



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

DISEÑO DE FILTRO ESPECTRAL SMS BASADO SOBRE EL
MODO LP01 PARA LA BANDA DE 1.55 UM

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN TELCOMUNICACIONES

AUTOR: MARCELO ADRIAN ALTAFUYA CHILA

DIRECTOR: ING. HUGO OSWALDO MORENO AVILÉS

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Marcelo Adrian Altafuya Chila

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Marcelo Adrian Altafuya Chila, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 27 de noviembre de 2023



Marcelo Adrian Altafuya Chila
080345931-2

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto de Investigación, “**DISEÑO DE FILTRO ESPECTRAL SMS BASADO SOBRE EL MODO LP01 PARA LA BANDA DE 1.55 UM.**”, realizado por el señor: **MARCELO ADRIAN ALTAFUYA CHILA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Diego Fernando Veloz Chérrez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-11-27
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2023-11-27
Ing. Paul David Moreno Avilés ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2023-11-27

DEDICATORIA

La elaboración de este trabajo se lo dedico a mi familia, para mis padres por todo su apoyo, consejos, comprensión, amor, y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han brindado todo para ser la persona que soy, mis principios, valores y mi perseverancia para conseguir mis objetivos y cumplir mis metas. A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome en este largo camino, los quiero mucho. A todos mis amigos, ya que ellos me han ayudado a que mi vida politécnica sea más divertida, porque hemos compartido muchos momentos que siempre llevare en mi corazón.

Marcelo

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mi familia, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida, por las palabras de aliento en los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más. A siempre estar ahí cuando me salud se quebrantaba y a nunca rendirse conmigo, así como yo nunca me he rendido en este camino. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y a sus docentes que con sus conocimientos me dieron la oportunidad de formarme profesionalmente. Finalmente agradezco a aquellos amigos que han estado en momentos difíciles de flaqueza durante mis estudios.

Marcelo

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xxi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Limitaciones y delimitaciones	2
1.3 Problema general de investigación	2
1.4 Problemas específicos de investigación.....	2
1.5 Objetivos	3
1.5.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.5.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.6 Justificación	3
1.6.1 <i>Justificación teórica</i>	3
1.6.2 <i>Justificación metodológica</i>	4
1.6.3 <i>Justificación práctica</i>	4

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Fibras ópticas.....	6
2.1.1 <i>Fibra monomodo</i>	9
2.1.2 <i>Fibra multimodo</i>	9
2.1.3 <i>Características de fibras ópticas</i>	11
2.1.3.1 <i>Fibras ópticas comerciales y normalizadas</i>	12
2.1.4 <i>Propagación luminosa</i>	17
2.1.5 <i>Perdidas de señal o atenuación</i>	17
2.1.5.1 <i>Pérdidas por absorción</i>	18
2.1.5.2 <i>Pérdidas por dispersión en material o de rayleigh</i>	19

