1 - \alpha_2 = 2m\pi$, donde $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$, mientras que las franjas oscuras se obtienen cuando $\alpha_1 - \alpha_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\pi$, donde $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$

El contraste de un patrón de interferencia se puede especificar por una función de visibilidad definida en la ecuación 11, como: [13]

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (11)$$

4.4. Desarrollo experimental.

La figura 4.5 muestra el arreglo experimental del interferómetro de Michelson constituido por un filtro espacial con objetivo-micro agujero de 40x -10 μm ; un cubo divisor de haz 50/50; dos espejos planos y como detector una cámara CMOS PixeLink PL-B776 con una resolución de 3.1 MP (Mega Pixeles), 2048x1536 píxeles, un área activa de 6.55x4.99 mm y una velocidad de captura de 12 fps.

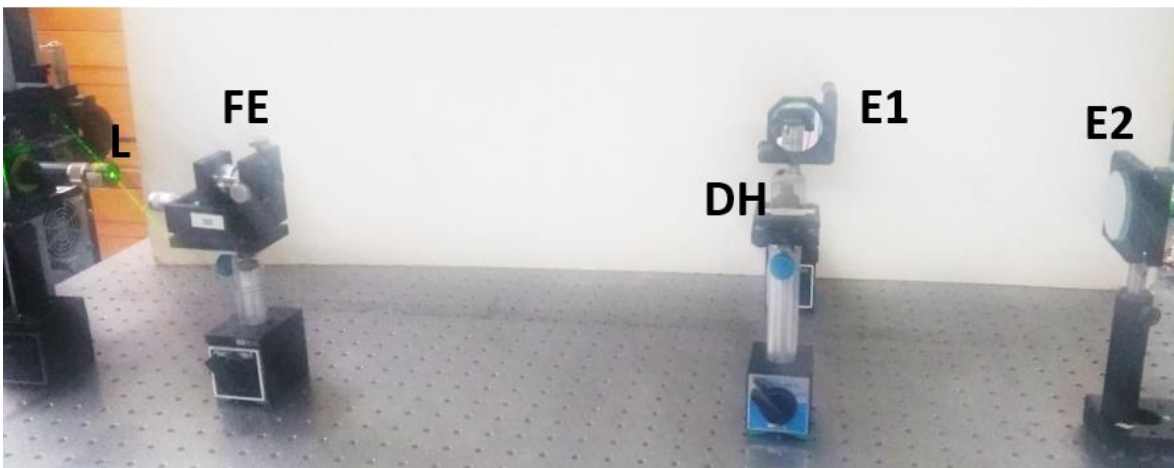


Figura 4.5 Arreglo experimental, interferómetro de Michelson; L (laser), FE (filtro espacial), DH (cubo divisor de haz), E1 (espejo fijo), E2 (espejo móvil).

El paso previo para la utilización del interferómetro de Michelson como instrumento de medición fue calibrarlo, para esto se utilizó una fuente de luz blanca para asegurar que las distancias obtenidas correspondan únicamente a los desplazamientos efectuados sobre el espejo móvil y no al camino óptico que depende de la longitud de onda.

Para realizar la igualación de caminos ópticos se utilizó como fuente un láser verde de 550 nm, ambos espejos se colocaron sobre monturas con inclinación y uno de ellos en una platina desplazable mientras que el otro a una distancia fija, con ayuda de un vernier se midieron las distancias de los espejos al divisor de haz para que fueran iguales.

Las franjas obtenidas son las de igual inclinación, como se muestra en la figura 4.6, y se buscó que en el detector se observara el menor número de anillos posible.

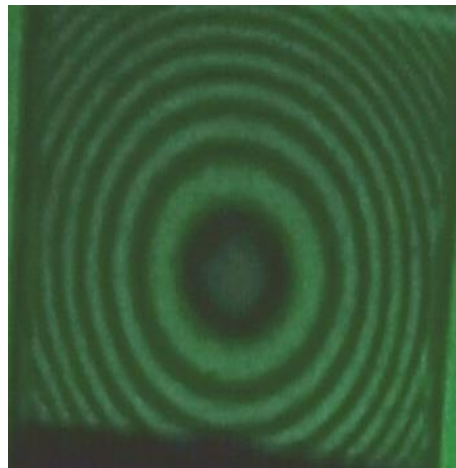


Figura 4.6 Franjas de igual inclinación del interferómetro de Michelson.

Posteriormente para lograr mayor precisión en la posición en donde los espejos tienen el mismo camino óptico, uno es inclinado hasta observar franjas lo más rectas posibles. Una vez que se encuentren las franjas de las figuras 4.7(a) y 4.7 (b) se obtiene el punto medio entre ellas y el espejo es colocado en esta posición hasta encontrar las franjas más rectas posibles, se repitió este paso varias veces para sacar el punto medio de la distancia y garantizar que la diferencia de camino óptico es casi cero. [11]

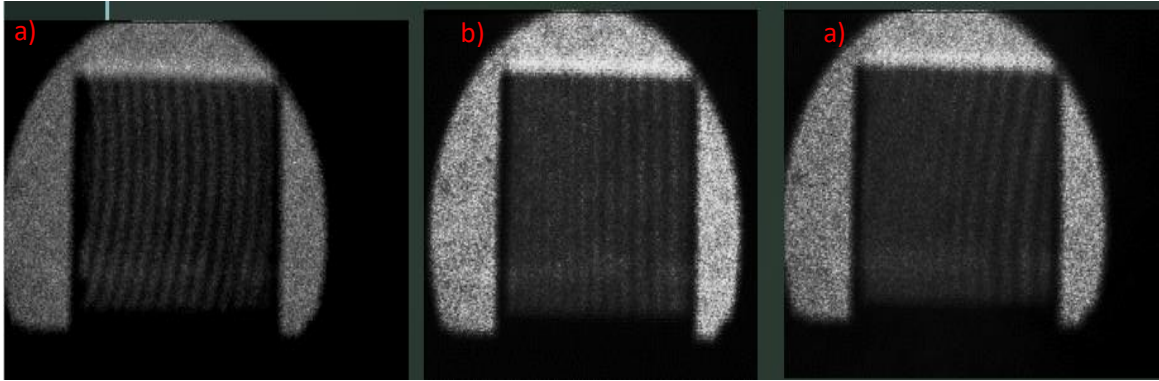


Figura 4.7 Franjas con un espejo inclinado.

