

DESARROLLO DE UN POLARÍMETRO PARA MEDICIÓN DE ACTIVIDAD ÓPTICA Y ESTADOS DE POLARIZACIÓN

Amezcuca López Erick Enrique¹, Corral Martínez Luis Francisco¹ y Garduño Wilches Ismael Arturo²

¹ Tecnológico Nacional de México/I.T. Chihuahua, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Tecnológico 2909, Chihuahua, Chih., México, 31310, Tel. +52 (614) 2012000

² Cátedras CONACYT/Centro de Investigación en Ciencia Avanzada y Tecnología Aplicada del IPN Calzada Legaria #694, Col. Irrigación, Ciudad de México, 11500, Tel: +52 (55) 57296000

e-mail: lfcorral@itchihuahua.edu.mx

RESUMEN.

El presente trabajo describe el diseño y construcción de un arreglo experimental de un polarímetro. El objetivo del proyecto fue desarrollar en primera instancia una simulación del polarímetro y después un programa que basado en mediciones experimentales pudiera reconstruir el vector de Stokes de un estado de polarización o bien, medir la actividad óptica en una muestra. Para ello se utilizó el software LabVIEW y un arreglo experimental construido por elementos como los son un polarizador lineal, un retardador de $\frac{1}{4}$ de onda y equipo óptico en general. Los resultados demuestran que se obtuvo el funcionamiento esperado del sistema, reconstruyendo correctamente el vector de Stokes del haz polarizado incidente.

Palabras Clave: Polarímetro, polarización, actividad óptica, vector de Stokes.

ABSTRACT.

The following work describes the design and assembly of an experimental setup for a polarimeter. The main goal of the project was developing first a software simulation of the polarimeter and then, the retrieval of the Stokes vector for a polarization state based in experimental measurements, as well as the measurement of the optical activity of a sample. To achieve this, we used the software LabVIEW and also mounted an experimental setup comprising a quarter-wave plate, a linear polarizer and few other optical elements. Results show that the expected behavior of the system was achieved, having the Stokes Vector of the incident beam properly reconstructed.

Keywords: Polarimeter, Polarization, Optical activity, Stokes vector

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de este proyecto surgió de la necesidad que se tiene en el Laboratorio de Análisis de Sistemas de Iluminación del Instituto Tecnológico de Chihuahua de instrumentos especializados para la realización de experimentos, investigación y labores didácticas. Uno de estos instrumentos es el polarímetro.

El polarímetro es un instrumento óptico usado para determinar las propiedades de polarización de fuentes de luz o muestras, como pueden ser biológicas o químicas [1].

Las aplicaciones de un polarímetro son muy diversas, como, por ejemplo:

- Espectropolarimetría en química, permitiendo medir el dicroísmo, la birrefringencia lineal y la actividad óptica de una muestra [1].
- Metrología óptica, en donde es de gran utilidad para la medición de la polarización instrumental de sistemas ópticos y la caracterización de componentes ópticos y polarizantes [1].

Algunas otras de las aplicaciones de los polarímetros son el monitoreo remoto, la polarimetría de radio y la medición del grosor e índice refractivo de películas delgadas [1].

Por todo lo anterior el contar con un instrumento como el polarímetro es de gran utilidad para el Laboratorio de Análisis de Sistemas de Iluminación, ya que este laboratorio no cuenta actualmente con ningún instrumento que pueda realizar las funciones que el polarímetro cumple. Las ventajas de contar con este instrumento son varias, ya que permite caracterizar elementos ópticos y también la polarización de fuentes de luz, lo que es de gran ayuda para la investigación que se realiza en el área.

Sin embargo, el adquirir un polarímetro comercial es bastante costoso, además de que este tipo de instrumentos no cumpliría cabalmente con las necesidades del laboratorio, ya que por lo regular son muy especializados en la función que cumple y no permiten la versatilidad necesaria para el área, como lo es una medición transparente para el usuario o el poder modificar el proceso de la medición de acuerdo a la situación.

A continuación, se presenta los fundamentos teóricos que se utilizaron para el diseño del polarímetro.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Luz polarizada.

La luz polarizada es aquella en la que la luz mantiene fija la orientación del campo eléctrico, aunque su magnitud y signo varíe. En este caso el campo eléctrico reside en lo que se conoce como plano de vibración.

Para explicar los diferentes tipos de polarización se parte de las siguientes dos ecuaciones [2]:

$$E_x(z, t) = i E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (1)$$

$$E_y(z, t) = j E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \quad (2)$$

Las cuales sumadas definen el estado de polarización resultante:

$$E = E_x(z, t) + E_y(z, t) \quad (3)$$

Dependiendo del valor de la diferencia de fase, es posible obtener varios casos de polarización: luz linealmente polarizada, circularmente polarizada y elípticamente polarizada [2].

Polarización lineal

En este tipo de polarización las componentes eléctricas de la onda están en fase.

Polarización circular

En esta polarización las amplitudes son iguales, pero su desfase es de $\varepsilon = -\pi/2 + 2m\pi$, lo cual se observa en la figura 1.

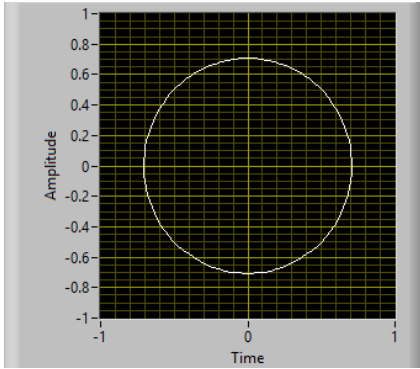


Figura 1. Representación gráfica de la polarización circular.

Polarización elíptica

Para describir la polarización elíptica, es posible desarrollar las ecuaciones (1) y (2) y equipararlas a la ecuación de una elipse de la siguiente forma:

$$\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos\varepsilon = \sin^2\varepsilon \quad (4)$$

Esta es la ecuación de una elipse que forma un ángulo α con el sistema coordenado (E_x, E_y) tal que [2]:

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos\varepsilon}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad (5)$$

2.2. Actividad óptica.

La actividad óptica es el desplazamiento que provoca una sustancia o material en el campo eléctrico E de una onda plana lineal [2], como se muestra en la figura 3.

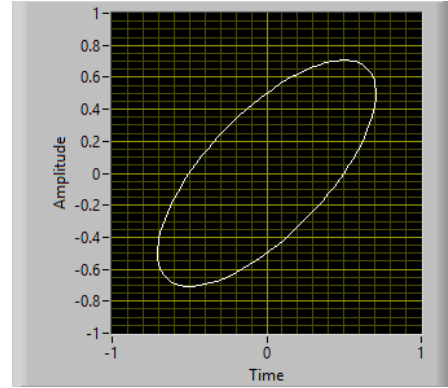


Figura 2. Representación gráfica de la polarización elíptica.

Se debe hacer una distinción entre si el giro es hacia la derecha o hacia la izquierda. En el caso de que se observe hacia la dirección de la fuente y pareciera que el plano de vibración se mueve en el sentido de las agujas del reloj, se habla una sustancia dextrógira o rotatoria d. Si ocurre el caso contrario, que gire en el sentido contrario a las manecillas del reloj, se dice que la sustancia es levógira o rotatoria i.

Algunos ejemplos de sustancias activamente ópticas son el cuarzo y el bencilo, las cuales solo presentan este fenómeno cuando se encuentran en estado cristalino.

También sustancias como el azúcar, el ácido tartárico y el aguarrás son activamente ópticas, ya sea en solución o en estado líquido [2].

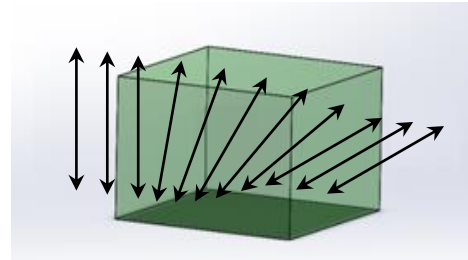


Figura 3. Actividad óptica en una muestra de material.

2.3. Modelado matemático de la polarización

Una de las formas en la que se puede describir la polarización y que fue la usada en este proyecto, son los llamados vectores de Stokes. Estos describen en cuatro elementos las características de polarización de la onda electromagnética [2]:

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \quad (6a)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \quad (6b)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y}\cos\varepsilon \quad (6c)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y}\sin\varepsilon \quad (6d)$$

El parámetro S_0 indica la intensidad del haz incidente, que por lo regular se normaliza a 1, el parámetro S_1 indica la preferencia del haz a una polarización horizontal (0°), el parámetro S_2 indica la preferencia del haz a un estado de polarización diagonal (45°) y finalmente S_3 indica la preferencia del haz a tener una polarización circular derecha. Con esto es posible describir los estados de polarización antes descritos de la siguiente manera:

$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
P. Horizontal	P. diagonal	P. circular derecha	Luz natural

Por otro lado, para obtener matemáticamente la descripción de un estado de polarización alterado por elementos ópticos como lo son un polarizador o un retardador, es necesario utilizar las matrices de Mueller [2], las matrices que se utilizaron para el proyecto fueron las de un polarizador lineal horizontal y un retardador de $\frac{1}{4}$ de onda, las cuales se muestran a continuación, respectivamente:

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

3. DESARROLLO DEL POLARÍMETRO

3.1. Simulación del polarímetro.

Para la simulación del polarímetro se realizó un programa en el software LabVIEW, el cual consiste en varios SubVi, cada con una función para lograr la reconstrucción del vector original, estos SubVi se ilustran en la figura 4.

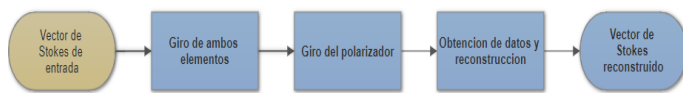


Figura 4. Esquema a bloques del polarímetro.

La primera parte consiste únicamente un cuadro donde se le indica al programa el vector de Stokes a reconstruir, es de mencionar que el vector dado es validado, para explicar el funcionamiento se tomara como base el siguiente vector de Stokes de la figura 5, a partir del cual se realiza la simulación y se obtiene su reconstrucción al final.

La función que realiza el SubVi “Giro de ambos elementos” es simular el giro de ambos elementos (Retardador de $\frac{1}{4}$ de onda y polarizador lineal) desde 0° a 180° . La información que se obtiene es el comportamiento del parámetro S_0 , el cual se gráfica y guarda su valor en un arreglo.

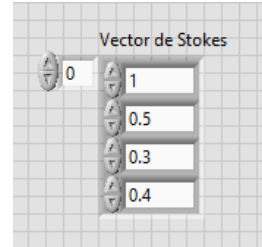


Figura 5. Vector de Stokes a reconstruir.

Después de realizar las 180 iteraciones, el programa extrae el valor máximo y mínimo del arreglo, además de indicar en que índice ocurrió el mismo, lo cual se observa en la figura 6.

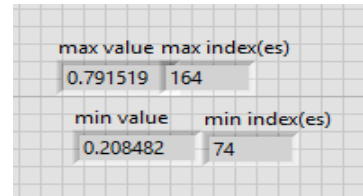


Figura 6. Valores máximos y mínimos del arreglo.

De aquí se toma el valor máximo y el índice en el cual ocurrió y son estos valores los que se mandan al siguiente SubVi “Giro del polarizador”.

En esta parte, el valor donde ocurrió el valor máximo del paso anterior, se tomará como el ángulo θ al cual está el retardador y se hará girar únicamente el polarizador lineal para de nuevo obtener el comportamiento del parámetro S_0 , obteniéndose otra vez un arreglo del cual se obtienen valores máximos y mínimos, así como sus respectivos índices en el cual ocurrieron, además de calcularse los valores de luz polarizada y luz no polarizada que se muestran en la figura 7.

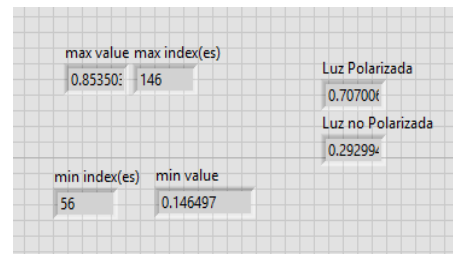


Figura 7. Valores del SubVi “Giro analizador”.

3.2. Reconstrucción del vector de Stokes.

Para la reconstrucción del vector de Stokes, se tomará el ángulo máximo que se obtuvo en el SubVi “Giro de ambos elementos” y los valores de luz polarizada y luz no polarizada del SubVi “Giro analizador”. Con estos tres valores se realiza una sola iteración, de la cual se obtienen dos matrices, las cuales se observan en la figura 8. Dichas matrices corresponden al analizador horizontal (polarizador lineal) y a su complemento,

el analizador vertical, el cual es equivalente a girar 90° el polarizador lineal. A continuación, se procede sumar ambas matrices con lo que se obtiene la matriz de la figura 9.

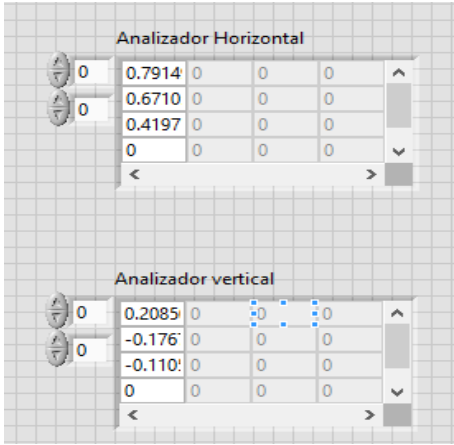


Figura 8. Matrices de los analizadores.

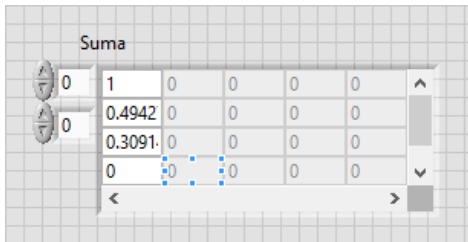


Figura 9. Suma de los analizadores.

Como se observa, el sumar ambas matrices proporciona de manera correcta los valores S_0 , S_1 y S_2 del vector de Stokes. Llegados a este punto solo falta obtener el parámetro S_3 , para lo cual se tomara la siguiente ecuación:

$$(S_0)^2 = (S_1)^2 + (S_2)^2 + (S_3)^2 \quad (7)$$

Una consideración importante para que esta ecuación sea válida es que el haz de luz esté completamente polarizado, por eso mismo se obtuvo en pasos anteriores los parámetros de la fracción polarizada y la fracción no polarizada del haz. A continuación se toma $S_0 =$ luz completamente polarizada y se despeja el factor S_3 de la ecuación, quedando de la siguiente forma:

$$S_3 = \sqrt{(S_0)^2 - (S_1)^2 - (S_2)^2} \quad (8)$$

Este elemento se agrega a una matriz junto a los elementos de luz polarizada, S_1 y S_2 , dando la matriz de la figura 10. Por otro lado, la fracción no polarizada se agrega a una matriz con todos los elementos en 0, exceptuando S_0 , que se le asignara el valor de la amplitud del haz no polarizado, lo que da la matriz de la figura 11.

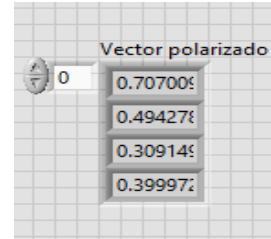


Figura 10. Haz completamente polarizado.

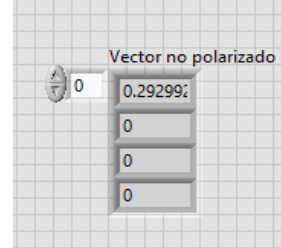


Figura 11. Haz no polarizado.

Por último, se procede a sumar ambas matrices, obteniéndose la matriz de la figura 12.

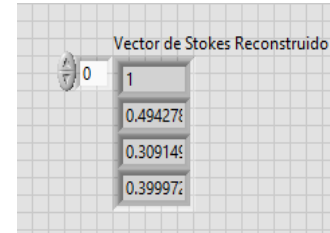


Figura 12. Vector de Stokes reconstruido.

3.3. Montaje del arreglo experimental.

Para obtener las mediciones del fenómeno se desarrolló un arreglo experimental con los siguientes elementos:

- Una fuente de luz (láser rojo de 5mW)
- Una base para la muestra
- Un retardador de ¼ de onda
- Un analizador (polarizador lineal)
- Un fotómetro
- Un goniómetro
- Una base para el analizador.

El cómo se acomodan los elementos en el arreglo se muestra en la figura 13:

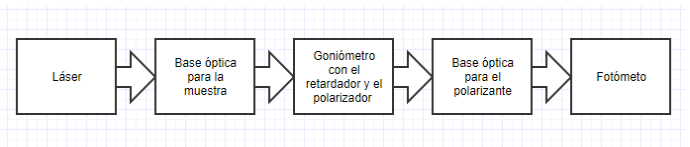


Figura 13. Diagrama del arreglo experimental.

La forma en que se opera el arreglo experimental es la siguiente:

- En primer lugar, se deja el arreglo únicamente con el goniómetro, el retardador y el analizador y se gira el goniómetro hasta que el fotómetro nos dé la máxima medición. Se anota el ángulo en el que ocurre esto, ya que será la referencia del sistema.
- Si se desea caracterizar una fuente de luz, se procede al siguiente paso, en caso contrario, se coloca el elemento óptico que se quiere analizar en el espacio para la muestra.
- Ahora se gira el goniómetro hasta encontrar de nueva cuenta el máximo de la medición, se anota el valor de los grados donde ocurrió, así como el valor del fotómetro.
- A continuación, se retira el analizador del goniómetro y se vuelve a colocar, pero girando 90° el analizador (esto es equivalente a cambiar nuestro analizador horizontal por uno vertical) y se anota la medición del fotómetro.
- Restando el valor del máximo de la medición y de la medición a 90° se obtiene el parámetro S_1 del sistema. Además de que el ángulo del goniómetro en el que ocurrió esto será el ángulo α .
- Ahora se procede a retirar el analizador del goniómetro y se coloca en la base para el analizador, lo que se hace aquí es dejar fijo el retardador de $\frac{1}{4}$ de onda en el ángulo donde ocurrió el máximo.
- Después se gira el analizador únicamente y se buscará de nueva cuenta el máximo y el mínimo de la medición del fotómetro.
- Se resta de nueva cuenta el valor máximo y mínimo y este será el valor de S_0 polarizada y, además, se multiplica por 2 el valor del mínimo y corresponderá al valor de la luz no polarizada.

Después de obtener todas las mediciones del arreglo experimental, únicamente se colocan los datos en la interfaz de LabVIEW para el polarímetro físico.

3.4. Interfaz de LabVIEW

La interfaz en LabVIEW del polarímetro físico consiste en varios controles numéricos, a los cuales únicamente se les alimenta con los valores obtenidos en el arreglo experimental. Una vez dados los valores, únicamente se ejecuta el programa y éste entregará el valor del vector de Stokes de la fuente o del elemento analizado, este panel se muestra en la figura 14.

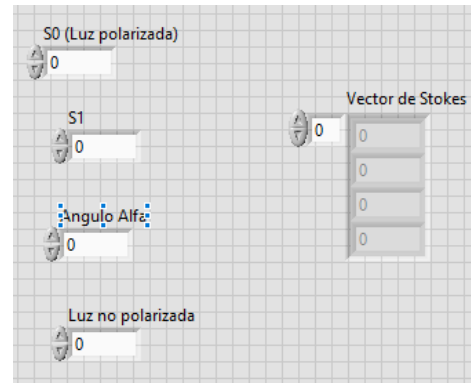


Figura 14. Interfaz de LabVIEW.

4. RESULTADOS

Para analizar los resultados se realizaron diferentes mediciones de estados de polarización conocidos con el fin de poder validar los datos obtenidos, así como el algoritmo del programa.

En primer lugar, se caracterizó el estado provocado por un retardador de cuarto de onda obteniéndose datos de la figura 15.

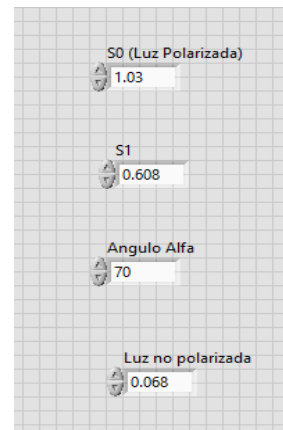


Figura 15. Mediciones de un retardador de $\frac{1}{4}$ de onda.

Obteniéndose el vector de Stokes de la figura 16.

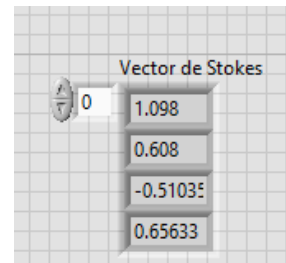


Figura 16. Vector de Stokes del estado de polarización causado por un retardador de $\frac{1}{4}$ de onda.

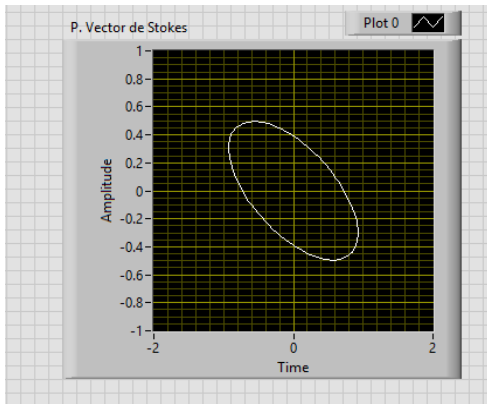


Figura 17. Estado de polarización causado por el retardador de $\frac{1}{4}$ de onda.

Como se observa en la figura 17, el estado de polarización causado es una polarización de tipo elíptica, lo cual es correcto conociendo los efectos de un retardador de $\frac{1}{4}$ de onda.

A continuación, se procedió a analizar la polarización de luz láser, obteniéndose las mediciones de la figura 18.

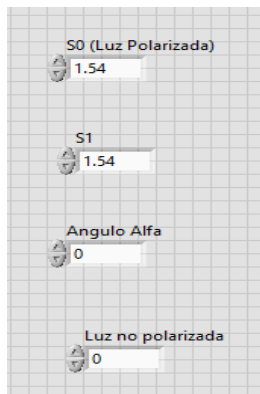


Figura 18. Mediciones de un láser.

Obteniéndose el vector de Stokes de la figura 19.

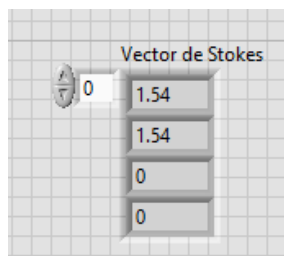


Figura 19. Vector de Stokes de la luz láser.

Finalmente, se grafica el estado de polarización del láser, que se muestra en la figura 20.

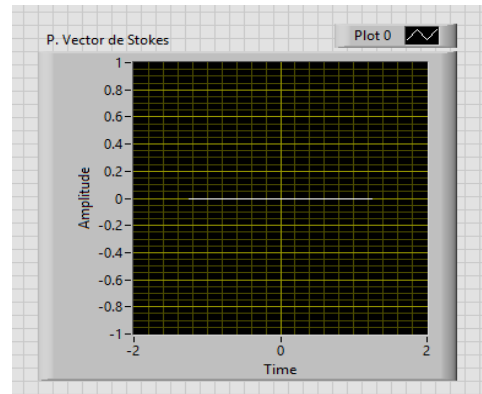


Figura 20. Polarización de la luz láser.

5. CONCLUSIONES.

Se logró desarrollar tanto un programa para simular la reconstrucción de un vector de Stokes, el cual sirvió como base para implementar otro programa con el cual se pudiera obtener el vector de Stokes de un estado de polarización, por medio de las mediciones obtenidas de un arreglo experimental.

El arreglo polarímetro también cuenta con la capacidad de medir la actividad óptica en una muestra y para ello únicamente es necesario hacer ciertas adecuaciones al experimento.

Como trabajo a futuro, se plantea el automatizar el arreglo experimental de manera que el movimiento giratorio de los elementos pueda ser controlados por motores a pasos y que las mediciones sean tomadas en tiempo real por una tarjeta de adquisición de datos y finalmente que sean procesadas en LabVIEW y con esto obtenga el vector de Stokes.

6. REFERENCIAS

- [1] R. Chipman, «Handbook Of Optics, Volumen II,» de *Handbook Of Optics, Volumen II*, McGraw-Hill Education, 1995, p. 37.
- [2] E. Hecht, «Óptica,» de *Óptica*, Madrid, ADDISON WESLEY IBEROAMERICANA, 2000, p. 722.
- [3] N. Instruments, «National Instruments,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/academic/students/learnlabview/esa/>. [Último acceso: 2017].
- [4] Optics, E. (2018). Edmund Optics. Obtenido de <https://www.edmundoptics.com/optics/polarizers/linear-polarizers/3.25quot-dia.-2-pack-gray-polarizing-film/>
- [5] Optics, E. (2018). Edmund Optics. Obtenido de <https://www.edmundoptics.com/optics/polarizers/waveplates-retarders/100-x-100mm-lambda4-retarder-film/>
- [6] Instruments, Q. (2018). quasarinstruments. Obtenido de <http://www.quasarinstruments.com/p-16812-kruss-p8000-digital-automatic-high-speed-polarimeters.aspx>