



# Práctica 2

## Generación de haces estructurados con polarización heterogénea



Carlos Esteves Flores      Maricruz Rosas Velázquez  
[carlos.stvs@ciencias.unam.mx](mailto:carlos.stvs@ciencias.unam.mx)      [maricruzrv@ciencias.unam.mx](mailto:maricruzrv@ciencias.unam.mx)

Facultad de Ciencias  
Universidad Nacional Autónoma de México

*Fecha de entrega: 12 de abril de 2023*

### Resumen

Se calculó el ángulo  $\theta_0$  de los ejes de transmisión de dos polarizadores y el eje rápido de un retardador de 1/4 de onda, obteniendo un valor de  $(18.61 \pm 0.03)^\circ$  para el LP1,  $(27.51 \pm 0.05)^\circ$  para el LP2, y  $(17.47 \pm 0.03)^\circ$  para el retardador de 1/4 de onda. Después, se caracterizó el retardo de fase en función del nivel de gris enviado en cada píxel del SLM-LC (modulador de cristal líquido), y con ello, se generaron haces de 5 diferentes distribuciones (cuadrantes, espiral, cardiode, coseno y axicon), a los que se les determinó su estado de polarización calculando las componentes  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$  del vector de Stokes, a partir de las imágenes polarimétricas capturadas.

*Palabras clave:* Polarizador, SLM-LC, Retardador de fase.

## 1. Introducción

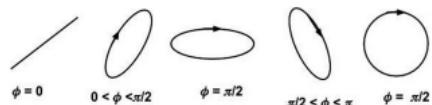
### 1.1. Polarización

Es una propiedad de las ondas, la cual describe cómo la oscilación de una onda luminosa u otra radiación electromagnética están restringidas a una dirección de propagación. Si una onda electromagnética no tiene orientación preferencial se dice que no está polarizada; pero si existe una dirección preferencial se dice que está polarizada.

Existen diferentes tipos de polarización: la polarización elíptica, lineal y circular. Estos estados de polarización pueden ser descritos usando la fase  $\phi$  de la onda electromagnética, como se muestra en la Figura 1.

### 1.2. Polarizadores

Un filtro polarizador o polarizador es un filtro óptico formado por un material que transmite de forma selectiva una determinada dirección de oscilación del campo eléctrico de una onda electromagnética como la luz.



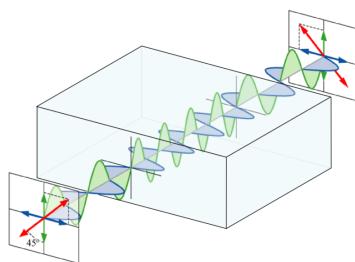
**Figura 1.** Diferentes tipos de polarización: lineal, elíptica y circular.[3].



**Figura 2.** Polarizador comercial [1].

### 1.3. Retardadores de fase

Un retardador de fase o placa retardadora es un dispositivo óptico que altera el estado de polarización de una onda de luz viajando a través de él. Funciona produciendo un desfase entre las dos componentes perpendiculares de polarización.



**Figura 3.** Onda electromagnética a través de un retardador de fase.[2].

### 1.4. Modulador espacial de cristal líquido

Un modulador de luz espacial (SLM) es un dispositivo que impone alguna forma de modulación espacialmente variable en un haz de luz., un SLM-LC lo hace a partir de celdas de cristal líquido, que inducen un retardo de fase en la luz incidente.

Los SLM se han utilizado como un componente en la computación óptica., en pinzas ópticas holográficas. Pueden ayudar a resolver problemas relacionados con la manipulación de micropartículas con láser.



**Figura 4.** Modulador de cristal líquido[4].

### 1.5. Parámetros de Stokes

Los parámetros de Stokes, son cuatro elementos que caracterizan completamente cualquier forma de polarización. Estos se combinan para formar lo que se denomina como el **vector de Stokes**, de la siguiente manera:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

en donde los parámetros de Stokes se pueden calcular a partir de las intensidades de los estados de polarización, lineal en X e Y, lineal en +45 y -45, circular derecha e izquierda.

$$S_0 = I_x + I_y$$

$$S_0 = I_x - I_y$$

$$S_0 = I_3^{+45} - I_3^{-45}$$

$$S_0 = I_4^D - I_4^I$$

donde:

- $S_0$  se refiere a la intensidad total de la luz.
- $S_1$  describe la cantidad de polarización lineal vertical u horizontal.
- $S_2$  describe la cantidad de polarización lineal a +45 o -45 grados.
- $S_3$  describe la cantidad de polarización circular izquierda o derecha.