Después se colocó una lente colimadora convirtiendo al interferómetro en un Twyman Green, esto para obtener mayor visibilidad de las franjas de interferencia y después se cambió el láser por una fuente de luz blanca y una pantalla difusora. Si la separación entre espejos es lo suficientemente pequeña $\approx .5\lambda$, estas franjas son franjas de igual espesor, por lo que son equidistantes, rectas y paralelas al vértice de la cuña, por lo tanto, los movimientos para encontrar las franjas se realizan con el micrómetro, fue necesario observar a ojo y una vez que se lograron observar, se coloca la cámara, figura 4.8.

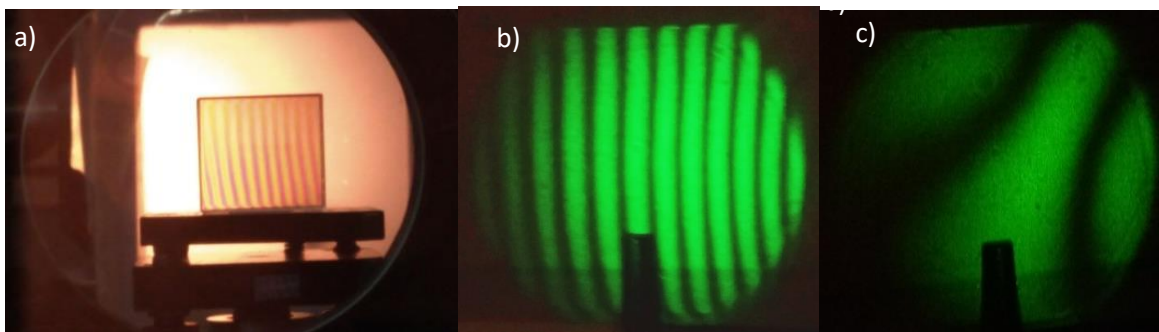


Figura 4.8 Patrón de interferencia; a) franjas con luz blanca y b) franjas con láser verde espejo inclinado, c) franjas sin el espejo inclinado.

Las franjas de interferencia de luz blanca sirven para medir la distancia absoluta de desplazamiento que existe al introducir una placa en uno de los brazos del interferómetro y poder relacionar su espesor con la diferencia de camino óptico (DCO) que es introducida.

Antes de introducir el modulador espacial de luz a uno de los brazos del interferómetro se realizaron dos pruebas previas, primero se introdujo un cubreobjetos de espesor aproximado de $131.66 \mu\text{m}$ y un portaobjetos de $14.5 \mu\text{m}$,

ambos medidos previamente con un vernier. La figura 4.9 muestra el arreglo esquemático y experimental.

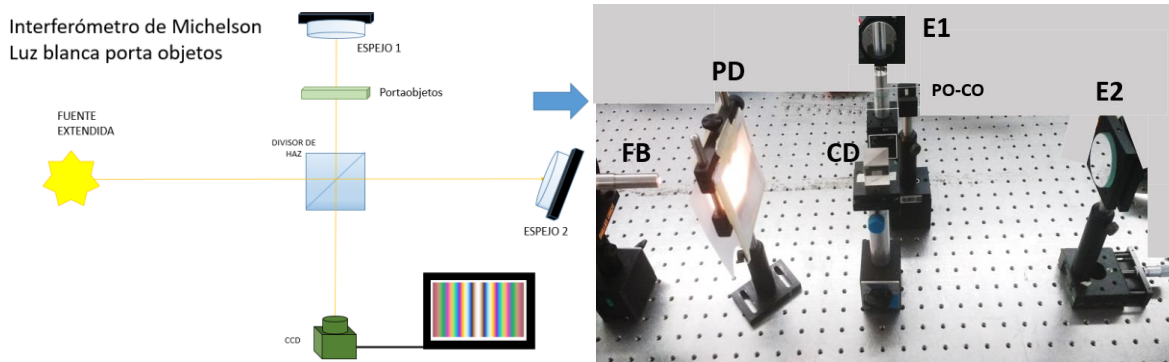


Figura 4.9 Arreglo esquemático y arreglo experimental FB (fuente de luz blanca), PD (pantalla), CD (cubo divisor de haz), E1 (espejo fijo), E2 (espejo móvil) y PO-CO (portaobjetos-cubreobjetos).

En la siguiente se muestran los cálculos realizados: Donde d es el espesor medido y n el índice de refracción del vidrio.

Tabla 4-1 Cálculo de DCO al introducir un portaobjetos y un cubreobjetos.

Cubreobjetos	Portaobjetos
$2nd = DCO$ $2(1.5)(14.5 \mu m) = 43.5 \mu m$ $2(1.514)(14.5 \mu m) = 43.5 \mu m *$	$2nd = DCO$ $2(1.5)(131.66 \mu m) = 396 \mu m$
Entonces el lugar donde deberían estar las franjas.	Entonces el lugar donde deberían estar las franjas.
$850 \mu m + 43.5 \mu m = 893.5 \mu m$	$850 \mu m + 396 \mu m = 1246 \mu m$

Los datos obtenidos experimentalmente para la distancia en la que se movieron las franjas al introducir el portaobjetos y cubreobjetos fueron de $40 \mu m$ y $520 \mu m$, figura 4.10, dando un margen de error en el caso del cubreobjetos de $3.5 \mu m$ y $124 \mu m$, respectivamente.

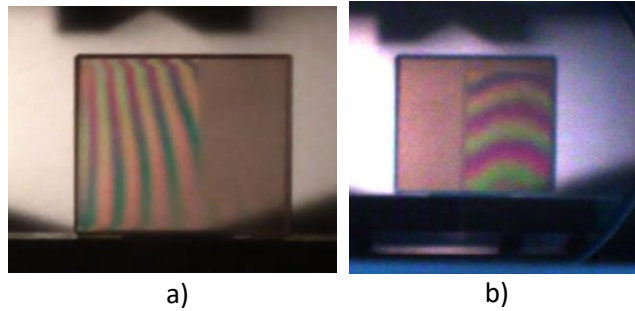


Figura 4.10 Franjas de interferencia con luz blanca al introducir a) portaobjetos y b) cubreobjetos.

La implementación del cubreobjetos y portaobjetos fue con la finalidad de familiarizarse con el interferómetro para después introducir la pantalla de cristal líquido, figura 4.11.



Figura 4.11 Arreglo esquemático y experimental del interferómetro de Michelson con luz blanca y con una pantalla de cristal líquido en uno de sus brazos.

La figura 4.12 muestra las franjas obtenidas al colocar la pantalla de cristal líquido con una imagen de 0 en nivel de gris y mover el tornillo una distancia de 1690 nm del punto donde se encontraron las franjas de interferencia antes de introducir la pantalla.

