



**INAOE**

***Caracterización de una pantalla de cristal líquido  
para generar estados de polarización radial y  
espiral.***

*Por:*

***Lic. Reyna Cornelio de Jesús***

*Tesis que se presenta 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***

***2023***

***Tonantzintla, Puebla, México***

*Dirigida por:*

***Dr. Fermín Salomón Granados Agustín***

***Director de Tesis, Coordinación de Óptica, INAOE***

**©INAOE 2023**

*Derechos Reservados*

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



## RESUMEN

En el presente trabajo se muestra la caracterización de una pantalla de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés), mediante la cual se proyectan distintos niveles de gris, en un rango de 0-255, esto con la finalidad de generar desplazamientos de fase, para obtener estados de polarización radial y espiral. Para ello se utilizó una LCD de modelo XGA2P01 de la marca CRL-Opto. Cuya resolución es de  $26\mu\text{m} \times 26\mu\text{m}$ .

Para la obtención de dichos estados, se trabajó en la parte donde la pantalla genera cambios de fase con un comportamiento lineal, esto al iluminar con una longitud de onda de 550nm correspondiente al color verde, debido a que es donde presenta un comportamiento más estable, es decir, sin tantas fluctuaciones del láser al momento de tomar las medidas de intensidades correspondientes. Estas fluctuaciones aumentan más para el caso del láser rojo [25].

Posteriormente se determinó de forma experimental, el nivel de gris correspondiente al desplazamiento de fase. Para ello se colocó la LCD entre dos polarizadores lineales.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que existe una relación entre los niveles de grises y los desplazamientos de fase.

**Palabras clave:** polarización, pantalla de cristal líquido, radial y espiral.

**Keywords:** polarization, Liquid cristal display, radial and spiral.



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi asesor Fermín Salomón Granados Agustín por la asesoría, confianza, el apoyo brindado y por no dejarme vencer en todo este trayecto, así como por los consejos dados para la realización de esta tesis.

A mis sinodales Dr. Alejandro Cornejo Rodríguez, Dr. J. Félix Aguilar Valdez y la Dra. Elizabeth Percino Zacarías, por sus valiosos comentarios para el desarrollo de este trabajo.

A mis padres por el apoyo brindado todo este tiempo.

A mis amigos por darme las fuerzas para seguir adelante en este camino de la ciencia, además de inspirarme de alguna u otra manera. Gracias a Luis, Moisés, Meda, Marcos, Sandino, Ángela, Diana Isabel...

Al INAOE por las facilidades prestadas dentro de las instalaciones durante mi estancia académica.

A CONAHCYT por el apoyo otorgado durante el periodo académico.

*A mis padres y amigos con todo mi cariño.*

*Todos tienen su propio ritmo, tu ritmo  
también es especial en sí mismo.  
Así que no te preocupes demasiado  
por los demás, sólo ve por donde te diriges  
porque te llevará a un lugar muy especial.*

*CB97*

## ÍNDICE GENERAL

<b>Capítulo 1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivo General .....	2
1.3 Objetivos Particulares.....	3
1.4 Estructura de la Tesis.....	4
<b>Capítulo 2 Polarización.....</b>	<b>6</b>
2.1 Introducción.....	7
2.2 Antecedentes.....	7
2.3 Estados de polarización de la luz.....	10
2.3.1 Parámetros de Stokes.....	15
2.3.2 Grado de polarización.....	16
2.3.3 Esfera de Poincaré .....	17
2.3.4 Matriz de Mueller .....	18
2.4 Desarrollo experimental implementado para las placas retardadoras y Ley de Malus.....	21
2.4.1 Placas retardadoras y polarizadores .....	21
2.4.2 Ley de Malus .....	25
<b>Capítulo 3 Cristales Líquidos.....</b>	<b>30</b>
3.1 Introducción.....	31
3.2 Tipos de cristales líquidos.....	33
3.2.1 Cristales líquidos liotrópicos .....	34
3.2.1.1 Cristales líquidos poliméricos .....	35

3.2.2 Cristales líquidos termotrópicos .....	36
3.2.2.2 Cristales líquidos nemáticos. ....	37
<b>Capítulo 4 Experimentos de estados de polarización. ....</b>	<b>40</b>
4.1 Introducción. ....	41
4.2 Experimento de polarización con elementos clásicos. ....	42
4.3 Experimento de polarización y objeto a estudiar con luz blanca. ....	44
4.4 Experimento de polarización con pantalla de cristal líquido (LCD) .....	47
4.4.1 Experimento con LCD variando la distribución de niveles de gris. ....	48
4.5 Experimento de polarización y objeto a estudiar con una sola longitud de onda. ....	49
<b>Capítulo 5 Resultados. ....</b>	<b>52</b>
5.1 Introducción. ....	53
5.2 Descripción del arreglo experimental. ....	53
5.3 Calibración del cambio de fase como función de los niveles de gris de la LCD. ....	55
5.4 Resultados. ....	56
5.5 Cambios de fase en distribuciones controladas. ....	57
<b>Capítulo 6 Conclusiones .....</b>	<b>59</b>
6.1 Introducción .....	60
6.2 Trabajo a futuro. ....	61
<b>Referencias. ....</b>	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA LUZ A) CON FLUCTUACIONES EN TODAS LAS DIRECCIONES DE UNA FUENTE DE LUZ AMARILLA ( NO POLARIZADA) , B) CON FLUCTUACIONES EN TODAS LAS DIRECCIONES DE UNA FUENTE DE LUZ AMARILLA QUE ATRAVIESA UN POLARIZADOR LINEAL QUE TIENE COMO RESULTADO LUZ POLARIZADA LINEALMENTE..... 9

FIGURA 2.2 ONDA ELECTROMAGNÉTICA, FORMADA POR UN CAMPO ELÉCTRICO DADO POR LA CURVA DE COLOR ANARANJADO Y CAMPO MAGNÉTICO DADO POR LA CURVA AMARILLA . ..... 11

FIGURA 2.3 ELIPSE DE POLARIZACIÓN [6] ..... 12

*FIGURA 2.4 REPRESENTACIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE POLARIZACIÓN DEPENDIENDO DEL VALOR DE LA FASE. .... 14*

COMO PODEMOS DARNOS CUENTA, EN LA FIGURA 2.5 A PARTIR DE LA ECUACIÓN DE LA ELIPSE, SE PUEDEN OBTENER LOS TRES ESTADOS DE POLARIZACIÓN LINEAL PARA MÚLTIPLOS DE  $\pi$ . PARA EL CASO DE LA POLARIZACIÓN CIRCULAR POR MÚLTIPLOS DE  $\pi/2$  Y PARA LOS DEMÁS CASOS SE OBTIENE EL ESTADO DE POLARIZACIÓN ELÍPTICA, ESTOS ESTADOS DE POLARIZACIÓN SON LOS MÁS CONOCIDOS Y ESTUDIADOS EN LA ACTUALIDAD. 14

FIGURA 2.6 ESFERA DE POINCARÉ..... 18

FIGURA 2.7 ARREGLO ESQUEMÁTICO Y EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE INTENSIDADES. **F** (FUENTE DE LUZ BLANCA), **OP** (OBJETIVO Y PINHOLE), **D**(DIAFRAGMA), **L**(LENTE), **P1**(POLARIZADOR), **PR**(PLACA RETARDADORA, **P2**(ANALIZADOR) Y **DET**(DETECTOR DE INTENSIDAD THORLABS PM100). ..... 24

FIGURA 2.8 RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LA PLACA RETARDADORA  $\lambda/4$  Y  $\lambda/2$  ..... 25



FIGURA 2.9 COMPARACIÓN DE LA LEY DE MALUS RESPECTO A LA PARTE EXPERIMENTAL. ....	27
FIGURA 2.10 DIBUJO ESQUEMÁTICO DE LA DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO RADIAL Y AZIMUTALMENTE.. <b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>	
FIGURA 3.1 EJEMPLOS DE APLICACIONES DE LOS CRISTALES LÍQUIDOS. ....	31
FIGURA 3.2 ELIPSE DE ÍNDICES DE REFRACCIÓN DE CRISTAL LÍQUIDO.....	33
FIGURA 3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS CRISTALES LÍQUIDOS.....	34
FIGURA 3.4 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS ESTRUCTURAS DE FASES LIOTRÓPICAS. A) LAMINAR, B) HEXAGONAL, C) CÚBICA. ....	35
FIGURA 3.5 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA ESTRUCTURA DE UN POLÍMERO.....	36
FIGURA 3.6 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE ALGUNOS TIPOS DE CRISTALES LÍQUIDOS TERMOTRÓPICOS, A) ESMÉCTICO, B) NEMÁTICO Y C) COLESTÉRICO.....	37
FIGURA 3.7 ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE UN A) CRISTAL LÍQUIDO NEMÁTICO AL MOMENTO DE APLICARSE UN CAMPO ELÉCTRICO, B) CRISTAL LÍQUIDO TORCIDO EN UNA PANTALLA...	38
FIGURA 4.1 GRAFICA DE LA PLACA RETARDADORA UTILIZANDO UNA FUENTE DIODO LÁSER.....	42
FIGURA 4.2 GRAFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA PLACA RETARDADORA Y UN OBJETO A ESTUDIAR.....	43
FIGURA 4.3 ARREGLO EXPERIMENTAL CON FUENTE DE LUZ BLANCA PARA LA OBSERVACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLACA RETARDADORA $\lambda/2$ . <b>F</b> (FUENTE), <b>A</b> (ATENUADOR), <b>P1</b> (POLARIZADOR), <b>PR</b> (PLACA RETARDADORA), <b>P2</b> (POLARIZADOR ANALIZADOR).....	44

FIGURA 4.4 ARREGLO EXPERIMENTAL CON FUENTE DE LUZ BLANCA  
**F**(FUENTE), **A** (ATENUADOR), **P1**(POLARIZADOR), **O** (BOLSA DE  
 PLÁSTICO), **PR** (PLACA RETARDADORA), **P2**(POLARIZADOR  
 ANALIZADOR)..... 45

FIGURA 4.5 A) POLARIZADORES PARALELOS Y B) POLARIZADORES  
 CRUZADOS..... 46

FIGURA 4.6 EFECTO DE DIFRACCIÓN. A) LCD CON FUENTE DE LUZ  
 BLANCA INCIDIENDO DIRECTAMENTE, B) PLACA RETARDADORA  
 $\Lambda_2$  CON FUENTE DE LUZ BLANCA INCIDIENDO DIRECTAMENTE. ... 47

FIGURA 4.7 ARREGLO EXPERIMENTAL CON FUENTE DE LUZ BLANCA  
 AGREGANDO UNA LCD Y UN OBJETO A ESTUDIAR PARA LA  
 OBSERVACIÓN DEL EFECTO DE POLARIZACIÓN **F**(FUENTE DE LUZ  
 BLANCA), **A**(ATENUADOR), **P1**(POLARIZADOR 1),**O**(BOLSA DE  
 PLÁSTICO CON CIERTA TENSIÓN MECÁNICA), **LCD**(PANTALLA DE  
 CRISTAL LÍQUIDO),**P2**(ANALIZADOR) ..... 48

FIGURA 4.8 BOLSA DE PLÁSTICO A TRAVÉS DE A) NIVELES DE GRIS 0-  
 50 Y B) NIVELES DE GRIS 200-255..... 48

FIGURA 4.9 BOLSA DE PLÁSTICO SOMETIDA BAJO CIERTA TENSIÓN  
 MECÁNICA ILUMINADA CON CIERTAS CONFIGURACIONES DE  
 NIVEL DE GRIS. A) CONFIGURACIÓN VERTICAL CON NIVEL DE  
 GRIS 255,60 Y 0 B) CONFIGURACIÓN UNA VERTICAL Y DOS  
 HORIZONTALES CON NIVELES DE GRIS 255,60,0C C)  
 CONFIGURACIÓN CON TRES NIVELES DE GRIS C)  
 CONFIGURACIÓN VERTICAL CON DOS NIVELES DE GRIS ..... 49

FIGURA 4.10 GRÁFICAS COMPARATIVAS A) PLACA RETARDADORA $\Lambda_2$  .  
 B) LCD CON DISTINTOS NIVELES DE GRISES CON UNA VARIACIÓN  
 DE 5 PASOS. .... 50

FIGURA 4.11 GRÁFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LA LCD VS LCD  
 MÁS OBJETO A ESTUDIAR ..... 50

FIGURA 5.1 ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA LCD. **F**(FUENTE DIODO LÁSER 550NM), **O** Y **PH**(OBJETIVO Y PINHOLE), **L**(LENTE), **P1**(POLARIZADOR), **LCD**(PANTALLA DE CRISTAL LÍQUIDO), **P2**(ANALIZADOR) Y **D**(DETECTOR MARCA THORLABS PM100)..... 54

FIGURA 5.2 TABLA DE CARACTERÍSTICAS DE LA PANTALLA DE CRISTAL LÍQUIDO UTILIZADO [16]. ..... 54

FIGURA 5.3 GRÁFICA DE LA PANTALLA DE CRISTAL LÍQUIDO EN LA CUAL SE OBSERVA EL CAMBIO DE FASE COMO FUNCIÓN DE NIVELES DE GRIS. .... 55

FIGURA 5.4 GRÁFICA DE LOS DATOS OBTENIDOS DE LA PLACA RETARDADORA. .... 56

FIGURA 5.5 GRAFICA DE CALIBRACIÓN DE LA LCD, EN LA CUAL SE OBTIENEN LAS FASES A TRAVÉS DE UNA PLACA RETARDADORA  $\Lambda/2$ . ..... 57

FIGURA 5.6 DISTRIBUCIÓN EN LAS PANTALLAS VARIANDO LOS NIVELES DE GRIS. .... 57

---

# Capítulo 1 Introducción

---

## 1.1 Antecedentes.

En la actualidad la aplicación de los cristales líquidos ha ido en aumento, en aparatos electrónicos, que utilizamos cotidianamente, tal es el caso de las pantallas de celulares, televisores, relojes, calculadoras, entre otros.

Sin embargo, en el área científica también tiene diversas aplicaciones, debido a las distintas propiedades electroópticas que posee dicho material por ejemplo se pueden utilizar como moduladores espaciales de luz (Spatial Light Modulator SLM por sus siglas en inglés). Puesto que, al aplicar cierto voltaje por medio de una fuente de alimentación, los pixeles pueden tener un cambio de fase y eso se refleja en la cantidad de luz transmitida por la pantalla. Cabe mencionar que se puede modificar dicha fase en tiempo real.

Las pantallas de cristal líquido también se utilizan en el almacenamiento óptico, generación de hologramas, metrología óptica, etc. De igual manera tiene aplicaciones geológicas, biológicas, así como también ópticas. Esto es posible, porque se puede manejar pixel a pixel, ya que cada uno puede actuar por separado a causa de que tiene contactos eléctricos individuales.

Este tipo de dispositivos puede modificar la polarización de la luz que incide sobre el modulador. También es capaz de cambiar la fase, así como la amplitud. He aquí la importancia de estudiar esta aplicación.

Es por ello que, para fines de esta tesis, el tema central será analizar la polarización y los estados de polarización que la pantalla de cristal líquido puede generar por medio del cambio de fases, ya sea por secciones u ocupando la pantalla completa.

## 1.2 Objetivo General

El objetivo de este trabajo es aplicar el concepto de polarización, para manipular cambios de fase, variando los niveles de grises en una pantalla de cristal líquido (Liquid Cristal Displays, LCD por sus siglas en inglés) para obtener estados de polarización, del tipo radial y espiral. Este tipo de polarización se logrará modificando los niveles de grises, los cuales se traducen a cambios de fase en una LCD previamente caracterizada, pixel a pixel.

