

# Práctica 4: Polarización

Autores: Isaias Hernández Lares, Pablo Natera Bravo Titular: Rigoberto Castro Beltrán  
Laboratorio de óptica, División de Ciencias e Ingenierías, Campus León,  
Universidad de Guanajuato, Lomas del Bosque 103, Lomas del Campestre, 37150 León, Gto.  
Septiembre de 2023

## Resumen

En esta práctica se usó un polarizador lineal que rota para determinar la polarización de un haz de He-Ne de  $633nm$ . Se obtuvo que el láser tiene una polarización lineal vertical, luego se puso un segundo filtro para tomar mediciones ahora con una segunda transformación y se calculó el vector de Jones asociado al láser y con las matrices asociadas a cada polarizador se calculó el vector de Jones saliente.

## I. INTRODUCCIÓN

Cuando estamos trabajando con ondas electromagnéticas, es importante recordar que los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí, y que también ambos son perpendiculares a su dirección de propagación.[1] Generalmente un campo eléctrico que se está propagando tendrá la forma de una función trigonométrica. Si tuviéramos una onda electromagnética propagándose a lo largo del eje  $z$ , con el campo eléctrico oscilando en  $x$  y el campo magnético oscilando en el eje  $y$  tendríamos una onda de la forma:

$$\mathbf{E} = E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{i}$$

$$\mathbf{B} = \frac{E_0}{c} \cos(kz - \omega t) \hat{j}$$

Como podemos ver, es posible describir completamente una onda solamente con su campo eléctrico, ya que con la ley de Faraday-Lenz se obtiene el campo magnético.

Ahora, es importante mencionar que el campo eléctrico no siempre va a estar solamente en un eje, es posible que esté inclinado un ángulo  $\alpha$ , o inclusive, puede que esté girando y/o cambiando su magnitud, a esto es a lo que se le conoce como polarización. Hay tres tipos; lineal, circular y elíptica[2]. El caso más general tiene la forma:

$$\mathbf{E} = E_{0x} \cos(kz - \omega t + \phi_x) \hat{i} + E_{0y} \cos(kz - \omega t + \phi_y) \hat{j}$$

Pero, recordando variable compleja, es posible escribir esto usando exponenciales y sólo tomando la parte real, i.e:

$$\mathbf{E} = E_{0x} e^{i(kz - \omega t + \phi_x)} \hat{i} + E_{0y} e^{i(kz - \omega t + \phi_y)} \hat{j}$$

Usando propiedades de los exponenciales obtenemos:

$$\mathbf{E} = [E_{0x} e^{i\phi_x} \hat{i} + E_{0y} e^{i\phi_y} \hat{j}] e^{i(kz - \omega t)} \quad (1)$$

A la cantidad dentro de corchetes la podemos definir como amplitud compleja  $\mathbf{E}_0$ , por lo que el campo eléctrico se simplifica a:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(kz - \omega t)}$$

Es posible escribir la amplitud compleja como un vector:

$$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i\phi_x} \\ E_{0y} e^{i\phi_y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

A este formalismo se le conoce como el formalismo de Jones[3]. Entonces podemos tener una polarización lineal en el eje  $x$ , la cual tendría la forma:

$$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{i*0} \\ 0 \end{bmatrix} = E_{0x} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Por simplicidad, se ignorará la magnitud inicial del campo y se normalizará el vector. De manera análoga una onda polarizada en el eje  $y$  tendrá la forma:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Y el caso general será:

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde el ángulo es:

$$\tan(\theta) = \frac{B}{A}$$

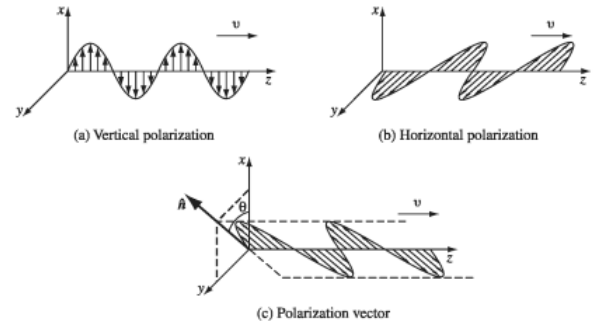


Figura 1. Ejemplos de polarizaciones lineal vertical(a), horizontal(b) y a un ángulo  $\theta$ (c). [1]