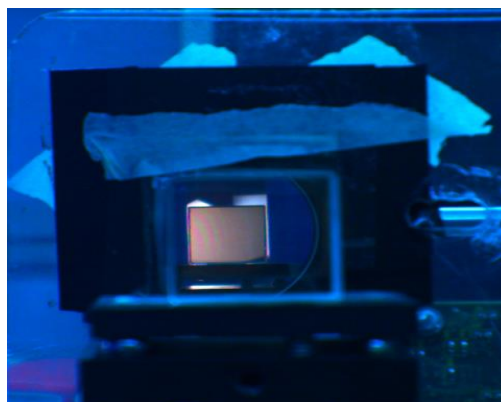


Figura 4.12 Franjas de interferencia de luz blanca al introducir la pantalla de cristal líquido.

Además, se caracterizaron dos espejos uno de $\lambda/4$ y otro de $\lambda/2$ donde $\lambda=633$ nm en los que se depositó un sustrato en la mitad de ellos para obtener escalones de diferente espesor, como se muestra en la figura 4.13.

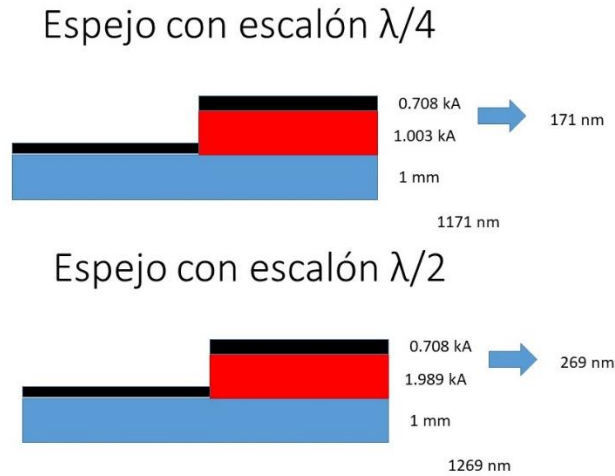


Figura 4.13 Escalones de $\lambda/4$ y $\lambda/2$.

En la figura 4.14 se muestra el arreglo esquemático y el arreglo experimental para medir el escalón con luz blanca, al conocer los datos del grosor del espejo y la cantidad de material depositado fue posible encontrar de forma más rápida las franjas de interferencia con luz blanca.

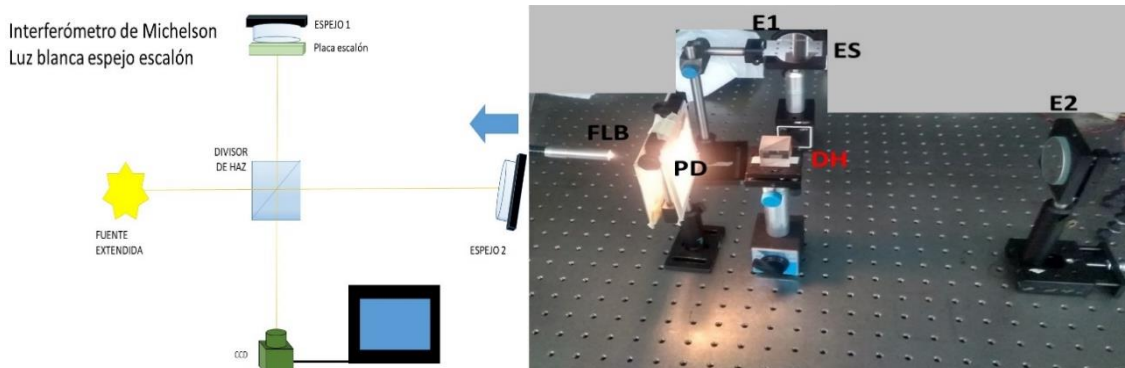
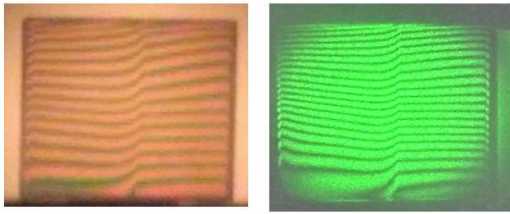


Figura 4.14 Arreglo esquemático y experimental del interferómetro de luz blanca con espejo escalón.

Finalmente, la figura 4.15 muestra la comparación de las franjas de interferencia obtenidas con luz blanca y con el láser verde al iluminar los dos espejos escalón. Ambos patrones de interferencia serán utilizados en el Capítulo 5 junto con la SLM para intentar corregir el escalón.

Espejo con escalón $\lambda/2$



Espejo con escalón $\lambda/4$

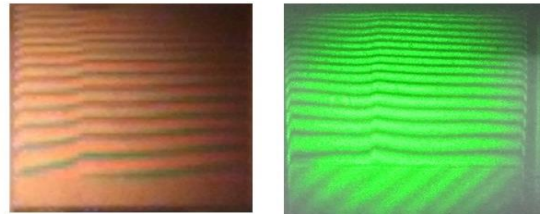


Figura 4.15.- Patrones de interferencia de los espejos con escalón.

4.5. Conclusiones.

En este capítulo se realizó una descripción detallada de las características y funcionamiento del interferómetro de Michelson, esto con el objetivo de realizar su calibración y poder utilizar dicho interferómetro como referencia en la caracterización del modulador espacial de luz que se utiliza como elemento para realizar desplazamientos de fase en zonas localizadas de un interferograma. De la calibración realizada se encontró que el espesor del *SLM CRL Opto XGA2P01* fue de 1.69 mm.

Debido al poco contraste de las franjas al capturar la imagen con el detector cuando se modificaban los niveles de gris del modulador fue imposible realizar la prueba absoluta por lo que se optó por realizar otro método que se describe en el capítulo siguiente. Además, como pasos previos se realizó la caracterización de dos espejos escalón de $\lambda/4$ y $\lambda/2$, un portaobjetos y un cubreobjetos.

**CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN
DEL SLM PARA
COMPENSAR LAS
DEFORMACIONES DE
SUPERFICIES ÓPTICAS**

5.1. Introducción.

Como se vio en el Capítulo 2, las pantallas de cristal líquido son ampliamente implementadas como moduladores espaciales de luz al tener la propiedad de que pueden modificar la amplitud, fase o estado de polarización.

En nuestro caso, es de interés realizar la caracterización del modulador espacial de luz CRL Opto XGA2P01, debido a que el objetivo principal de este trabajo es con ayuda del modulador compensar los desplazamientos de fase introducidos por un espejo con defectos y dependiendo del nivel de gris relacionarlo con el tamaño de dicho defecto.