Se propone un método para poder obtener la polarización espiral y radial, usando la pantalla LCD, la cual consiste en un arreglo dentro de una matriz de (1024 x 768 píxeles) en donde se van variando los niveles de grises en cada píxel con área activa de 26.6mm (H) x 20.0mm (V). Una de las ventajas de utilizar dicha pantalla es que a cada píxel se le puede asignar un nivel de gris, lo cual hace más dinámicos los cambios de fase. Además de que se pueden crear distribuciones controladas, de cambio de fase.

### 1.3 Objetivos Particulares.

De acuerdo con el objetivo general se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Montaje experimental para verificar la Ley de Malus utilizando luz blanca (policromática) por medio de mediciones cualitativas.
- Introducción de una placa retardadora para obtener estados de polarización circular y elíptico. Así también, la introducción de un objeto transparente para su estudio.
- Caracterizar una LCD y determinar los cambios de fase, en donde se presenta un comportamiento lineal en función de los niveles de gris.
- Montaje experimental para verificar la Ley de Malus usando una sola longitud de onda.

- Comparar el comportamiento de la LCD usando luz blanca, la cual funciona como un retardador variable pixel a pixel de forma cualitativa.

#### 1.4 Estructura de la Tesis.

Este trabajo se divide en 6 capítulos, a continuación, se describe de manera breve el contenido de cada uno de los capítulos del trabajo de esta tesis.

En el Capítulo 1 se hace una introducción del trabajo de tesis. En ella se describen el objetivo general, así como los objetivos particulares, de igual manera, se muestran los antecedentes de dicho trabajo.

En el Capítulo 2 se describe el concepto de polarización, así como sus antecedentes, se muestra el análisis matemático y el desarrollo experimental para la comprensión de dicho concepto. Se incluyen las gráficas correspondientes.

En el Capítulo 3 se da una breve introducción sobre los cristales líquidos, incluyendo la clasificación reportada en la literatura en base a ello se describe el tipo de cristal líquido utilizado en esta tesis y se muestran las características de la pantalla de cristal líquido utilizado.

En el Capítulo 4 se presentan las gráficas obtenidas en la caracterización de la pantalla de cristal líquido y también las de la placa retardadora. También, se realiza el análisis de cada una de ellas. De igual manera, se presentan los experimentos de forma cualitativa que se utilizaron para observar el fenómeno de polarización.

En el Capítulo 5 se detalla la descripción del arreglo experimental utilizado. Se presentan los resultados en la caracterización de la pantalla de cristal líquido para obtener las fases correspondientes en el nivel de gris 50-200, una vez obtenidas las fases se procede a obtener los estados de polarización espiral y radial.

En el Capítulo 6 se dan a conocer las conclusiones del trabajo de tesis, así como el trabajo a futuro.



---

## Capítulo 2 Polarización

---

## 2.1 Introducción.

En este capítulo se presenta el concepto de una onda electromagnética asociada a los fenómenos luminosos. Así, como un breve análisis de las características matemáticas de dicha descripción, para poder obtener los distintos tipos de estados de polarización conocidos (elíptica, circular y lineal).

Se representa la polarización de la luz, por medio de los parámetros de Stokes. Así como, la localización de estos parámetros en la esfera de Poincaré. Para poder familiarizarse con estos términos y saber el tipo de estados de polarización, que se obtienen por medio de elementos clásicos.

También se muestra el desarrollo experimental implementado, para poder familiarizarse con los estados de polarización, para ello se usan placas retardadoras de  $\lambda/2$  de onda y  $\lambda/4$  de onda. Para posteriormente realizar una comparación con los resultados obtenidos con una la pantalla de cristal líquido.

## 2.2 Antecedentes.

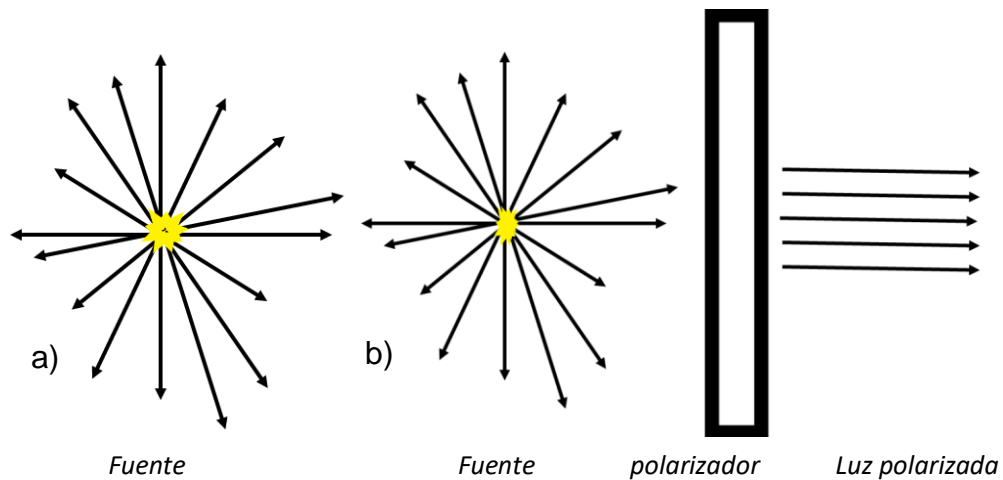
Uno de los primeros registros que se tiene de la luz polarizada datan de año 1669, donde el físico Erasmus Bartholinus descubrió al fenómeno de la doble refracción a través de un elemento parecido a la calcita [1]. Posteriormente Huygens postuló la teoría del tren de ondas en 1690, dicha teoría fue publicada en el libro "Traite de la lumiere" [2]. Por otro lado, Newton desarrolló la teoría corpuscular en a principios del siglo XVIII [3]. De igual manera, en 1852 Stokes descubrió que la polarización es una propiedad geométrica de la luz [1]. En 1892 Poincaré menciona que la polarización es una propiedad electromagnética de la luz [1].

La polarización juega un papel importante puesto que muchos dispositivos actuales utilizan el comportamiento ondulatorio de la luz para su

funcionamiento. Los más comunes en la vida cotidiana son los lentes de sol o el polarizador que se pone en los vidrios de los automóviles. Sin embargo, también se utiliza en sistemas más complejos, tales como, algunos láseres.

De igual manera es necesario tomar en cuenta que de forma implícita la polarización afecta el comportamiento de algunos sistemas ópticos, por ello la importancia de estudiar este tipo de comportamientos para poder optimizar dichos sistemas y así poder tener mejor respuesta al momento de darle alguna aplicación.

Un aspecto importante es la comprensión del concepto de onda electromagnética, específicamente la parte policromática, pues proporciona la idea principal de este concepto. Es fundamental distinguir entre la luz polarizada y la no polarizada, dado que esta última no tiene una dirección fija del campo eléctrico, es decir, varía aleatoriamente en el tiempo como se puede observar en la fig.2. 1a. Ejemplo de ello se puede observar en la vida cotidiana la luz del sol y los focos incandescentes. Mientras que para la luz polarizada tendríamos la luz láser o luz después de atravesar las gafas de sol polarizadas, en estas fuentes la salida la luz sale en una dirección preferencial como se observa en la fig.2.1. b. Una forma de obtener la luz polarizada es mediante instrumentos ópticos, tales como, polarizadores lineales y placas retardadoras, con las cuales se puede obtener estados de polarización clásicos.



*Figura 2.1 Representación esquemática de la luz a) con fluctuaciones en todas las direcciones de una fuente de luz amarilla ( no polarizada ) , b) con fluctuaciones en todas las direcciones de una fuente de luz amarilla que atraviesa un polarizador lineal que tiene como resultado luz polarizada linealmente*

Durante años se han desarrollado distintas teorías para poder explicar el comportamiento de la luz, entre estos destacan la teoría corpuscular (fotones) [2] y la teoría ondulatoria (tren de ondas) atribuida al físico holandés Christian Huygens (1629-1695), que postula una teoría con la que era ya posible explicar la reflexión, la refracción, la interferencia y la difracción [4]. El descubrimiento de la luz polarizada permitió además establecer que la luz era una onda transversal que se propagaba en un medio desconocido al que llamó éter [4].

Por consiguiente, se tienen dos teorías, la primera en donde la luz se toma como fotones y la segunda se toma como una onda. En cualquiera de los casos dependen del medio en el que se encuentren, es decir, si es un medio microscópico lo ideal es utilizar la teoría en donde se toma como fotones, mientras que para el caso macroscópico se toma como una onda electromagnética transversal.

Sin embargo, para fines de esta tesis tomaremos el segundo comportamiento, ya que las matemáticas asociadas, pueden resolverse para el caso de la

polarización, además de que resulta fácil entender este concepto. Para ello es necesario introducir la ecuación de onda, esto debido al comportamiento vectorial de las ondas electromagnéticas, las cuales pueden ser descrita usando dos componentes ortogonales entre sí, así como su propagación en dirección perpendicular al campo eléctrico.

### 2.3 Estados de polarización de la luz.

Para poder obtener los distintos estados de polarización, es necesario partir de la ecuación de onda mediante la cual Maxwell demostró que su teoría clásica del electromagnetismo acerca de la onda. Que puede ser modelada por conveniencia a través de las componentes del campo eléctrico **E** y magnético **B**. Debido a que se encuentran dentro del plano de vibración, los cuales son perpendiculares entre sí. Este resultado coincide con el resultado de la ecuación de las ondas en la óptica, ya que la luz es una onda transversal.

Este tipo de ondas tiene la propiedad de ser filtrada, es decir, se puede seleccionar una componente que vibre en un plano determinado, el cual oscilan de forma perpendicular a la dirección de propagación de la luz, es por ello que la onda resultante puede o no ser linealmente polarizada [6].

En este tipo de fenómenos en donde la luz tiene interacción con diversos medios. La polarización es indistinguible, ya sea para el caso donde la luz es monocromática o cuasi-monocromática. Como consecuencia se puede tomar en cualquier caso alguno de estos tipos de luz.

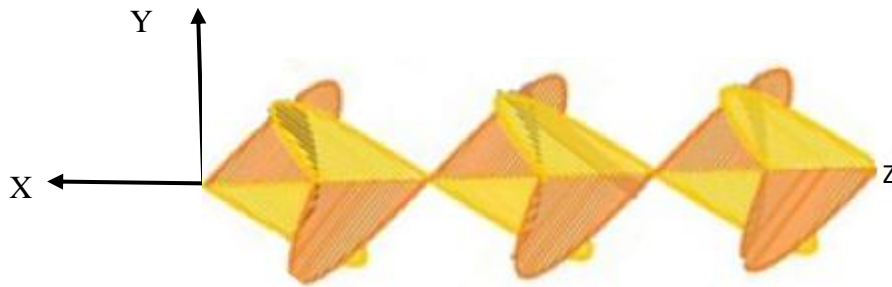


Figura 2.2 Onda electromagnética, formada por un campo eléctrico dado por la curva de color anaranjado y campo magnético dado por la curva amarilla.

Normalmente la dirección de polarización se define según sea la dirección del vector  $\mathbf{E}$  que, por conveniencias, viaja en la dirección z, en coordenadas cartesianas (x, y, z). La velocidad de las ondas electromagnéticas es la velocidad de la luz. Para lo que a continuación se desarrolla; se tomará en cuenta el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  en un medio lineal, homogéneo e isótropo como se muestra en la fig.2.2, el cual tiene la siguiente notación compleja.

$$\mathbf{E} = E_0 \exp[(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega \cdot t + \delta)] \quad (2.1)$$

La ecuación (2.1) se puede reescribir en componentes ortogonales XY como se muestra a continuación.

$$E_x = a_1 \cos(k \cdot r \pm \omega \cdot t \pm \delta_x)$$

y

$$E_y = a_2 \cos(k \cdot r \pm \omega \cdot t \pm \delta_y) \quad (2.2)$$

Donde  $a_1$  y  $a_2$  son las amplitudes de los campos en los ejes X y Y respectivamente,  $\mathbf{K}$  es el vector de propagación del campo electromagnético,  $\mathbf{r}$  la posición,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $t$  el tiempo,  $\delta_x$  y  $\delta_y$  Son las fases de los campos de cada componente, las cuales pueden ser cero, iguales o distintas.

Ahora aplicando relaciones trigonométricas y tomando  $\delta_y - \delta_x = \delta$  , y desarrollando los cosenos podemos expresarlo de forma general [6]:

$$\left(\frac{E_x}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{a_2}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{a_1}\right)\left(\frac{E_y}{a_2}\right)\cos(\delta) = \sin^2(\delta) \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3) representa la ecuación paramétrica de una elipse, la cual representa la luz elípticamente polarizada [2], para este caso la orientación de los ejes del plano XY y su excentricidad depende de  $\delta$  . La elipse de polarización se encuentra dentro de un rectángulo cuyos lados son paralelos a los ejes de coordenadas y cuyas longitudes son  $2a_1$  y  $2a_2$  mostrados en la fig.2.3

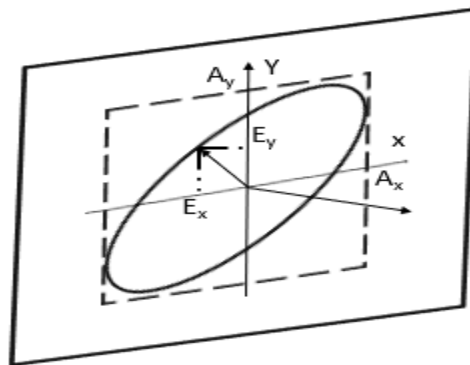


Figura 2.3 Elipse de polarización [6]

A partir de esta ecuación podemos obtener los estados de polarización dependiendo de las condiciones de fase de cada componente, es decir la modificación de las fases. A continuación, se muestran los dos casos particulares.

Para el primer caso, si la diferencia de fase entre las componentes ortogonales es igual a un múltiplo par de  $\pi$  ( $\delta = m\pi$ , con  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), entonces la ecuación (2.3) se reduce a:

$$\frac{E_y}{E_x} = (-1)^m \frac{a_2}{a_1} \quad (2.4)$$

La cual describe el estado de polarización lineal, esto debido a que se reduce a la ecuación de una recta. De igual manera, existe el caso particular donde las amplitudes  $E_y = E_x$ , lo cual indica que el campo eléctrico oscila en  $\theta = 45^\circ$  es decir a la resultante de los ejes X y Y.

Para el segundo caso, si la diferencia de fase entre los dos estados ortogonales es  $\frac{\pi}{2}$  o múltiplo impar, obtenemos la siguiente ecuación

$$\left(\frac{E_x}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{a_2}\right)^2 = 1 \quad (2.5)$$

Pero si en la ecuación (2.5) consideramos  $a_1 = a_2 = a$  entonces obtendremos la ecuación del círculo en el origen en donde el rectángulo circunscrito se convertirá en un cuadrado, la cual nos estaría dando la polarización circular, izquierda o derecha.



$$E_x^2 + E_y^2 = a^2 \quad (2.6)$$

En este tipo de polarización la amplitud no se ve afectada.

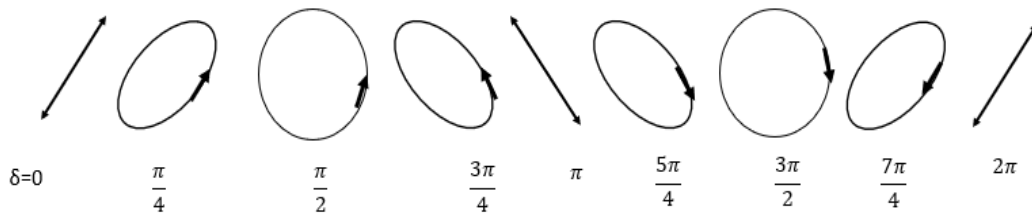


Figura 2.4 Representación de distintos tipos de polarización dependiendo del valor de la fase.