2.1.5.3	<i>Dispersión cromática, o de longitudes de onda.</i>	19
2.1.5.4	<i>Dispersión modal.</i>	19
2.1.5.5	<i>Pérdidas por acoplamiento.</i>	19
2.1.6	<i>Perdidas por radiación</i>	20
2.1.6.1	<i>Perdidas por curvatura</i>	20
2.1.7	<i>Apertura numérica de la fibra óptica (an)</i>	21
2.2	Multiplexación por división de longitud de onda	22
2.2.1	<i>Densidad de canales</i>	23
2.2.2	<i>Técnicas de multiplexación y demultiplexación por división de longitud de onda</i>	24
2.3	Filtros ópticos	25
2.3.1	<i>Filtro etalón o fabry perot</i>	26
2.3.2	<i>Interferómetro</i>	26
2.3.3	<i>Filtro fabry perot liquid crystal</i>	27
2.3.4	<i>Filtros fbg (fiber bragg grating)</i>	27
2.3.5	<i>Filtros awg (arrayed waveguide grating)</i>	29
2.3.6	<i>Filtros tff (thin-film filter)</i>	30
2.4	Filtro óptico sms	30
2.4.1	<i>Fibra de 7 core</i>	32
2.4.2	<i>Análisis de la dinámica de acoplamiento de modos</i>	33
2.4.3	<i>Método de expansión en modo propio</i>	34
2.5	Modos de operación	35
2.5.1	<i>Guías circulares</i>	35
2.5.1.1	<i>Los modos te</i>	38
2.5.1.2	<i>Los modos tm</i>	41
2.5.2	<i>Propagación y ecuación característica en una fibra índice escalonado</i>	43
2.5.3	<i>Modos linealmente polarizados</i>	53
2.6	Fimmwave	55
2.6.1	<i>El solucionador fmm (film mode matching)</i>	56
2.6.2	<i>Solucionadores de modo numérico: solucionadores fdm (diferencia finita) y fem (elemento finito)</i>	56
2.6.3	<i>Solucionador fdm</i>	57
2.6.4	<i>Solucionador fem</i>	57
2.6.5	<i>Solucionador cilíndrico</i>	57
2.6.6	<i>Otro solucionador</i>	57
2.6.7	<i>Fimmprop</i>	57

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLOGICO	59
3.1	Enfoque de investigación	59
3.2	Nivel de Investigación	59
3.3	Diseño de investigación	59
3.3.1	<i>Según la manipulación o no de la variable independiente</i>	60
3.3.2	<i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i>	60
3.4	Tipo de estudio	60
3.5	Población y Planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra	60
3.6	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	60

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	66
4.1	Prueba en diferentes distancias de la sección multicore.	66
4.1.1	<i>A medio metro.</i>	66
4.1.2	<i>A un metro.</i>	68
4.1.3	<i>A dos metros.</i>	69
4.1.4	<i>A tres metros.</i>	71
4.1.5	<i>A cuatro metros.</i>	73
4.1.6	<i>A cinco metros.</i>	75
4.2	Modos de operación.	78
4.2.1	<i>Modo uno.</i>	78
4.2.2	<i>Modo dos.</i>	78
4.2.3	<i>Modo tres.</i>	79
4.2.4	<i>Modo cuatro.</i>	80
4.2.5	<i>Modo cinco.</i>	80
4.2.6	<i>Modo seis.</i>	81
4.2.7	<i>Modo siete.</i>	82
4.2.8	<i>Modo ocho.</i>	82
4.3	Resultados finales.	83
4.4	Discusión de los resultados.	86

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
CONCLUSIONES.....	87
RECOMENDACIONES.....	88

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas EIA-492.....	14
Tabla 2-2: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas ITU-T G.651.....	15
Tabla 2-3: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas ITU-T G.652.....	15
Tabla 2-4: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas ITU-T G.653.....	16
Tabla 2-5: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas ITU-T G.654.....	16
Tabla 2-6: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas ITU-T G.655.....	16
Tabla 2-7: Atenuación en el cable de fibra óptica.....	18
Tabla 2-8: Comparación de las Propiedades de dos clases de Filtros Ópticos.	26
Tabla 2-9: Raíces $(h\rho)_{mm}$ para las cuales $J_m(h\rho) = 0$	39
Tabla 2-10: Raíces $(h\rho)_{mm}$ para las cuales $J'_m(h\rho) = 0$	40
Tabla 2-11: Ecuación característica de β para una fibra óptica de índice escalonado.	51
Tabla 2-12: Condiciones para la frecuencia de corte normalizada ($V_c = p$) de los modos de propagación en una fibra de índice escalonado.....	52
Tabla 2-13: Correspondencia entre los primeros modos LP y los modos tradicionales que los forman por superposición lineal.....	55
Tabla 3-1: Parámetros MCF y sus valores.	62
Tabla 3-2: Posición y ancho de los núcleos de la sección MCF.	62

