

ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS SUBACUÁTICAS

Analysis of underwater optical communications propagation

| | |
|-----------------|-------------------------------|
| Sebastian Ruiz | emilio.ruiz@epoch.edu.ec |
| Madelaine Muñoz | madelaine.munioz@epoch.edu.ec |

Facultad de Informática y Electrónica
 Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
 Riobamba, Ecuador.

RESUMEN

Este artículo presenta un estudio de la propagación de luz en medios acuáticos. El objetivo principal fue investigar y comprender los fenómenos que causan pérdidas de propagación en la transmisión de luz en medios líquidos, específicamente agua bajo diferentes condiciones. Para estudiar el comportamiento de estas ondas en un medio líquido se realizó una simulación utilizando una fibra óptica monomodo Corning SMF-28 con una transición de agua utilizando el software FIMMWAVE y realizando un análisis a través de regresión polinomial, relacionando la variación de la longitud de onda en función de la permitividad del agua, con lo cual se obtuvo una ecuación con un comportamiento polinómico de orden 11. Las longitudes de onda analizadas abarcaron un rango de 0.18 a 1.13 μm , considerando agua potable como el medio de transición. En el análisis de resultados se utilizó la herramienta WG Scanner de FIMMWAVE para analizar los modos de propagación en la fibra óptica, observando un comportamiento exponencial más allá de cierto valor de longitud de onda. Este estudio busca avanzar en el conocimiento de las comunicaciones subacuáticas y proporcionar información relevante para el diseño y la optimización de sistemas de transmisión óptica en entornos acuáticos. La comprensión de la propagación de la luz en este contexto es fundamental para mejorar la calidad y la eficiencia de las comunicaciones submarinas.

Palabras Clave: Fibra Óptica, Fibra Monomodo, Fimmwave, Comunicaciones, Comunicaciones Subacuáticas.

ABSTRACT

This article presents a study of light propagation in aquatic environments. The main objective was to research and understand the phenomena that cause propagation losses in the transmission of light in liquid media, specifically water under different conditions. To study the behavior of these waves in a liquid medium, a simulation was carried out using a Corning SMF-28 single-mode optical fiber with a water transition using the FIMMWAVE software and performing an analysis through polynomial regression, relating the variation of the wavelength as a function of the permittivity of the water, with which an equation with a polynomial behavior of order 11 was obtained. The wavelengths analyzed spanned a range of 0.18 to 1.13 μm , considering drinking water as the transition medium. In the analysis of results, FIMMWAVE's WG Scanner tool was used to analyze the propagation modes in the optical fiber, observing an exponential behavior beyond a certain wavelength value. This study seeks to advance the knowledge of underwater communications and provide relevant information for the design and optimization of optical transmission systems in aquatic environments. Understanding light propagation in this context is critical to improving the quality and efficiency of submarine communications.

Palabras Clave: Optical Fiber, Single-Mode Fiber, Fimmwave, Communications, Submarine Communications.

► I. Introducción

En los últimos años, las comunicaciones subacuáticas han experimentado un importante desarrollo, encontrando diversas aplicaciones en la actualidad, como el monitoreo ambiental, la recolección de datos oceanográficos, el monitoreo de desastres y la exploración submarina [1] [2]. Estas comunicaciones se basan principalmente en el uso de tres tipos de señales para su propagación: señales electromagnéticas, señales ópticas y señales acústicas [3] [4]. Sin embargo, estas señales presentan ventajas y desventajas en su propagación debido a las características dieléctricas del medio en el que se transmiten [5] [6].

Las señales pueden variar dependiendo del entorno en el que se propaguen. Por ejemplo, en el caso de las ondas electromagnéticas, su velocidad máxima de propagación se alcanza en el aire o el vacío, con un valor de 3×10^8 m/s a diferencia del resto de tipos de medios como el agua dulce que presenta una permitividad relativa de 80 [7] [8].

Para analizar el comportamiento de una onda en las comunicaciones subacuáticas, se debe considerar también la conductividad del medio, ya que este valor puede afectar la atenuación y la velocidad de propagación de la onda [9] [10]. El agua potable tiene una conductividad que varía de 500 mhos/cm a 800 mhos/cm y el agua de mar puede llegar a tener una conductividad de 60000 mhos/cm [11] [12].

Las ondas al propagarse en el agua presentan problemas como la atenuación, que reduce la intensidad de la señal a medida que avanza, y la dispersión, que causa desviaciones en la trayectoria de la onda provocando pérdida de información [13] [14]. Además, el ruido en las comunicaciones subacuáticas disminuye la tasa de transmisión y afecta la calidad de la señal. Existen diferentes fuentes de ruido en este tipo de comunicaciones, como el ruido del fondo del océano, el ruido generado por barcos, animales marinos y actividades humanas [15] [16]. Por último, otro factor a considerar es el ancho de banda limitado que se tiene en este tipo de comunicaciones. Para transmitir la información en una comunicación subacuática el tipo de modulación más utilizada es la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) [17] [18].

Las señales ópticas son una opción viable para la propagación en el agua. Estas señales no se ven

afectadas por el efecto Doppler, y la distancia que pueden recorrer depende de la frecuencia de funcionamiento [19] [20]. Un ejemplo donde se utilizan señales ópticas es la fibra óptica, que consta de un hilo muy fino de material transparente, como vidrio o materiales plásticos, por donde se transmiten pulsos de luz [21] [22].