En este trabajo se busca generar haces estructurados con diferentes distribuciones a partir de la calibración de los píxeles de un modulador espacial de cristal líquido (SLM-LC), y con ello, determinar el estado de polarización de los haces generados calculando las componentes del vector de Stokes a partir de las mediciones polarimétricas capturadas con una cámara CCD.

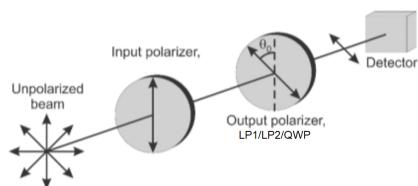
## 2. Metodología

Se utilizó un láser rojo de He-Ne con una longitud de onda de 632.8 nm, con el que se generó un rayo de luz no polarizada utilizando un polarizador ThorLabs, un objetivo de microscopio y un vidrio esmerilado giratorio para obtener una distribución más uniforme. También, se utilizó un par de polarizadores (al que denominamos LP1 y LP2) y un retardador de un cuarto de onda (QWP), de la marca Thorlabs.

Para medir la intensidad de la luz, se utilizó un medidor de intensidades ThorLabs PM320E (con resolución de hasta  $0.1 \mu W$  e incertidumbre en las mediciones del 3 %) conectado con un detector tipo fotodiodo de silicio ThorLabs S120C. Se utilizó un modulador de cristal líquido Meadowlark Optics modelo P512-635 de 512x512 pixeles (con tamaño de pixel de  $15\mu m \times 15\mu m$ ). Para capturar las imágenes proyectadas en el modulador, se utilizó una cámara FLIR Blackfly S con sensor CMOS, de 2048x1936 pixeles (con tamaño de pixel de  $3.45\mu m \times 3.45\mu m$ ), en escala de grises.

## 2.1. Determinación de la orientación del eje de transmisión de los polarizadores

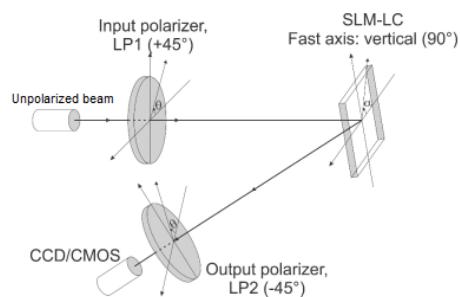
Se utilizó un arreglo como el de la Figura 5, en el cual, se determinó el ángulo  $\theta_0$  para el polarizador (o retardador) de salida, variando el ángulo en este, cada  $10^\circ$  y registrando la intensidad de la luz no polarizada con el detector, en  $\mu W$  para los polarizadores y en  $mW$  para el retardador de fase. Con ayuda de Excel, se calculó el ángulo para cada caso.



**Figura 5.** Arreglo experimental para determinar el ángulo  $\theta_0$ .

## 2.2. Calibración del modulador espacial de cristal líquido

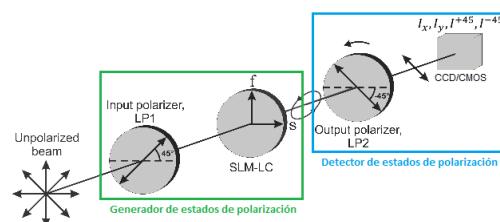
Una vez obtenidos los ángulos  $\theta_0$  para la instrumentación, se utilizó el arreglo de la Figura 6. Se colocó el eje de transmisión del LP1 en un ángulo de  $+45^\circ$  y para el LP2, se colocó a  $-45^\circ$ . Entre ellos, se montó el modulador SLM-LC como en el arreglo antes mencionado. Se enviaron niveles de gris de 0 a 255 al modulador, y con el software del mismo, se grabó cinco veces la imagen resultante para realizar después un promedio con ayuda de MATLAB. Con lo anterior, se logró generar las gráficas de *Intensidad vs Nivel de gris* y *Retardancia vs Nivel de gris* para cada uno de los pixeles del modulador para poder realizar la calibración necesaria.