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: Pasos a seguir para el desarrollo del proyecto.	5
Ilustración 2-1: Cable de fibra óptica.	6
Ilustración 2-2: Incidencia de rayos de luz en el cono de aceptación.....	8
Ilustración 2-3 : Trayectoria en una fibra monomodo.....	9
Ilustración 2-4: Fibras de índice escalonado y gradual.	10
Ilustración 2-5: Espectro electromagnético.....	11
Ilustración 2-6: Ventanas de transmisión óptico.	12
Ilustración 2-7: Pérdidas por Macrocurvaturas.	20
Ilustración 2-8: Pérdidas por Microcurvaturas.	21
Ilustración 2-9: Apertura numérica.	22
Ilustración 2-10: Esquema General de un Sistema WDM Punto a Punto.	23
Ilustración 2-11: Ancho de Banda de un canal transmitido en WDM.....	24
Ilustración 2-12: Demultiplexación por refracción de prisma.....	25
Ilustración 2-13: Multiplexación por Red de Difracción.	25
Ilustración 2-14: Interferómetro MZ.	27
Ilustración 2-15: Estructura de una FBG.....	27
Ilustración 2-16: Filtro Óptico con FBG.	28
Ilustración 2-17: Estructura de un filtro AWG.....	29
Ilustración 2-18: Estructura de un filtro TFF.	30
Ilustración 2-19: Estructura de fibra de siete núcleos que consta de 6 núcleos distribuidos simétricamente alrededor de un núcleo central.	32
Ilustración 2-20: Varias reflexiones y transmisiones en un dispositivo S7S.....	35
Ilustración 2-21: Guía de ondas circular y sistema de coordenadas polares.	36
Ilustración 2-22: Funciones Bessel de primera clase, $J_m(h\rho)$	39
Ilustración 2-23: Campos transversales del modo de propagación TE_{11} en una guía circular. .	41
Ilustración 2-24: Campos transversales del modo de propagación TM_{01} en una guía circular.	43
Ilustración 2-25: Sistema de coordenadas para analizar la propagación en una fibra óptica con núcleo de radio a.	43
Ilustración 2-26: Gráfica de las funciones Bessel modificadas $K_m(h\rho)$	45
Ilustración 2-27: Vista transversal de las líneas de campo eléctrico del modo dominante y de los tres primeros modos superiores siguientes en una fibra óptica de índice escalonado.	53

Ilustración 2-28: Constante de fase β normalizada con relación a la constante de fase en el espacio libre, en función de la frecuencia normalizada V , para los primeros modos de propagación en una fibra óptica de índice escalonado.	54
Ilustración 2-29: Obtención de dos modos LP_{11} . El campo eléctrico resultante está polarizado en la dirección x	55
Ilustración 3-1: Estructura del filtro óptico SMS (Single-Multu-Single).....	61
Ilustración 3-2: Estructura de fibra de siete núcleos con sus parámetros.....	61
Ilustración 3-3: Activación del cfseg en el core central.	63
Ilustración 3-4: MOLAB Options.	64
Ilustración 3-5: FDM Solver Parameters.....	64
Ilustración 3-6: Modos de operación a través de los cores.....	65
Ilustración 4-1: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a medio metro a la longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$	66
Ilustración 4-2: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a medio metro de distancia a $1.6 \mu\text{m}$	67
Ilustración 4-3: Potencia normalizada a medio metro de distancia a una longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$	67
Ilustración 4-4: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a 1 metro a la longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$	68
Ilustración 4-5: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 1 metro de distancia a $1.6 \mu\text{m}$	68
Ilustración 4-6: Potencia normalizada a 1 metro de distancia a una longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$	69
Ilustración 4-7: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a 2 metros a la longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$	69
Ilustración 4-8: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 2 metros de distancia a $1.6 \mu\text{m}$	70
Ilustración 4-9: Potencia normalizada a 2 metros de distancia a una longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$	70
Ilustración 4-10: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a 3 metros a la longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$	71
Ilustración 4-11: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 3 metros de distancia a $1.55 \mu\text{m}$	71
Ilustración 4-12: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 3 metros de distancia a $1.6 \mu\text{m}$	72