Como podemos darnos cuenta, en la figura 2.4 a partir de la ecuación de la elipse, se pueden obtener los tres estados de polarización lineal para múltiplos pares de  $\pi$ . Para el caso de la polarización circular por múltiplos impares de  $\pi/2$  y para los demás casos se obtiene el estado de polarización elíptica, estos estados de polarización son los más conocidos y estudiados en la actualidad.

Una vez obtenidos estos estados se pueden describir los parámetros de polarización, sin embargo, existen diversas formas de representarlas matemáticamente. Los más utilizados son el formalismo de Jones [7] y los parámetros de Stokes [8]. Para este caso se utilizará esta última, debido a que describe la polarización de la luz en términos de cuatro intensidades, las cuales pueden ser medibles de forma experimental.

### 2.3.1 Parámetros de Stokes.

Para poder obtener la forma completa del estado de polarización de un haz, es necesario obtener los parámetros de Stokes la cual es la representación moderna de la luz polarizada. George Gabriel Stokes introdujo en 1852 cuatro parámetros,  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ , que determinan por completo la elipse de polarización [5].

Una de las ventajas de utilizar los parámetros de Stokes tiene que ver con el hecho de que se puede representar la luz parcialmente polarizada, así como totalmente polarizada o no polarizada, en consecuencia, se puede obtener el grado de polarización mediante las intensidades medidas de forma experimental [9].

Los parámetros de Stokes son generalmente más sensibles a la naturaleza de una superficie de dispersión que la intensidad total, parecería que las técnicas de formación de imágenes de polarización ofrecen la clara posibilidad de producir imágenes con mayor contraste visual inherente. [10]

Estos parámetros están definidos por  $a_1$ ,  $a_2$ , estos términos corresponden a la irradiancia respectivamente y  $\delta$  al desfaseamiento entre cada onda: Teniendo estos términos, los parámetros se puede representar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 S_0 &= a_1^2 + a_2^2 \\
 S_1 &= a_1^2 - a_2^2 \\
 S_2 &= 2a_1a_2\cos\delta \\
 S_3 &= 2a_1a_2\sin\delta
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Donde  $S_0$  corresponde a la intensidad total de la luz dada por el detector,  $S_1$  mide la diferencia de intensidad preponderancia de la polarización horizontal

sobre la polarización en vertical. Mientras que  $S_2$  describe la cantidad de luz polarizada linealmente, y el parámetro  $S_3$  describe la cantidad de luz polarizada circularmente. Las cuales nos describen los tipos de polarización más estudiados en la actualidad a través de la intensidad de la luz incidente. Esto aplica para la luz total o parcialmente polarizada.

Para la luz totalmente polarizada se cumple la relación.

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (2.7)$$

Sin embargo, para conocer los demás casos donde la luz se encuentra parcialmente polarizada y se requiera saber este parámetro, se utiliza el grado de polarización, como se muestra a continuación.

### 2.3.2 Grado de polarización

Una de las propiedades físicas de la luz es que puede ser polarizada. Para ello una vez obtenidos los parámetros de Stokes se puede calcular el grado de polarización, es decir se puede predecir el efecto que tiene un polarizador sobre el haz, por consiguiente, se puede obtener que tan polarizada está la luz. Este se define como:

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (2.8)$$

donde

$P=0$  Luz no polarizada

$P=1$  Luz completamente polarizada

$0 < P < 1$  Luz parcialmente polarizada

La ecuación (2.8) es conocida como el *grado de polarización* [1]. Para un polarizador ideal la luz polarizada no se transmite por el eje perpendicular, sin embargo, para un polarizador real esto no ocurre, ya que, depende del material con el que está fabricado y a su vez de la longitud de onda con la que se incide. Esto se puede ver en la hoja de especificaciones del fabricante para los polarizadores o placas retardadoras. Ya que, si no se usa de manera correcta se puede estar omitiendo algunas propiedades de la incidencia de luz. Y los datos no serían del todo correctos

### 2.3.3 Esfera de Poincaré

Existen diversos materiales dentro de los cuales el efecto de polarización sufre algún cambio, tal es el caso de las placas retardadoras (producen un retardo óptico), las películas polaroid, polarizadores (producen absorción o reflexión selectiva de la luz que incide sobre ellos), entre otros. Es por ello por lo que es importante estudiar dicho comportamiento, debido a que tiene distintas aplicaciones.

Uno de los procedimientos para estudiarlos es el propuesto por Henri Poincaré, el cual propuso en 1892 la representación de los distintos estados de polarización por medio de una esfera de radio unitario, en la cual estados de polarización están sobre la superficie, los cuales forman un arco sobre la superficie ya que predice como determinado retardador modificará su estado de polarización [1].

Se puede observar la polarización dada mediante puntos sobre la esfera de Poincaré los cuales están dados por los parámetros de Stokes normalizados. Los estados están parcialmente polarizados se encuentran dentro de la esfera, es decir se pueden encontrar en el polo norte (polarización circular), en la superficie (luz polarizada totalmente), puntos en el ecuador (polarización lineal). Mientras que la luz no polarizada es representada por el centro de la esfera.

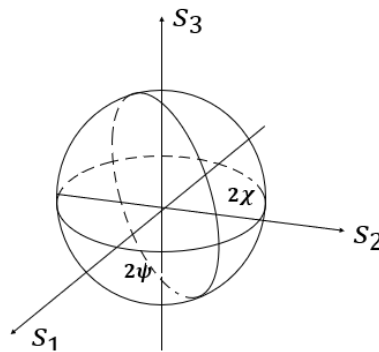


Figura 2.5 Esfera de Poincaré.

Cada punto que se encuentra dentro de la esfera de Poincaré viene dado por  $2\omega$  y  $2\varphi$  las cuales son las coordenadas angulares y  $r$  representa la intensidad. De modo que en coordenadas cartesianas se puede representar como:

$$X = r \cos(2\omega) \cos(2\varphi)$$

$$Y = r \cos(2\omega) \sin(2\varphi)$$

$$Z = r \sin(2\omega)$$

### 2.3.4 Matriz de Mueller

De la sección anterior, podemos retomar la representación de los parámetros de Stokes y con ello complementarlo con la matriz de Mueller para poder cambiar el estado de polarización, utilizando elementos ópticos. Estos elementos pueden ser polarizadores, retardadores de fase, etc. [6].

Una de las ventajas de esta matriz es que, permite estudiar la luz incidente de algún dispositivo el cual no necesariamente está totalmente polarizado a través de la intensidad detectada, dado que son parámetros medibles.

Este tipo de método se puede extender a dispositivos ópticos analizados mediante el método de la matriz de Mueller [11]. En consecuencia, puede analizar por medio de los parámetros de Stokes tanto el grado de polarización, así como el estado de polarización presente en la parte experimental a estudiar. La siguiente matriz dada por la ecuación (2.9) nos representa los vectores de Stokes y la matriz de Mueller.

$$\begin{bmatrix} S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ S_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

La cual se puede reescribir como

$$\mathbf{S}_2 = \mathbf{M}\mathbf{S}_1$$

Donde  $\mathbf{S}_1$  y  $\mathbf{S}_2$  representan los vectores de Stokes de entrada y salida, y  $\mathbf{M}$  es la matriz de Mueller asociada al sistema la cual sería el elemento polarizador. En este caso esta última puede tener distintas variaciones dependiendo del elemento óptico a representar. Cabe aclarar que no todas las matrices de 4x4 corresponden a una matriz de Mueller real, ya que esta debe de representar un dispositivo físico:

**Tabla 1- Matrices asociadas a distintos tipos de polarización.**

Tipo de Polarización	Matriz Asociada
Polarización lineal horizontal	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Polarización lineal vertical	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Polarización lineal a 45	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Polarización lineal a $-45^\circ$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Placa de $\lambda/4$ eje rápido vertical	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
Placa de $\lambda/4$ eje rápido horizontal	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

Placa de $\lambda/2$ eje rápido vertical	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$

Es importante destacar que al momento de que el haz de luz interactúa con cada elemento polarizador puede producir algún cambio, ya sea, en la fase, amplitud, incluso en la dirección del campo electromagnético.

## 2.4 Desarrollo experimental implementado para las placas retardadoras y Ley de Malus.

### 2.4.1 Placas retardadoras y polarizadores

Los polarizadores y placas retardadoras son dispositivos ópticos que se utilizan en la mayoría de los arreglos ópticos para observar los cambios de fase. En el caso de la placa retardadora, este es un elemento óptico, el cual tiene como función generar un desfase determinado entre la componente transversal y la componente perpendicular de la onda electromagnética incidente. El desfase que produce la placa es constante y en el caso de las placas comerciales su especificación es certificada por el fabricante, las placas más comunes son  $\frac{\pi}{2}$  y  $\frac{\pi}{4}$ . Estos desfases se deben a la onda que se descompone en dos ondas las cuales viajan a diferentes velocidades, por lo que a la salida del retardado la onda o uno ha sido retardado en relación con la otra onda.

Por otro lado, los polarizadores son elementos ópticos, los cuales están fabricados con una película de plástico polimérico dopado de yodo. En el cual



las moléculas se alinean en una dirección preferencial para formar una rejilla, esta solo deja pasar una componente cuando es un polarizador lineal. En estos tipos de dispositivos se utiliza una fuente de luz coherente y monocromática. Debido a que esta se encuentra polarizada, tiene dos componentes ortogonales las cuales son perpendiculares a la dirección de propagación y tienen la misma frecuencia.

Una de las formas de cambiar el estado de polarización de la luz monocromática es a través de retardadores. Esto en consecuencia del retardo de fase que se produce entre las componentes de la onda incidente. El tipo de luz polarizada resultante puede ser lineal, circular o elíptica.

Algunos materiales pueden producir este efecto de retardo de fase, tales como, la calcita, polaroids, algunos cristales (cuarzo, mica, etc.) e incluso algo tan cotidiano como una bolsa de plástico (esto aplicando cierta tensión mecánica).

Este tipo de materiales tienen la característica de que el retardo de fase depende del espesor del material, así como la diferencia relativa de camino óptico, esta diferencia está descrita por la siguiente expresión.

$$\Lambda = d(|n_o - n_e|) \quad (2.10)$$

Donde  $d$  corresponde al espesor del material,  $n_o$  es el índice de refracción ordinario y  $n_e$  el extraordinario.

Ahora bien, la diferencia de fase relativa también está relacionada con la expresión anterior, debido a que depende del espesor, así como de los índices de refracción de modo que está dada por:

$$\Delta\varphi = k_0\Lambda$$

Pero 
$$k_0 = 2\pi/\lambda_0 \quad (2.11)$$

Por lo que la ecuación anterior tendría la siguiente forma:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} d(|n_o - n_e|) \quad (2.12)$$

Donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda en el vacío. De esta ecuación se puede tomar el valor del retraso relativo que tiene la onda monocromática plana a través de una placa retardadora. Es importante destacar que, en este tipo de placas, la longitud de onda que atraviesa dicho dispositivo es la que cumple con la ecuación anterior, es decir son monocromáticos.

Algunos corrimientos de retraso relativo más utilizados son  $\Delta\varphi = 2\pi, \pi, \pi/2$ , cada una de estos cambios de fase nos da un tipo de polarización antes descritas o en su defecto una combinación de estos estados de polarización.

Para poder obtener los estados de polarización del haz de forma experimental, es importante tener bien caracterizados los elementos a utilizar. Por ello, fue necesario implementar un arreglo para el cual se utilizó un retardador de media onda. La figura 2.6 muestra el arreglo esquemático compuesto por un láser verde de 520 nm, un filtro espacial, con el fin de obtener el orden 0 del haz, una lente mediante, la cual se colima el haz del láser y se obtiene un frente de onda plano; un polarizador, una placa retardadora de  $\lambda/2$ , un analizador y un detector de ThorLabs PM100.

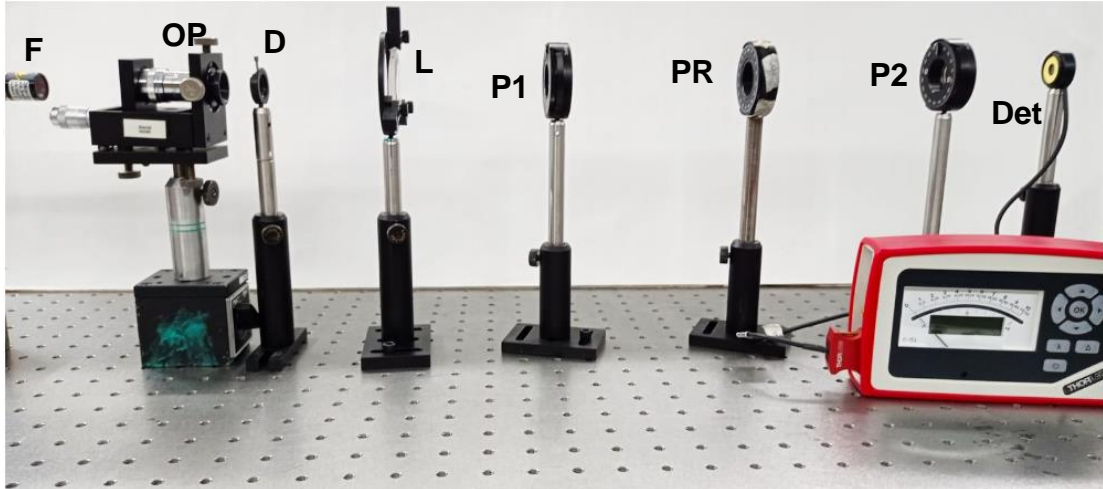


Figura 2.6 Arreglo esquemático y experimental para la obtención de intensidades. **F** (Fuente de luz blanca), **OP** (objetivo y pinhole), **D**(diafragma), **L**(lente), **P1**(polarizador), **PR**(placa retardadora, **P2**(analizador) y **DET**(detector de intensidad ThorLabs PM100).

Para la primera parte se alinea el láser, con una herramienta de alineación montada en un vástago. Esta herramienta se va desplazando por el eje óptico para ir verificando que el láser siga pasando por el orificio, lo cual indica que se encuentra en el mismo nivel. En dado caso de que esto no ocurra se procede a mover el láser con los tornillos milimétricos que tiene y así poder alinearlos de forma correcta.

Posteriormente se coloca un filtro espacial, después se coloca la lente a una distancia donde el punto generado por el filtro espacial coincida con la distancia focal de la lente, esto con el fin de colimar el haz y obtener un frente de onda plano. Se pone frente al objetivo, un diafragma con el cual solo deja pasar el orden cero del frente de onda. Se colocan los polarizadores P1 y P2, de tal modo que los ejes sean perpendiculares entre sí. Esto con el fin de obtener el mínimo de intensidad posible de la luz transmitida, debido a que no se puede obtener un valor nulo esto a causa del material con que están hechos los polarizadores y la longitud de onda para los que fueron diseñados. Después se introduce con una orientación arbitraria del eje del retardador de

$\lambda/2$  y así obtener su curva característica, es importante aclarar que en cualquier orientación del eje del retardador se obtiene una curva característica. Por último, se coloca un detector para medir las intensidades al ir girando la placa retardadora se coloca en una montura que permite giros cada  $5^\circ$ .