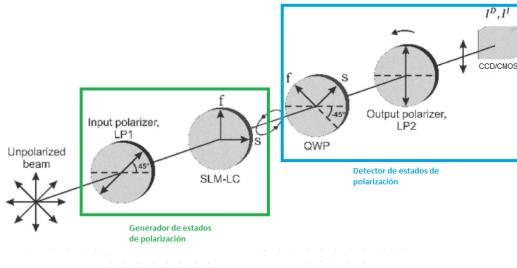
**Figura 6.** Arreglo experimental para caracterizar el retardo de fase inducido por los pixeles del SLM-LC en función del nivel de gris enviado desde la computadora.

## 2.3. Generación y detección de haces con una distribución heterogénea de su estado de polarización

De la calibración obtenida, se generaron con MATLAB, cinco imágenes de haces de diferentes distribuciones polarimétricas (cuadrantes, espiral, cardioide, coseno, axicon), a los cuales se les midió sus intensidades de polarización. Para medir las intensidades de la polarización lineal ( $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I^{+45}$  y  $I^{-45}$ ), se utilizó el arreglo de la Figura 7, y recordando los resultados para el ángulo  $\theta_0$ , se colocó el LP2 en los ángulos  $(243 \pm 1)^\circ$  para  $I_x$ ,  $(333 \pm 1)^\circ$  para  $I_y$ ,  $(198 \pm 1)^\circ$  para  $I^{+45}$  y  $(288 \pm 1)^\circ$  para  $I^{-45}$ . Para medir las intensidades de la polarización circular ( $I^D$  e  $I^I$ ), se utilizó el arreglo de la Figura 8, y se colocó el QWP a  $207.5^\circ$  y el LP2 a  $(333 \pm 1)^\circ$  para  $I^D$  y a  $(243 \pm 1)^\circ$  para  $I^I$ .



**Figura 7.** Arreglo experimental para detectar la intensidad de polarización vertical, horizontal, a  $+45^\circ$  y  $-45^\circ$ .



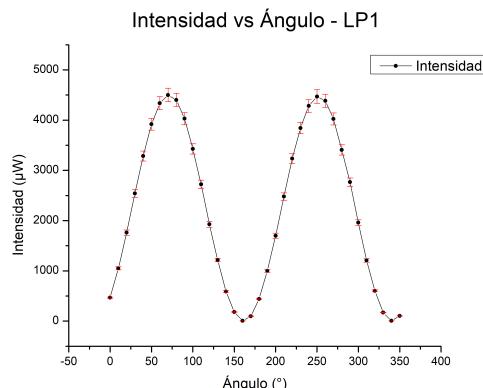
**Figura 8.** Arreglo experimental para detectar la intensidad de polarización circular derecha e izquierda.

### 3. Resultados

#### 3.1. Determinación de la orientación del eje de transmisión de los polarizadores y el eje rápido del retardador.

##### 3.1.1. Polarizador lineal 1 (LP1)

Para el primer polarizador, se obtuvo la gráfica que se muestra en la Figura 9.

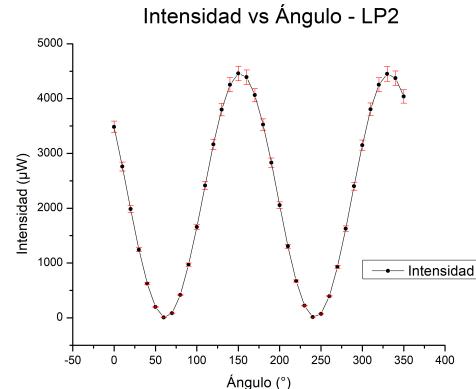


**Figura 9.** Gráfica de Intensidad vs Ángulo para el LP1.

Y se obtuvo un ángulo de orientación del eje de transmisión de  $\theta_0 = 18.61 \pm 0.03$

##### 3.1.2. Polarizador lineal 2 (LP2)

Para el segundo polarizador, se obtuvo la gráfica que se muestra en la Figura 10.