La fibra monomodo, permite la propagación de un único modo de luz, esto se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra a un tamaño de 8.3 a 10 micrones, lo que asegura una sola dirección de propagación [23] [24]. Las fibras monomodo permiten alcanzar grandes distancias de propagación de hasta 400 km y transmitir elevadas tasas de información [25] [26] [27] [28].

En este trabajo de investigación, se analizaron las pérdidas de propagación utilizando señales ópticas a través de una transición con diferentes tipos de agua realizando simulaciones en el software FIMMWAVE. Estas simulaciones permitieron variar la transición, en específico la permitividad y observar el comportamiento de la señal de luz antes y después de la transición considerando los diferentes modos de propagación.

► II. Metodología

En esta investigación se diseñó una estructura formada por una fibra comercial monomodo Corning SMF-28 con una transición intermedia de material líquido (agua potable como base), como se observa en la figura 1, con un índice de refracción que varía en un rango de 1.330 a 1.340, valores que dependen de factores como la temperatura y la presión. Para analizar esta estructura se utilizó el software de simulación FIMMWAVE.

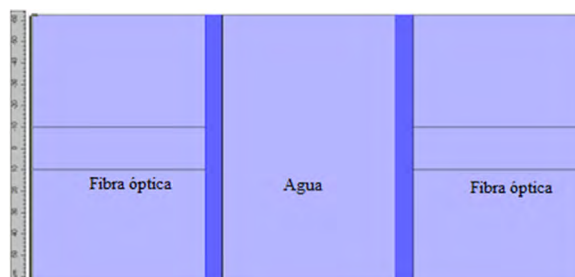


Fig. 1. Estructura de la unión de la fibra monomodo y agua.

Para el análisis de propagación se creó una fibra monomodo, utilizando las características y dimensiones de la fibra óptica monomodo Corning SMF-28. Aunque esta fibra está optimizada para longitudes de onda cercanas a $1.55 \mu\text{m}$,

se puede utilizar en el rango de 1.12 μm con algunas limitaciones en términos de atenuación y dispersión. Para el análisis se utilizó un índice de refracción en un rango de longitud de onda de 0.18 a 1.13 μm en función de los materiales que se encuentra en las librerías del software como se detalla en la Tabla I.

TABLA 1: RIX (fimmwave – material del agua).

| No | Lambda | Indice de Refracción |
|----|------------|----------------------|
| 1 | 0.18178736 | 1.468725 |
| 2 | 0.18261377 | 1.465757 |
| 3 | 0.18365075 | 1.462235 |
| 4 | 0.18457517 | 1.459262 |
| 5 | 0.18496831 | 1.458039 |
| 6 | 0.852344 | 1.327733 |
| 7 | 0.894596 | 1.327068 |
| 8 | 1.01426 | 1.325273 |
| 9 | 1.08333 | 1.324248 |
| 10 | 1.12895 | 1.323559 |

Con los datos de la tabla I se realizó una regresión polinómica para obtener la permitividad en función de la longitud de onda ajustando la función a los datos originales registrados en FIMMWAVE. El polinomio fue de grado 11 de la forma:

$$p(x) = p_1x^{11} + p_2x^{10} + \dots + p_{10}x^2 + p_{11}x^1 + p_{12} \quad (1)$$

Y la curva ajustada se visualiza en la figura 2 con los coeficientes pi de la ecuación Ec.1. que se obtuvieron utilizando la función *polyfit* de Matlab.

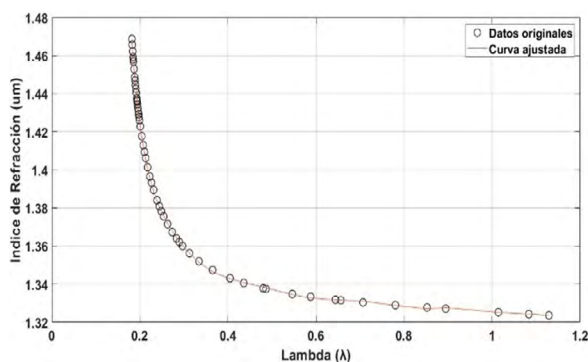


Fig. 2. Modelo de la variación de la permitividad del agua en función de lambda.

Para realizar la simulación se empleó el modo FDM (Frequency Division Multiplexing) debido a que proporciona el solucionador más potente de FIMMPROP, permitiendo calcular superposiciones de modos de manera eficiente. La figura 3 presenta un ejemplo de una fibra monomodo utilizada en la simulación [29].

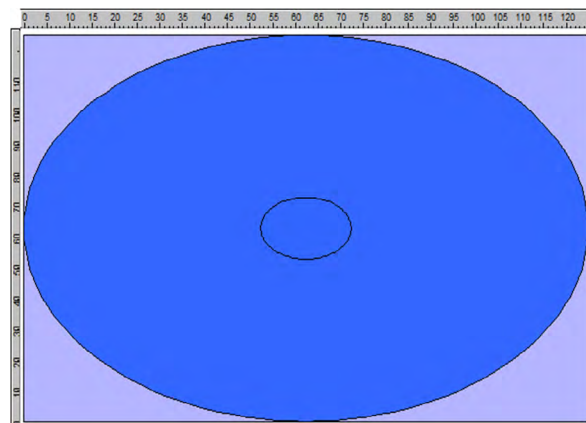


Fig. 3. Fibra Monomodo.