Para la polarización circular tenemos una amplitud compleja de la forma:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad (4)$$

Pero aquí también importa la orientación hacia la que va girando. Este ejemplo es para una rotando hacia la derecha  $E_{RCP}$ , si estuviera girando hacia la izquierda tendría la forma:

$$E_{LCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (5)$$

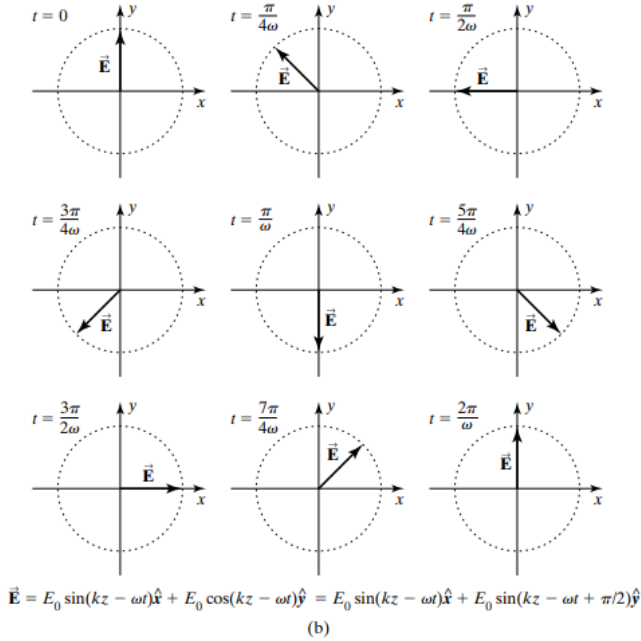


Figura 2. Ejemplos de polarización  $E_{LCP}$  a distintos tiempos. [3]

El tercer tipo de polarización es la elíptica, es una especie de mezcla, donde las magnitudes son  $A$  y  $B$ , su vector de Jones para una elipse rotando de manera horaria tiene la forma:

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{bmatrix} A \\ iB \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para una rotando de manera antihoraria tiene la forma:

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{bmatrix} A \\ -iB \end{bmatrix}$$

Otro elemento óptico de suma importancia es el polarizador. Un polarizador es un objeto que sólo permite que la luz paralela a éste pase.[4] Por lo que si tenemos una polarización lineal paralela pasando toda la luz pasará, en cambio si fue polarizada lineal perpendicular nada pasaría, y si estuviera en un ángulo sólo la componente paralela podría pasar.

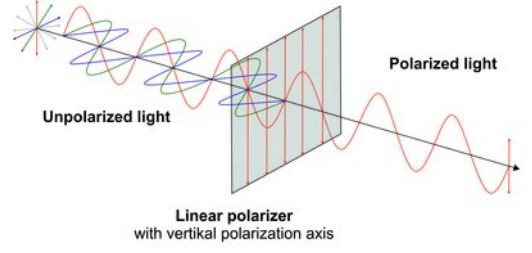


Figura 3. Luz pasando por un polarizador. [4]

Nosotros podemos entender un polarizador como un objeto que transforma la luz que entra, por lo que la luz de entrada y salida están relacionadas con una transformación asociada al polarizador. Usando el formalismo de Jones previamente visto obtenemos una matriz de transformación para un polarizador lineal, la cual tiene la forma[5]:

$$\begin{bmatrix} \cos^2\theta & \cos\theta\sin\theta \\ \cos\theta\sin\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

Entonces es posible predecir la polarización de la luz que sale del Polarizador simplemente multiplicando esta matriz por el vector de Jones asociado.

En este experimento es importante mencionar que como el fotodetector tiene un umbral óptico de daño (Optical damage threshold) mayor a la potencia es necesario usar un filtro para disminuir la potencia a un rango aceptable, para saber qué filtro usar hacemos uso de la ecuación:

$$OD = \log_{10} \left( \frac{1}{T} \right) \quad (8)$$

o:

$$T = 10^{-OD} \quad (9)$$

En donde  $OD$  es la optical density, es decir, el valor del filtro que vamos a ocupar, y  $T$  es la transmitancia, el cual es un valor adimensional que es el cociente entre la potencia que entra y la potencia que sale.[6]