Con dicho experimento se obtuvieron las siguientes gráficas:

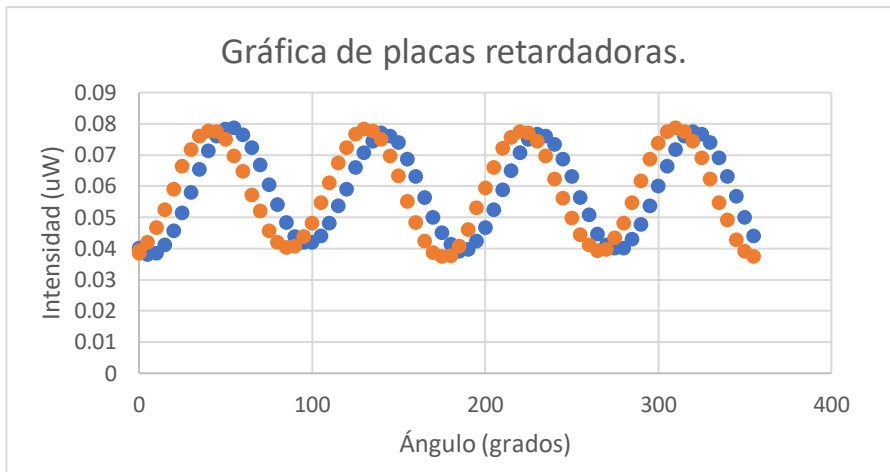


Figura 2.7 Resultados experimentales para la placa retardadora  $\lambda/4$  y  $\lambda/2$

Como se puede observar en la figura 2.7 el comportamiento obtenido de dicho arreglo, cuenta con mínimos y máximos  $\approx 45^\circ$ , así como un comportamiento periódico. La cual nos indica que dentro de un ciclo agregando una placa retardadora  $\lambda/2$  habrá 4 mínimos y 4 máximos en total en el rango de  $360^\circ$ . Se puede ver el desplazamiento de la curva anaranjada que corresponde a la placa retardadora  $\lambda/4$ , esto en consecuencia de que los periodos son más rápidos, en consecuencia, existe un corrimiento en las fases de la placa retardadora.

### 2.4.2 Ley de Malus

Ahora supongamos tenemos luz polarizada y se quiere analizar su comportamiento. Para ello solo se utilizará una fuente láser previamente alineada. Se colocan dos polarizadores P1 y P2 perpendiculares entre sí. En este caso se irá girando P2 que tiene la función de analizar la luz laser de salida, este se va girando cada  $5^\circ$ . La amplitud del campo eléctrico es  $E_0$  y la única componente que atraviesa es  $E_0 \cos\theta$  la cual es paralela al eje de transmisión, entonces tenemos para la máxima intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico:

$$I_0 \propto E_0^2$$

$$I \propto E_0^2 \cos^2\theta$$

Debido a que la constante de proporcionalidad es la misma, nos queda

$$I = E_0^2 \cos^2\theta \tag{2.12}$$

La ecuación (2.12) es conocida como Ley de Malus.

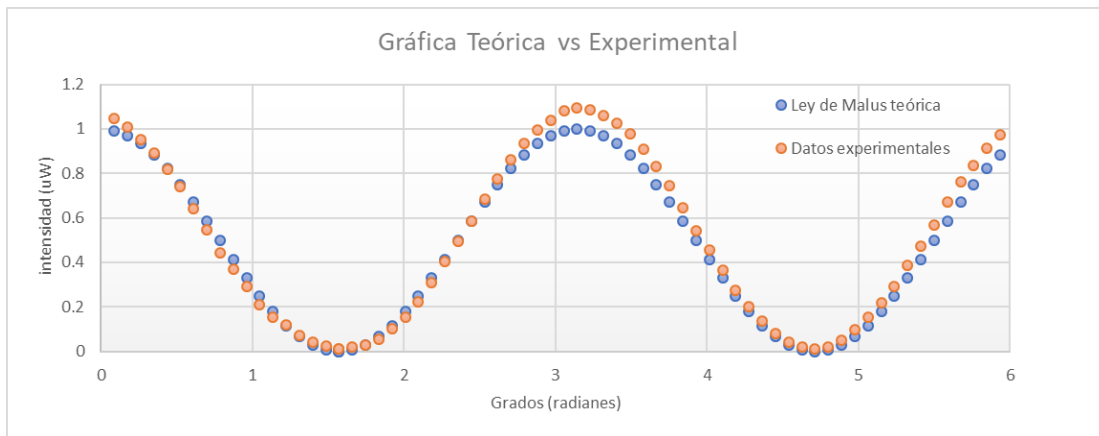


Figura 2.8 Comparación de la Ley de Malus respecto a la parte experimental.

El comportamiento de la Ley de Malus de forma teórica indicada en la Fig. 2.9, tiene la forma coseno cuadrado. Para poder obtener la curva es necesario tener los polarizadores paralelos, posteriormente el segundo polarizador o analizador es el que se irá girando cada  $5^\circ$  para tener mayor precisión y posteriormente realizar un promedio de las intensidades.

Como se puede observar la ley de Malus teórica y la parte experimental hay un cierto margen de error, el cual puede deberse ya sea por la persona misma, la calibración de los elementos ópticos, el medio donde se encuentra, etc. El cual es más notorio en la parte donde presenta máximos, ya que en los mínimos el error no es tan notorio. De igual manera, como indica la teoría se obtiene una onda cosenoidal en ambos casos, tanto en la parte teórica como la experimental.

Una vez ya estudiados los elementos clásicos y la forma de representarlos matemáticamente, así como la comprobación experimental, de los estados de polarización. Es posible obtener los estados de polarización denominados radial y espiral (ver figura 2.10).

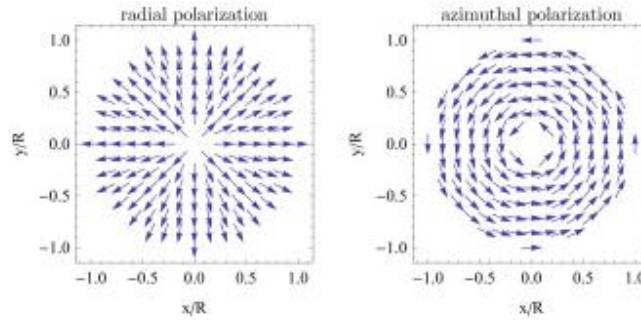


Figura 2.9 Dibujo esquemático de la distribución del campo eléctrico radial y espiral (azimutalmente) [12].

Como se puede observar, el tipo de polarización radial y espiral se pueden representar mediante estados de polarización lineal, esto debido a que solo se va variando el ángulo de inclinación píxel a píxel variando respectivamente. Para el caso de esta tesis, la variación de los ángulos de inclinación se realiza mediante la modificación de los niveles de gris píxel a píxel, los cuales se traducen en los cambios de fase los cuales generan estados de polarización deseados y estos cambios pueden ser medidos experimentalmente por medio de la medición de las intensidades.

La polarización radial, así como espiral tienen una distribución con simetría rotacional. En la actualidad son de gran interés de estudio, debido a los resultados teóricos y experimentales que han demostrado sus ventajas sobre las bien conocidas polarizaciones lineal y circular [13]. Algunos de los métodos que se han propuesto para su estudio, son arreglos interferométricos, etc. [14].

Esta propuesta es de nuestro interés debido a que LCD se puede hacer como un retardador variable. Una forma de obtener la polarización radial o espiral es mediante la manipulación de las polarizaciones lineales píxel a píxel, es decir, la distribución no es uniforme en toda el área [15]. Además, se debe de tomar en cuenta que en el centro no estará claramente definido. Esta región posee un alto grado de asimetría.

Para poder definir los haces tanto radiales como azimutales, utilizamos la matriz de Jones

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = f(r, \theta) \begin{pmatrix} -\text{sen}(\theta + \alpha) \\ \text{cos}(\theta + \alpha) \end{pmatrix}$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo respecto a la dirección azimutal,  $\mathbf{r}$  es el vector de posición. Y  $f$  es una función cualquiera dependiente de la posición y el ángulo [15].

Esta ecuación nos describe el comportamiento lineal, sin embargo, al manipular el ángulo  $\alpha = 0$  se puede obtener el estado de polarización tipo espiral para el caso radial  $\alpha = \pi/2$ .

Por lo que la ecuación cambiaría de la siguiente manera, en la cual se obtiene tanto polarización radial como espiral:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = f(r, \theta) \left( -\text{sen}(\alpha) \begin{pmatrix} \text{Cos}(\theta) \\ \text{Sen}(\theta) \end{pmatrix} + \text{Cos}(\alpha) \begin{pmatrix} -\text{Sen}(\theta) \\ \text{Cos}(\theta) \end{pmatrix} \right)$$



---

## Capítulo 3 Cristales Líquidos

---

### 3.1 Introducción.

Coloquialmente la experiencia nos dice que sólo hay tres estados de la materia, sólido, líquido y gaseoso. Sin embargo, existe un estado de la materia que exhibe la dualidad líquido-sólido. Los llamados cristales líquidos no son tan desconocidos, como se llegase a creer, ya que las aplicaciones que tienen las podemos encontrar en la vida cotidiana, tal es el caso de las pantallas planas de computadora, algunas televisiones, celulares, calculadoras, relojes, etc. [16]



*Figura 3.1 Ejemplos de aplicaciones de los cristales líquidos.*

Sin embargo, también podemos encontrar algunas de sus aplicaciones en las ciencias de la salud e industria. Para el caso de la óptica los cristales líquidos más utilizados son los termotrópicos los cuales están compuestos por moléculas orgánicas que pueden ser alargadas como varillas, en forma de disco o elipsoides. Este tipo de moléculas se pueden organizar en distintas configuraciones geométricas. Cada una de estas configuraciones determina el tipo de cristal líquido, ya que pueden ser orgánicos o como los cristales líquidos termotrópicos que contienen metales de transición tales como los metalomesogenos (conformado por átomos de metal) [17]

Ahora bien, es importante conocer las características de este material, es por ello, que una pregunta fundamental sería ¿qué son los cristales líquidos? Se

puede decir que es un tipo de material que presentan propiedades entre un sólido cristalino y un líquido el cual se puede crear a partir de ciertos elementos tales como el colesterol el cual presenta ambos comportamientos. Los cuales tienen distintas propiedades dependiendo del estado en que se encuentra, es decir, depende de la posición y dirección de las moléculas, debido a que son materiales anisotrópicos y se pueden deslizar o girar, esto al aplicarle alguna fuerza eléctrica o mecánica.

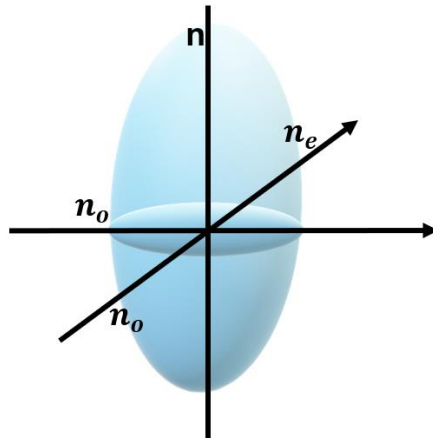
En otras palabras, son líquidos que tienen orden cristalino. Estos a su vez están en función de la temperatura o dependiendo de los componentes, concentración, sustitutos y así sucesivamente; esto a diferencia de los materiales isotrópicos, los cuales no dependen de la dirección en la que se lleguen a medir.

Dentro de estos cristales líquidos existen en muchas de las llamadas mesofases nemática, colestérica, esméctica y ferroeléctrica [17]. Las cuales son anisotrópicos, es decir, que dependen de la dirección en la que se midan, ya que no tiene el mismo comportamiento en cada región que se desee estudiar.

Este tipo de mesofases, se deben como ya se mencionó, a que los cristales líquidos están compuestos por moléculas alargadas en forma de varilla o planas en forma de discos, de igual manera muestran un cierto grado de orden rotacional. El tipo de interacción entre dichas moléculas es del tipo débiles es decir dipolo-dipolo; lo cual permite que se desplacen a lo largo de sus ejes, al aplicar cierto tipo de fuerza, ya sea eléctrica o magnética. Para su funcionamiento no requieren de mucha energía, algunos aparatos que contienen cristal líquido solo utilizan baterías, lo cual resulta una ventaja.

De igual manera otra característica de los cristales líquidos es que cuentan con dos índices de refracción, el ordinario  $n_o$  y el extraordinario  $n_e$  (es decir,

son materiales birrefringentes), dichos índices modifican los estados de polarización de la luz y se modifican al aplicar un campo eléctrico externo, como se puede observar en la fig.3.2. Las moléculas quedan orientadas en una dirección preferencial, que es conocida como eje director  $\hat{n}$ , la cual coincide con la dirección del eje óptico en un material anisotrópico óptico.



*Figura 3.2 Elipse de índices de refracción de cristal líquido.*

La primera observación de los cristales líquidos de la cual se tiene registro data del año 1888, descubierto por el botánico austriaco F. Reintzer a través de la observación del benzoato de colesterol, el cual presentaba dos puntos de transición al momento de calentarlo y llegar a su punto de fusión en  $145^\circ$  y el otro punto de fusión en  $178^\circ$ . De igual manera en 1889 F. Lehmann descubrió que este material posee propiedades ópticas, el cual le acuñó el nombre de cristal líquido. Hoy en día se conocen más materiales que poseen esta propiedad los cuales se pueden aplicar en diversas áreas [18]

### 3.2 Tipos de cristales líquidos

Existen diversas maneras de clasificar a los cristales líquidos, ya sea por cómo se alinean u ordenan las moléculas o como se fabrican. El método de fabricación es de los más utilizados debido a que se basa en las mesofases.

En esta se incluyen dos clasificaciones; los termotrópicos (dependen de la temperatura ya que presentan distintas transiciones entre las fases dependiendo si se le aplican altas o bajas temperaturas, normalmente se utilizan para aplicaciones electroópticas) y los liotrópicos (son aquellos que están constituidos por sustancias que se dispersan en un líquido, estas pueden ser anfifílicas, alcoholes, en donde las mesofases dependen de la concentración de dichos disolventes). Esta última es de particular interés en el campo de la fisicoquímica y entornos biológicos [19].

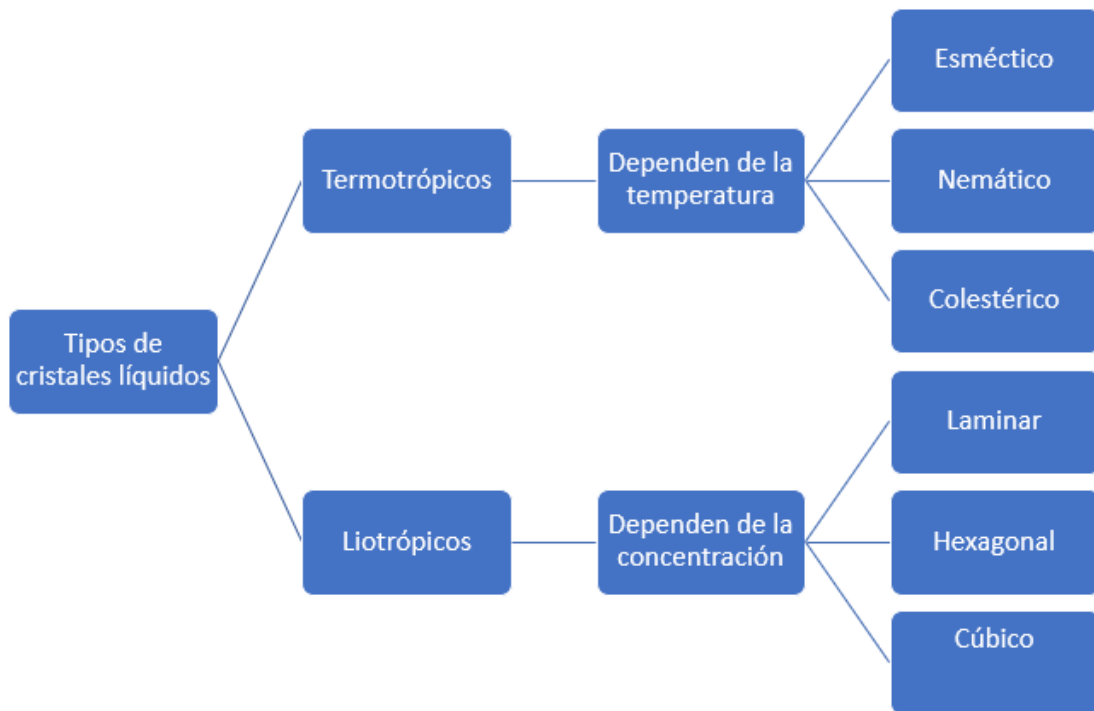


Figura 3.3 Clasificación de los cristales líquidos.