El "Mode Finder" (Buscador de Modos) es una herramienta que se utiliza para encontrar y analizar los modos de propagación en guías de onda ópticas. El modo de propagación se refiere a la distribución espacial del campo electromagnético dentro de una estructura óptica, como una fibra óptica o una guía de onda plana. El objetivo principal del "mode finder" es determinar los modos de propagación que son soportados por una estructura óptica específica. Esto es importante porque cada modo de propagación tiene características únicas, como el perfil de campo electromagnético, la frecuencia de resonancia y la constante de propagación.

En FIMMWAVE, el "mode-finder" utiliza métodos numéricos de elementos finitos (FEM) para resolver las ecuaciones de Maxwell que describen la propagación de la luz en una estructura óptica. Estos algoritmos encuentran los modos de propagación que satisfacen las condiciones de contorno y las propiedades del material definidas para la estructura como se observa en las figuras 4, 5.

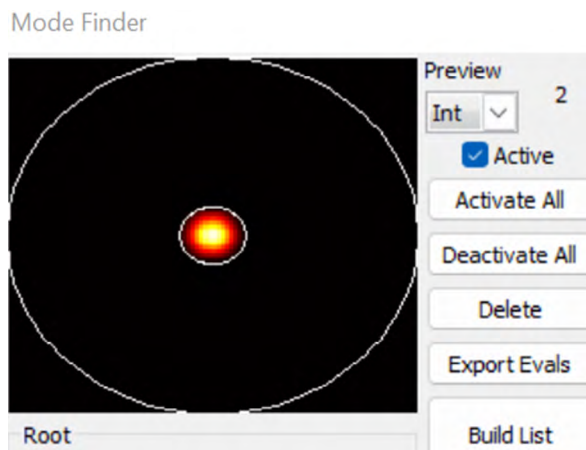


Fig. 4. Modo de propagación 2 de la fibra óptica.

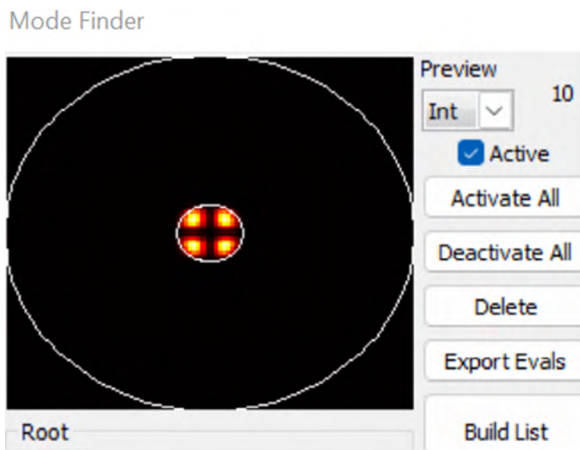


Fig. 5. Modo de propagación 10 de la fibra óptica.

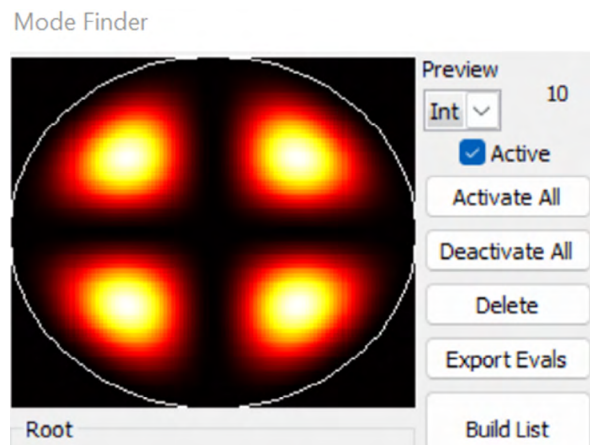


Fig. 8. Modo de propagación 10 del agua.

En la Figura 6 se observa la transición de agua en FIMMWAVE, esta contiene varios modelos en el espectro visible e infrarrojo cercano para la mayoría de los materiales comúnmente utilizados en ópticas. Al igual que en la fibra óptica se aplicó el modo finder en la transición de agua como se muestra en la Figura 7 y 8.

La estructura simulada considera la fibra SMF-28 con una longitud de 1000 μm , una transición de agua de 1000 μm con un radio de 125 μm y una segunda fibra SMF-28 con una longitud de 1000 μm . La figura 9 muestra la propagación de la luz a diferentes longitudes de onda con una vista lateral y la figura 10 define cortes laterales donde se aprecia como está la intensidad de luz en la fibra y en la transición.

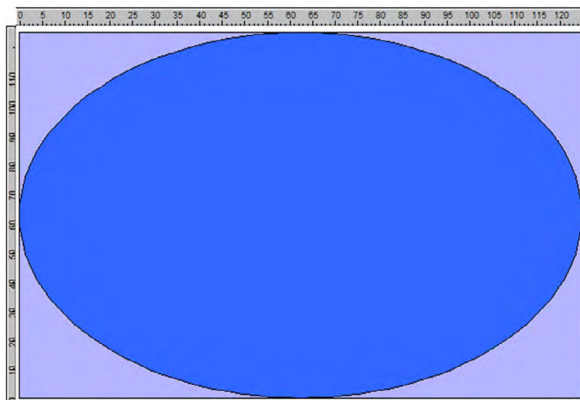


Fig. 6. Material de Agua dentro de la base de datos de FIMMWAVE.