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### II-A. Materiales

- 1 Láser de Helio-Neón, clase 3B ,color rojo de marca JDS Uniphase. Emite un haz monocromatico con longitud de onda de  $632,8nm$  y potencia de salida de  $20mW$ .
- 1 Fuente de alimentación de láser uniphase, modelo 1216-1, de  $115 V$  y  $0.12 A$
- Osciloscopio digital con  $60MHz$  de anchura de banda, y 2 canales. Marca Tektronix, modelo TDS 1002C-EDU.
- Receptor óptico de silicio de diámetro extragrande modelo new focus 2031. Diametro de  $8mm$ . Rango de longitudes de onda  $400 - 1070nm$ . Umbral de daño de  $10mW$ .
- Estuche con diez filtros absorbentes de intensidad. Marca Thorlabs, modelo NEK01. Rango de longitud de onda  $400 - 650nm$ .

- Dos polarizadores para cámara fotográfica, marca Amazon Basics™, modelo MCCPL. Estos filtros son de forma circular, con un diámetro de 55mm.
- Dos monturas ópticas modeladas e impresas en 3D para los polarizadores de cámara fotográfica, con capacidad de giro, graduadas a 5 grados por giro.
- 1 Montura
- 1 Mesa óptica
- 1 Desatornillador
- 7 Tornillos y 7 tuercas
- 7 Vástago
- 7 Porta vástago
- 7 Sujeta vástago
- 1 Nivelador
- 1 Iris
- 1 Stop
- 1 Pinza de sujeción

## II-B. Métodos

La práctica se divide en dos partes. En la parte 1 se utiliza un polarizador (analizador) para determinar la polarización de la luz del láser.

### II-B1. Parte 1:

1. Posicionar el stop al final del camino óptico. Conectar el láser a la fuente de alimentación. Colocar el iris al final de camino óptico. Alinear el láser a la altura del iris y a su centro. Trasladar el iris al inicio del camino óptico para revisar la alineación, regresar el iris al final del camino óptico. Mientras la alineación no esté correcta, compensar el láser para mejorarla. Repetir hasta alinear adecuadamente el láser al camino óptico.
2. Colocar filtros de absorción neutra en un porta lentes. Fijar el porta lentes a un vástago en porta vástagos al inicio del camino óptico. Alinear y ajustar al camino óptico.
3. Colocar el polarizador (analizador) en la montura óptica para polarizadores. Alinear y ajustar al camino óptico después de los filtros OD.
4. Colocar el foto detector con ayuda de un vástago y una pinza de sujeción después de la montura micrométrica. Ajustar y alinear al camino óptico. El láser impacta en el centro del detector, el cuál va a generar un voltaje en relación a la luz que reciba. Conectar el foto detector con un cable BNC al osciloscopio para tomar las mediciones.
5. Se deja incidir el láser en el receptor encendido. Se prueba obstruir por completo el haz para verificar incidencia.
6. Buscar un mínimo de la medición de voltaje en el osciloscopio rotando el analizador.
7. Tomar mediciones del voltaje para cada graduación de 5° del analizador. Repetir la medición hasta completar 1 giro.

El arreglo del sistema final para la parte 1, con 1 polarizador, se muestra en el render de la figura 4.

**II-B2. Parte 2:** En la parte 2 se utilizan 2 polarizadores, un analizador y un rotador en el mismo camino óptico. El sistema es idéntico a la parte 1 exceptuando por el rotador añadido.

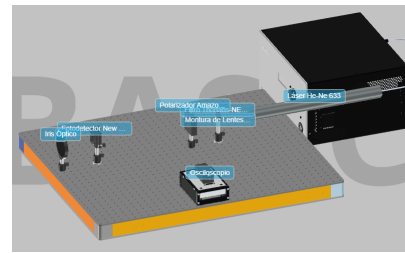


Figura 4. Render del sistema con 1 polarizador, un analizador.

