Revista Ingenio
UFPS Ocaña
"Journal of Engineering Sciences"

Original Article DOI: https://doi.org/10.22463/2011642X.5502

# Modos de propagación en fibras ópticas utilizando el software de simulación optmodes-ud: identificación y representación

Propagation modes in optical fibers using optmodes-ud simulation software: identification and representation

MSc. Magreth Rossio Sanguino-Reyes[1], MSc. Fabián Ranulfo Cuesta-Quintero[2], MSc. Marco José Lanziano-Barrera[3], MSc. Juan Carlos Luna-Quintero[4], Ing (c). Elkin David Claro-Ortíz[5], Ing (c). Silvia Tatiana Carrillo-Vega[6], Ing (c). Elian Camilo Angarita-Sanguino[7], Ing (c). Karol Yissel Guerrero-Sánchez[8], Psic (c). Kristal Andrea Lindarte-Galván[9]

[1] Universidad Abierta y a Distancia, Ocaña, Colombia, Email: magreth.rsanguinor@colnumersa.edu.co, Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2194-7485
[2] Universidad Abierta y a Distancia, Ocaña, Colombia, Email: fabian.cuesta@unadvirtual.edu.co, Orcid: https://orcid.org/0000-0002-0230-9445
[3] Universidad Abierta y a Distancia, Ocaña, Colombia, Email: marco.lanziano@unadvirtual.edu.co, Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9287-0000
[4] Universidad Abierta y a Distancia, Ocaña, Colombia, Email: juan.luna@unad.edu.co, Orcid: https://orcid.org/0000-0002-4076-4596
[5] Universidad Abierta y a Distancia, Ocaña, Colombia, Email: edclaroo@unadvirtual.edu.co, Orcid: https://orcid.org/0009-0003-2215-4924
[6] Universidad Abierta y a Distancia, Ocaña, Colombia, Email: stcarrillov@unadvirtual.edu.co, Orcid: https://orcid.org/0009-0002-2652-7452
[7] Universidad Abierta y a Distancia, Ocaña, Colombia, Email: ecangaritas@unadvirtual.edu.co, Orcid: https://orcid.org/0009-0009-1266-5994
[8] Universidad Abierta y a Distancia, Ocaña, Colombia, Email: kyguerreros@unadvirtual.edu.co, Orcid: https://orcid.org/0009-0004-6101-7604
[9] Universidad Abierta y a Distancia, Ocaña, Colombia, Email: kalindarteg@unadvirtual.edu.co, Orcid: https://orcid.org/0009-0005-7764-1089

Cómo citar: M. R. Sanguino-Reyes, F. R. Cuesta-Quintero, M. J. Lanziano-Barrera, J. C. Luna-Quintero, E. D. Claro-Ortíz, S. T. Carrillo-Vega, E. C. Angarita-Sanguino, K. Y. Guerrero-Dánchez y K. A. Lindarte-Galván, "Modos de propagación en fibras ópticas utilizando el software de simulación optmodes-ud: identificación y representación", Rev. Ingenio, vol. 22, n º1, pp. 1-6, 2025, doi:https://doi.org/10.22463/2011642X.5502

***Recibido:***16 de julio de 2024 / ***Evaluado:***10 de agosto de 2024 / ***Aprobado:***09 de septiembre de 2024 / ***Publicado:***01 de octubre de 2024

**RESUMEN**

Este artículo muestra la representación de los modos de propagación en las fibras ópticas. El objetivo principal es demostrar que una fibra óptica solo propagará un modo. Cuando la frecuencia normalizada V es inferior a 2,405 (información geométrica de la fibra y longitud de onda) y cuando la frecuencia normalizada V es superior a 2,405 (información geométrica de la fibra y longitud de onda), se propagarán más de un modo. Los resultados se generan a partir de dos tipos de fibra y diferentes longitudes de onda de funcionamiento, donde se debe encontrar el valor de V, el número de modos propagados y su representación. La revisión teórica y el análisis simulado identificaron que cada uno de los modos de propagación posibles tiene un patrón de distribución de campo asociado y una frecuencia de corte normalizada.

**Keywords:**

Normalized frequency, Optical fiber, propagation modes, wavelength.