### 3.2.1 Cristales líquidos liotrópicos

Los cristales líquidos liotrópicos (LLC) son moléculas anfifílicas que tienen la capacidad de autoorganizarse en ensamblajes altamente ordenados pero fluidos y segregados por fases en presencia de un líquido polar añadido, como

el agua o detergentes [20]. En este tipo de fases el grado del orden depende de la proporción del disolvente. Una de las ventajas de este tipo de fases es su estabilidad debido a que dependen de la temperatura y a las concentraciones definidas [21].

Las principales estructuras de fase pueden ser: laminar, hexagonal, hexagonal invertida y cúbica mostrados en la fig.3.6. Sin embargo, dentro de estas cuatro fases se pueden dar otras composiciones ya que dependen del tensioactivo utilizado, así como las interacciones electroestáticas, concentraciones, etc. Algunas de las aplicaciones en las que se pueden encontrar los cristales líquidos liotrópicos están en los sistemas biológicos, en la industria farmacéutica, así como en algo tan cotidiano como los cosméticos [22].

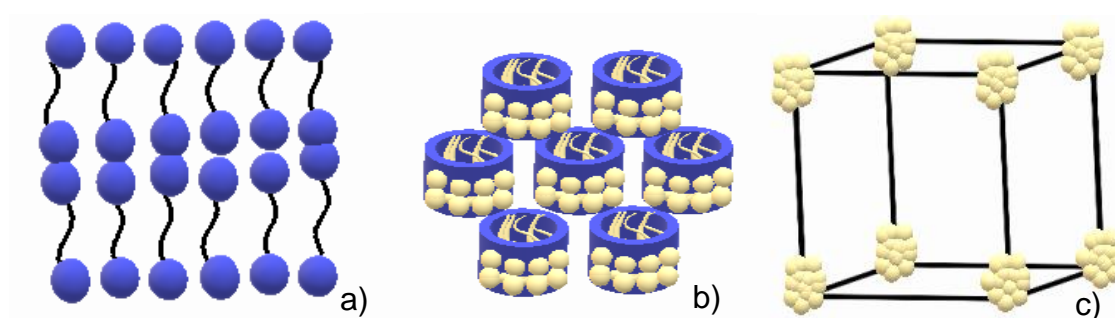


Figura 3.4 Representación esquemática de las estructuras de fases liotrópicas. a) laminar, b) hexagonal, c) cúbica.

### 3.2.1.1 Cristales líquidos poliméricos

Los cristales líquidos poliméricos (CLP), son materiales que presentan un gran ordenamiento en la estructura debido a la forma de varilla, la cual permite que sean capaces de auto ensamblarse y a su vez tener una baja densidad. Algunas de las propiedades que posee este tipo de material tienen que ver con la resistencia, la flexibilidad y la cristalinidad, las cuales dependen de la distribución del peso molecular, de igual manera, a la longitud del enlazador.

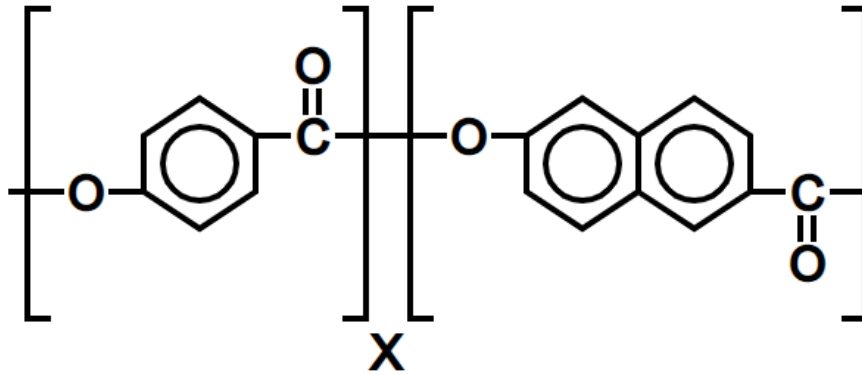


Figura 3.5 Representación esquemática de la estructura de un polímero.

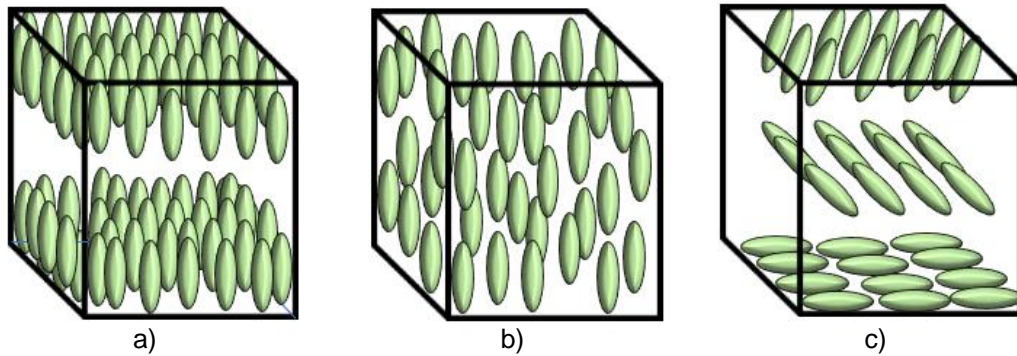
Este tipo de propiedades se pueden modificar o ajustarse de acuerdo con la mezcla con otros polímeros, dependiendo de las características que se deseen. Ya sea por medio de tensión mecánica, calor, aplicación de un campo externo eléctrico, etc.

Algunas de las aplicaciones de este tipo de material se encuentran dentro del sector deportivo (palos de hockey, tablas de snowboard, etc.) o el sector automotriz (refuerzo de neumáticos, piezas de transmisiones, etc.) Debido a sus propiedades mecánicas.

También se utilizan en dispositivos ópticos y electroópticos, por sus propiedades anisotrópicas, así como la flexibilidad que tiene al modificar sus propiedades ópticas tales como el índice de refracción, la transmitancia. Las cuales tienen aplicaciones en las telecomunicaciones, detección de la temperatura, etc.

### 3.2.2 Cristales líquidos termotrópicos

*El término “termotrópico” surge porque las transiciones que involucran estas mesofases se ven afectadas de manera más natural por el cambio de la temperatura [23]. Dentro de este grupo se encuentran las fases nemáticas, colestéricas y esmécticas, las cuales tienen la siguiente configuración.*



*Figura 3.6 Representación esquemática de algunos tipos de cristales líquidos termotrópicos, a) esméctico, b) nemático y c) colestérico.*

Como se puede observar en la fig. 3.6a en los cristales líquidos esméctico las moléculas se encuentran alineadas en cierta dirección, además de que forma ciertas capas. Para el caso de los cristales líquidos nemáticos presentados en la fig.3.6b estas no cuentan con una alineación como en el caso anterior. Por último, tenemos los colestéricos mostrados en la fig.3.6c en los cuales las capas de las moléculas de cristal líquido tienen cierto ángulo.

A continuación, se describirá detalladamente cada uno de los tipos de cristal líquidos mencionados anteriormente:

### 3.2.2.2 Cristales líquidos nemáticos.

Unos de los cristales líquidos más estudiados son los nemáticos, esto debido a las propiedades electroópticas que presenta, las cuales tienen distintas aplicaciones. Esta fase exhibe orden orientacional molecular de largo alcance, pero no posee un orden posicional, debido a que las posiciones a las que tienden las moléculas son aleatorias [24].

Es decir, al momento de aplicar algún campo externo sufre una reorientación las moléculas, pero no cambian de lugar.



Para el caso de esta tesis, se trabajará con el cristal líquido nemático torcido (TNLC por sus siglas en inglés), en el cual la alineación de las moléculas se encuentra de forma ortogonal a los vidrios utilizados, estas a su vez se alinean a una dirección preferencial como se puede observar en la fig. 3.7a, al combinar la dirección de pulido de ambas placas se genera dicho torcimiento véase en fig3.7.b. En consecuencia, debido a las propiedades de este material se pueden tener diversas aplicaciones, ejemplo de ello se pueden encontrar en las LCD's, moduladores, interruptores ópticos, así como aplicación en un medio de entrada en tiempo real para sistemas de procesamiento de datos ópticos coherentes (CODP) [21]

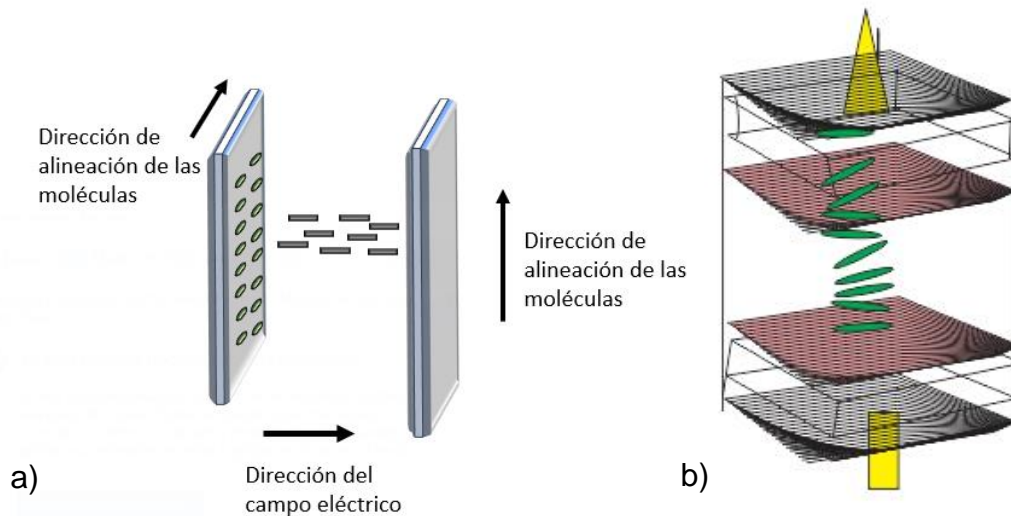


Figura 3.7 Esquema del funcionamiento de un a) cristal líquido nemático al momento de aplicarse un campo eléctrico, b) cristal líquido torcido en una pantalla.

En esta mesofase el cristal líquido es un medio anisótropo ópticamente inhomogéneo que actúa localmente como un cristal uniaxial, con el eje óptico paralelo a la dirección molecular [25]. Por otro lado, bajos ciertas condiciones dicho material puede actuar como un rotador de polarización, entre otros.

Para el caso en donde se presenta un retraso de fase, se considera que la propagación de la luz ocurre a lo largo del eje  $z$  y el ángulo de torsión varía linealmente, de modo que se tendría:

$$\theta = \alpha z$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de torsión. De este modo se tiene que el eje óptico es paralelo al plano  $x$ - $y$  y los índices ordinario y extraordinario cumplen que  $n_o > n_e$ , por lo que el coeficiente de retardo de fase sería:

$$\beta = (n_e - n_o)k_o$$

En este caso para variar el coeficiente de retardo en el cual no se conocen los índices de refracción, se aplica cierto voltaje lo cual hace que las moléculas se alineen en cierta dirección. Lo cual se traduce a un cambio de fase en la salida dependiendo del ángulo de torsión de la molécula, la cual depende del espesor, así como de la longitud de onda incidente.

---

## **Capítulo 4 Experimentos de estados de polarización.**

---

#### 4.1 Introducción.

Como ya se mencionó en el capítulo 2, las placas retardadoras son dispositivos ópticos, los cuales producen un desfase determinado, es decir, se conoce la diferencia de fase relativa que se generará, esto debido a que dependen del espesor del cristal, así como los índices de refracción, los cuales son proporcionados por el fabricante y de acuerdo con la ecuación (2.11) podemos conocer el desfase introduciendo los datos dados. Los más conocidos son los que tienen  $\Delta\varphi = \pi$  ó  $\pi/2$ , es decir  $\lambda/2$  y  $\lambda/4$ . Este tipo de placas se utilizan en un sistema de cambio fijo de fase, es decir, donde se requiere de ciertas especificaciones fijas, ya sea en el desfase, el índice de refracción, etc.

Para el caso de esta tesis se utilizó una pantalla de cristal líquido, en la cual no se conocen los índices de refracción ya que pueden ser uniaxiales o biaxiales dependiendo del cristal líquido del que se trate. El espesor de la pantalla de cristal líquido es fijo al igual que de las placas retardadoras. Sin embargo, los índices de refracción de la pantalla no son conocidos, como consecuencia de ello no se cuenta con valores fijos. Es decir, se tienen fases variables. Para el caso de la pantalla de cristal líquido hay una variación en el rango 50-200 niveles de gris. Estos niveles de gris representan un cambio en la fase.

Las pantallas de cristal líquido son pantallas pasivas, es decir, que no radian luz. Es por ello que para poder observar la imagen proyectada de la computadora a la pantalla se requiere de luz ambiental y en algunos casos polarizadores a  $45^\circ$  [26].

Para el dispositivo XGA2 SLM, el cual utiliza un material de cristal líquido nemático torcido, se utilizó un voltaje de 5V en corriente directa. Para tener mayor estabilidad en el comportamiento de dicho dispositivo se utilizó una

fuentes láser de 550nm. Esto debido a que es donde presenta un comportamiento lineal, es decir donde la gráfica se parece o tiende a ser una recta, así como un mayor rango dinámico de variación de intensidad. [20]. El tiempo de estabilización es de hora y media, antes de este tiempo los valores que se lleguen a tomar no son tan confiables por las fluctuaciones que llega a tener el láser.

Además de utilizar la pantalla de cristal líquido, también se utilizan elementos clásicos (polarizadores lineales y una placa retardadora  $\lambda/2$ ) para obtener estados de polarización. Y así poder comparar los elementos clásicos con la pantalla de cristal líquido.

#### 4.2 Experimento de polarización con elementos clásicos.

A continuación, se muestran los datos obtenidos para una placa retardadora, se hace el uso del arreglo experimental mostrado en la fig.4.1 el cual fue descrita anteriormente. Para así tener el comportamiento de dicho elemento.

Para el caso de la placa retardadora  $\lambda/4$  tenemos que el retraso en la fase está dado por la gráfica de la fig. 4.1.