1. Posicionar el stop al final del camino óptico. Conectar el láser a la fuente de alimentación. Colocar el iris al final de camino óptico. Alinear el láser a la altura del iris y a su centro. Trasladar el iris al inicio del camino óptico para revisar la alineación, regresar el iris al final del camino óptico. Mientras la alineación no esté correcta, compensar el láser para mejorarla. Repetir hasta alinear adecuadamente el láser al camino óptico.
2. Colocar filtros de absorción neutra en un porta lentes. Fijar el porta lentes a un vástago en porta vástagos al inicio del camino óptico. Alinear y ajustar al camino óptico.
3. Colocar un polarizador (analizador) en la montura óptica para polarizadores. Alinear y ajustar al camino óptico después de los filtros OD.
4. Agregar otro polarizador (rotador) en montura para polarizadores entre el OD y el primer polarizador. Alinear y ajustar al camino óptico.
5. Colocar el foto detector con ayuda de un vástago y una pinza de sujeción después de la montura micrométrica. Ajustar y alinear al camino óptico. El láser impacta en el centro del detector, el cuál va a generar un voltaje en relación a la luz que reciba. Conectar el foto detector con un cable BNC al osciloscopio para tomar las mediciones.
6. Se deja incidir el láser en el receptor encendido. Se prueba obstruir por completo el haz para verificar incidencia.
7. Buscar un mínimo de la medición de voltaje rotando el analizador y el rotador.
8. Tomar mediciones del voltaje para cada rotación de 5° en el rotador. Repetir la medición hasta completar 1 giro del rotador.

El arreglo del sistema final para la parte 2, con 2 polarizadores, se muestra en el render de la figura 5

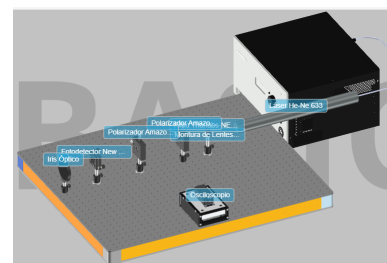


Figura 5. Render del sistema con 2 polarizadores, un analizador y un rotador.

### III. RESULTADOS

#### III-1. Parte 1:

1. Se obtiene el camino óptico alineado.
2. Se utiliza un filtro de densidad óptica de 2.0 para reducir la potencia del láser y no superar el umbral de daño del fotodetector. El  $OD = 0,2$ :

$$T = 10^{-OD} = 10^{-2,0} = 0,01 \quad (10)$$

Con una potencia de  $20mW$  del láser y una transmitancia de 0.06, el fotodetector recibe una entrada de  $0,2mW$ .

3. Para la montura del polarizador se emplea una montura óptica impresa en 3D para tener la capacidad de giro y lograr rotar los polarizadores para las mediciones.
4. El montaje del fotodetector es inestable por la inestabilidad de las pinzas de sujeción. La inconsistencia puede resultar en toma de mediciones con error.
5. El cable conectado del fotodetector al osciloscopio se conecta al canal 1. La configuración adecuada del osciloscopio es a 1 V como escala de eje vertical y a 25 ms de eje horizontal.
6. La medición inicial es el mínimo, es decir, cuando el polarizador atenúa la intensidad del láser lo más posible.
7. La graduación de la rotación en la montura no es precisa. Muestra error en la graduación por la inexacta graduación del material.

#### III-2. Parte 2:

1. Se obtiene el camino óptico alineado.
2. Se utiliza un filtro de densidad óptica de 2.0 para reducir la potencia del láser y no superar el umbral de daño del fotodetector. El  $OD = 0,2$ :

$$T = 10^{-OD} = 10^{-2,0} = 0,01 \quad (11)$$

Con una potencia de  $20mW$  del láser y una transmitancia de 0.06, el fotodetector recibe una entrada de  $0,2mW$ .

3. Para la montura del analizador y rotador se emplean monturas óptica impresa en 3D para tener la capacidad de giro y lograr rotar los polarizadores para las mediciones. Se obtienen polarizadores que pueden modificar la polarización de la luz al rotar.
4. El montaje del fotodetector es inestable por la inestabilidad de las pinzas de sujeción. La inconsistencia puede resultar en toma de mediciones con error. Se obtiene el fotodetector alineado conectado al osciloscopio en ganancia media.
5. El cable conectado del fotodetector al osciloscopio se conecta al canal 1. La configuración adecuada del osciloscopio es a 1 V como escala de eje vertical y a 25 ms de eje horizontal.
6. La medición inicial es el mínimo, es decir, cuando el polarizador atenúa la intensidad del láser lo más posible. El mínimo debe obtenerse con la combinación de los mínimos individuales del rotador y analizador.
7. Al utilizar las mismas monturas graduadas, su graduación de la rotación no es precisa. Muestra error en la graduación por la inexacta graduación del material.