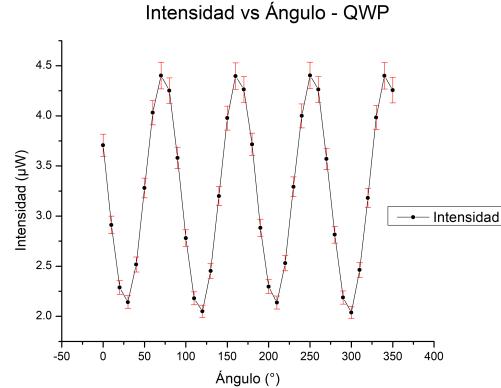


**Figura 10.** Gráfica de Intensidad vs Ángulo para el LP2.

Y se obtuvo un ángulo de orientación del eje de transmisión de  $\theta_0 = 27.51 \pm 0.05$

##### 3.1.3. Retardador de cuarto de onda (QWP)

Para el retardador de  $\frac{1}{4}$  de onda, se obtuvo la gráfica de la Figura 11.

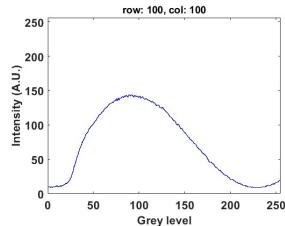


**Figura 11.** Gráfica intensidad vs ángulo para el QWP

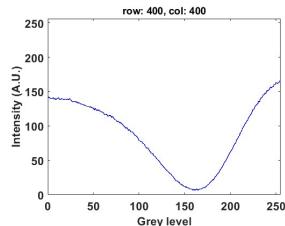
Y se obtuvo un ángulo de orientación del eje rápido de  $\theta_0 = 17.47 \pm 0.03$

### 3.2. Calibración del modulador espacial de cristal líquido

Se observa en la Figura 12a la gráfica de Intensidad vs Nivel de gris para las celdas de cristal líquido que representan el pixel renglón 100, columna 100 y el renglón 400, columna 400.



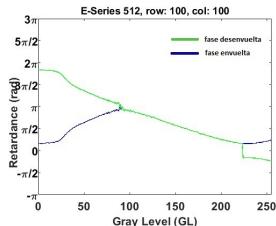
(a) Pixel r:100, c:100.



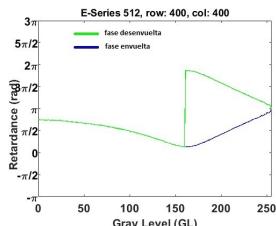
(b) Pixel r:400, c:400.

**Figura 12.** Gráficas de Intensidad vs Nivel de gris.

Se observa en la Figura 12a la gráfica de Retardo de fase vs Nivel de gris para las celdas de cristal líquido que representa el pixel renglón 100, columna 100 y el renglón 400, columna 400.



(a) Pixel r:100, c:100.



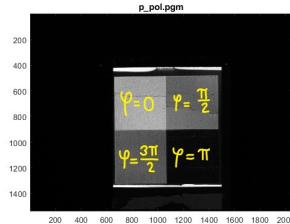
(b) Pixel r:400, c:400.

**Figura 13.** Gráficas de Retardo de fase vs Nivel de gris.

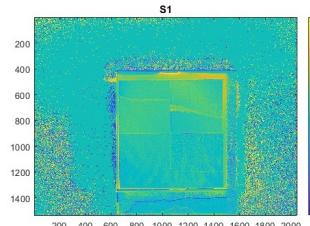
### 3.3. Generación y detección de haces con una distribución heterogénea de su estado de polarización.

#### 3.3.1. Cuadrantes

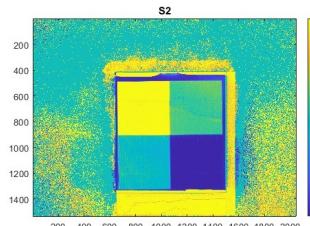
Se obtuvieron las siguientes imágenes polarimétricas para el haz de cuadrantes después del análisis con MATLAB:



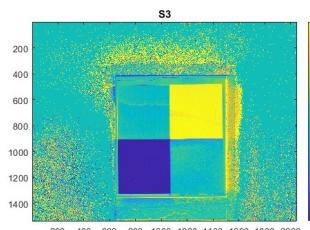
(a) Retardo de fase deseado



(b) Componente S1 del vector de Stokes



(c) Componente S2 del vector de Stokes

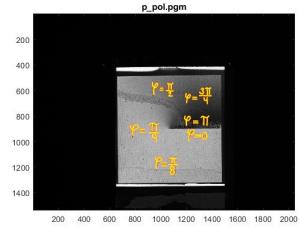


(d) Componente S3 del vector de Stokes

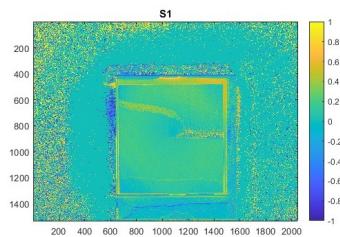
**Figura 14.** Parámetros de stokes para la distribución de cuadrantes

### 3.3.2. Espiral

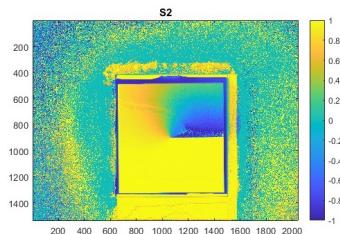
Se obtuvieron las siguientes imágenes polarimétricas para el haz espiral después del análisis con MATLAB:



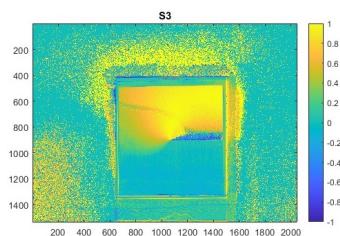
(a) Retardo de fase deseado



(b) Componente S1 del vector de Stokes

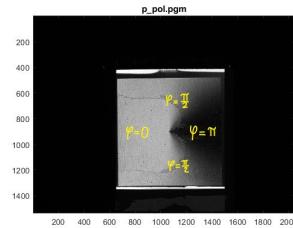


(c) Componente S2 del vector de Stokes

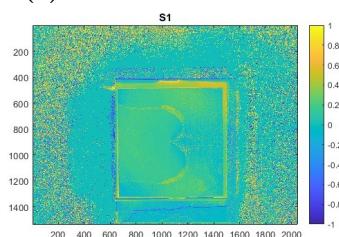


(d) Componente S3 del vector de Stokes

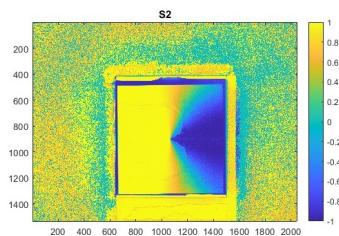
**Figura 15.** Parámetros de stokes para la distribución de Espiral



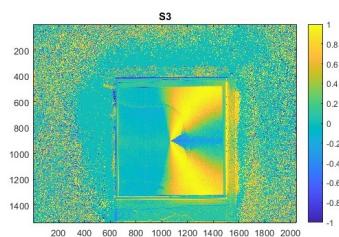
(a) Retardo de fase deseado



(b) Componente S1 del vector de Stokes



(c) Componente S2 del vector de Stokes



(d) Componente S3 del vector de Stokes

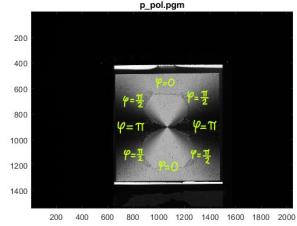
**Figura 16.** Parámetros de stokes para la distribución Cardio

### 3.3.3. Cardio

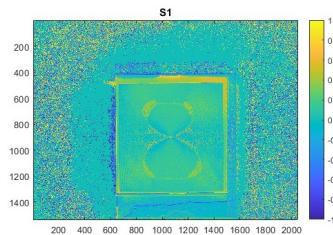
Se obtuvieron las siguientes imágenes polarimétricas para el haz cardioide después del análisis con MATLAB:

### 3.3.4. Coseno

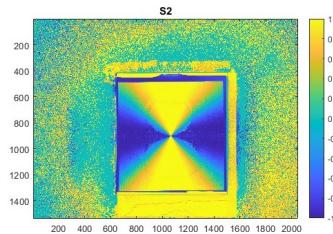
Se obtuvieron las siguientes imágenes polarimétricas para el haz cosenoidal después del análisis con MATLAB:



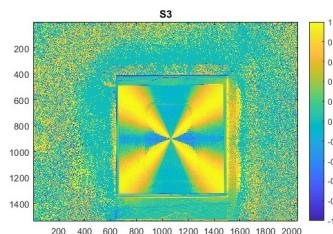
(a) Retardo de fase deseado



(b) Componente S1 del vector de Stokes

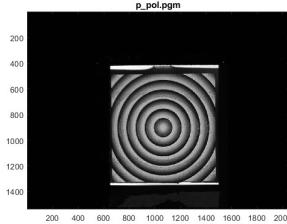


(c) Componente S2 del vector de Stokes

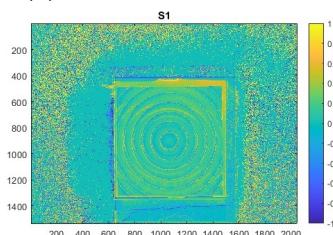


(d) Componente S3 del vector de Stokes

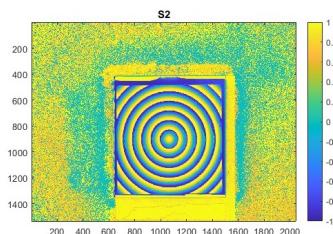
**Figura 17.** Parámetros de stokes para la distribución Coseno



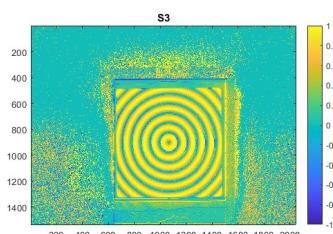
(a) Retardo de fase deseado



(b) Componente S1 del vector de Stokes



(c) Componente S2 del vector de Stokes



(d) Componente S3 del vector de Stokes

**Figura 18.** Parámetros de stokes para la distribución de Axicon

### 3.3.5. Axicon

Se obtuvieron las siguientes imágenes polarimétricas para el haz axicon después del análisis con MATLAB:



## 4. Discusión

A partir de las gráficas de Intensidad vs Ángulo para los polarizadores y el retardador de cuarto de onda (Figuras 9, 10 y 11), se observó que el ángulo calculado concuerda con el máximo, lo cual es un indicador de que el valor de éste nos determina la orientación del eje de transmisión y el eje rápido.

De la Figura 12, se observó que la intensidad en función del nivel de gris es distinta para cada pixel del modulador de cristal líquido, por lo que fue necesario calibrar el retardo de fase, en éstos, de forma individual.

De acuerdo con las imágenes polarimétricas calculadas (Figuras 14,15, 16, 17 y 18), se obtuvo una representación del estado de polarización para cada haz estructurado. De acuerdo con estas representaciones, que corresponden a los parámetros de Stokes, se observó que en todas las distribuciones, la polarización lineal horizontal y vertical es casi nula. A excepción del haz de cuadrantes, se observó que para el resto de haces, existen zonas de transición de la polarización lineal a  $+45^\circ$  a la de  $-45^\circ$ ; en esta zona de transición, se obtuvo polarización circular derecha.

Como trabajo a futuro, puede plantearse el uso de la distribución Axicon, que genera un haz estructurado, como una lente en un sistema óptico, o para la manipulación de partículas.

## 5. Conclusiones

- Se logró calcular el ángulo  $\theta_0$  para los polarizadores LP1 ( $18.61 \pm 0.03$ ) $^\circ$  y LP2 ( $27.51 \pm 0.05$ ) $^\circ$ , además también para el retardador QWP ( $17.47 \pm 0.03$ ) $^\circ$ , lo cual se utilizó para calibrar de forma óptima cada pixel del SLM-LC.
- A partir de la caracterización del retardo de fase, se logró la generación de haces estructurados para cinco distribuciones diferentes.
- Con las imágenes polarimétricas, se logró determinar el estado de polarización para cada una de las celdas de cristal líquido del modulador SLM-LC.