Existen muchas técnicas para medir la fase que introducen estos moduladores, entre ellas destacan los métodos de extracción de fase, donde utilizan la matriz de correlación de intensidades para determinar la fase introducida por el modulador, aplicando el efecto Talbot o como es en nuestro caso implementando métodos interferométricos.

En este capítulo se describe el procedimiento para obtener la curva de “desplazamiento de fase vs nivel de gris”, realizando un procesamiento de los interferogramas obtenidos al variar los niveles de gris para medir el desplazamiento de fase. Las imágenes que se desplegaron en el modulador se dividieron en dos partes iguales, en la parte superior se varían los niveles de gris de 120-200 con pasos de 2 niveles de gris recordando la curva obtenida en el Capítulo 3, para la parte lineal, y los pasos se eligieron así ya que, al realizar el barrido fino en nivel de gris, el cambio de intensidad se daba después de variar cuatro niveles de gris. La parte inferior de la imagen se mantuvo con un nivel de gris fijo de 0 como referencia.

El desplazamiento de fase que producen los distintos niveles de gris se midió utilizando el interferómetro Twyman Green y colocando el modulador en uno de sus brazos. En las secciones siguientes se muestran los interferogramas experimentales capturados, así como el arreglo experimental propuesto. Por último, se muestran los desplazamientos de fase obtenidos y la curva característica del modulador.

5.2. Desarrollo experimental.

Una vez realizada la igualación de caminos ópticos en el interferómetro de Michelson, descrita en el Capítulo 3, lo que se hizo fue introducir en el arreglo experimental el modulador CRL Opto modelo XGA2P01, figura 5.1, y se compensó el camino óptico introducido, desplazando el espejo montado en la platina.

El SLM implementado es un dispositivo de transmisión, tiene una resolución de 1024x768 píxeles; tamaño de píxel de 26x26 μm ; área activa de píxel de 23x16 μm ; separación de píxel de 3x10 μm y un área total activa de 26.6x20mm. El detector utilizado fue una cámara CCD Hamamatsu C2400 de 483x483 píxeles; tamaño de píxel de 8.4x9.8 μm ; área activa de píxel de 6.3x4.7 μm y una velocidad de obturación de 30 fps.

Con el arreglo experimental de la figura 5.1, el siguiente paso fue comprobar que distintos niveles de gris producen desplazamientos de fase en el frente de onda bajo prueba, el cual se verá reflejado en un corrimiento de las franjas del patrón de interferencia; para esto, se realizó una primera prueba al SLM en donde se desplegaron en el modulador diferentes imágenes con distintos niveles de gris.

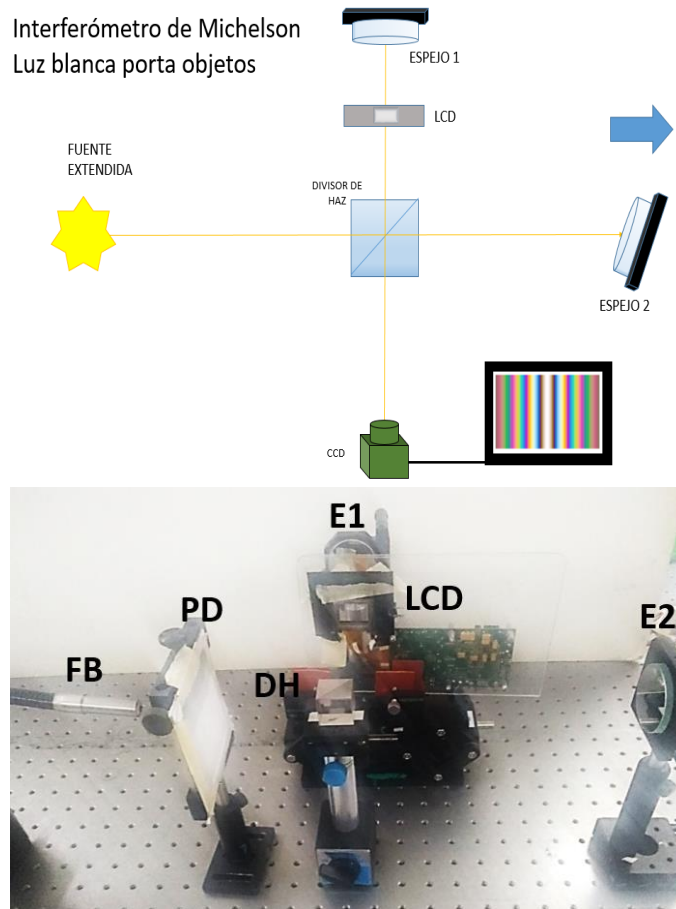


Figura 5.1 Arreglo esquemático y experimental.

Para generar los niveles de gris se desarrolló un algoritmo que genera una imagen del tamaño de la resolución del SLM, es decir, de 1024 columnas por 768 renglones; esta matriz se dividió en dos partes de igual espesor, a una de ellas se le asignó diferentes niveles de gris en un rango de 120 a 200 mientras que a la otra mitad un

valor fijo con el objetivo de utilizarlo de referencia para poder medir los desplazamientos. Al realizar esta prueba, lo que se observó fue que efectivamente al desplegar diferentes niveles de gris en el SLM se produce un corrimiento en las franjas del patrón de interferencia capturado, en la figura 5.2 se muestra un ejemplo de ellos.

Los patrones de interferencia capturados se obtuvieron al iluminar con el laser verde debido a que las franjas obtenidas con luz blanca tenían poco contraste, y la cámara utilizada no resolvía estos desplazamientos.