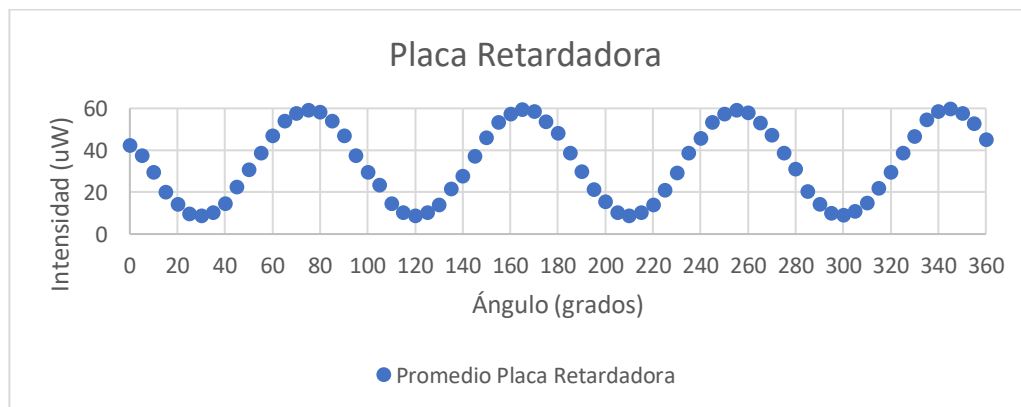


Figura 4.1 Gráfica de la placa retardadora utilizando una fuente láser.

Como se puede observar en la fig. 4.1 la gráfica presenta un comportamiento periódico, de forma de cosenoidal. Cuenta con una intensidad máxima de 60uW así como una mínima de 10uW.

Ahora bien, como ya se tiene la gráfica de referencia de la placa retardadora, ahora se le agrega una bolsa de plástico a la cual se le aplica cierta tensión mecánica. Se tiene la siguiente grafica donde se muestra una disminución en la intensidad tal y como se puede observar en la fig. 4.2.

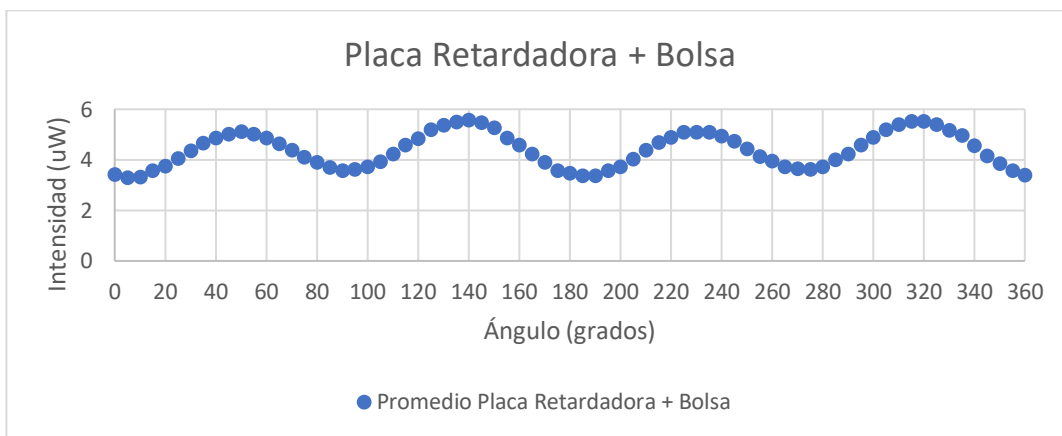


Figura 4.2 graficas del comportamiento de una placa retardadora y un objeto a estudiar.

Comparando la primera grafica dada para la placa retardadora  $\lambda/4$  se puede notar que presenta un comportamiento periódico al igual que la gráfica mostrada en la figura 4.2. Sin embargo, para el segundo caso este comportamiento ya no se percibe, esto es debido al objeto a estudiar. Ya que el objeto funge como una segunda placa retardadora con espesor variable como no se tiene control del espesor al ir aplicando la fuerza mecánica, ya que, en cierto punto puede que se le haya aplicado mayor o menor fuerza mecánica. De igual manera, la bolsa de plástico hace que el comportamiento en las amplitudes disminuya la intensidad aproximadamente 10%. Además de crear un corrimiento en la fase de aproximadamente  $20^\circ$  como se puede observar en la figura 4.2.

### 4.3 Experimento de polarización y objeto a estudiar con luz blanca.

Para saber el tipo de comportamiento de una placa retardadora de  $\lambda/2$  de forma cualitativa. Se usa el arreglo experimental mostrado en la fig.4.4. En el cual se utilizan una fuente de luz blanca, dos polarizadores (P1 y P2), los cuales tienen que estar alineados ya sea de forma paralela o perpendicular. Una vez alineados se procede a colocar la placa retardadora arbitrariamente, la cual se va girando cada  $5^\circ$ , para poder ir observando el comportamiento de la placa retardadora. De igual manera se colocó un atenuador de 2.5 esto para poder controlar la luz que pasa por el sistema, ya que sin este se satura la cámara SONY Cyber-shot con una resolución de 16.2 megapíxeles.

Como es un experimento cualitativo, solo se puede observar al momento de manipular el polarizador cuando atraviesa la luz blanca o no a través de la placa retardadora al ir girando cada  $5^\circ$ . La cual se puede observar por el segundo polarizador(P2) el cual tiene la función de analizar el elemento óptico.

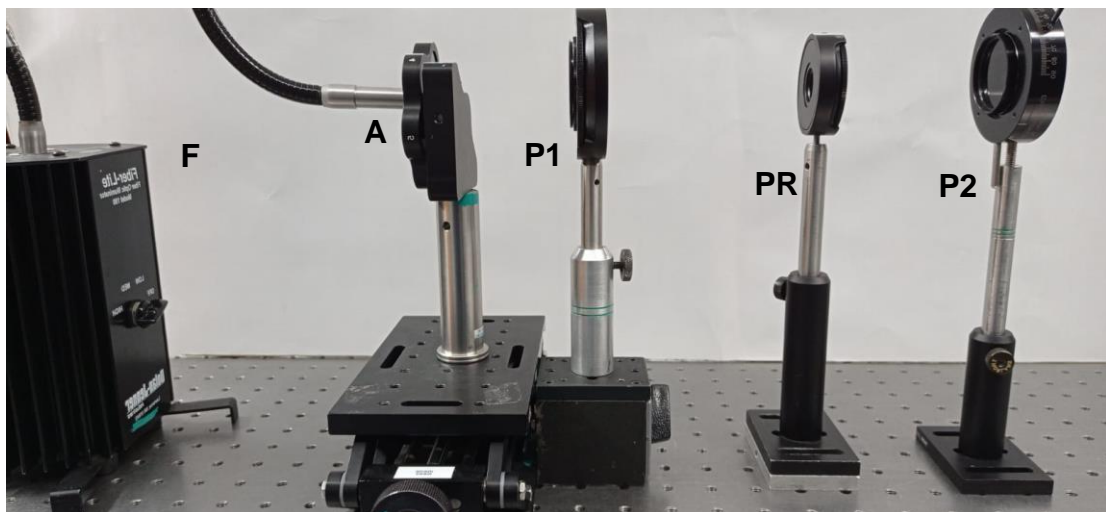
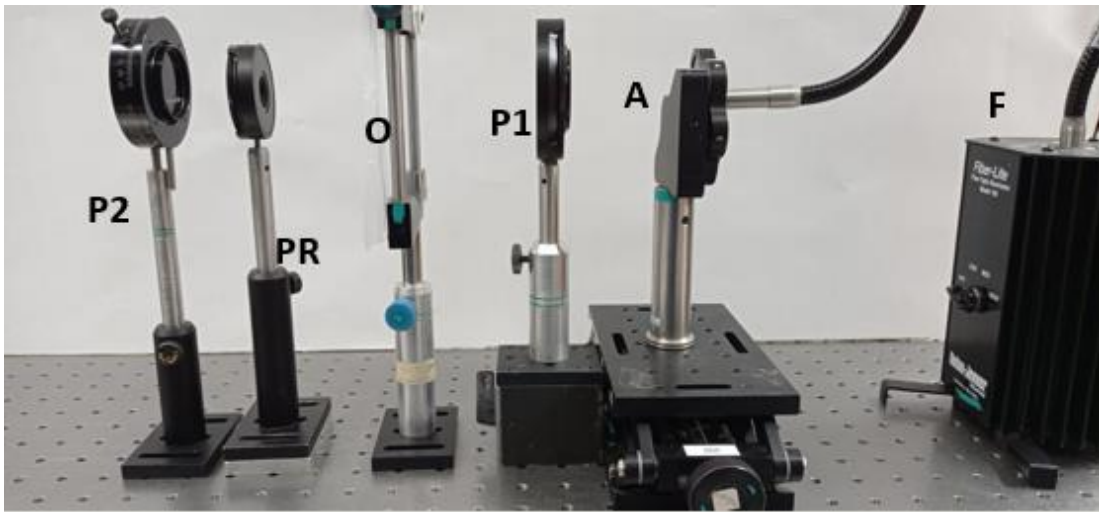


Figura 4.3 Arreglo experimental con fuente de luz blanca para la observación del comportamiento de la placa retardadora  $\lambda/2$ . **F**(Fuente), **A** (Atenuador), **P1**(Polarizador), **PR** (placa retardadora), **P2**(polarizador analizador).

Para el segundo caso se añade una bolsa de plástico a la cual se le aplica cierta tensión mecánica, tal y como se muestra en la fig. 4.4 y así tener una referencia para la polarización que ocurre, dicho material será el objeto de estudio en cual se comparará con la placa retardadora la cual sirve como referencia del comportamiento.

Es importante tener la bolsa sin pliegues, debido a que al contar con estos la luz incidente se refleja y no mostraría el efecto de polarización de forma correcta. Al aplicar tensión mecánica se forman pequeñas líneas que actúan como una rejilla, la cual deja pasar ciertas longitudes de onda, estas se pueden observar al momento de tener los polarizadores en paralelo, ya que la dirección en la que se alinean las moléculas coincide con la máxima transmisión de intensidad



*Figura 4.4 Arreglo experimental con fuente de luz blanca F(Fuente), A (Atenuador), P1(Polarizador), O (bolsa de plástico), PR (placa retardadora), P2(polarizador analizador).*



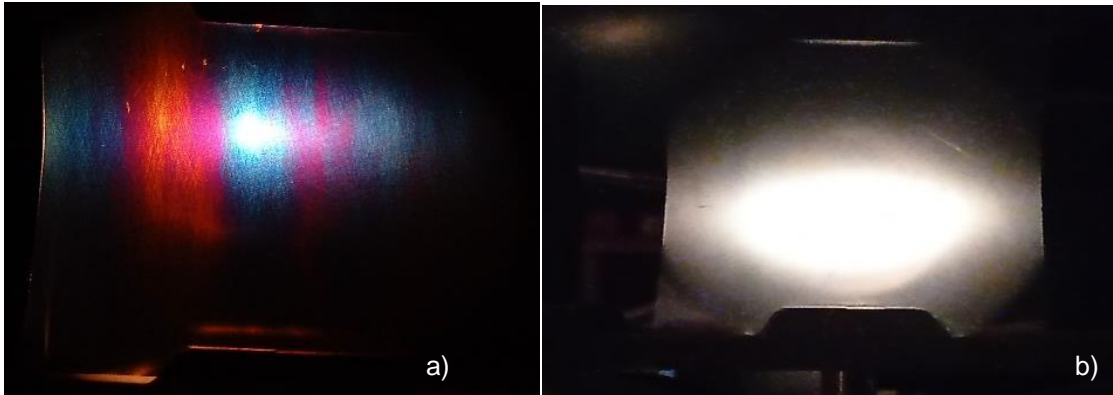


Figura 4.5 a) Polarizadores paralelos y b) polarizadores cruzados.

Puesto que la bolsa al tener o no cierta tensión mecánica funge como otra placa retardadora, esto se puede notar en los cambios de intensidad al ir moviendo la placa retardadora. Los cuales a través de la bolsa se perciben por medio de distintos colores, se puede tomar como un retardador con espesor variable se coloca en lugar de la placa retardadora, al momento de mover el analizador, siendo el color azul la mínima intensidad obtenida.

Para el caso de la pantalla de cristal líquido este fenómeno se puede distinguir con mayor claridad, debido a que se utilizan distintos niveles de grises, de 0 a 255. Para el caso donde se rota el analizador se fija un nivel de gris el cual se tiene como referencia. En esta prueba se usó el nivel de gris 240 a la pantalla de cristal líquido.

La difracción que se observa en la figura 4.6a es causado el tamaño que hay en cada píxel, es por ello por lo que se puede observar una red de difracción. Sin embargo, en la fig.4.6b no se observa porque la placa es homogénea. Es decir, la fase es la misma en toda la placa retardadora, mientras que en la pantalla de cristal líquido se tiene retardadores variables en cada uno de los pixeles, en consecuencia, de que se le puede asignar cualquier nivel de gris.

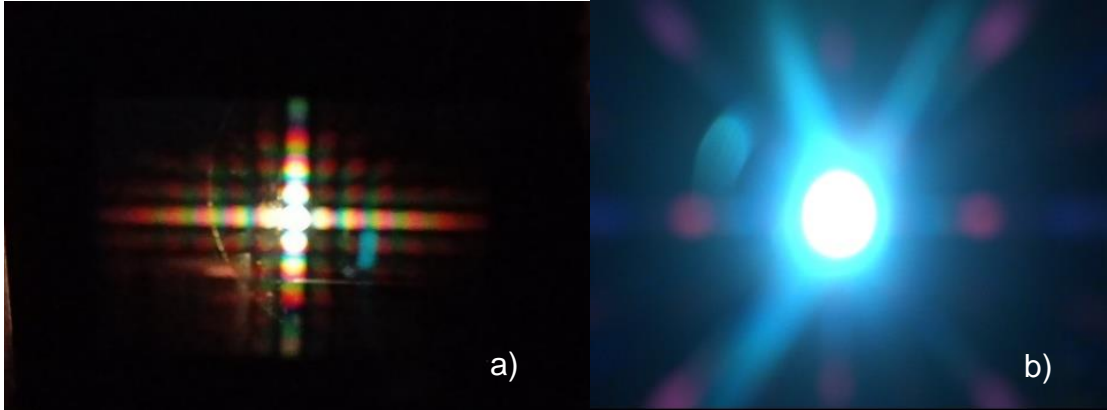


Figura 4.6 Efecto de difracción. a) LCD con fuente de luz blanca incidiendo directamente, b) placa retardadora  $\lambda/2$  con fuente de luz blanca incidiendo directamente.

Para el caso en donde se utiliza la placa retardadora se puede notar dos mínimos en el cambio de intensidad esto girando el analizador. Mientras que para la pantalla de cristal líquido también obtenemos el mismo resultado. Solo que para este caso es importante observar el orden cero, debido a que aparece el efecto de difracción que se observa al incidir la luz blanca que pasa por la pantalla que se encuentra en medio de los dos polarizadores, este efecto se puede observar en la fig. 4.6<sup>a</sup>. Para el caso de la placa retardadora se tiene que la superficie es homogénea, lo cual quiere decir que se comporta de la misma manera en cualquier punto de la superficie.

#### 4.4 Experimento de polarización con pantalla de cristal líquido (LCD)

Para el caso del experimento con la pantalla esta se coloca en el sitio donde estaba colocada la placa retardadora tal y como se muestra en la figura 4.7. Esto con la finalidad de analizar los efectos de polarización al ir cambiando los niveles de gris de 0 a 255 en paso de 5.