## Referencias

- [1] Dzoom -Sitio sobre fotografía. *Filtro polarizador: ¿Qué es y para qué sirve?* 6 de abr. de 2023. URL: <https://www.dzoom.org.es/filtros-polarizadores-que-son-y-para-que-sirven/>.

- [2] Wikipedia La Enciclopedia Libre. *Lámina retardadora.* 5 de abr. de 2023. URL: [https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mina\\_retardadora](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mina_retardadora).
- [3] Jenny Marcela Rodriguez. *Polarización de la luz.* Revista Brasileira de Ensino de Física, 2018.
- [4] Wikipedia The Free Encyclopedia. *Spatial light modulator.* 5 de abr. de 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Spatial\\_light\\_modulator](https://en.wikipedia.org/wiki/Spatial_light_modulator).

## Apéndice A. Primer apéndice

**Tabla 1.** Mediciones de intensidad en función del ángulo del polarizador LP1.

Ángulo [°] ( $\pm 1^\circ$ )	I [ $\mu W$ ] ( $\pm 0.1\mu W$ )
0	466.9
10	1051.0
20	1761.0
30	2540.0
40	3286.0
50	3919.0
60	4337.0
70	4501.0
80	4403.0
90	4030.0
100	3428.0
110	2723.0
120	1927.0
130	1216.0
140	588.9
150	182.0
160	5.26
170	98.2
180	442.3
190	999.5
200	1699.0
210	2480.0
220	3234.0
230	3844.0
240	4283.0
250	4471.0
260	4385.0
270	4024.0
280	3407.0
290	2768.0
300	1960.0
310	1209.0
320	602.5.0
330	170.9.0
340	5.119.0
350	104.3.0

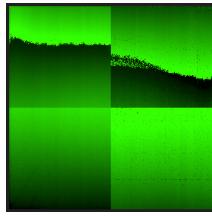
**Tabla 2.** Mediciones de intensidad en función del ángulo del polarizador LP2.

Ángulo [°] ( $\pm 1^\circ$ )	I [ $\mu W$ ] ( $\pm 0.1\mu W$ )
0	3485.0
10	2760.0
20	1985.0
30	1245.0
40	626.3
50	198.6
60	7.707
70	84.81
80	418.7
90	971.7
100	1658.0
110	2416.0
120	3165.0
130	3800.0
140	4253.0
150	4459.0
160	4391.0
170	4063.0
180	3526.0
190	2832.0
200	2056.0
210	1306.0
220	671.8
230	222.6
240	12.92
250	72.6
260	394.9
270	930.7
280	1628.0
290	2401.0
300	3149.0
310	3806.0
320	4253.0
330	4451.0
340	4375.0
350	4040.0

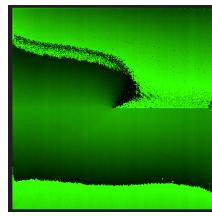
**Tabla 3.** Mediciones de intensidad en función del ángulo del retardador QWP.

Ángulo [°] ( $\pm 1$ )	IQWP [mW] ( $\pm 0.001$ )
0	3.707
10	2.912
20	2.288
30	2.142
40	2.517
50	3.281
60	4.032
70	4.402
80	4.251
90	3.581
100	2.781
110	2.180
120	2.050
130	2.453
140	3.200
150	3.978
160	4.397
170	4.264
180	3.716
190	2.883
200	2.297
210	2.138
220	2.530
230	3.292
240	4.000
250	4.404
260	4.263
270	3.570
280	2.815
290	2.188
300	2.038
310	2.463
320	3.181
330	3.984
340	4.400
350	4.257

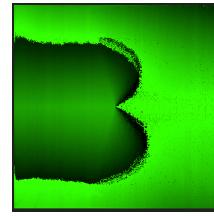
## Apéndice B. Segundo apéndice



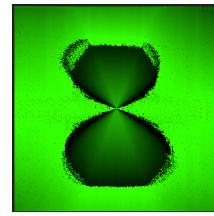
(a) Sectores



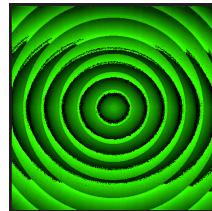
(b) Espiral



(c) Cardioide



(d) Coseno



(e) Axicon

**Figura 19.** Imágenes con la calibración requerida para generar los haces estructurados.