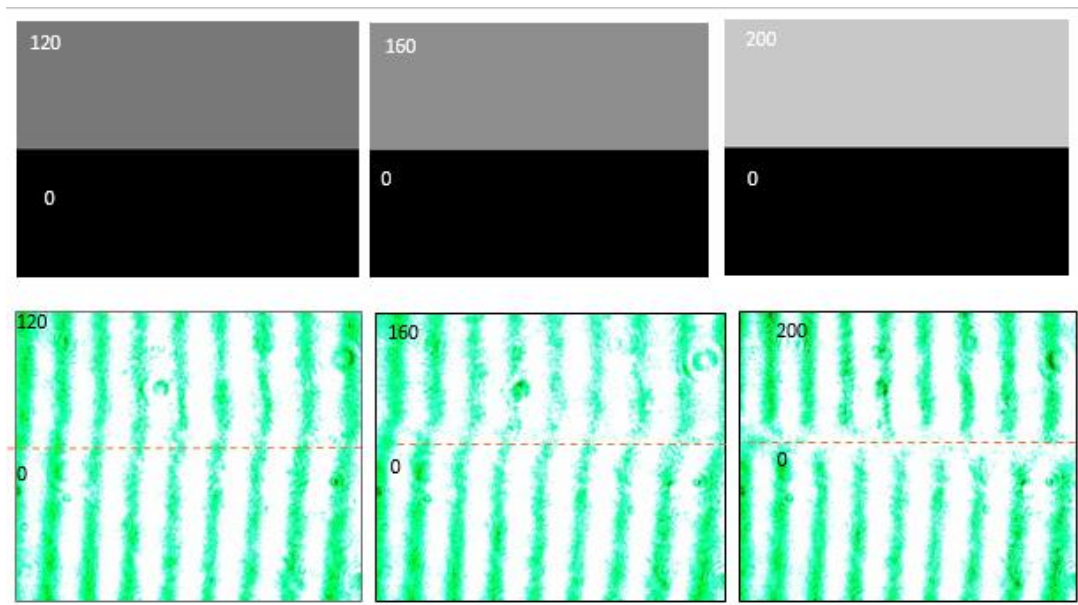


Figura 5.2 Corrimiento de franjas, variando los niveles de gris.

Para realizar el análisis cuantitativo de estos interferogramas se implementó un algoritmo previamente desarrollado [11] al que se le realizaron algunas modificaciones, se calculó el desplazamiento de franjas que se observa en los patrones de interferencia de la figura 5.2. En la siguiente sección se describe a detalle su funcionamiento.

5.3. Algoritmo para calcular el desfaseamiento.

Para realizar el análisis de los interferogramas experimentales obtenidos en la sección anterior, se desarrolló un algoritmo en el entorno de Matlab®, el cual consta de cuatro ciclos principales. La figura 5.3 muestra un diagrama de bloques que describe de manera detallada cada uno de los pasos que sigue.

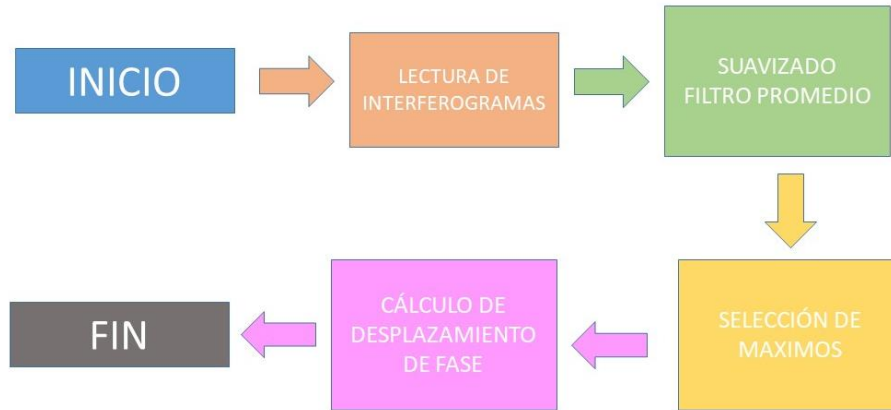


Figura 5.3 Diagrama a bloques del programa.

El primer bloque del diagrama lee las imágenes de los interferogramas capturados, realizando la lectura de 41 interferogramas en total, para ello se utiliza la función “read”; después, la imagen se convierte a escala de grises y para suavizarla se utiliza el filtro “promedio”, esto con el objetivo de eliminar el ruido de cada imagen, como se muestra en la figura 5.4, al graficar un perfil de cada una de las imágenes se puede observar que la gráfica obtenida después del filtraje ha perdido todo el ruido inicial a comparación con la imagen inicial.

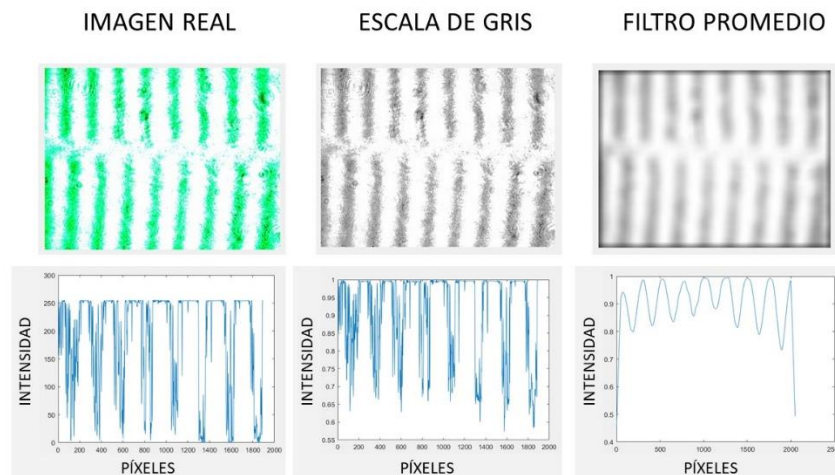


Figura 5.4 Procesamiento del interferograma a) imagen capturada b) escala de grises c) suavizado.

Para encontrar los máximos de cada imagen se utiliza la función “findpeaks” de MatLab con la que es posible encontrar sus posiciones y sus valores de intensidad, además se puede especificar el espaciado entre picos con la propiedad “MinPeakDistance”; el valor la intensidad puede ser especificada con la propiedad

“MINPEAKHEIGHT”, esto con el objetivo de seleccionar solo los picos con estas características, como se muestra en la figura 5.5.

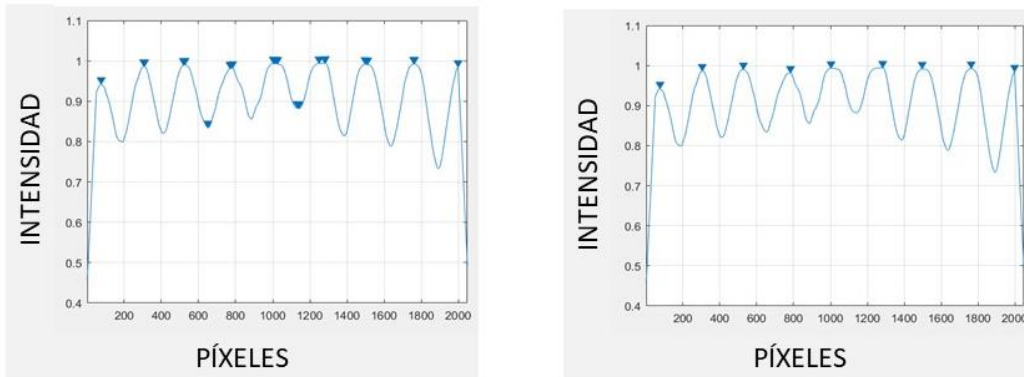


Figura 5.5 Selección de máximos.