Ilustración 4-13: Potencia normalizada a 3 metros de distancia a longitudes de onda de 1.55 μm y 1.6 μm	72
Ilustración 4-14: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a 4 metros a la longitud de onda de 1.55 μm	73
Ilustración 4-15: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 4 metros de distancia a 1.55 μm	73
Ilustración 4-16: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 4 metros de distancia a 1.6 μm	74
Ilustración 4-17: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 4 metros de distancia a 1.45 μm	74
Ilustración 4-18: Potencia normalizada a 4 metros de distancia a longitudes de onda de 1.45 μm , 1.55 μm y 1.6 μm	75
Ilustración 4-19: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a 5 metros a la longitud de onda de 1.55 μm	75
Ilustración 4-20: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 5 metros de distancia a 1.55 μm	76
Ilustración 4-21: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 5 metros de distancia a 1.6 μm	76
Ilustración 4-22: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 5 metros de distancia a 1.45 μm	77
Ilustración 4-23: Potencia normalizada a 5 metros de distancia a longitudes de onda de 1.45 μm , 1.55 μm y 1.6 μm	77
Ilustración 4-24: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 1.....	78
Ilustración 4-25: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 2.....	79
Ilustración 4-26: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 3.....	79
Ilustración 4-27: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 4.....	80
Ilustración 4-28: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 5.....	81
Ilustración 4-29: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 6.....	81
Ilustración 4-30: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 7.....	82
Ilustración 4-31: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 8.....	83
Ilustración 4-32: Transmisión de potencia al inicio de la sección multicore con una longitud de onda de 1.55 μm	83
Ilustración 4-33: Transmisión de potencia en el centro de la sección multicore con una longitud de onda de 1.55 μm	84

Ilustración 4-34: Transmisión de potencia en al final de la sección multicore con una longitud de onda de 1.55 μm	84
Ilustración 4-35: Longitud de onda de operación y potencia normalizada de todos los modos de operación.....	85
Ilustración 4-36: Respuesta de los cores laterales al propagar en el core central de la sección multicore y viceversa.	85

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: DIFERENTES VARIABLES DE EXPERIMENTACION EN EL SIMULADOR.

ANEXO B: DISEÑO DE LA SECCION MULTINUCLEO CON UNA CAPA DE AIRE
PARA EXPERIMENTACION.

ANEXO C: RESPUESTA DEL FILTRADO OBTENIDO DEL SIMULADOR.

ANEXO D: MANUAL FIMMWAVE MULTICORE.

RESUMEN

Esta investigación se llevó a cabo a raíz de querer diseñar un filtro óptico que tenga la capacidad de realizar un filtrado adecuado en la longitud de onda de 1.55 μm solo utilizando las fibras ópticas de uso común (monomodo y multimodo) con un diseño especial sin la necesidad de utilizar componentes extra. Teniendo como objetivo comprobar que el diseño de un filtro espectral de siete núcleos basado sobre el modo de propagación fundamental ([LP] _01) para la banda de 1.55 μm , es factible y realiza un filtrado adecuado, para lo cual, mediante el software FimmWave se simuló una estructura de fibra óptica especial con una disposición de núcleos Monomodo-Multimodo-Monomodo (SMS). La metodología empleada combina un enfoque descriptivo y aplicado, donde, se emplean los conocimientos teóricos del manual del software FimmWave sobre guías de onda circulares y se creó las secciones con sus longitudes, ancho del recubrimiento, ancho de cada núcleo, índices de refracción, acoples y separación entre núcleos. Se realizó pruebas a un ancho de filtrado de 3dB con potencias normalizadas obteniendo un resultado de filtrado adecuado a 1.55 μm . Las gráficas de operación de los diferentes modos de propagación demostraron el funcionamiento del filtro en el modo de propagación fundamental ([LP] _01) con mayor potencia, con una interferencia cocanal en la longitud de onda de 1.45 μm provocada por el modo 2, siendo los demás modos irrelevantes. En conclusión, la evaluación de la multiplexación como solución para el diseño del filtro ha demostrado ser viable, ofreciendo ventajas notables como el aumento de la capacidad de transmisión, reducción de costos y la mejora del rendimiento del sistema óptico en la banda deseada. Además, que permite a los usuarios del software agilizar el diseño de guías circulares con diversas estructuras de fibra gracias al manual de usuario desarrollado.