### IV. DISCUSIÓN

Haciendo uso de la ecuación 11 podemos hacer el cálculo de cuánto voltaje va a dar en el fotodetector. Como se usó un filtro de 2 OD la transmitancia será:

$$T = 10^{-OD} = 10^{-2} = 0,01$$

Por lo que si el láser tiene una potencia de salida de  $20miliwatt$  el fotodetector como máximo estará recibiendo  $0,2miliwatt$ .

Respecto a la polarización, como podemos ver que la polarización elíptica es la más general, así que podemos asumir esa y después ver qué nos dan los coeficientes A y B. Entonces empezamos con el vector de Jones:

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{bmatrix} A \\ iB \end{bmatrix}$$

Lo multiplicamos por la matriz del polarizador lineal:

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \cos\theta\sin\theta \\ \cos\theta\sin\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ iB \end{bmatrix}$$

Obtenemos:

$$\frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \begin{bmatrix} A\cos^2(\theta) + iB\sin(\theta)\cos(\theta) \\ A\sin(\theta)\cos(\theta) + iB\sin^2(\theta) \end{bmatrix}$$

Finalmente sacamos su módulo al cuadrado, ya que eso es lo que mide el fotodetector, y obtenemos:

$$\frac{A^2\cos^2(\theta) + B^2\sin^2(\theta)}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (12)$$

A esta expresión es a la que le hacemos un ajuste con mínimos cuadrados y se obtienen los valores de A y B. Para A obtenemos  $A = -0,0007$  y para B obtenemos  $B = 31,424$ . Haciendo ese ajuste obtenemos la siguiente gráfica:

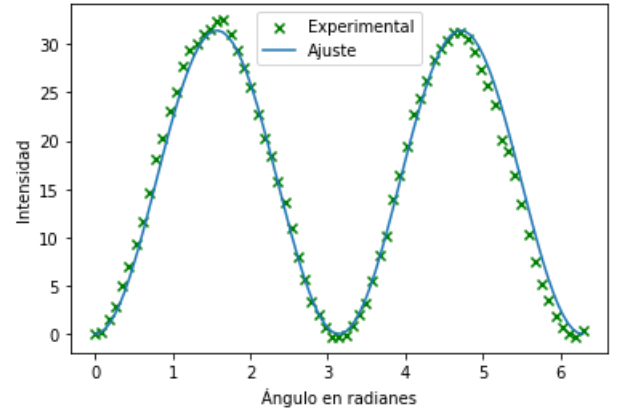


Figura 6. Datos experimentales junto con el ajuste obtenido del primer experimento

Entonces el vector de Jones después de pasar por el polarizador nos quedaría:

$$\frac{1}{31,424} \begin{bmatrix} -0,0007\cos^2(\theta) + i31,424\sin(\theta)\cos(\theta) \\ -0,0007\sin(\theta)\cos(\theta) + i31,424\sin^2(\theta) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Si ahora quisiéramos hacer una predicción podríamos ver cuánto vale el vector en  $\theta = 130$  y obtenemos teóricamente:

$$\frac{1}{31,424} \begin{bmatrix} -0,0007\cos^2(130) + i31,424\sin(130)\cos(130) \\ -0,0007\sin(130)\cos(130) + i31,424\sin^2(130) \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{31,424} \begin{bmatrix} -0,0003 - 15i \\ 0,00034 + 18,4i \end{bmatrix}$$

Cuya magnitud es 17,93, mientras que experimentalmente calculamos 18,5. Si ahora despreciamos a A, al ser muy pequeño, y multiplicamos por otra matriz de polarización lineal obtendremos el vector:

$$\frac{1}{B} \begin{bmatrix} \cos^2\phi & \cos\phi\sin\phi \\ \cos\phi\sin\phi & \sin^2\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} iB\sin(\theta)\cos(\theta) \\ iB\sin^2(\theta) \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{B} \begin{bmatrix} iB\sin(\theta)\cos(\theta)\cos^2\phi + iB\sin^2(\theta)\cos\phi\sin\phi \\ iB\sin^2(\theta)\sin^2\phi + iB\sin(\theta)\cos(\theta)\cos\phi\sin\phi \end{bmatrix}$$