Al conocer los picos y superponer las gráficas del perfil obtenidas a $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ de las imágenes de los interferogramas se calcula la distancia que existe entre máximos, el periodo y el desplazamiento que introduce cada nivel de gris, figura 5.6.

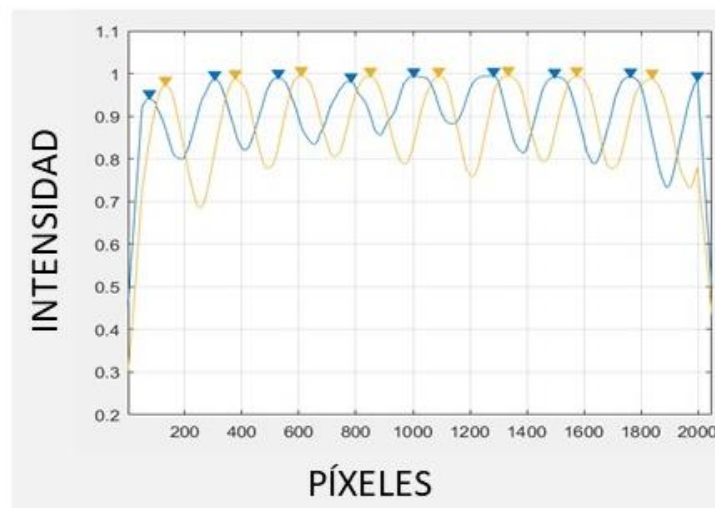


Figura 5.6 Cálculo del desfase introducido por cada nivel de gris.

La figura 5.7 muestra la curva de cambio de fase vs nivel de gris de diez diferentes mediciones realizadas con el algoritmo implementado.

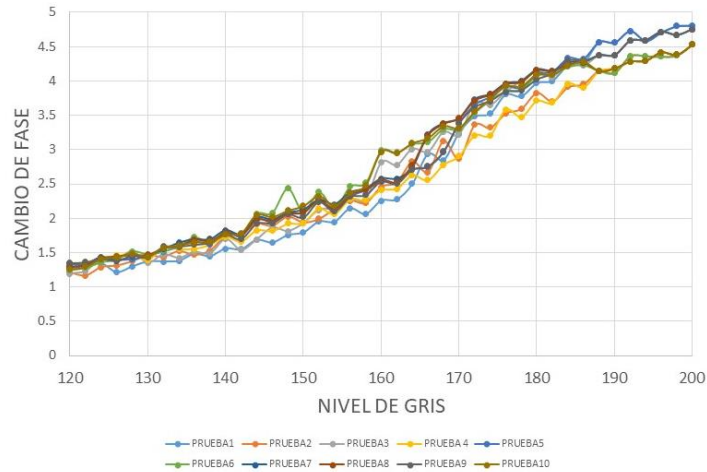


Figura 5.7 Resultados de diez diferentes mediciones del cambio de fase.

La curva promedio se muestra en la figura 5.8. Al realizar el ajuste a una línea recta con OriginPro 8® se obtuvo una certidumbre del 96.18% y un RMSE=0.0804, figura 5.8 (b).

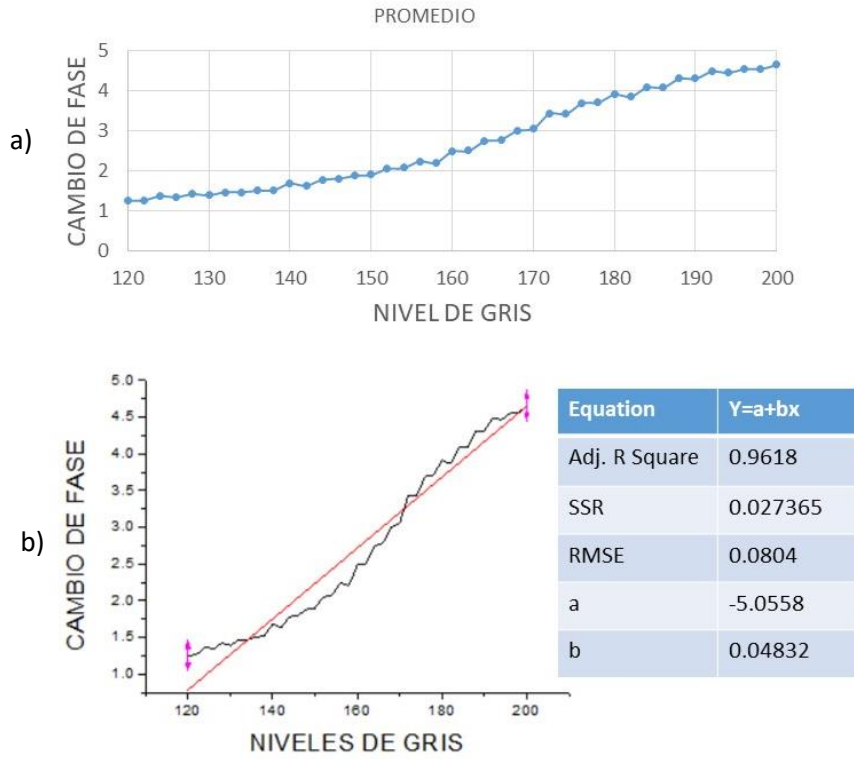


Figura 5.8 Curva promedio y ajuste lineal.

Como se puede observar en la gráfica de la figura 5.8 (a), el rango dinámico de trabajo para el SLM CRL Opto XGA2P01 en el cual se pueden obtener los mejores resultados, es entre los niveles de gris de 120 a 200, obteniendo un desplazamiento de fase de aproximadamente de 1.5π .

Ahora para comprobar esta curva de caracterización se utilizaron los escalones caracterizados previamente en Capítulo 4 con el interferómetro de luz blanca. El primer paso es encontrar las franjas de luz blanca al colocar el espejo con escalón, después se introdujo el modulador y nuevamente se buscaron las franjas de luz blanca para cerciorarse que el desfase introducido sea producido solo por el espejo escalón.

La figura 5.9 muestra el arreglo esquemático y experimental al introducir el modulador y buscar las franjas de interferencia con luz blanca para asegurar que el desfase introducido sea solamente producido por el escalón.