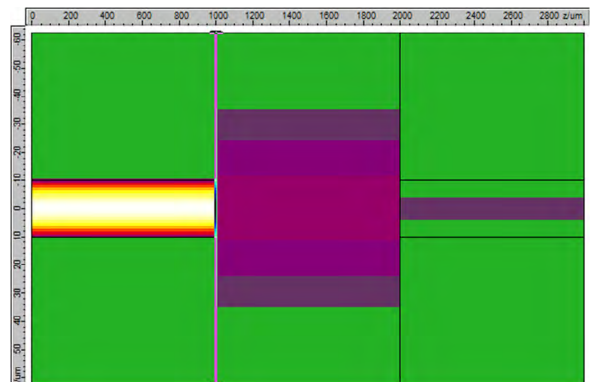


Fig. 9. Simulación de las estructuras unidas.

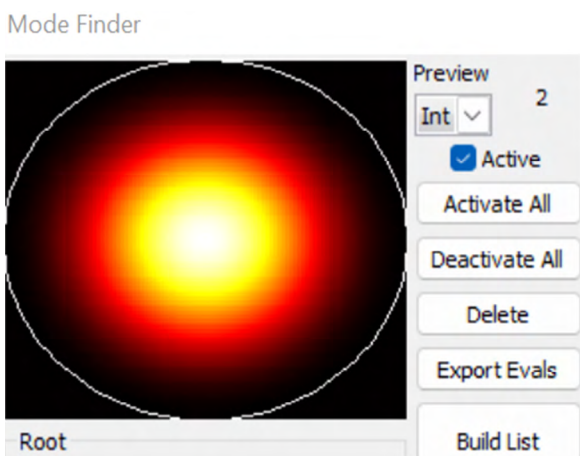


Fig. 7. FModo de propagación 2 del agua.

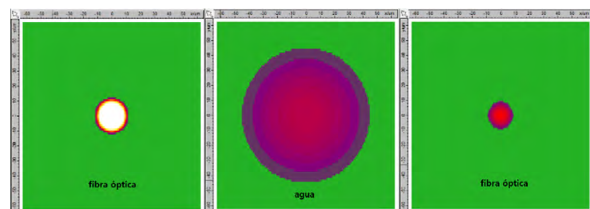


Fig. 10. Corte Lateral de la figura 9.

Para la figura 11 la estructura simulada comprende una fibra SMF-28 de 1000 μm de longitud, seguida de una transición de agua de 0.4 μm de longitud con un diámetro de 125 μm , y finalmente otra fibra SMF-28 de 1000 μm de longitud. La figura 11 ilustra la propagación de la luz a distintas

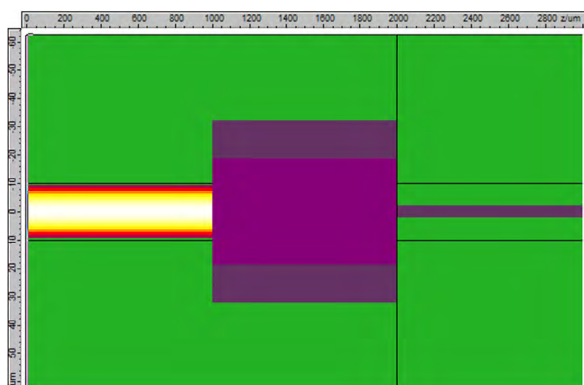


Fig. 11. Simulación de las estructuras unidas con un lambda de 0.4um.

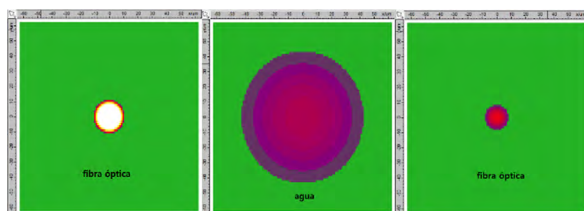


Fig. 12. Corte Lateral de la figura 11.

Para la figura 13 la estructura simulada comprende una fibra SMF-28 de 1000 um de longitud, seguida de una transición de agua de 0.6 um de longitud con un diámetro de 125 um, y finalmente otra fibra SMF-28 de 1000 um de longitud. La figura 13 ilustra la propagación de la luz a distintas longitudes de onda desde una perspectiva lateral, mientras que la figura 14 presenta secciones laterales que muestran la distribución de la intensidad lumínica tanto en la fibra como en el agua.

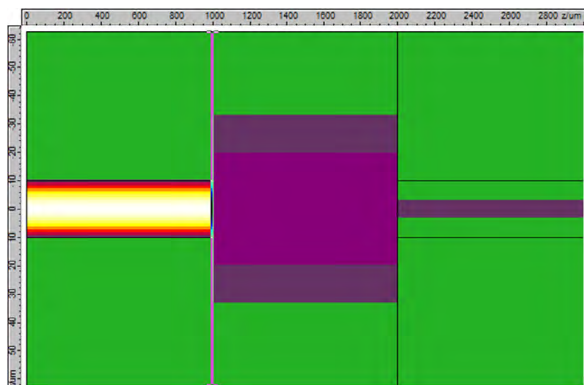


Fig. 13. Simulación de las estructuras unidas con un lambda de 0.6um.

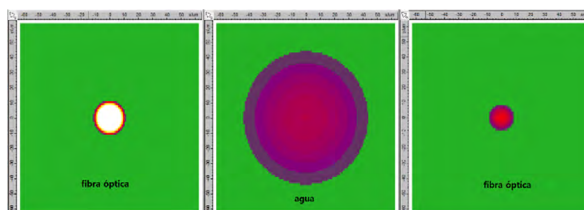


Fig. 14. Corte Lateral de la figura 13.

Para la figura 15 la estructura simulada comprende una fibra SMF-28 de 1000 um de longitud, seguida de una transición de agua de 0.8 um de longitud con un diámetro de 125 um, y finalmente otra fibra SMF-28 de 1000 um de longitud. La figura 15 ilustra la propagación de la luz a distintas longitudes de onda desde una perspectiva lateral, mientras que la figura 16 presenta secciones laterales que muestran la distribución de la intensidad lumínica tanto en la fibra como en el agua.

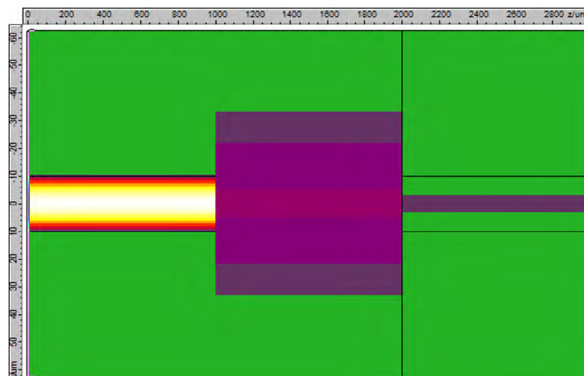


Fig. 15. Simulación de las estructuras unidas con un lambda de 0.8um.

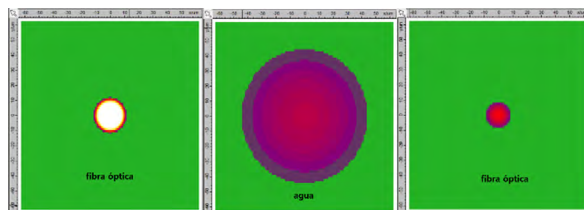


Fig. 16. Corte Lateral de la figura 15.

Para la figura 17 la estructura simulada comprende una fibra SMF-28 de 1000 um de longitud, seguida de una transición de agua de 1 um de longitud con un diámetro de 125 um, y finalmente otra fibra SMF-28 de 1000 um de longitud. La figura 17 ilustra la propagación de la luz a distintas longitudes de onda desde una perspectiva lateral, mientras que la figura 18 presenta secciones laterales que muestran la distribución de la intensidad lumínica tanto en la fibra como en el agua.

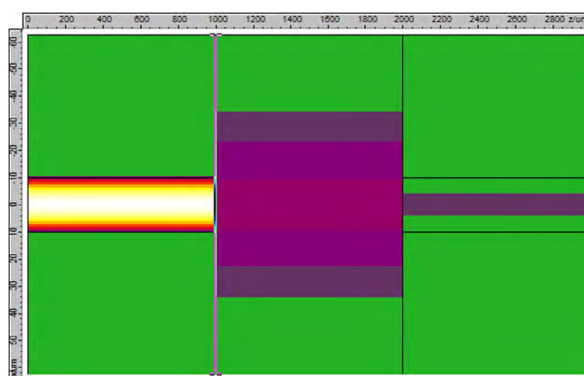


Fig. 17. Simulación de las estructuras unidas con un lambda de 1 um.

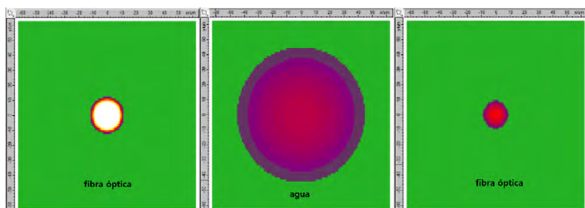


Fig. 18. Corte Lateral de la figura 17.

Las simulaciones realizadas se hicieron para los 10 primeros modos de propagación y sus resultados se analizarán en el siguiente apartado.

➤ III. Resultados

La convergencia de las pérdidas de los modos con un espesor de la capa perfectamente adaptada (PML), se simuló utilizando el WG Scanner dentro de FIMMWAVE el cual ayudó a estudiar los modos los cuales se utilizaron para mejorar la precisión y la eficiencia de las simulaciones de dispositivos ópticos, permitiendo la simulación de campos electromagnéticos que se propagan en un medio dieléctrico sin los efectos indeseados de los bordes de la región de simulación.

En la figura 18 se muestra el resultado del análisis de la fibra en el segundo modo de propagación. En este modo existe una banda de $0.24 \mu m$ hasta $0.4 \mu m$ que impiden la transmisión, y a partir de $0.5 \mu m$ empieza una tendencia de crecimiento exponencial que muestra una propagación mínima. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 0.3 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

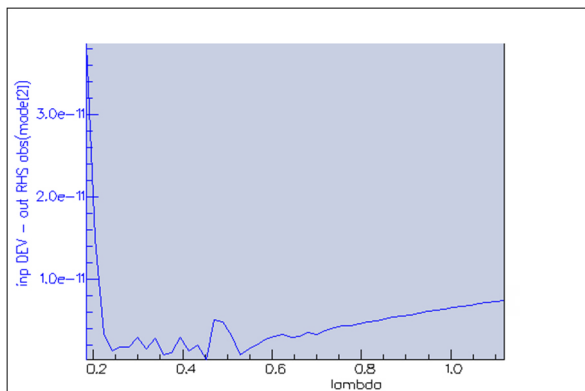


Fig. 18. Propagación en la fibra óptica del segundo modo.

Para el cuarto modo de propagación de la fibra óptica, tiene una banda de $0.2 \mu m$ donde comienza una tendencia de crecimiento exponencial que muestra una propagación mínima. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 1.6

(adimensional) se visualiza una propagación directa. Este resultado se muestra en la Figura 19.

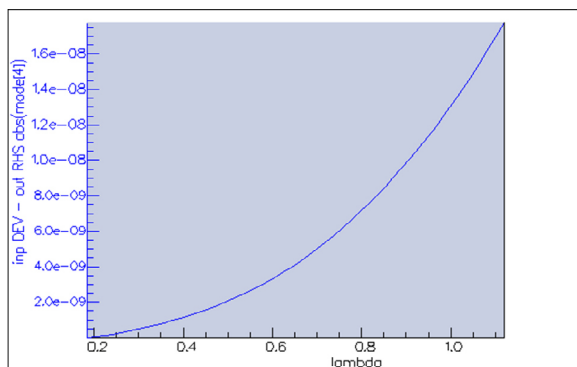


Fig. 19. Propagación en la fibra óptica en el cuarto modo.

En la figura 20 se observa el quinto modo de propagación en la fibra óptica, a diferencia del Modo 4 desde la banda de $0.2 \mu m$ empieza una tendencia de crecimiento exponencial que muestra una propagación mínima. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 1.6 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

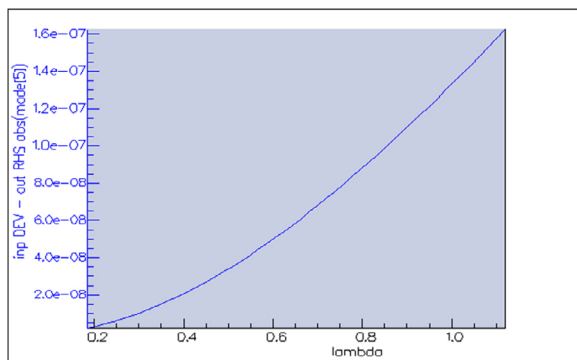


Fig. 21. Propagación en la fibra óptica en el quinto modo.

Para el sexto modo de propagación en la fibra óptica se tiene una banda de $0.19 \mu m$ donde empieza una tendencia de crecimiento exponencial que muestra una propagación mínima como se muestra en la Figura 22. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 1.2 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

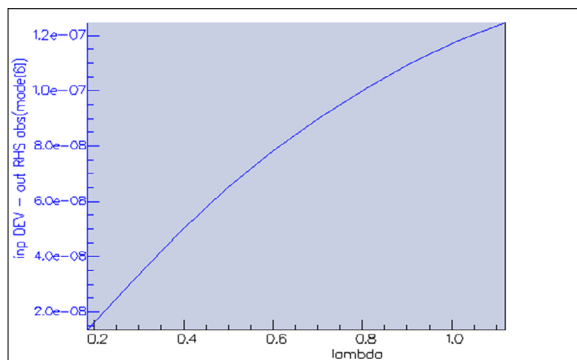


Fig. 22. Propagación en la fibra óptica en el sexto modo.

En la Figura 23 se muestra el resultado de la propagación de la fibra óptica en el séptimo modo. En este caso a longitudes bajas no existe propagación, pero empieza una tendencia de crecimiento exponencial, la cantidad es mínima debido al material, pero existe propagación desde la banda de $0.19\mu m$. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 0.003 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

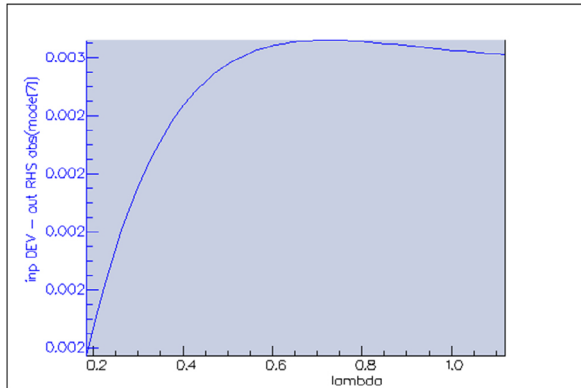


Fig. 23. Propagación en la fibra óptica en el séptimo modo.

Para el octavo modo de propagación en la fibra óptica se tiene un valor de mínimo 1.25 (adimensional) y tiene una caída a 1(adimensional) hacia la banda de $0.22\mu m$ donde empieza una tendencia de crecimiento exponencial que muestra una propagación mínima. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 8 (adimensional) se visualiza una propagación directa. Este resultado se muestra en al Figura 24.

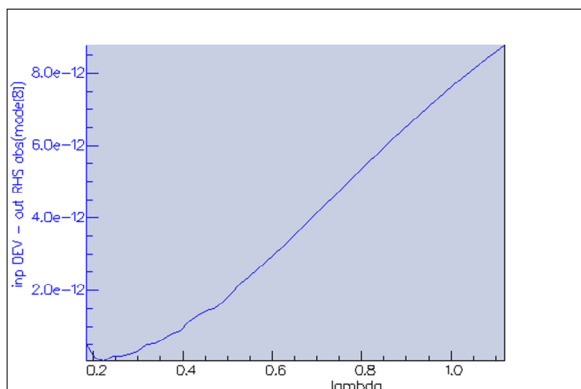


Fig. 24. Propagación en la fibra óptica en el octavo modo.

En la Figura 25 se muestra el noveno modo de propagación en la fibra óptica. En este caso desde la banda de $0.22\mu m$ hasta $0.775\mu m$ se abre una ventana de propagación. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 5 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

(adimensional) se visualiza una propagación directa.

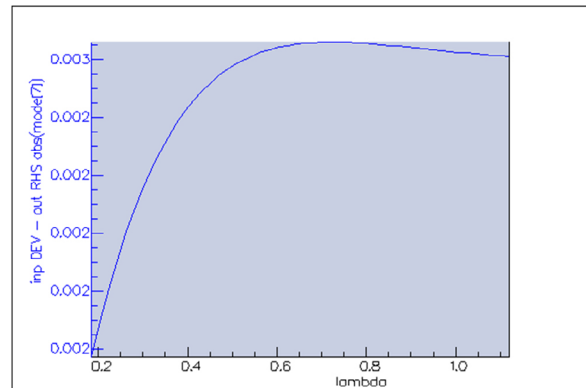


Fig. 25. Propagación en la fibra óptica en el noveno modo.

Para el décimo modo de propagación en la fibra óptica se tiene una banda de $0.25\mu m$ hasta $0.75\mu m$ donde se abre una ventana de rechazo en el cual no existirá una propagación nula, y desde la banda de $0.75\mu m$ hasta $1.12\mu m$ se abre una ventana de propagación, como se muestra en la Figura 26. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 5 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

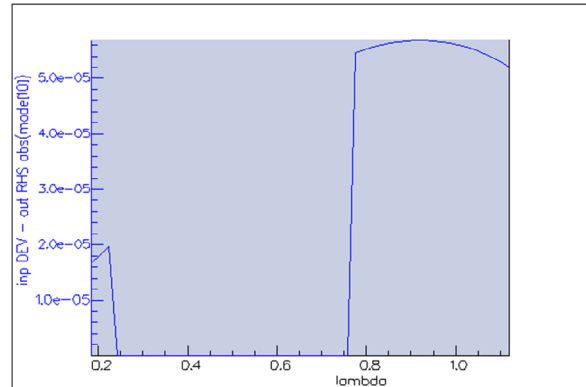


Fig. 26. Propagación en la fibra óptica en el décimo modo.

» IV. Discusión

Este trabajo permitió analizar los diferentes modos de propagación dentro de la fibra óptica con una transición de agua donde se obtuvo una distancia de propagación máxima de 1000 μm . Las limitaciones que se presentaron en la propagación de las ondas se dan en la longitud de onda debido a que el rango está delimitado a 0.18 hasta 1.12 μm debido a las características del material donde para valores superiores el índice de refracción se considera constante. Al trabajar a distancias de 0.4 μm hasta 1 μm , se realizaron comparaciones determinando como se comporta la onda en base

a los parámetros establecidos de la permitividad, longitud de onda y distancia.

» V. Conclusiones

A partir del exhaustivo análisis realizado sobre la propagación de las comunicaciones ópticas subacuáticas, se ha demostrado que la utilización de señales ópticas mediante fibra óptica monomodo es una opción altamente viable y eficiente para la transmisión de información a grandes distancias en entornos acuáticos. El estudio de los modos de propagación mediante herramientas como WG Scanner ha permitido un mejor entendimiento del comportamiento de las señales, evidenciando una tendencia de crecimiento exponencial de la propagación mínima a partir de ciertas longitudes de onda. Asimismo, la eficiencia de la propagación se refleja en los valores de ganancia adimensionales, donde valores menores indican una mejor propagación directa. En conclusión, este estudio brinda una perspectiva prometedora para el desarrollo de comunicaciones subacuáticas ópticas más avanzadas y eficientes, al revelar las características y rangos en los cuales se abre una ventana de propagación para diferentes modos de onda.

» VI. Agradecimientos

Deseo dedicar un sincero agradecimiento al Ingeniero Hugo Moreno por la guía y paciencia al ayudarme a realizar este artículo.

» VII. Referencias

- [1] H. KAUSHAL y G. KADDOUM, «Underwater Optical Wireless Communication,» IEEE access, vol. 4, pp. 1518-1547, 2016.
- [2] I. F. AKYILDIZ, P. WANG y S.-C. LIN, «SoftWater: Software-defined networking for next-generation underwater communication systems,» Ad Hoc Networks, vol. 46, pp. 1-11, 2016.
- [3] M. Zou, X. Tu, S. Yang, H. Fang, X. Wen y F. Qu, «Channel Distribution and Noise Characteristics of Distributed Acoustic Sensing Underwater Communications,» IEEE Sensors Journal, vol. 21, n° 21, pp. 24185-24194, 2021.
- [4] Y. Ata, A. Hanaa, L. Bariah, S. Muhaidat y M. A. Imran, «Intelligent Reflecting Surfaces for Underwater Visible Light Communications,» IEEE Photonics Journal, vol. 15, n° 1, pp. 1-10, 2023.
- [5] F. Yu, D. Li, Q. Guo, Z. Wang y W. Xiang, «Block-FFT Based OMP for Compressed Channel Estimation in Underwater Acoustic Communications,» IEEE Communications Letters, vol. 19, n° 11, pp. 1937-1940, 2015.
- [6] S. Gu, L. Zhang, S. Guo, L. Zheng, R. An, T. Jiang y A. Xiong, «Communication and Cooperation for Spherical Underwater Robots by Using Acoustic Transmission,» IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 28, n° 1, pp. 292-301, 2023.
- [7] J. Oberreuter, J. Uribe, R. Zamora, G. Gacitúa y A. Rivera, «semanticscholar,» 13 06 2014. [En línea]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Mediciones-de-espesor-de-hielo-en-Chile-usando-eco-Oberreuter-Uribe/86be6a1df0ecc8afe9793a602aaf9f7cba56666f>. [Último acceso: 05 04 2023].
- [8] S. He, N. Wang, M. Ho, J. Zhu y G. Song, «Design of a New Stress Wave Communication Method for Underwater Communication,» IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, n° 8, pp. 7370-7379, 2021.
- [9] Z. YU y P. WU, «Underwater communication and optical camouflage ionogels,» Advanced Materials, vol. 33, n° 24, p. 2008479.
- [10] M. Jain, N. Sharma, A. Gupta, D. Rawal y P. Garg, «Performance Analysis of NOMA Assisted Underwater Visible Light Communication System,» IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, n° 8, pp. 1291-1294, 2020.
- [11] C. G. d. I. Fuente, «PV ALBEITAR,» 07 11 2013. [En línea]. Available: https://www.avideter.com/ftp_public/A3081113.pdf. [Último acceso: 05 04 2023].
- [12] J. Jiajia, W. Xianquan, D. Fajie, F. Xiao, L. Chunyue y S. Zhongbo, «A Basic Bio-Inspired Camouflage Communication Frame Design and Applications for Secure Underwater Communication Among Military Underwater Platforms,» IEEE

- Access, vol. 8, pp. 24927-24940, 2020.
- [13] P. Zhu, X. Xu, X. Tu, Y. Chen y Y. Tao, «Anti-Multipath Orthogonal Chirp Division Multiplexing for Underwater Acoustic Communication,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 13305-13314, 2020.
- [14] J. YIN, W. GE, X. HAN, B. Liu y L. Guo, «Partial FFT Demodulation With IRC in MIMO-SC-FDE Communication Over Doppler Distorted Underwater Acoustic Channels,» *IEEE Communications Letters*, vol. 23, n° 11, pp. 2086-2090, 2019.
- [15] Y. Zhou, F. Tong, A. Song y R. Diamant, «Exploiting Spatial-Temporal Joint Sparsity for Underwater Acoustic Multiple-Input-Multiple-Output Communications,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 46, n° 1, pp. 352-369, 2021.
- [16] M. Jouhari, K. Ibrahim, H. Tembine y J. Ben-Othman, «Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96879-96899, 2019.
- [17] Á. CARBAJAL AZCONA y M. GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, «UCM,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/458-2013-07-24-Carbajal-Gonzalez-2012-ISBN-978-84-00-09572-7.pdf>. [Último acceso: 10 05 2023].
- [18] Y. Weng, J. Pajarinen, R. Akrou, T. Matsuda, J. Peters y T. Maki, «Reinforcement Learning Based Underwater Wireless Optical Communication Alignment for Autonomous Underwater Vehicles,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 47, n° 4, pp. 1231-1245, 2022.
- [19] H. Medwin, «Sounds in the Sea: From Ocean Acoustics to Acoustical Oceanography,» vol. 121, n° ISBN: 978-0-521-82950-2, p. 643, 2005.
- [20] D. Wei, L. Yan, C. Huang, J. Wang, J. Chen, M. Pan y Y. Fang, «Dynamic Magnetic Induction Wireless Communications for Autonomous-Underwater-Vehicle-Assisted Underwater IoT,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, n° 10, pp. 9834-9845, 2020.
- [21] H. Zhang, Y. Dong y L. Hui, «On Capacity of Downlink Underwater Wireless Optical MIMO Systems With Random Sea Surface,» *IEEE Communications Letters*, vol. 19, n° 12, pp. 2166-2169, 2015.
- [22] C. Lin, G. Han, J. Jiang, C. Lin, S. B. H. Shah y Q. Liu, «Underwater Pollution Tracking Based on Software-Defined Multi-Tier Edge Computing in 6G-Based Underwater Wireless Networks,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, n° 2, pp. 491-503, 2023.
- [23] D. Wei, C. Huang, X. Li, B. Lin, M. Shu, J. Wang y M. Pan, «Power-Efficient Data Collection Scheme for AUV-Assisted Magnetic Induction and Acoustic Hybrid Internet of Underwater Things,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, n° 14, pp. 11675-11684, 2022.
- [24] G. Qiao, X. Liu, L. Ma, S. Mazhar y Y. Zhao, «Residual Doppler Effect Analysis of the FBMC/OQAM Communication System in Underwater Acoustic Channel,» *IEEE Communications Letters*, vol. 25, n° 9, pp. 3090-3093, 2021.
- [25] M. Daimon y A. Masumura, «PubMed,» National Library of Medicine, 05 06 2007. [En línea]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17538678/>. [Último acceso: 16 05 2023].
- [26] X. TU, X. XU, Z. ZOU, L. YANG y J. WU, «Fractional Fourier domain hopped communication method based on chirp modulation for underwater acoustic channels,» *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 28, n° 3, pp. 449-456, 2017.
- [27] W. Yu, Y. Chen, L. Wan, X. Zhang, P. Zhu y X. Xu, «An Energy Optimization Clustering Scheme for Multi-Hop Underwater Acoustic Cooperative Sensor Networks,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 89171-89184, 2020.
- [28] W. Su, J. Tao, Y. Pei, L. Xiao y E. Cheng, «Reinforcement Learning Based Efficient Underwater Image Communication,» *IEEE Communications Letters*, vol. 25, n° 3, pp. 883-886, 2021.
- [29] FIMMWAVE, FDM SOLVER (REAL), vol. 1, info@photond.com, 2022, pp. 63-228.