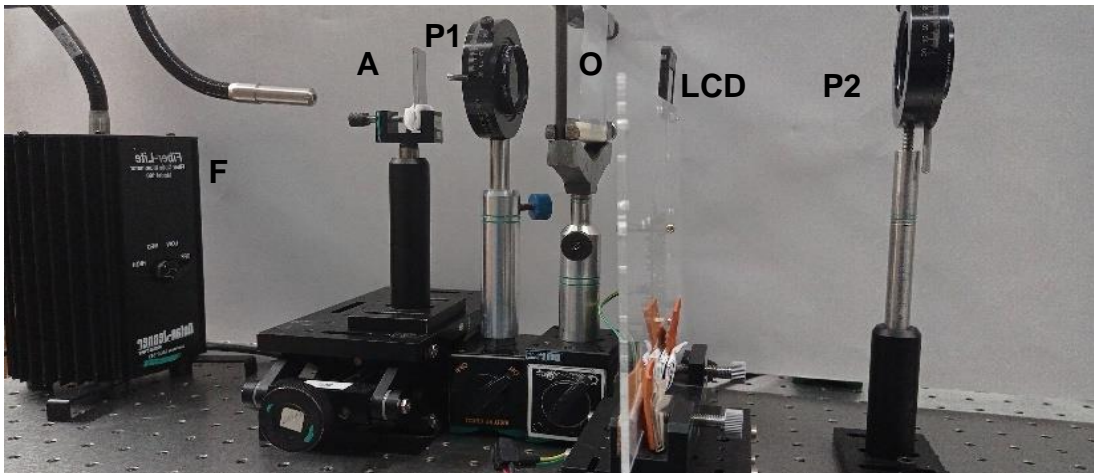


Figura 4.7 Arreglo experimental con fuente de luz blanca agregando una LCD y un objeto a estudiar para la observación del efecto de polarización **F**(Fuente de luz blanca), **A**(atenuador), **P1**(polarizador 1), **O**(bolsa de plástico con cierta tensión mecánica), **LCD**(pantalla de cristal líquido), **P2**(analizador)

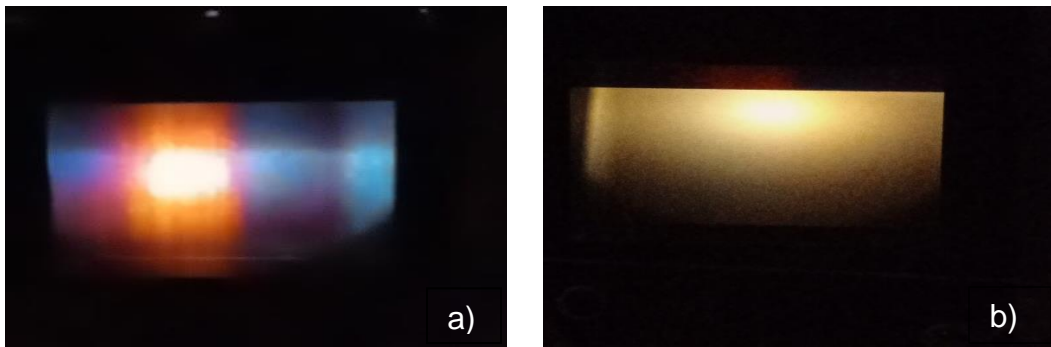
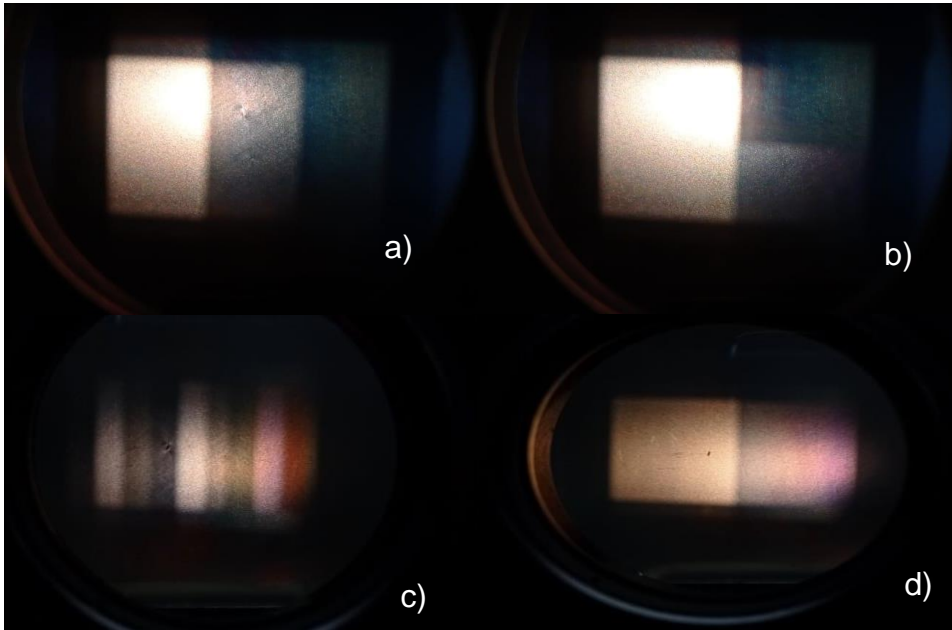


Figura 4.8 Bolsa de plástico a través de a) Niveles de gris 0-50 y b) Niveles de gris 200-255.

#### 4.4.1 Experimento con LCD variando la distribución de niveles de gris.

A continuación, se muestra un par de imágenes en donde se varía el nivel de gris, así como la configuración de esta. Para ello se utilizó una bolsa de plástico a la cual se le aplica cierta tensión mecánica. Se ilumina con una fuente de luz blanca y por último se despliega en la pantalla los niveles de gris dados.



*Figura 4.9 Bolsa de plástico sometida bajo cierta tensión mecánica iluminada con ciertas configuraciones de nivel de gris. a) configuración vertical con nivel de gris 255,60 y 0 b) configuración una vertical y dos horizontales con niveles de gris 255,60,0 c) configuración con tres niveles de gris c) configuración vertical con dos niveles de gris*

Como se puede observar en la fig.4.9 la pantalla de cristal líquido tiene mayor ventaja que un polarizador o una placa retardadora, ya que se puede ir variando las distribuciones de los niveles de gris, dependiendo de la región a la que se quiera cambiar la fase. Esto se debe a la composición de pixeles que tiene, ya que a cada pixel se le puede asignar un nivel de gris o como se muestra en la fig. 4.9 se pueden crear configuraciones dependiendo de lo que se desee analizar.

#### 4.5 Experimento de polarización y objeto a estudiar con una sola longitud de onda

Para esta parte del trabajo, una vez obtenidas las gráficas de referencia para una longitud de onda de 550nm y utilizando la placa retardadora de  $\frac{\lambda}{2}$ , se procede a montar el arreglo experimental mostrado en la Fig.4.3 en donde a la LCD se le asigna distintos niveles de grises en donde presenta un

comportamiento lineal [27]. Esto con la finalidad de poder obtener un comparativo entre ambos dispositivos donde presentan un comportamiento lineal.

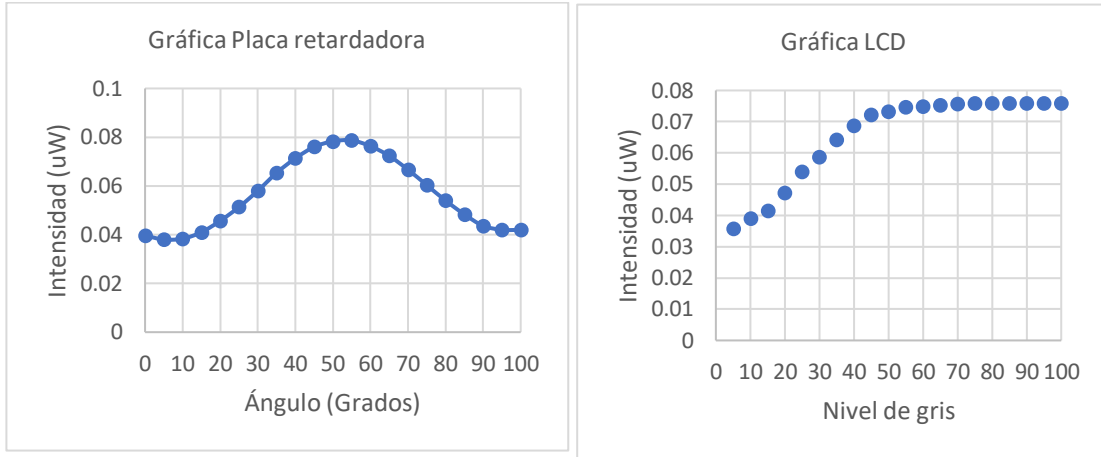


Figura 4.10 Gráficas comparativas a) placa retardadora $\frac{\lambda}{2}$ . b) LCD con distintos niveles de grises con una variación de 5 pasos.

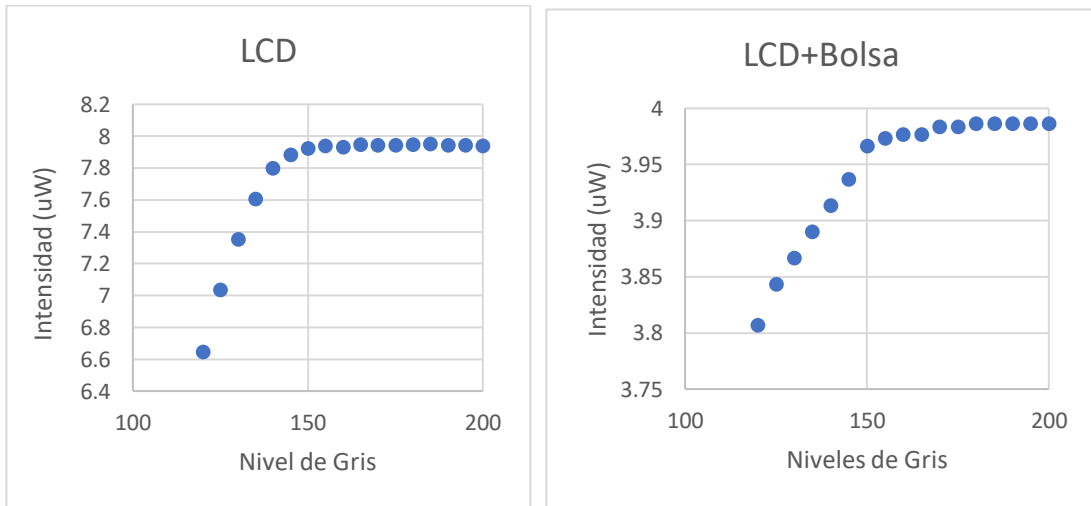


Figura 4.11 Gráficas del comportamiento de la LCD vs LCD más objeto a estudiar.

En el caso donde se coloca una bolsa de plástico, se puede observar que existe un retraso en la longitud de onda como se puede observar en la gráfica de la fig. 4.11a., esto debido a que se le está aplicando una tensión mecánica. De igual manera se puede observar la disminución de intensidad al colocar el objeto a estudiar es aproximadamente el 50%.

Si se compara el comportamiento entre una bolsa normal y una bolsa con cierta tensión mecánica, se puede observar que el retraso es mayor en donde no se le aplica o es casi nula la tensión, esto debido al grosor. En cambio, al aplicarle una tensión de acuerdo con la dirección de alineación de las moléculas, el grosor disminuye por lo que el retraso es mínimo. De igual manera depende del tipo de material con que esté fabricado. Este material funge como si se tratara de una placa retardadora.

---

## **Capítulo 5 Resultados.**

---

## 5.1 Introducción.

En este capítulo se corroboran los resultados obtenidos por la autora Pérez [28], con la finalidad de poder obtener la parte donde presenta linealidad la curva previamente caracterizada. Además de tomar el tiempo donde el diodo láser verde (550nm) se estabiliza y tiene mejor respuesta. También se describe el arreglo experimental utilizado. Posteriormente se muestra la gráfica de calibración la cual nos da la fase en función de los niveles de gris. Y por último se realiza una serie de cambios de fase en distribuciones controladas.

## 5.2 Descripción del arreglo experimental.

Para este caso se utiliza el arreglo experimental mostrado en la fig. 5.1 para el cual se utilizó una fuente de diodo laser de 550nm previamente alineado. Después de coloca un objetivo junto con un pinhole con el cual se busca el orden cero para obtener la mayor intensidad. Sin embargo, como se obtiene un frente de onda esférico, pero se ocupa un frente de onda plano, entonces se coloca una lente convexa para obtenerlo.

Posteriormente se colocaron dos polarizadores (P1 y P2) alineados de forma paralela, aunque también se puede alinear de forma perpendicular. Donde el segundo polarizador cumple la función de analizador. Después se coloca la pantalla de cristal líquido y por último se coloca el detector con el cual se medirá la intensidad final.

Es importante fijarse en las características de la pantalla de cristal líquido a utilizar, debido a que son algo delicadas en su funcionamiento. Para el caso de esta tesis la pantalla tiene las características mostradas en la fig.5.2.



LCD Panel	
Type	Active matrix TFT transmission mode panel using twisted nematic liquid crystal material.
Spatial resolution	1024 (horizontally) by 768 (vertically) monochrome pixels
Pixel pitch <sup>1</sup>	26 $\mu$ m (H) x 26 $\mu$ m (V)
Pixel dimensions	23 $\mu$ m (H) x 16 $\mu$ m (V)
Panel dimensions <sup>2</sup>	Active area 26.6mm (H) x 20.0mm (V)
Transmission <sup>3</sup>	18% typical at 600nm
Fill factor	54% with opaque metal mask between pixels
Contrast ratio <sup>4</sup>	>100:1 readily achievable on axis

Interface General	
Operating voltage	5V $\pm$ 10%
Power consumption: Without backlight	4.3W typical
With backlight at full power	6W typical
Operating temperature range: Interface	-10 to 70°C
LCD panel	0 to 70°C
PCB dimensions including mounting posts <sup>5</sup>	125mm (long) x 65mm (wide) x 27.5mm (high) approx.

Figura 5.1 Tabla de características de la pantalla de cristal líquido utilizado [24].

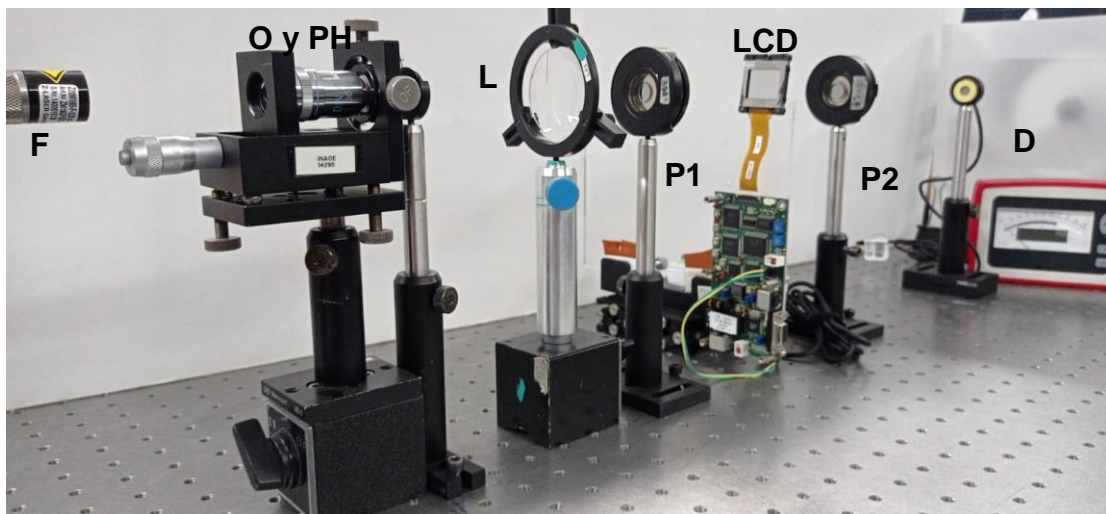


Figura 5.2 Arreglo experimental para la caracterización de la LCD. **F**(Fuente diodo láser 550nm), **O y PH**(Objetivo y pinhole), **L**(Lente), **P1**(Polarizador), **LCD**(Pantalla de Cristal Líquido), **P2**(Analizador) y **D**(Detector marca ThorLabs PM100)

### 5.3 Calibración del cambio de fase como función de los niveles de gris de la LCD.

Para la calibración de la pantalla de cristal líquido previamente caracterizada, se utiliza el arreglo experimental mostrado en la fig.5.2. Se generan niveles de gris de 0-255 con cambios de 5 niveles de gris (esto para mantener como cierta similitud al momento de medir con una placa retardadora). Los cuales se utilizan para ir midiendo las intensidades de cada nivel de gris para así obtener donde la curva que presenta linealidad. Se muestran los resultados obtenidos para poder calibrar la pantalla de cristal líquido en la figura 5.3.