**ABSTRACT**

This article shows the representation of propagation modes in optical fibers. The main objective is to demonstrate that an optical fiber will propagate only one mode. When the normalized frequency V is lower than 2.405 (fiber geometrical information and wavelength) and when the normalized frequency V is higher than 2.405 (fiber geometrical information and wavelength), it will propagate more than one mode. The results are generated from two types of fiber and different operating wavelengths, where the value of V, the number of propagated modes, and their representation must be found. The theoretical review and simulated analysis identified that each of the possible propagation modes has an associated field distribution pattern and a normalized cut-off frequency.

**Palabras claves:**

Frecuencia normalizada, fibra óptica, modos de propagación, longitud de onda.

## 1. Introducción

Las fibras ópticas han revolucionado las telecomunicaciones desde su aparición en la década de 1970, al ofrecer un medio ligero, de gran capacidad y resistente a las interferencias para la transmisión de datos. El estudio de la propagación modal en estas fibras es fundamental para optimizar el rendimiento, especialmente en redes de alta velocidad y larga distancia, donde el número y la naturaleza de los modos admitidos influyen directamente en laintegridad de la señal y el ancho de banda [22]. Una fibra óptica es un medio de transmisión puramente dieléctrico, es decir, no contiene ningún componente conductor en su interior. Su estructura básica consiste en dos cilindros concéntricos. El núcleo es un cilindro de material dieléctrico con un índice de refracción n1, y el revestimiento es una fina capa dieléctrica con un índice $n_2$ [1]. La primera metodología para

**Corresponding author**
Email: magreth.rsanguinor@colnumersa.edu.co (Magreth Rossio Sanguino Reyesl)

Peer review is the responsibility of Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
This article is licensed under CC BY-NC (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es)

analizar el fenómeno de la propagación es la teoría de los rayos [2].

La teoría de rayos se puede analizar en función del comportamiento que tendrá un rayo de luz al propagarse desde un medio caracterizado por un índice de refracción n1. La ley de Snell es una herramienta que ayuda a comprender las características que deben cumplir los rayos, de modo que la mayor cantidad de rayos atraviese n1, es decir, que el índice de refracción del núcleo n1 sea mayor que el índice del revestimiento n2 [3]. La luz, como campo electromagnético con una longitud de onda específica, se rige por las ecuaciones de Maxwell [4]. Las fibras ópticas se clasifican en función del perfil del índice de refracción y del tamaño del núcleo. El tamaño del núcleo determina el número de modos que pueden propagarse a través de la fibra [5].

El campo magnético puede descomponerse en un conjunto de componentes denominados modos, cada uno de los cuales puede considerarse como la distribución espacial del campo eléctrico en la fibra. Al inyectar un pulso de luz polarizada en la fibra, se activan múltiples modos [6]. Sin embargo, no todos ellos pueden transmitirse a través de fibra óptica; es importante señalar que cada modo tiene su propia velocidad de grupo, lo que implica una mala forma del pulso recibido [7–9]. Estos modos, denominados modos transversales, presentan un perfil de campo electromagnético en un plano perpendicular a la dirección de propagación del haz y se deben a las condiciones de contorno impuestas por el medio [10]. La clasificación de los modos transversales se divide en:

- Modos TE (Transversal Eléctrico): no hay ningún componente del campo eléctrico en la dirección de propagación.
- Modos TM (transversales eléctricos): no hay ningún componente del campo magnético en la dirección de propagación.
- Modos TEM (electromagnéticos transversales): no hay componentes del campo eléctrico ni del campo magnético en la dirección de propagación.
- Modos HE o EH: cuando los valores de E o H son distintos de cero, se denominan modos híbridos y su designación dependerá de si E o H, respectivamente, tienen una mayor contribución transversal que el otro [3].

