VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Estudio y desarrollo de prototipo para el ajuste automático del estado de polarización de la luz en fibras ópticas.

Study and Development of a Prototype for the Automatic Adjustment of the Polarization State of Light in Optical Fibers

Yoed Gutiérrez Velarde [1], Rosa Ivonne Penarán Prieto [1], Maximino Roberto Tapia García [1], Juan Carlos Hernández García [1,2], Daniel Alberto Razo Medina [1]

[1]División de Ingenierías, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8 Km, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., 36885, México y.gutierrezvelarde@ugto.mx; mr.tapiagarcia@ugto.mx; darazo@ugto.mx
[2]Investigadoras e investigadores por México CONAHCYT, CDMX, 039040, México. jchernandez@ugto.mx

Resumen

En este trabajo se presenta el estudio y el desarrollo de un prototipo funcional para el ajuste automático del estado de polarización mediante el análisis de controladores comerciales; se emplearon matrices de Jones para el modelado matemático y el prototipo fue automatizado mediante Arduino. El prototipo fue construido mediante diseño asistido por computadora (CAD), fabricado con filamento PLA en impresión 3D, empleando una configuración de tres placas retardadoras en configuración cuarto de onda, media onda, cuarto de onda, accionadas por motores a pasos permitiendo un rango de 0° a 359° para cada placa, ampliando el rango de movimiento con respecto a controladores comerciales. El modelado matemático fue implementado y resuelto mediante software, permitiendo analizar el comportamiento ideal del sistema e identificar las distintas regiones de polarización que podremos obtener en las distintas configuraciones de los ángulos de las placas. Los resultados fueron contrastados con pruebas experimentales, demostrando la viabilidad del sistema propuesto a un bajo costo para futuras aplicaciones o mejoras en sistemas basados en fibra óptica.

Palabras clave: Polarización de la luz; Control automático; Fibra Óptica; Láseres.

Introducción

Las fibras ópticas han sido un avance revolucionario respecto a la transmisión de datos de manera eficaz a largas distancias. La historia de las fibras ópticas inicios en la década de 1870, donde el físico británico John Tyndall mediante experimentación, demostró que la luz pude ser guiada por reflexión a través de un chorro de agua; Alejandro Graham Bell utilizó en 1889 un dispositivo llamado “fotofón” que permitía transmitir la luz a través de ondas lumínicas; En 1953, Kapany inventa la fibra de vidrio y la recubre de un revestimiento que permite su uso práctico, siendo la primera vez que se utiliza el término “fibra óptica”; aunque, no fue hasta la década de 1960 que la tecnología de las fibras ópticas comenzó a ser utilizada para la transmisión de datos. Hoy en día, la fibra óptica es empleada en redes mundiales de internet, telefonía y otros servicios de comunicación. (García, 2026)

Esta tecnología aprovecha algunas características de los pulsos de luz, entre los cuales se encuentra la reflexión, definida como una propiedad física que nos dice que los rayos de luz cambian de dirección al incidir sobre una superficie sin perdidas de potencia considerables. De esta manera, la fibra óptica puede definirse como un conductor de luz, el cual propaga la luz incidente en su núcleo a la máxima velocidad posible.

Polarización de la luz.

Como se mencionó anteriormente, las fibras ópticas aprovechan características de la luz, entre dichas características se encuentra el fenómeno llamado “Polarización”, el cual describe la orientación del campo eléctrico de la onda electromagnética que acompaña a los pulsos de luz. La polarización de la luz ocurre cuando las vibraciones del campo eléctrico en una onda electromagnética se orientan en una sola

dirección. Esta dirección está determinada por cómo se mueve la onda y por la forma en que se alinean esas vibraciones. (Gisbert, 2021)

Al polarizar la luz, logramos controlar en cierta parte la onda electromagnética haciendo que podamos obtener tres tipos distintos de polarización:

- Polarización Lineal: Las oscilaciones del campo eléctrico ocurren en un solo plano.
- Polarización Circular: El componente eléctrico de la onda describe un círculo sobre un plano perpendicular a la dirección de propagación.
- Polarización Elíptica: Una combinación de polarización lineal y circular donde las oscilaciones describen una elipse.

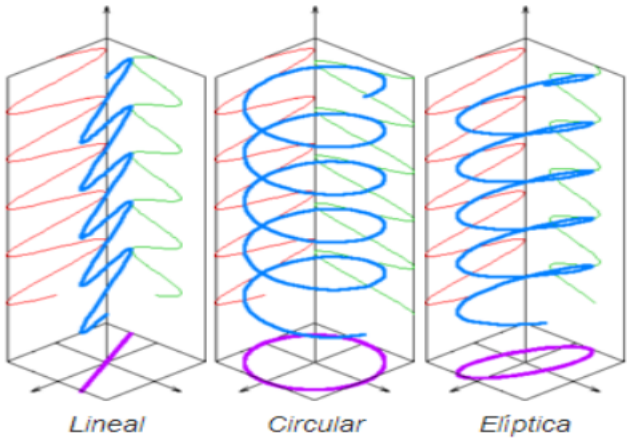


Figura 1. Tipos de polarización.

Para nuestro caso, el control del estado de la polarizacion de la luz es escencial para garantizar el correcto funcionamiento de un sistema que dependa de un tipo de estado de polarización específico, ya sean sensores de fibras ópticas, sistemas de telecomunicación de alta velocidad, etc.

Controles de polarización.

Un control de polarización es un dispositivo el cual es capaz de cambiar la dirección de la onda electromagnética existente en los pulsos de luz, logrando así obtener los tres tipos distintos de polarización mostrados en la Figura 1. Generalmente se emplea una configuración de 3 placas retardadoras HWR (λ/4) y QWF (λ/2), es decir:

- Primera placa: Placa de cuarto de onda (λ/4), introduce un desfase de 90°.
- Segunda placa: Placa de media onda (λ/2), introduce un desfase de 180°.
- Tercera placa: Placa de cuarto de onda (λ/4), introduce un desfase de 90°.

Al rotar las placas se obtiene cualquiera de los tres estados de polarización, y este depende del ángulo en el que este posicionada cada placa en ese mismo instante.

En el mercado existen algunas marcas las cuales cuentan con dispositivos que logran lo antes mencionado, siendo una de las más relevantes Thorlabs, las cuales cuentan con un diseño de tres placas en cascada, las cuales podemos mover manualmente, además de ya contar con un sistema motorizado, considerando como desventajas el hecho de que solo pueden rotar 160° en el caso de las placas motorizadas, teniendo un rango no tan amplio. (Manion, 2026; Phoenix Photonics, 2026; Thorlabs, 2026)



Figura 2. Thorlabs. a) Controlador manual; b) Controlador motorizado

Además de ello, y con la misma configuración de tres placas retardadoras, Phoenix Photonics cuenta tanto con un dispositivo manual con un diseño reducido, y el más relevante, un dispositivo motorizado al cual se le puede conectar una interfaz desarrollada por la misma marca, para un control más preciso de los estados de polarización, contando con un modo de barrido completo, en el cual las placas retardadoras van haciendo un recorrido completo, con la desventaja de no poder detenerse en algún estado de polarización que nosotros necesitemos.



Figura 3. Phoenix. a) Controlador manual; b) Controlador motorizado

No menos importante, existe una patente antigua, la cual describe un sistema de control de polarización mediante la combinación de dos lazos de control: uno de retroalimentación (feedback) y otro anticipativo (feed-forward). Esta patente US 6,576,886 B1, "Dynamic Control of Polarization of an Optical Signal", fue registrada por (X. Steve Yao, 2002) para General Photonics Corporation; la patente propone que un polarímetro en línea mida primero la polarización de entrada, de modo que un circuito de control consulte una tabla de configuraciones predeterminadas y ajuste rápidamente los elementos de polarización a una configuración aproximada. Posteriormente, el segundo módulo mide la polarización de salida real y afina dicha configuración para reducir la desviación respecto al estado deseado. Se emplea una configuración de placas retardadoras, lo cual es una configuración conceptual a los controles de polarización motorizados, como el desarrollado en el presente proyecto.

Modelado del sistema.

Para la caracterización del sistema desde un punto de vista teórico, se emplean las matrices de Jones (Filoteo, 2020), las cuales permiten analizar y predecir cómo cambia la polarización de la luz al interactuar con un dispositivo óptico. El sistema adopta su propia matriz de Jones, teniendo así, tres matrices, una para cada placa retardadora. Dichas matrices se representan con las siguientes ecuaciones:

$$[J_{PC_2}] = [T(\theta_1)] \times [T(\theta_2)] \times [T(\theta_3)] \quad \ldots (1)$$

A su vez:

$$[T(\theta_m)]= \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) + i\sin\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) \times \cos(2\theta_m) & i\sin\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) \times \sin(2\theta_m) \\ i\sin\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) \times \sin(2\theta_m) & \cos\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) - i\sin\left(\frac{\varphi_m}{2}\right) \times \cos(2\theta_m) \end{bmatrix} \quad \ldots (2)$$

En donde $\varphi_1 = \pi/2$, $\varphi_2 = \pi$ y $\varphi_3 = \pi/2$, los cuales son los retardos de fases de las placas (λ/4, λ/2 y λ/4), mientras que θ_1, θ_2 y θ_3 el ángulo de rotación en el que se encuentra posicionada cada placa en ese instante.

Prototipo desarrollado

Una vez analizadas las ecuaciones mencionadas anteriormente, validamos que el sistema es factible, por lo que mediante Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora) e impresión 3D, se construyeron las placas retardadoras tomando como base el diseño de las placas manuales de Thorlabs, aunque, haciéndoles varias modificaciones para lograr un rango más amplio de rotación de dichas placas. Como previamente se mencionó, cada placa tiene un barrido completo de 0° a 359°, haciendo un total de 360^3 combinaciones totales posibles, por lo que, se agregó un motor a pasos conectado a la placa mediante engranes, y con ayuda de un microcontrolador Arduino, se automatizo el barrido total de cada placa.

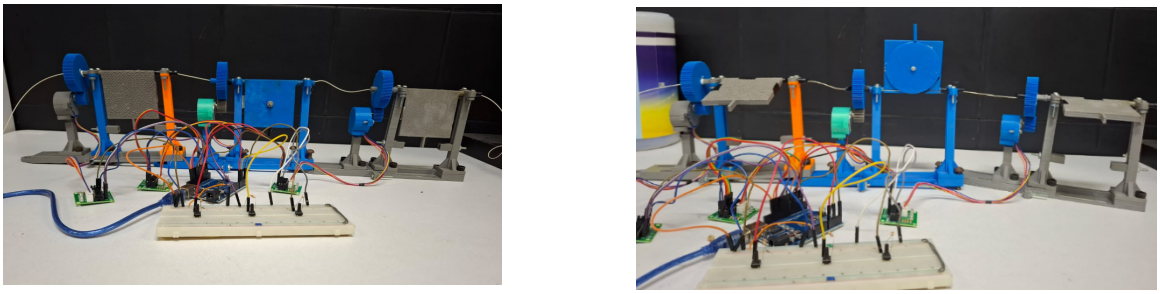


Figura 4. Prototipo Final

Resultados.

Debido a que el ángulo de rotación puede ir de 0° a 359°, el modelado y solución de (1) y (2) fue hecho mediante software matemático; en las simulaciones siguientes se representa el barrido total del ángulo de rotación de cada placa, teniendo en cuenta una potencia de entrada unitaria y sin tomar en cuenta la longitud de onda empleada en la fibra óptica.

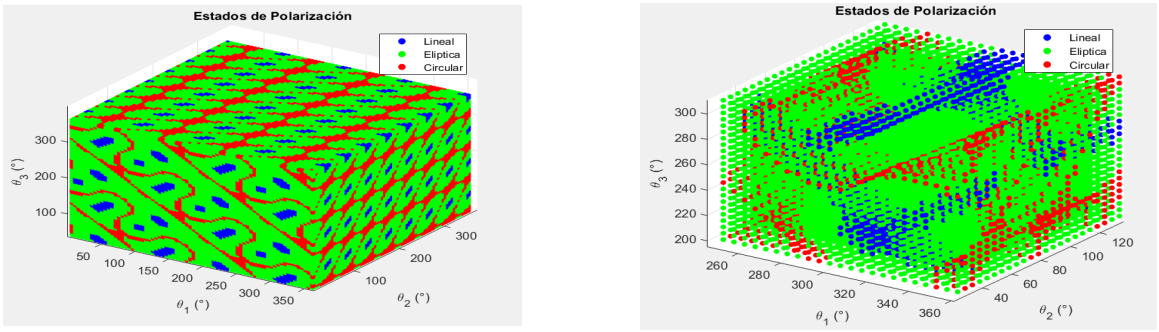


Figura 5. Regiones del estado de polarización obtenidas

La simulación permitió identificar las distintas regiones del estado de polarización; sin embargo, como previamente se mencionó, en la simulación no se tomó en cuenta la longitud de onda empleada, el tipo de fibra, además de que se asumió que la potencia de entrada fuera de valor unitario, por lo que, los resultados obtenidos fueron ideales, aunque son de gran aporte para comprender y validara a nuestro sistema. Debido a ello, posteriormente se realizaron pruebas experimentales con el prototipo desarrollado. Los resultados obtenidos se presentan a continuación, permitiendo evaluar el desempeño real del prototipo desarrollado. Para dichas pruebas, se empleó la siguiente configuración de esquema láser:

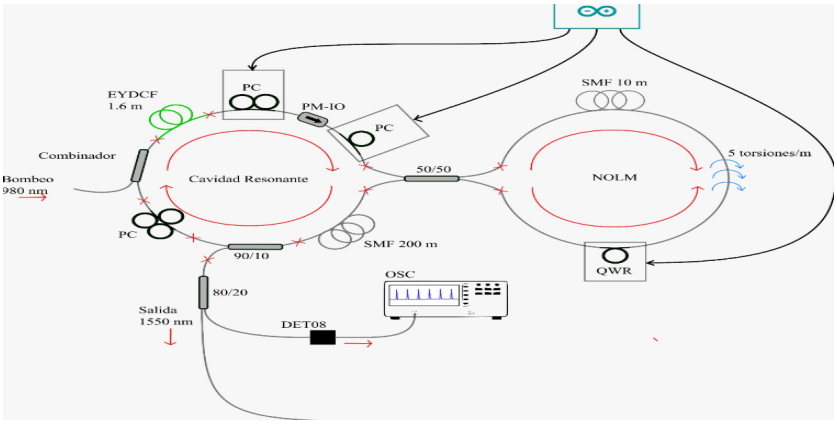


Figura 6. Configuración de esquema laser empleada.

Entre las aplicaciones más relevantes del sistema de control de polarización automático, se encuentra control de perfil temporal de un láser, en la figura siguiente se muestran los distintos perfiles que logramos ver gracias al control de polarización.

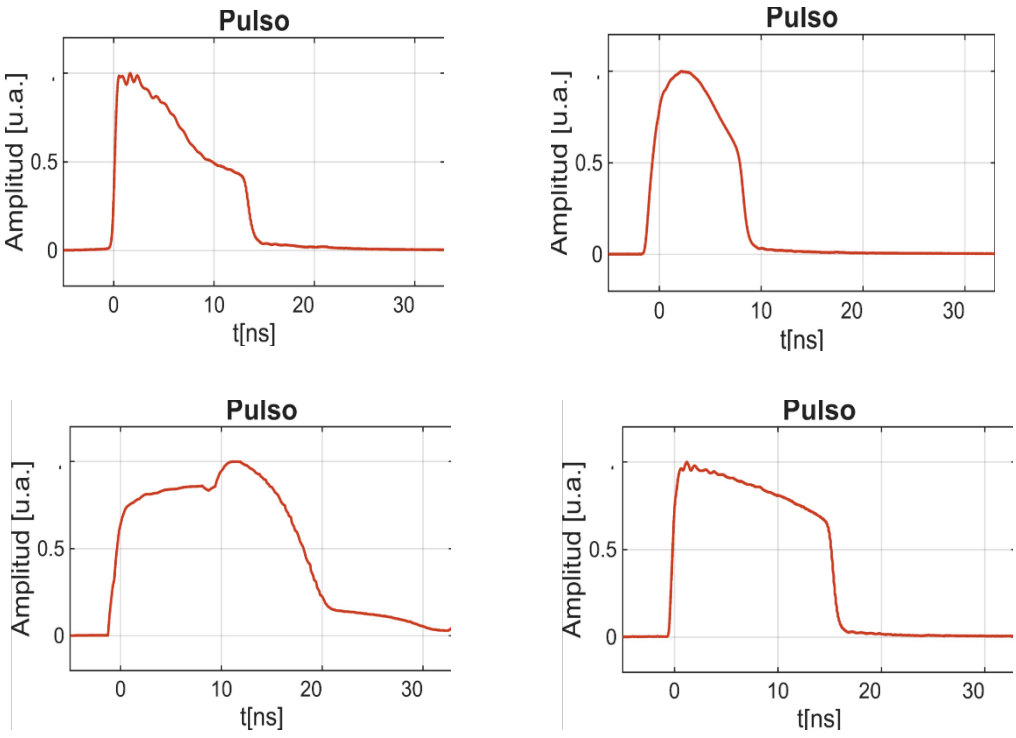


Figura 7. Ejemplos de perfiles de pulso láser modulados por control de polarización.

Conclusiones

En conclusión, la construcción de un sistema que sea capaz de posicionarse de manera totalmente automática es factible debido a que en el mercado no contamos con un sistema que logre eso. El modelado de las matrices de Jones permitió observar e identificar las distintas regiones de polarización, mientras que las pruebas experimentales validaron su funcionamiento. El diseño desarrollado mediante CAD e impresión 3D permitió construir un modelo sencillo y de bajo coso con un rango de rotación de 0° a 359° para cada placa, además de ser una alternativa flexible debido a que se automatizo mediante Arduino, siento robusto y económico. Como futuro trabajo se planea reducir el tamaño de este prototipo, además de implementar algoritmos que permitan ajustar automáticamente el estado de polarización en tiempo real, a partir de un módulo de retroalimentación, mejorando la fiabilidad del sistema.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la SECIHTI a través del programa Investigadoras e Investigadores por México proyecto no. 6969. Y la Universidad de Guanajuato a través de los proyectos CIIC 043/2026 y 044/2026. No menos importante, se da agradecimiento a la Universidad de Guanajuato por el apoyo en el verano de investigación UG 2026.

Bibliografía/Referencias

Filoteo-Razo, J. D., Hernández-García, J. C., Pottiez, O., Sierra-Hernández, J. M., Jauregui-Vázquez, D., Martínez-Angulo, J. R., Rojas-Laguna, R., & Estudillo-Ayala, J. M. (2020). Numerical analysis of DP-MZI–SI comb filter improvement using polarisation-maintaining fibre. Results in Physics, 19, 103363. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103363

García Linares, Y. (2026). Describen cómo se creó la fibra óptica. Gaceta CCH. Ciencia a distancia. Universidad Nacional Autónoma de México. https://gaceta.cch.unam.mx/es/describen-como-se-creo-la-fibra-optica

Gisbert Juárez, M. (2021). Polarización de la luz. Ingenierizando. https://www.ingenierizando.com/optica/polarizacion-de-la-luz/

Manion, G. N.; Stokkermans, T. J. (2026). Polarization of Light. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK592424/

Phoenix Photonics (2026). Fiber polarization controller (Manual técnico).https://www.phoenixphotonics.com/str/products/controllers/polarization_controller_0505.pdf

Steve Yao, X. (2002). United States Patent and Trademark Office. (2003). Fiber polarization controller (U.S. Patent No. 6,576,886 B1). https://patents.google.com/patent/US6576886B1

Thorlabs, Inc. (2026). MPC320 motorized polarization controller (Manual técnico ETN047599-D02). https://media.thorlabs.com/globalassets/items/m/mp/mpc/mpc320/etn047599-d02.pdf