Como se puede observar presenta linealidad de 0-50°, y ya después tiene un comportamiento constante.

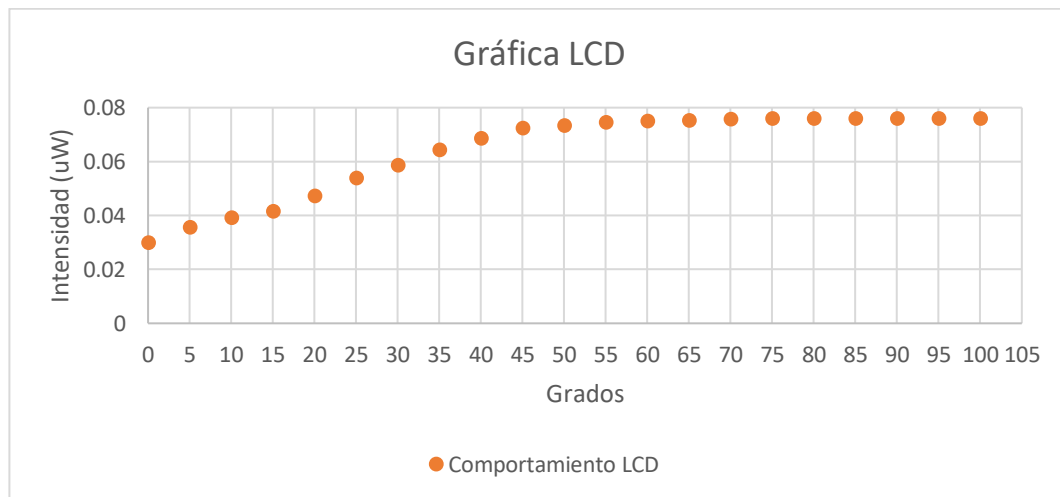


Figura 5.3 Gráfica de la pantalla de cristal líquido en la cual se observa el cambio de fase como función de niveles de gris.

Después de tomar los datos de la pantalla de cristal líquido, se procede a utilizar el mismo arreglo descrito en la fig.5.2 sin embargo, ahora se cambiará

la LCD por una placa retardadora  $\lambda/2$ . Se procede a tomar los datos correspondientes y se obtiene la gráfica de la fig.5.4

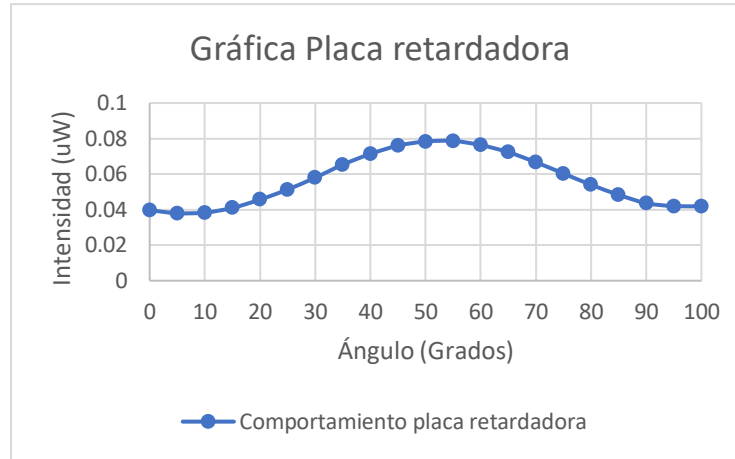


Figura 5.4 Gráfica de los datos obtenidos de la placa retardadora.

Para este caso, al obtener los datos de la placa retardadora, solo se tomará la primera curva de la cual la parte lineal es de interés. Esto debido a que es la parte que nos interesa para poder calibrar la pantalla de cristal líquido.

#### 5.4 Resultados.

Una vez obtenidos los datos tanto de la pantalla de cristal líquido como la placa retardadora. Se procede a tomar la parte lineal de ambos para así encontrar la equivalencia del nivel de gris con la fase y así obtener la gráfica de calibración.

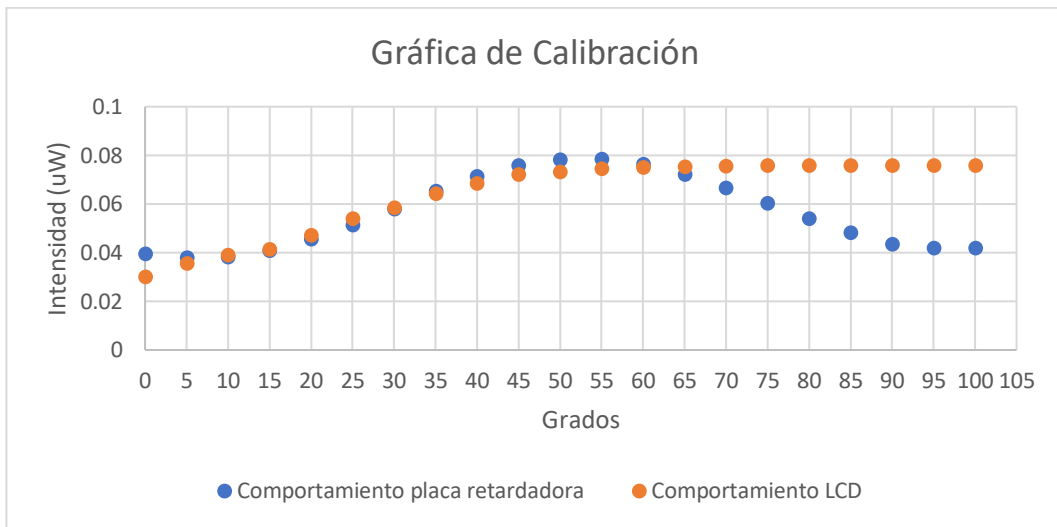


Figura 5.5 Grafica de calibración de la LCD, en la cual se obtienen las fases a través de una placa retardadora  $\lambda/2$ .

### 5.5 Cambios de fase en distribuciones controladas.

Una vez obtenida la gráfica de calibración de la pantalla de cristal líquido. Se procede a realizar imágenes en las cuales se va variando la distribución de los niveles de gris. Esto con la finalidad de estudiar ciertas áreas de algún objeto.

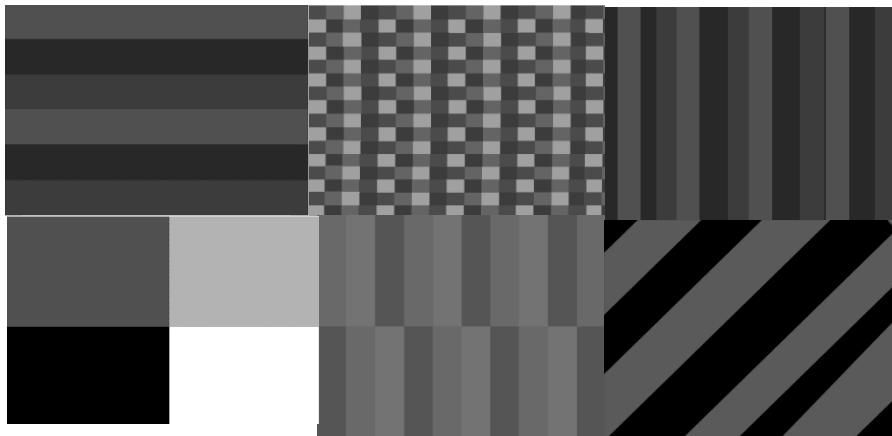


Figura 5.6 Distribución en las pantallas variando los niveles de gris.

Ahora con las distribuciones dadas por la figura 5.6, se pueden generar los estados de polarización radial y espiral. Esto se debe a que ya se conocen los cambios de fases que genera cada nivel de gris a partir 105 a 165. Se encontró que a cada nivel de gris le corresponde un retardo de aproximadamente  $5^\circ$ . Con esto se pueden generar distribuciones de forma radial y de igual manera estudiar algún objeto.

---

## **Capítulo 6 Conclusiones**

---

## 6.1 Introducción

A continuación, se muestran las conclusiones de esta tesis.

La pantalla de cristal líquido funciona como una placa retardadora variable. Con la cual se pueden reproducir los mismos efectos que con los elementos clásicos.

Al realizar la comparación entre la placa retardadora  $\lambda/2$  y la LCD, se observa que presentan un comportamiento similar. Con la cual se puede analizar de manera cualitativa el efecto de polarización al colocar una bolsa de plástico con cierta tensión mecánica.

Al ir variando los niveles de grises en la LCD en donde cuenta con polarización lineal se puede apreciar cómo va cambiando la tonalidad en la bolsa, así como en la coincidencia de la parte paralela y perpendicular. Lo cual nos indica que la pantalla actúa como una placa retardadora.

Al realizar la comparación entre la placa retardadora  $\lambda/2$  y la LCD, se observa que ambos presentan un comportamiento similar cuando la placa retardadora se encuentra en el rango de  $5^\circ$  a  $65^\circ$  y la pantalla de cristal líquido en un nivel de gris de 105-165.

Se encontró que los distintos niveles de gris generados a través de la pantalla tienen su correspondencia a la posición en grados del retardador  $\lambda/2$ .

Además, los resultados muestran un retardo de fase para cada nivel de gris de la pantalla por lo tanto es más dinámico, lo cual es una ventaja respecto del retardador fijo. Como cuenta con un retardo de fase en cada nivel de gris se pueden obtener cambios de fase en distribuciones controladas.

Con las distribuciones controladas se pueden generar los estados de polarización radial y espiral. Ya que cada nivel de gris genera un retardo de fase de aproximadamente  $5^\circ$ .

## 6.2 Trabajo a futuro.

Como trabajo a futuro se tiene contemplado

- Buscar un área de aplicación para la pantalla de cristal líquido.
- Aplicación en la medicina de los estados de polarización espiral y radial.
- Establecer un programa para implementar orientaciones de polarización pixel a pixel.



## REFERENCIAS

- [1] Collett, E. (2005). *Field guide to polarization v. FG05*. SPIE Press.
- [2] *La naturaleza de la luz, corpuscúlos y ondas*. (s/f). Día de la Luz. Recuperado el 5 de junio de 2023, de <https://www.diadelaluz.unam.mx/leer/66/la-naturaleza-de-la-luz-copercululos-y-ondas>
- [3] Peter Anton Pav, "Óptica del siglo XVIII: el conflicto cartesiano-newtoniano", *Appl. Optar.* 14 , 3102-3108 (1975)
- [4] Rodríguez. M. J "polarización de la luz: conceptos básicos y aplicaciones en astrofísica" *Articles Rev. Bras. Ensino Fís.* 40 (4) • 2018 • <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0024>
- [5] D. Malacara. (2015) "Óptica Básica". 3° edición. Fondo de Cultura Económica.
- [6] E. Hecht. (2000). "Óptica". 3° edición. Addison Wesley.
- [7] R.C. Jones, A new calculus for the treatment of optical systems, *IV Journal of the Optical Society of America*, 32, 486-493 (1942).
- [8] G.G. Stokes, On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources, *Trans. Camb. Phil. Soc.*, 9, (1852), p. 399. Reimpreso en *Mathematical and Physical Papers Volume 3*, Cambridge University Press, London, 233 (1901)
- [9] Born., M., Wolf (1999). *Principles of Optics*. Cambridge University Press.
- [10] Jerry E. Solomon, "Polarization imaging," *Appl. Opt.* 20, 1537-1544 (1981)
- [11] A.Gerard, J.M.Burch, "Introduction to matricial methods in optics", John Wiley & Sons, 1975.

- [12] Tobias Ehmke, Tim Heiko Nitzsche, Andreas Knebl, and Alexander Heisterkamp, "Molecular orientation sensitive second harmonic microscopy by radially and azimuthally polarized light," *Biomed. Opt. Express* 5, 2231-2246 (2014)
- [13] R. Dorn, S. Quabis, and G. Leuchs, "Sharper focus for a radially polarized light beam," *Phys. Rev. Lett.* **91**, 233901 (2003).
- [14] G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir and S. Jackel, "Spatially variable retardation plate for efficient generation of radially and azimuthally polarized beams" , *Opt. Commun.*, 281,732-738(2008).
- [15] Sánchez, V.R (2011). *Síntesis y caracterización de haces de luz con distribuciones de polarización no-uniformes*. Universidad Complutense de Madrid
- [16] Chartier, G. (2005). "Introduce to Optics". New York, NY 10013, USA: Springer Science + Business Media, Inc.
- [17] Khoo, I.-C. (2007). *Liquid Crystals* (B. E. A. Saleh, Ed.). Wiley.
- [18] Hanxing Zheng, Chung K. Lai, and Timothy M. Swager (Ed.).(1994). *Transition Metals in Highly Correlated Discotic Phases: Designing Metallomesogens with Selected Intermolecular Organizations* (Vol. 6, Número 2). *Chem. Mater*
- [19] E. Otón, J. M. Otón, M. Caño-García, J. M. Escolano, X. Quintana, and M. A. Geday, "Rapid detection of pathogens using lyotropic liquid crystals," *Opt. Express* 27, 10098-10107 (2019)
- [20] H. Kawamoto, "The history of liquid-crystal displays," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 4, pp. 460-500, April 2002, doi: 10.1109/JPROC.2002.1002521.
- [21] Gin, D.L., Pecinovsky, C.S., Bara, J.E., Kerr, R.L. (2007). *Functional Lyotropic Liquid Crystal Materials*. In: Kato, T. (eds) *Liquid Crystalline*

Functional Assemblies and Their Supramolecular Structures. Structure and Bonding, vol 128. Springer, Berlin, Heidelberg.

[22] Contreras, M. H. *Cristales Líquidos. Bol. Soc.Mex.Fís.* 28-3,2014

[23] Priestly, E. (2012). *Introduction to liquid crystals* (E. B. Priestley, P. J. Wojtowicz, & P. Sheng, Eds.; 1975a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2175-0>

[24] Khoo, I.-C., & Wu, S.-T. (1992). *Optics and nonlinear optics of liquid crystals*. World Scientific Publishing.

[25] J. Grinberg and A. D. Jacobson, "Transmission characteristics of a twisted nematic liquid-crystal layer\*," *J. Opt. Soc. Am.* 66, 1003-1009 (1976)

[26] Perez-Esquivel, N., Granados-Agustín, F. S., Villalobos-Mendoza, B., Aguirre-Aguirre, D., Percino-Zacarías, E., & Cornejo-Rodríguez, A. (2018, September). Characterization of a transmissive spatial light modulator using four different wavelengths. In *Optical Manufacturing and Testing XII* (Vol. 10742, pp. 265-271). SPIE.

[27] Opto, C. (2004). LCD Interface Type 3 Test Schedule.

[28] Esquivel, G. N. P. (2018). *Análisis de cambio de fase local por polarización implementando un SLM*. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica