



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO  
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN EN UNA FBG INCLINADA  
INSCRITA EN UNA FIBRA DE DOS NÚCLEOS.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero en Telecomunicaciones

AUTOR: Marco Augusto Comina Velasque

TUTOR: Milton Napoleón Tipán Simbaña

Quito – Ecuador

2024

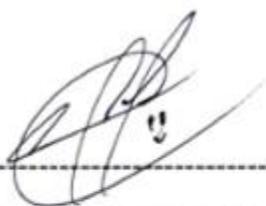
## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Marco Augusto Comina Velasque con documento de identificación N° 1726287723; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 15 de marzo del 2024

Atentamente,



-----  
Marco Augusto Comina Velasque

1726287723

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Marco Augusto Comina Velasque con documento de identificación N° 1726287723, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Artículo Académico: “**Evaluación del efecto del ángulo de inclinación en una fbg inclinada inscrita en una fibra de dos núcleos.**”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 de marzo del 2024

Atentamente,



-----  
Marco Augusto Comina Velasque

1726287723

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Napoleón Tipán Simbaña con documento de identificación N° 1713583126, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN EN UNA FBG INCLINADA INSCRITA EN UNA FIBRA DE DOS NÚCLEOS**, realizado por Marco Augusto Comina Velasque con documento de identificación N° 1726287723 obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 de marzo del 2024

Atentamente,



-----  
Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña MSc.

1713583126

## **DEDICATORIA**

A mi amada madre, Piedad Velasque, fuente inagotable de amor, sabiduría y fortaleza. Tu apoyo incondicional ha sido mi faro en las noches oscuras y mi inspiración en los días soleados. Gracias por ser mi guía y mi mayor ejemplo de perseverancia.

A mi querido padre, Marco Comina, cuyo sacrificio y dedicación han pavimentado el camino hacia mis logros académicos. Tu sabiduría y aliento han sido el motor que impulsa mis sueños. Esta tesis es también un tributo a tu legado y enseñanzas.

A mi adorado hijo, Gabriel Comina, luz de mi vida y fuente de alegría. Tu presencia ha llenado de significado cada paso en este viaje académico. Que esta obra sea un testimonio de mi compromiso contigo, con la construcción de un futuro mejor.

## AGRADECIMINETO

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental de este viaje académico.

En primer lugar, a mis padres, Piedad Velasque y Marco Comina, quienes han sido mis pilares inquebrantables. Su amor, apoyo y sacrificios han sido la fuerza impulsora detrás de cada logro alcanzado. Sin su constante aliento, este camino habría sido mucho más arduo.

A mis amigos, compañeros de risas y consuelo en los momentos difíciles. Gracias por compartir este trayecto conmigo, por ser mi red de apoyo y por comprender las ausencias y dedicación que este proyecto demandó. Su amistad ha enriquecido mi vida de maneras invaluable.

A mis queridos docentes, cuya sabiduría y orientación han iluminado mi camino académico. Gracias por su dedicación, paciencia y por desafiarme a alcanzar lo mejor de mí. Sus enseñanzas perdurarán en mi formación y contribuirán al desarrollo de mi carrera profesional.

Este logro no es solo mío, sino el resultado del esfuerzo colectivo de quienes han compartido este viaje conmigo. A todos ustedes, les ofrezco mi más sincero agradecimiento.

# EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN EN UNA FBG INCLINADA INSCRITA EN UNA FIBRA DE DOS NÚCLEOS

## EVALUATION OF THE EFFECT OF THE ANGLE OF INCLINATION IN AN INCLINED FBG INSCRIBED IN A TWO-CORE FIBER

Augusto Comina<sup>1</sup> , Milton N. Tipán<sup>3</sup> 

### Resumen

Este artículo presenta un estudio sobre el efecto del ángulo de inclinación en una rejilla de Bragg inclinada realizada sobre una fibra óptica de dos núcleos. Los resultados de la simulación muestran que existe una relación creciente entre la potencia de salida normalizada de la rejilla y el ángulo de inclinación, pero una relación inversa con la longitud de onda de trabajo y el ángulo de inclinación.

**Palabras clave:** FBG, TFBG, TCF, MCF.

### Abstract

This article presents a study on the effect of the inclination angle in an inclined Bragg grating made on a two-core optical fiber. The simulation results show that there is an increasing relationship between the normalized output power of the grating and the inclination angle, but an inverse relationship with the working wavelength and the inclination angle.

**Keywords:** FBG, TFBG, TCF, MCF.

---

<sup>1</sup>Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mcominav@est.ups.edu.ec

<sup>2</sup>Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mtipans@ups.edu.ec

## 1. Introducción

La dispersión cromática surge debido a disparidades en las velocidades de propagación de diversas longitudes de onda de la luz en una fibra óptica, originadas por distintos factores, tales como las propiedades del material y el diseño de la fibra [1]. Esta variabilidad conlleva a que los componentes espectrales de una señal óptica alcancen distintos momentos a lo largo de la fibra, ocasionando una ampliación en el pulso luminoso. [2].

La utilización de fibras multinúcleo presenta numerosas ventajas y aplicaciones. En el ámbito de las comunicaciones ópticas, estas fibras prometen potenciar la capacidad de transmisión de datos y optimizar la eficiencia de las redes de alta velocidad. Además, en el ámbito de los sensores distribuidos, posibilitan la vigilancia de extensas áreas o estructuras al emplear cada núcleo como una guía de onda independiente para detectar distintos parámetros físicos. Aunque, en desarrollo, las fibras multinúcleo representan un campo de investigación prometedor, con aplicaciones potenciales que abarcan desde las comunicaciones hasta la medicina y la exploración espacial [2].

El problema de la dispersión en fibras ópticas de dos núcleos radica en las disparidades de dispersión cromática entre los dos núcleos [5]. Este fenómeno provoca un ensanchamiento de los pulsos luminosos a medida que avanzan por la fibra, resultando en distorsiones temporales y pérdida de calidad en la señal transmitida [3]. En una fibra de dos núcleos, los núcleos de guía y de compensación tienen índices de refracción diferentes, generando distintas propiedades de dispersión, a pesar de que esta configuración permite una compensación parcial gracias a la diferencia de dispersión entre ambos núcleos, lograr una compensación total para todas las longitudes de onda sigue siendo un desafío abierto [4].

La compensación de la dispersión posibilita la transmisión de señales a mayores distancias sin degradar significativamente la calidad de la señal. Esto es especialmente valioso en aplicaciones de telecomunicaciones donde se requiere transmitir datos a distancias considerables [5]. Esta compensación se logra mediante Fiber Bragg Gratings (FBG), en particular las FBG inclinadas (TFBG), que ofrecen mejores características de compensación [6]. La evaluación del impacto del ángulo de inclinación en una TFBG inclinada inscrita en una fibra de dos núcleos es crucial, ya que su característica espectral mejora su rendimiento en la compensación. [6].

En este artículo, se presenta un estudio sobre la evaluación del efecto del ángulo de inclinación en una FBG inclinada inscrita en una fibra de dos núcleos. Se analiza cómo las características espectrales de estas FBGs varían en función del ángulo de inclinación.

## 2. Rejilla de Bragg Inclinada TFBG

El interés en las rejillas de Bragg de fibra óptica radica en su aplicación en las comunicaciones ópticas y láseres [7]. Estos dispositivos, desarrollados dentro de la fibra óptica, se utilizan para reflejar, filtrar o dispersar la luz sin salir del núcleo de la fibra, evitando el uso de espejos, volúmenes y rejillas de difracción, esto conlleva a una reducción de la pérdida de energía [8].

Estas rejillas ofrecen la capacidad de medir parámetros comunes como temperatura y deformación. Mediante el uso de rejillas de fibra Bragg, se puede controlar con precisión la temperatura en diferentes ubicaciones [9]. Además, existe la posibilidad de monitorear simultáneamente ambos parámetros. La aplicación de la rejilla de fibra de doble longitud de onda, como la implementada por Wever, se destaca por su habilidad para discriminar entre los efectos de tensión y temperatura en sistemas de sensores. [9].

Para evaluar el acoplamiento y la amplitud espectral de la luz reflejada por la rejilla Bragg inclinada, es necesario que los planos de la rejilla estén orientados de manera inversa en el núcleo de la fibra, permitiendo una conexión flexible, y que estén guiados en el recubrimiento de manera eficiente. En este tipo de rejillas, el vector de la rejilla, representado por  $\mathbf{K}$ , incide en un ángulo ( $\theta_b$ ) con respecto al eje de la fibra, donde la magnitud del vector de onda. [10].

$$\cos \theta_b = \frac{|\mathbf{K}|}{v_i + v_s} = \frac{|\mathbf{K}|}{2v} \quad (1)$$

Esto indica que el ángulo de dispersión ( $\theta_b$ ) está limitado por la longitud de onda y el índice de refracción, como se ilustra en la ecuación 1. Por lo tanto, una rejilla inclinada no solo exhibe diferentes longitudes de onda a diferentes ángulos, sino también varios modos con la misma longitud de onda. Del mismo modo, se generan pequeños ángulos con distintas constantes de propagación.

La 1 de la rejilla Bragg inclinada, el ángulo de inclinación ( $\theta_b$ ) representa la desviación angular de los planos de la rejilla con respecto al eje de la fibra. Cada segmento inclinado en el gráfico corresponde a un ángulo específico. La distancia entre los puntos a lo largo de la curva representa la longitud de onda ( $\lambda$ ), indicando cómo varía la respuesta espectral de la rejilla con cambios en el ángulo de inclinación. Este comportamiento proporciona información crucial sobre cómo la luz se refleja y dispersa en la rejilla Bragg inclinada. [10].

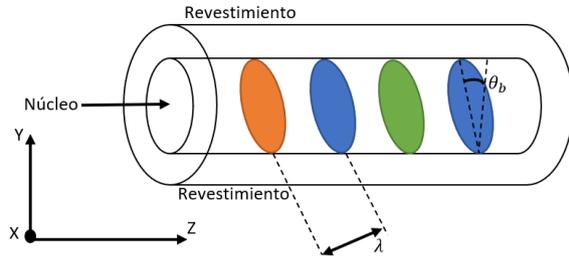


Figura 1. Rejilla Bragg inclinada.

En la ecuación 2, el primer requisito es que el período de la rejilla, denotado como  $\lambda$ , determine la longitud de onda resonante,  $\lambda$ , que debe coincidir con la fase. El segundo requisito se refiere a los índices de refracción del núcleo, expresados como  $n_{effLP11}$  y  $n_{effLP01}$ , asociados a los modos involucrados en el fenómeno de reflexión [10].

$$\lambda = \lambda_e \cdot (n_{effLP11} - n_{effLP01}) \quad (2)$$

La eficiencia de acoplamiento, según la ecuación 3, está influenciada por la forma en que se distribuye el campo modal y por el perfil de modulación del índice de refracción. Es crucial que la función de la integral de transposición del campo eléctrico no sea nula para que la eficiencia de acoplamiento sea significativa .

$$k_{uv} = \left( \frac{n\omega\varepsilon}{2} \right) \iint \Delta n(x, y) E_u(x, y) E_v(x, y) dx dy \quad (3)$$

Donde:

En la expresión,  $k_{uv}$  se refiere al coeficiente de acoplamiento entre los dos modos involucrados,  $n$  representa el índice de refracción del núcleo de la fibra,  $\omega$  es la frecuencia angular de la luz,  $\varepsilon$  es la constante dieléctrica,  $\Delta n(x, y)$  indica la amplitud de la perturbación inducida en el índice de refracción debido a la exposición a los rayos UV, mientras que  $E_u(x, y)$  y  $E_v(x, y)$  son campos eléctricos normalizados [10].

Para realizar la modelación matemática de acuerdo con la ecuación 4, es esencial identificar una porción de la luz ultravioleta (UV), ya que esta experimenta una disminución exponencial a lo largo de la fibra, representada por  $\Delta n(x, y)$ . La variación del índice de refracción con respecto al núcleo de la fibra se vuelve no uniforme después de la exposición a la radiación UV, mostrando un decrecimiento que sigue una función exponencial [4].

$$\Delta n(x, y) = A \exp \left[ -\alpha \left( y + \sqrt{r^2 + x^2} \right) \right] \quad (4)$$

Donde:

Las coordenadas  $x, y$  representan las posiciones en el plano,  $A$  es la magnitud máxima del cambio en el índice en el borde superior del núcleo,  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación que regula la distribución de dicho cambio, y  $r$  es el radio del núcleo de la fibra [10].

La configuración de una rejilla de Bragg en fibra óptica (Fiber Bragg grating) (FBG) se caracteriza por su índice de refracción distribuido en  $n(z)$ , el cual se extiende a lo largo de la fibra, como ilustra la ecuación 5 y 6

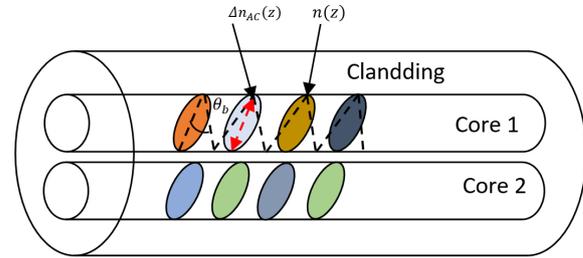


Figura 2. Rejilla de fibra inclinada en fibra óptica de dos núcleos

$$n(z) = n_0 + \sum_{i=1}^2 [\Delta n_{DC,i}(z) + f_{A,i}(z) \cdot \quad (5)$$

$$\Delta n_{AC,i}(z) \cos(2\pi\Lambda_i z + \theta_{b,i}(z))] \quad (6)$$

Donde:

Donde:

$i$  es el índice que representa el núcleo (1 o 2).

$n_0$  es el índice de refracción previo a la rejilla.

$\Delta n_{DC,i}(z)$  es la amplitud de la modulación del índice de refracción para el núcleo  $i$ .

$\Delta n_{AC,i}(z)$  es el cambio promedio para el núcleo  $i$ .

$\Lambda_i$  es el periodo de rejilla de diseño para el núcleo  $i$ .

$\theta_{b,i}(z)$  es el periodo que varía lentamente en  $Z$  para el núcleo  $i$ .

Promedio efectivo del índice de refracción para dos núcleos:

$$n_{eff} = n_0 + \sum_{i=1}^2 \Delta n_{DC,i}(z) \quad (7)$$

En el caso de la rejilla inclinada para dos núcleos:

$$\Delta n_i(x, y) = \Delta n_i \cos \left( \frac{4\pi}{\Lambda_i} (x \cos(\theta_{b,i}) + y \sin(\theta_{b,i})) \right) \quad (8)$$

Donde:

$\Delta n_i(x, y)$  : Varía localmente el índice en  $x, y$ .

$\Delta n_i$  : Amplitud máxima de la variación.

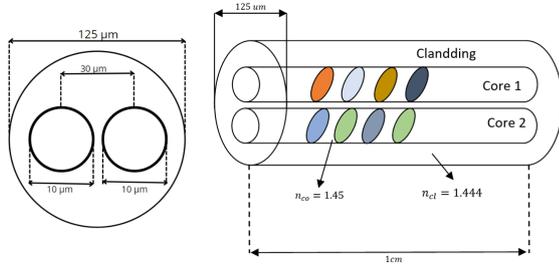
$\Lambda_i$  : Distancia de repetición en la rejilla.

$x, y$  : Coordenadas en el plano transversal.

$\theta_{b,i}$  : Ángulo de inclinación para la variación.

### 3. Configuración de la simulación TFBG

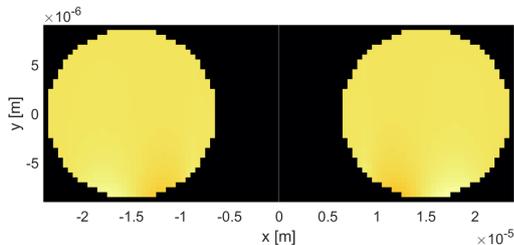
Se realizó una simulación de una Rejilla Inclinada de Bragg en Fibra (Tilted Fiber Bragg Grating, TFBG) inscrita en una fibra óptica de dos núcleos, en el software BPM-Matlab R2023b, teniendo en cuenta que la evaluación se realiza en una fibra de dos núcleos. Los diámetros de los dos núcleos y el diámetro del recubrimiento de fibra de dos núcleos (two core fibre, TCF) son respectivamente de  $8.6\mu m$  y  $125\mu m$ , con un índice de refracción del núcleo  $n_{co} = 1.45$ , del recubrimiento  $n_{cl} = 1.444$ , y una longitud de onda de  $1500\text{ nm}$ . La figura 3 muestra la configuración de la TFBG para la simulación.



**Figura 3.** Parámetros de una rejilla de fibra inclinada en dos núcleos.

Dos láseres son simulados e ingresados a cada núcleo de la TCF y la potencia a la salida de TFBG fue medida para el rango de  $1500\text{ nm}$  a  $1600\text{ nm}$ . En cada longitud de onda se varió el ángulo de inclinación de la TFBG desde  $10^\circ$  a  $80^\circ$ , para simular una TFBG reflectiva ( $\theta_b < 45^\circ$ ) y transmisiva ( $\theta_b > 45^\circ$ ).

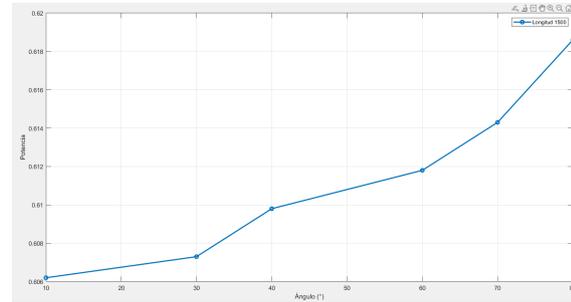
### 4. Resultados y análisis



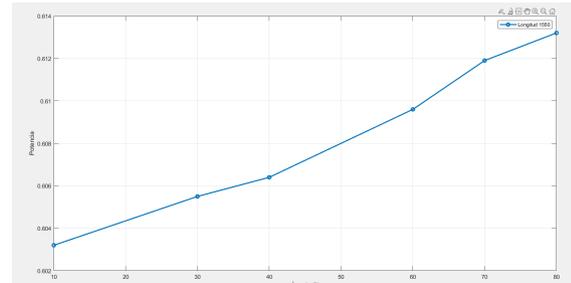
**Figura 4.** Efecto de la luz ultravioleta en la TFBG.

El perfil del índice de refracción de la TFBG es simulado; el efecto de la luz UV se muestra en la figura 4, donde se presenta la variación del índice de refracción debido al ángulo de inclinación como un degradado del color, lo cual indica el adecuado funcionamiento de la simulación.

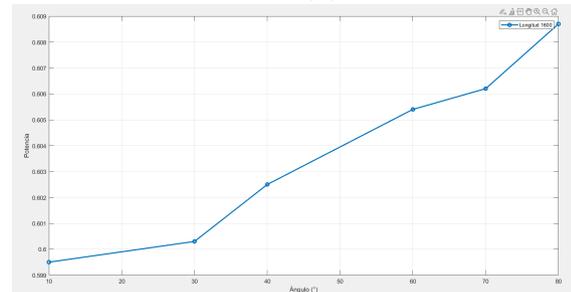
La potencia de la evaluación del efecto del ángulo de inclinación en la FBG inclinada en una fibra de dos núcleos, la figura 5 representa la potencia a la salida de la TFBG. En este análisis, se destaca un comportamiento directamente proporcional entre el ángulo de inclinación y la potencia para todas las longitudes de onda consideradas. Este fenómeno subraya la influencia significativa del ángulo de inclinación en la transmisión de potencia a través de la FBG.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.** Comparación de potencias de la longitud de ángulo de 1500 en (a) 1550 en (b) y 1600 en (c)

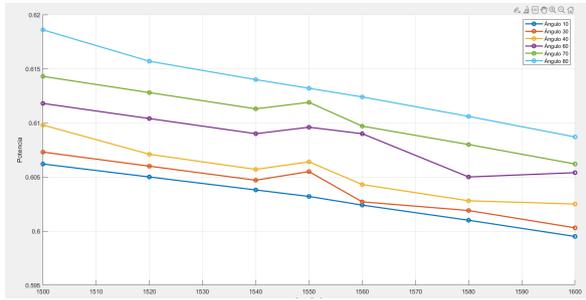


Figura 6

Un análisis de la potencia a la salida de la TFBG en el rango de  $1500\text{nm}$  a  $1600\text{nm}$  fue realizada, los resultados se muestran en la figura 6, se observa un comportamiento decreciente de la potencia en toda la banda. Un ligero incremento de la potencia a  $1550\text{nm}$  es predecible ya que esta es la frecuencia de resonancia de la rejilla, este incremento de potencia se observa también con el incremento del ángulo de inclinación.

## 5. Conclusiones

Un estudio sobre el impacto del ángulo de inclinación en la transmisión de potencia a través de una TFBG creada en una fibra óptica de dos núcleos fue realizado, se ha revelado una relación creciente entre el ángulo de inclinación y la potencia de salida de la TFBG. Así mismo, existe una relación decreciente entre la potencia y la longitud de onda de trabajo de la rejilla. Un estudio posterior sobre la transferencia de potencia entre los núcleos es necesario para tener una comprensión mayor del efecto del ángulo. Los resultados de este estudio contribuirán a mejorar la comprensión de las FBGs inclinadas y su aplicación en fibras de dos núcleos, con posibles implicaciones significativas en el desarrollo de tecnologías ópticas avanzadas para diversas aplicaciones prácticas.

## Referencias

[1] *Single-Mode Fiber Performance Characteristics*. (2000). The International Engineering Consor-

tium. Retrieved July 9, 2001, from the World Wide Web: <http://www.iec.org/tutorials/fiber-optic/topic06.html>

- [2] Hecht, J. (2000, July). Dispersion control boosts high-speed transmission. *Laser Focus World*, 107-13.
- [3] Keiser, G. (1983). *Optical Fiber Communications*. New York: McGraw-Hill.
- [4] Sotelo, P. I. H. (s/f). “Aplicación de las rejillas de Bragg en fibra óptica para medición de vibraciones en eventos de baja frecuencia”. Repositorio institucional.mx. Recuperado el 23 de enero de 2024, de <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/585/1/11510.pdf>.
- [5] May Alarcón, M., et al. (2002). Sensor láser de fibra óptica con una cavidad de 8.6 km formada por dos rejillas de Bragg usadas como espejos. *Revista Mexicana de Física*, 48(5), 434-437.
- [6] Othonos, A., Kalli, K. (1999). *Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Artech House, Inc., Capítulo 2.
- [7] Lerner, E.J. (1997). Optical fibers carry information of the age. *Laser Focus World*, 33(3), 101-6. Retrieved June 26, 2001 from EBSCO database (MasterFile Premier) on the World Wide Web: <http://www.ebsco.com>
- [8] *Thoughts About Fiber Optics*. (2000). Optimized Engineering Corporation. Retrieved June 30, 2001, from the World Wide Web: <http://www.optimized.com/COMPENDI/L1-fiber.htm>
- [9] Gapontsev, V. P., Matitsin, S. M., Isinev, A. A., & Kravchenko, V. B. (1982). Erbium Glass Lasers and Their Applications. *Optics Laser Technology*, 14, 189-196 (Agosto).
- [10] Canchig, T., & Valeria, A. (2022). Diseño de una rejilla inclinada de Bragg basada en fibra óptica de dos modos para reducción del retardo modal.