La fibra óptica propagará un solo modo, concretamente el modo fundamental [LP]_01, cuando la frecuencia normalizada V sea inferior a 2,405. Cada uno de los modos de propagación posibles tiene, a su vez, un patrón de distribución de campo asociado y una frecuencia de corte normalizada [11, 12]. Las teorías sobre los perfiles modales de los modos polarizados linealmente establecen una relación sencilla con los índices l y m, según la cual se clasifican [3]. Concretamente, l está relacionado con el número de zonas claras y oscuras en función de la variable azimutal. Si l = 0, no hay variación con el acimut, es decir, el diagrama de campo presenta simetría de revolución. Si l = 1, en la expresión del campo eléctrico aparece un ciclo completo de la función seno o coseno, por lo que se observarán dos zonas de luz (ciclo positivo y negativo) y una zona de sombra. El índice m está relacionado con el número máximo de puntos luminosos en el interior del núcleo en función de la variable radial. Es decir, si m = 1, hay un único máximo en el centro que disminuye hacia la superficie. Si m = 3, habrá un máximo en el centro, una zona nula y luego otra zona luminosa antes de llegar a la superficie del LP lm [13]. El objetivo principal de esta propuesta es demostrar que una fibra óptica solo propaga un modo. Cuando la frecuencia normalizada V es inferior a 2,405, la propagación se produce en un solo modo, y cuando la frecuencia normalizada V es superior, se propagan más de un modo [14-16].

## 2. Methodology and materials

Las simulaciones de este estudio se llevaron a cabo utilizando el software OptModes-UD, dise¶ado específicamente para el análisis y la visualización de modos guiados en guías de onda ópticas. Esta herramienta permite identificar los modos LP (linealmente polarizados) y sus correspondientes distribuciones de campo en función de diversos parámetros de la fibra.

Las condiciones para calcular el umbral de corte de un modo concreto (monomodo o multimodo) pueden expresarse como una función de la frecuencia normalizada este parámetro se representa con la letra V.

### 2.1. Parámetro característico de la guía de ondas

O bien, el número de onda normalizado o la frecuencia, o simplemente el número V, pueden expresarse mediante la siguiente ecuación (1) [17].

$$V = \frac{2\pi\alpha}{\lambda} AN \quad (1)$$

Donde AN es la apertura numérica, ɔ es la longitud de onda y Ŭ es el radio del núcleo. Esta frecuencia puede utilizarse para medir el número de modos que puede soportar la fibra; para ello, se utiliza un diagrama b-V, que es una representación normalizada [18, 19]. El parámetro b se denomina constante de propagación normalizada y se define en la ecuación (2).

$$b = \frac{\left(\frac{\beta}{k}\right)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} AN \quad (2)$$

Donde k es la constante de propagación del medio, ɓ es la constante de propagación de un modo, n1 es el índice de refracción del núcleo y n2 es el índice de refracción del revestimiento

**Tabla 1**. Estudios de caso

| caso | Parámetros |
|---|---|
| Fibra de tipo A | Diámetro del núcleo = 4 mm |
| | Diámetro de la cubierta = 125 mm |
| | AN= 0.11 |
| | $n_1 = 1.46$ |
| Fibra de tipo B | Core diameter = $8\mu m$ |
| | Diámetro de la cubierta = 125 mm |
| | AN= 0.11 |
| | $n_1 = 1.46$ |

## 3. Resultados y discusión

Es importante se¶alar que, en ocasiones, existe una diferencia entre los resultados experimentales y los obtenidos numéricamente [31]. Sin embargo, en comparación con los datos de la bibliografía, los resultados simulados concuerdan bien con las expectativas teóricas para los modos LP en fibras de índice escalonado. En particular, el punto de corte en V = 2,405 queda confirmado por la ausencia de modos de orden superior por debajo de este valor.

Por encima de este umbral, aparecen modos adicionales como el LP11, el LP21 y el LP02, conforme a lo esperado. Entre las limitaciones de la simulación se incluyen la suposición de una simetría perfecta de la fibra y la exclusión de la dispersión del material o de las imperfecciones de fabricación, que en la práctica pueden alterar ligeramente el comportamiento de la propagación [24].

En el caso 1, dados dos tipos de fibra (A y B) y utilizando una longitud de onda de funcionamiento de 633 nm, se determina el valor de V y se calcula e identifica el número de modos propagados. Dado que se necesita el parámetro n2 para simular los modos, se aplica la ecuación (3).

$$\lambda = 633nm \approx 0.633\mu m$$
$$AN = n_1\sqrt{2\Delta} \quad (3)$$
$$\left(\frac{AN}{n_1}\right)^2 = \left(\sqrt{2\Delta}\right)^2$$
$$\left(\frac{AN}{n_1}\right)^2 = 2\Delta$$
$$\frac{\left(\frac{AN}{n_1}\right)^2}{2} = \Delta$$
$$\Delta = \mathbf{0,002838244}$$
$$\Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1}$$
$$\Delta n_1 = n_1 - n_2$$
$$n_2 = n_1 - \Delta n_1$$
$$\boldsymbol{n_2 = 1,456}$$

Cálculo de V para el tipo de fibra A, ecuación (4)

$$V = \frac{2\pi\alpha}{\lambda} * AN \quad (4)$$
$$V = \frac{2\pi(2x10^{-6})}{0{,}633\mu m} * 0.11$$
$$\boldsymbol{V = 2,1}$$

La matriz V-b representa los modos LP y sus constantes de propagación normalizadas en función de V. Los modos están etiquetados para facilitar su identificación (véanse las figuras 1 y 2).

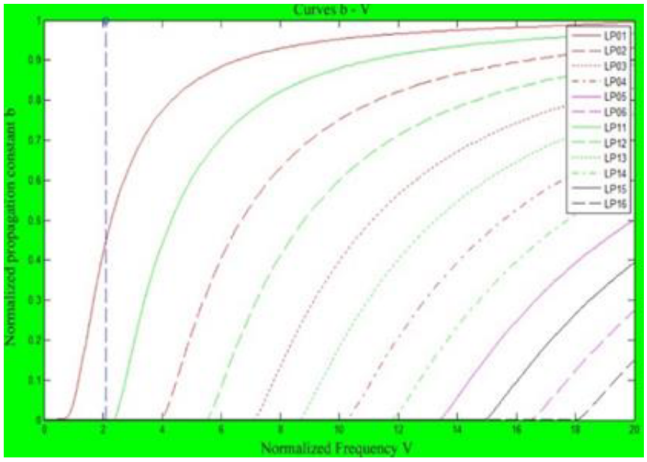



**Figura 1.** Modo de visualización LP01 para fibra de tipo .

Cálculo de V para la fibra de tipo B; véase la ecuación (5) y la figura 2

$$V = \frac{2\pi\alpha}{\lambda} * AN \quad (5)$$
$$V = 4{,}28$$

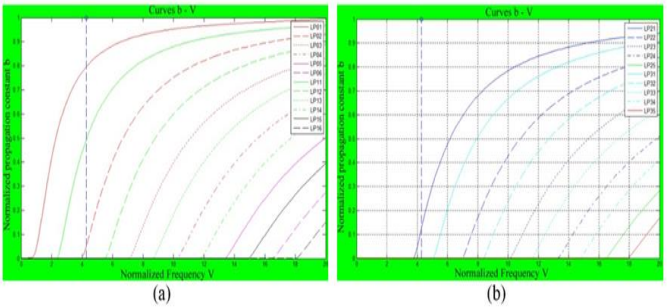



**Figura 2.** Visualización de los modos LP01, LP02 y LP11

En el caso 2, utilizando fibra de tipo B y con una longitud de onda de funcionamiento de 1310 nm, se determina el valor de V, se calcula y se identifica el número de modos propagados.

$$V = \frac{2\pi\alpha}{\lambda} * AN \quad (6)$$
$$\boldsymbol{V = 2{,}072}$$

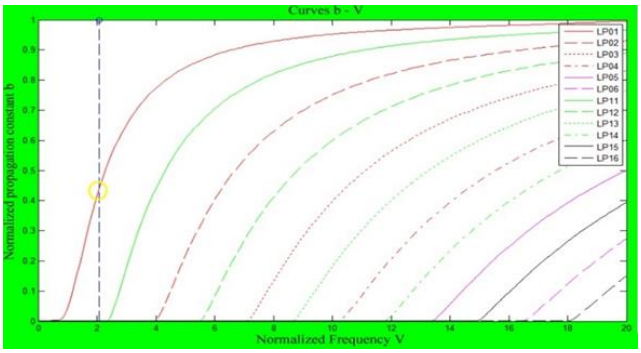



**Figura 3.** Modo de visualización LP01 para fibra de tipo B

Los dos tipos de fibra (fibra tipo A y fibra tipo B) tienen el mismo ángulo de aceptación (AN = 0,11). Por lo tanto, el ángulo de emisión de la luz es igual al ángulo de aceptación de la siguiente fibra, lo que genera un acoplamiento de luz perfecto. En cuanto al comportamiento de la fibra [20, 21], se observa que la potencia se concentra en el centro de la fibra o en el núcleo de la fibra para diferentes valores de V (frecuencia normalizada). La capacidad de transmisión de información de la fibra multimodo está limitada por dos componentes de dispersión: la modal y la cromática [32]. La primera, conocida como dispersión modal, se produce porque el perfil del índice de la fibra multimodo no es perfecto. Por lo tanto, se considera teóricamente que el perfil de índice gradual permite que todos los modos tengan la misma velocidad de grupo o velocidad de propagación a lo largo de la fibra (véanse las figuras 4, 5, 6 y 7).

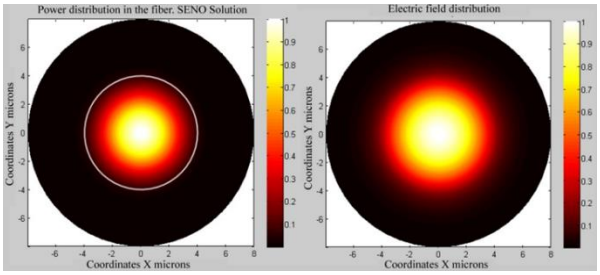



**Figura 4.** Resultado visual del modo LP01 para el caso 1 del tipo de fibra A.

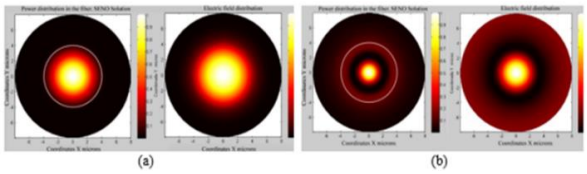



**Figura 5.** Representación gráfica de los modos LP01 y LP02 para la fibra de tipo B, caso 1

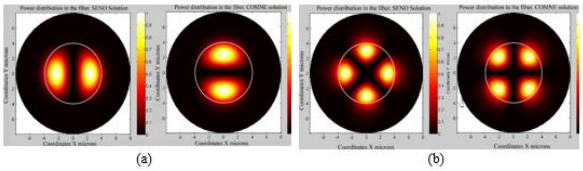



**Figura 6.** Visualización de los modos LP11 y LP21 para la fibra de tipo B

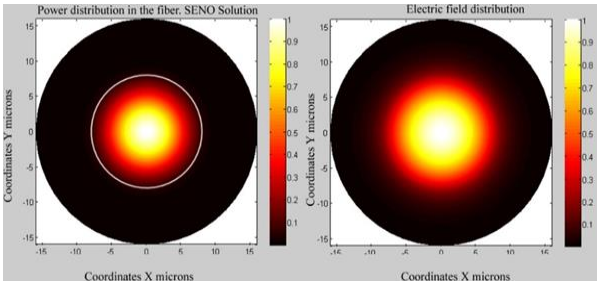



**Figura 7.** Resultado visual del modo LP01 para la fibra de tipo , caso 2

## 4. Conclusiones

En conclusión, este estudio ha demostrado que la propagación de modos en las fibras ópticas viene determinada por el parámetro de frecuencia normalizada V. Cuando V es inferior al valor crítico de 2,405, solo se propaga el modo fundamental LP01, mientras que valores más altos de V permiten la propagación de múltiples

modos, incluidos LP11, LP21 y LP02. Estos hallazgos son fundamentales para la clasificación y la aplicación de las fibras como monomodo o multimodo.

Además, las simulaciones realizadas con el software OptModes-UD han demostrado su eficacia a la hora de visualizar y analizar el comportamiento modal de las fibras ópticas de índice escalonado. El análisis teórico y visual confirma la coherencia de los resultados de la simulación con los principios establecidos de propagación óptica.

En lo que respecta a las aplicaciones prácticas, comprender la propagación modal permite optimizar el dise¶o de las redes de telecomunicaciones, especialmente en lo que se refiere a la transmisión de datos a alta velocidad y a larga distancia. Esto es importante porque el coste del ancho de banda y de los recursos necesarios para la transmisión de datos influirá de manera significativa en el aumento del volumen y del flujo de datos.

De cara al futuro, se propone incluir la simulación de fibras de índice gradual y de cristal fotónico para evaluar diferentes comportamientos de dispersión modal. La integración de análisis de tensiones térmicas y mecánicas en el entorno de simulación permitirá, además, comprender de forma más exhaustiva el rendimiento de las fibras en condiciones reales.

Se ha determinado que, cuando se requieren anchos de banda muy amplios, se recomiendan las fibras monomodo, que se caracterizan por tener un diámetro de núcleo muy pequeño, de entre 5 y 12 μm, lo que permite la propagación en modo único. Además, la dispersión modal es muy baja, lo que permite anchos de banda excepcionales y pérdidas relativamente bajas. Como resultado, este tipo de fibra se considera adecuada para comunicaciones de larga distancia o de alta velocidad. En este caso concreto, esto se refleja en la simulación de las fibras de tipo A y B. Por lo tanto, se ha podido demostrar que, en los modos polarizados linealmente de las fibras ópticas monomodo y multimodo convencionales, si la frecuencia normalizada V es inferior al parámetro adimensional 2,405, se propagará un solo modo; en caso contrario, se propagarán más de un modo.

## 5. References


[1] Sanchis E, J.B. Ejea.2008 Propagación de la luz en guías de onda. Univ Val 1–65.

[2] Khrennikov A, Nilsson B, Nordebo S, et al. 2012 Quantization of propagating modes in optical fibers. Phys Scr 85: 065404. Doi:https://doi.org/10.1088/0031-8949/85/06/065404

[3] Abadía D, Fábrega J. 2006 Diseño e implementación de un módulo para simular Fibras de pocos modos (Barcelona: Universitat Oberta de Catalunya)

[4] UCO. 2006 Ondas electromagnéticas, conceptos básicos (Córdoba: Universidad de Córdoba)73.

[5] Arturo Bastidas Mora H, Barahona Varela F. a 2012 Calculation of Cutoff Frequency To Step-Index Optical Fibers Using Matlab 22: 97–109.

[6] Capmany J. 1999 Introducción a redes de comunicaciones ópticas. Óptica pura y Apl 32: 19.

[7] Cuesta-Quintero F, Puerto-Leguizamón G, Rico-Bautista D 2019 Evaluation of a Centralized Spectral Slicing for Radio over Fiber Transport in Optical Access and Metro Networks Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao E23 367–377.

[8] Cuesta Quintero F, Puerto Leguizamón G, Suárez Fajardo C. 2020 Optical partitioning for multicarrier generation in subcarrier multiplexed networks. INGE CUC; 16.

[9] Cuesta-Quintero FR, Puerto-Leguizamón G, Rico-Bautista DW, Cuesta-Quintero B, and Coronel-Rojas LA 2020 Design of a hybrid transmission system using wavelength division multiplexing and subcarrier under the frequency frame for 5G J. Phys.: Conf. Ser. 1513 012008. Doi:https://doi.org/10.1088/1742-6596/1513/1/012008

[10] Freeman RL. 2004 Telecommunication System Engineering (New Jersey: Wiley-Interscience)

[11] Pandey PC, Ojha SP. 2001 Effect of axial linear and sinusoidal variation of the core refractive index on the propagation of some low-order modes in an optical fiber. Microw Opt Technol Lett 28: 265–267. Doi:https://doi.org/10.1002/10982760(20010220)28 :4<265::AID-MOP 1013>3.0.CO;2-E

[12] Bourdine A. 2015 Fast and Simple Method for Evaluation of Polarization Correction to Propagation Constant of Arbitrary Order Guided Modes in Optical Fibers with Arbitrary Refractive Index Profile. Math Probl Eng 2015: 1–11. Doi: https://doi.org/10.1155/2015/801243

[13] Cuesta-Quintero FR, Areniz-Arévalo Y, Barrientos-Avendão E, et al. 2020 Design of a metropolitan network based on fiber optic and wireless links to support COVID-19 monitoring. J. Phys.: Conf. Ser. 1708 012038. Doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1708/1/012038

[14] Poole CD, Wiesenfeld JM, DiGiovanni DJ, et al. 1994 Optical fiber-based dispersion compensation using higher order modes near cutoff. J Light Technol 12:1746–1758.Doi: https://doi.org/10.1109/50.337486

[15] Ter-Mikirtychev V V. 2019 Propagation of Lightnd Modes in Optical Fibers. pp. 69–82.

[16] Morishita K, Obata Y, Kumagai N. 1982 An Exact Analysis of Propagation Modes Group Velocity for in Optical Fibers. IEEE Trans Microw Theory Tech 30: 1821–1826.Doi: https://doi.org/10.1109/TMTT.1982.1131330

[17] Salleg J, Torres Moreno C, Vilardy J, et al. 2006 Modos de propagación en una fibra óptica de índice de perfil escalonado. Modos propagación en una fibra óptica índice Perf escalonado 38: 277–280.

[18] Lyubopytov VS, Tatarczak A, Lu X, et al. 2016 Analysis of optical fiber complex propagation matrix on the basis of vortex modes. 2016 International Conference Laser Optics (LO) (St. Petersburg:IEEE)pp.R4-14.Doi:https://doi.org/10.1109/LO.2016.7549769

[19] Ibragimov A, Rubass A, Halilov S, et al. 2018 Modeling of self-consistent modes in optical fibers with V=3.8. J Phys Conf Ser 1062: 012002. Doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1062/1/012002

[20] Blackman RT, Fischer DA, Jurgenson CA, et al. 2020 Performance Verification of the EXtreme PREcision Spectrograph. Astron J 159: 238. Doi : https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab811d

[21] Denisov AN, Semjonov SL. 2021 Microstructured optical fibres with a wide single -mode range. Quantum Electron 51: 240–247. Doi: https://doi.org/10.1070/QEL17485

[22] G.Keiser, *Optical Fiber Communications*, 5th ed., McGraw-Hill, 2021.

[23] D. Abadía and J. Fábrega, “Diseño e implementación de un módulo para simular fibras de pocos modos”, Universitat Oberta de Catalunya, 2006.

[24] C. D. Poole et al., "Optical fiber-based dispersion compensation using higher order modes near cutoff", *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, pp. 1746– 1758,1994.Doi:https://doi.org/10.1109/50.337486

[25] J. M. Fini, “Advances in single-mode and few-mode optical fibers for elecommunications,” IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 40, no. 3, pp. 635–648, 2022.

[26] A. Mecozzi, C. Antonelli, and M. Shtaif, “ Modal propagation and nonlinear effects in modern optical fibers,” Optical Fiber Technology, vol. 67, pp. 102753, 2022.

[27] S. Ramachandran and P. Kristensen, “Optical vortex modes and their applications in modern fiber systems,” Nature Photonics, vol. 17, no. 2, pp. 87– 96, 2023.

[28] Y. Jung, T. Hawkins, and D. Richardson, “ Recent advances in microstructured optical fibers and mode control,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 35, no. 9, pp. 421–428, 2023.

[29] A. Denisov, S. Semjonov, and V. Kivshar, “ Recent progress in microstructured single-mode optical fibers,” IEEE Photonics Journal, vol. 16, no. 2, pp. 1–12, 2024. [30] G. P. Agrawal, “Modern optical fiber communication systems and modal control,” Optical Fiber Technology, vol. 79, pp. 103299, 2025.

[31] A. R. Salazar-Navarro, “Simulación numérica de la producción de hollín en una llama laminar de difusión axisimétrica de propano”, Rev . Ingenio, vol. 20, n. º 1, pp. 46–52, ene. 2023

[32] .Z. J. Ibarra-Cuevas y F. E. Martínez-Pérez, “ Protocolo de comunicación inteligente para una arquitectura enfocada en internet de las cosas”, Rev. Ingenio, vol. 19, n. º 1, pp. 9–15, ene. 2022.