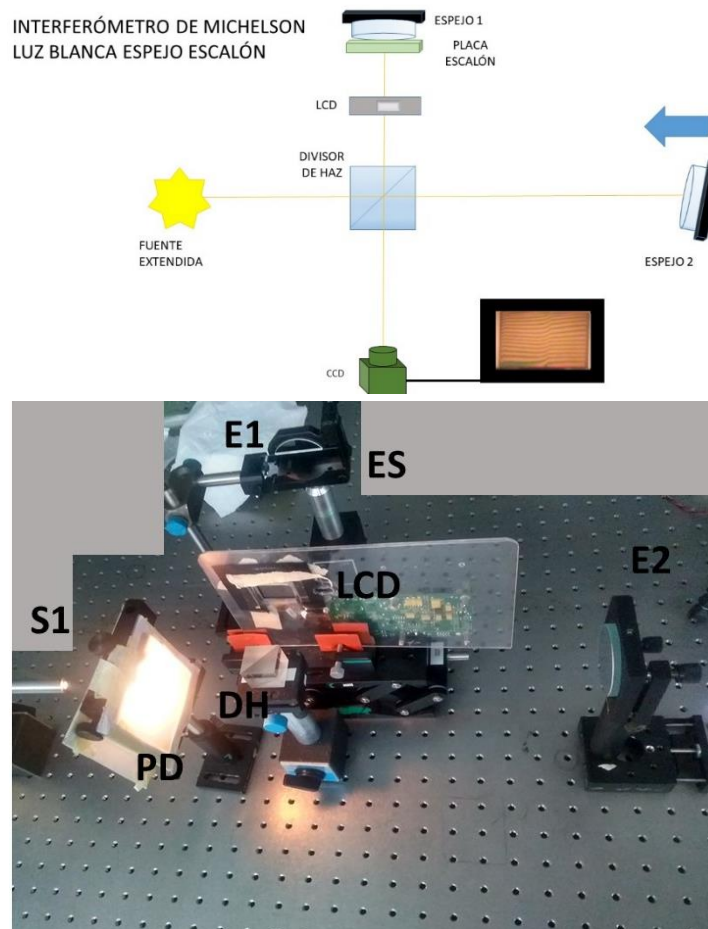


Figura 5.9 Arreglo esquemático y experimental, S1 (fuente de luz blanca), PD (pantalla difusora), DH (divisor de haz), LCD (pantalla de cristal líquido), E1 (espejo1), ES (espejo escalón) y E2 (espejo2).

Al realizar el procesado de las imágenes del patrón de interferencia de la imagen con escalones, se obtuvo un desfase de 3.08 rad para el escalón de $\lambda/4$ y 4.19 rad para el escalón de $\lambda/2$. Se desplegaron imágenes seleccionando un rango de 10 niveles de gris por debajo y por arriba de estos valores. En la mitad donde se encontraba el escalón de $\lambda/4$ se desplegaron los niveles de 160-180, que en cambio de fase fue 2.5 a 3.5 rad. Para el escalón de $\lambda/2$ se utilizaron los niveles de 180 a 200, que en cambio de fase equivale a 3.5 a 4.5 rad. La figura 5.10 muestra los resultados obtenidos, la selección del nivel de gris que mejor se ajusta se realizó de forma cualitativa obteniendo que el nivel de gris para el escalón de $\lambda/4$ fue de 175 figura 5.10 (a) y en el caso del escalón de $\lambda/2$ de 190, figura 5.10 (b).

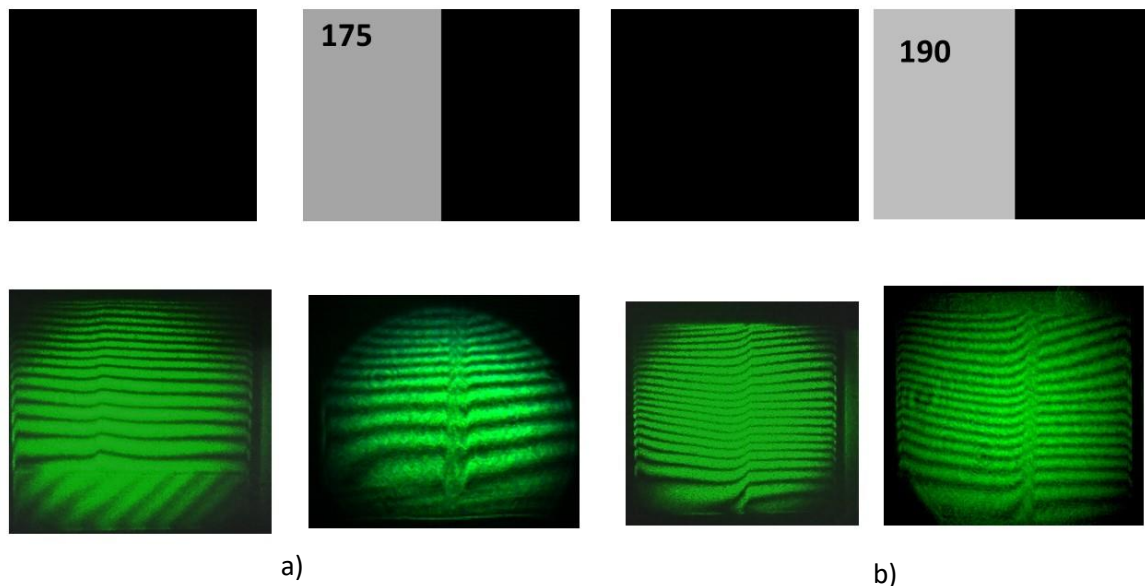


Figura 5.10 Resultados obtenidos de los escalones al introducir niveles de gris en la pantalla de cristal líquido.

5.4. Conclusiones.

En este capítulo se realizó la caracterización para la obtención de la curva característica de la pantalla de cristal líquido XGA2P01 de CRL-Opto, en donde se obtuvo que esta puede introducir hasta 1.5π de desfase.

Además de realizar el análisis para determinar el desfase que introducen dos escalones de películas delgadas de 3.08 rad para el escalón de $\lambda/4$ y 4.19 rad para el escalón de $\lambda/2$.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO A FUTURO.

6.1. Conclusiones generales.

Las principales contribuciones de este trabajo son las siguientes:

Se presentó la caracterización de una pantalla de cristal líquido modelo XGA2P01 para cuatro diferentes longitudes de onda, rojo 633nm, naranja 612 nm, morado 412 nm y verde 550 nm.