Al cual cuando se le hace un ajuste se obtiene la siguiente gráfica:

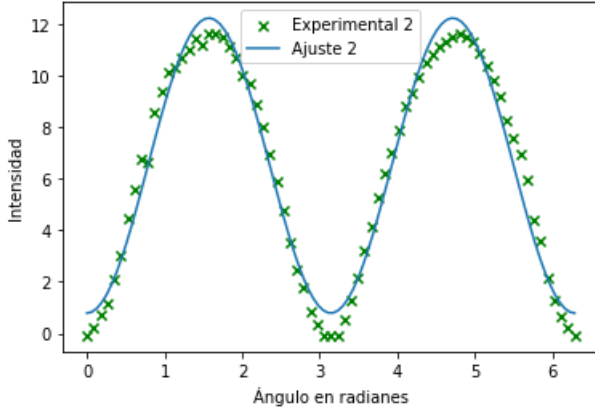


Figura 7. Datos experimentales junto con el ajuste obtenido en el experimento con dos polarizadores.

Viendo ambas gráficas juntas tenemos:

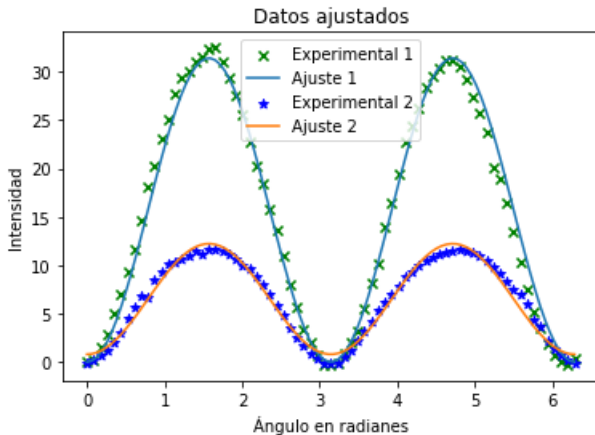


Figura 8. Datos experimentales junto con el ajuste obtenido en ambos experimentos.

Podemos ver que en el experimentos dos las intensidades son menores que en el experimento 1; sin embargo los picos coinciden. El que la intensidad sea menor se debe a que al pasar por dos polarizadores se pierde más intensidad que si se pasara por uno solo, y el hecho de que ambos picos coincidan es debido a que en ambos experimentos se empezó en un mínimo.

## V. CONCLUSIONES

La polarización de la luz puede ser lineal, circular o elíptica, y se puede describir mediante el formalismo de Jones. Los polarizadores son dispositivos ópticos que permiten o bloquean la luz según su polarización, y su efecto se puede calcular utilizando matrices de transformación de Jones.

En este trabajo se llega a la conclusión que el láser de Helio-Neón, clase 3B tiene una polarización lineal vertical. Se asumió una polarización elíptica general. Utilizando el formalismo de Jones, se realizaron cálculos para obtener los coeficientes A y B que caracterizan la polarización elíptica. Estos coeficientes se ajustaron a los datos experimentales para determinar que el coeficiente de la amplitud A es muy pequeño en comparación al coeficiente B. Lo que significa que la amplitud de la componente de polarización en la dirección del eje y es máxima y hay componente muy pequeña en la dirección del eje x, es decir, una polarización lineal vertical.

## REFERENCIAS

- [1] David J. Griffiths. *Introduction to electrodynamics*. Pearson Education. Pearson, 2013.
- [2] Dr. Rüdiger Paschotta. Polarization of light. [urlhttps://www.rp-photonics.com/polarization\\_of\\_light.html](https://www.rp-photonics.com/polarization_of_light.html), 2020.
- [3] LENO M. PEDROTTI FRANK L. PEDROTTI, S.J. and LENO S. PEDROTTI. *Introduction to optics*. Introduction to optics. Addison-Wesley, 2006.
- [4] CODIXX. Polarization. [urlhttps://www.codixx.de/en/knowledge-corner/polarization](https://www.codixx.de/en/knowledge-corner/polarization), 2020.
- [5] FOSCO. Jones matrix calculus. [urlhttps://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/102261126-jones-matrix-calculus](https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/102261126-jones-matrix-calculus), 2018.
- [6] Thorlabs. Mounted absorptive neutral density filters. [urlhttps://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=266](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=266) : : text = Optical