Con las curvas obtenidas se realizaron tres observaciones importantes. El cristal líquido del que está compuesto el modulador al ser una molécula orgánica es muy absorbente en el ultravioleta, por lo tanto, la curva de caracterización obtenida al iluminar la pantalla con el láser morado obtuvo un comportamiento muy diferente al de los otros tres láseres utilizados.

El láser con mayor rango lineal fue el naranja, pero se seleccionó al laser verde con el que mejor funciona la SLM debido a que obtuvo una mayor intensidad. La caracterización del tiempo de estabilización de los láseres permitió la obtención de repetibilidad en los datos de las curvas de caracterización de la SLM.

La técnica utilizada para obtener la curva “cambio de fase vs nivel de gris” es fácil de implementar y consiste en desplegar imágenes divididas en partes iguales, la parte superior varia con distintos niveles de gris, mientras que la parte interior permanece con un valor de nivel de gris de referencia. Esta técnica puede ser utilizada para realizar la caracterización de cualquier modulador de fase ya que es fácil de implementar. La idea propuesta de colocar una referencia en las imágenes que fueron desplegadas es una gran ventaja para calcular el desplazamiento que han sufrido las franjas en el patrón de interferencia.

Se implementó un algoritmo computacional para calcular los desplazamientos de fase de los interferogramas experimentales. Entre las funciones más importantes que realiza este algoritmo es la búsqueda y localización de los máximos de intensidad de las franjas por lo que al realizar la comparación entre la localización de estos nos permite calcular el desplazamiento de las franjas de los patrones de interferencia.

Se realizó la caracterización del interferómetro de Michelson como herramienta para asegurar que los desplazamientos de fase observados en los patrones de interferencia, fueran producidos por los diferentes niveles de gris desplegados en el modulador, y no debido a su espesor.

Y finalmente se realizó de forma experimental la comprobación de la implementación de la SLM para compensar defectos en espejos. Para este propósito se utilizaron espejos en los cuales en la mitad de ellos se realizó un depósito con un espesor de $\lambda/2$ y $\lambda/4$ donde $\lambda=632.8$ nm, el cual se logró compensar al variar los niveles de gris del modulador y obtener nuevamente franjas rectas.

6.2. Trabajo a futuro.

- Realizar imágenes con diferentes niveles de gris en cada uno de los pixeles para generar estados de polarización radial y azimutal.
- Determinar la dirección de giro de la polarización elíptica y circular.
- Mejorar el algoritmo desarrollado para optimizar su funcionamiento.
- Desarrollar un algoritmo para seleccionar el nivel gris óptimo para corregir los desplazamientos introducidos por los defectos de la superficie bajo prueba.

Referencias.

- [1] Y. Liu, L. Xuan, L. Hu, Z. Cao, D. Li, Q. Mu, and X. Lu, (2005) "Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase," *Acta Opt. Sin.* 25, 1682–1686.
- [2] X. Chu, S. Zhan, S. Zhao, Y. Li, and J. Xu, (2008) "Research on phase detecting method for coherent beam combining of fiber laser array," *Optoelectron. Lett.* 3, 455–458.
- [3] H. K. Liu, J. A. Davis, R. A. Lilly, (1985) "Optical-data-processing properties of a liquid-crystal television spatial light modulator", *Opt. Lett.* 10, 635-637.
- [4] H. J. Coufal, D. Psaltis, B. T. Sincerbox, Eds., (2000) *Holographic Data Storage*, Springer-Verlag, Berlin.
- [5] A. Márquez, C. Lemmi, J. Campos, J. C. Escalera, M. J. Yzuel, (2005) "Programmable apodizer to compensate chromatic aberrations effects using a liquid crystal spatial light modulator", *Opt. Express* 13, 716-730.
- [6] R. Dou, M. K. Giles, (1995) "Closed-loop adaptive optics system with a liquid crystal television as a phase retarder", *Opt. Lett.* 20, 1583-1585.
- [7] A. Serrano-Heredia, G. W. Lu, P. Purwosumarto y F. T. S. Yu. (1996) Measurement of the phase modulation in liquid crystal television based on the fractional- Talbot effect. *Opt. Eng.* 35:2680-2684.
- [8] H.F. Talbot. (1836) Facts relating to optical science. No. IV. *Philos. Mag.*, 9:401-407.
- [9] Mok F., Diep J. H., Liu H-K y Psaltis D. (1986) Real-time computer-generated hologram by means of liquid-crystal television spatial light modulator. *Opt. Lett.* 11:748-750.
- [10] Grother P. and Casasent D. (2001) Optical path difference measurement techniques for SLMs. *Opt. Commun.* 189:31-38.
- [11] Brenda Villalobos-Mendoza, Fermín S. Granados-Agustín, Daniel Aguirre-Aguirre, and Alejandro Cornejo-Rodríguez. (2015). "Phase shifting interferometry using a spatial light modulator to measure optical thin films," *Appl. Opt.* 54, 7997-8003.
- [12] Zhang H., Zhang J. and Wu L. (2007). Evaluation of phase-only liquid crystal spatial light modulator for phase modulation performance using a Twyman-Green interferometer. *Meas. Sci. Technol.* 18:1724-1728.
- [13] E. Hecht. (2000). "Óptica". 3º edición. Addison Wesley.

- [14] D. Malacara. (2015) "Óptica Básica". 3° edición. Fondo de Cultura Económica.
- [15] Chartier, G. (2005). "Introduce to Optics". New York, NY 10013, USA: Springer Science + Business Media, Inc.
- [16] Dennis H. Goldstein (2003) "Polarized Light", Revised and Expanded Optical Science and Engineering
- [17] William A. Shurcleffy Stanley S. Ballard (1968). "Polarized light". Van Nostran Company, Inc.
- [18] Malacara, D. (2007). "Optical Shop Testing". New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [19] Riachi, S. M. (2005). "Cristales líquidos: un ejemplo fantástico de aplicación tecnológica de las propiedades." Córdoba: Agencia Córdoba Ciencia.
- [20] William A. Shurcleffy Stanley S. Ballard (1968) . "Polarized light. Van Nostran Company, Inc.
- [21] Vicari L. (2016). Optical applications of liquid crystals. CRC press.
- [22] Ian Choon Khoo, (2007) "Liquid Crystals", Ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Páginas Web

- http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/104/htm/sec_6.htm
- <https://www.unizar.es/icma/divulgacion/cristalesliq.html>- Instituto de Ciencia de materiales de Aragon
- <https://www.upc.edu/es> -Universidad Politécnica de Catalunya