Palabras clave: <FIBRA ÓPTICA>, <MONOMODO-MULTIMODO-MONOMODO (SMS)>, <MODO DE PROPAGACIÓN FUNDAMENTAL (LP)>, <LONGITUD DE ONDA>, <FILTRO ESPECTRAL>, <FIMMWAVE>, <ÍNDICES DE REFRACCIÓN>, <MULTIPLEXACIÓN>.



ABSTRACT

This research stems from the desire to design an optical filter capable of effectively filtering at a wavelength of 1.55 μm using commonly used optical fibers, both single-mode and multimode. The goal is to achieve this without the need for additional components. To confirm the feasibility and performance of a seven-core spectral filter based on the fundamental propagation mode ($[[\text{LP}]]_{01}$) within the 1.55 μm wavelength range, a specialized fiber optic structure with a Singlemode-Multimode-Singlemode (SMS) core arrangement was developed using FimmWave software. The methodology employed combines both descriptive and applied approaches. Theoretical knowledge from the FimmWave software manual about circular waveguides was applied, encompassing considerations such as creating sections with specific lengths, coating width, individual core widths, refractive indices, couplings, and separation between cores. Experimental tests were conducted at a 3dB filtering bandwidth with normalized power levels, resulting in effective filtering at 1.55 μm . Graphs illustrating the behavior of different propagation modes highlighted the filter's operation primarily in the fundamental propagation mode ($[[\text{LP}]]_{01}$), exhibiting higher power. However, co-channel interference at a wavelength of 1.45 μm , attributed to mode 2, was observed, with other modes proving to be inconsequential. In conclusion, multiplexing has emerged as a viable solution for filter design, offering significant advantages such as increased transmission capacity, reduced costs, and improved optical system performance within the desired wavelength band. Moreover, it enables software users to streamline the design of circular guides with diverse fiber structures, thanks to the user manual developed for this purpose.

KEY WORDS: <FIBER OPTIC>, <SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS)>, <FUNDAMENTAL PROPAGATION MODE ($[[\text{LP}]]_{01}$) >, <WAVELENGTH>, <SPECTRAL FILTER>, <FIMMWAVE>, <MULTIPLEXATION>, <REFRACTION INDICES>



Lenin Iván Lara Olivo

0602546103

INTRODUCCIÓN

En el vertiginoso avance de las comunicaciones ópticas, la búsqueda de soluciones eficientes para manipular y transmitir señales de luz en longitudes de onda específicas se ha convertido en un objetivo central. En este contexto, los dispositivos de fibra óptica desempeñan un papel crucial al ofrecer la capacidad de modular y dirigir la propagación de la luz de manera precisa y adaptable. Entre estos dispositivos, los filtros espectrales juegan un papel esencial al permitir la selección y separación de señales en función de sus longitudes de onda.

Esta investigación se adentra en el diseño innovador de un filtro espectral de fibra óptica basado en la estructura monomodo-multimodo-monomodo (SMS, por sus siglas en inglés), específicamente centrándose en la banda de longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$. Esta longitud de onda, que cae en la tercera ventana de transmisión de fibra óptica y es ampliamente utilizada en sistemas de comunicaciones, presenta una importancia estratégica para transmitir datos a largas distancias con mínimas pérdidas de señal.

El corazón de este filtro radica en la utilización del modo LP_{01} , una modalidad fundamental en la propagación de luz a través de fibras ópticas. Al emplear este modo como base, se busca diseñar un filtro que permita el paso selectivo o la supresión de una banda espectral específica alrededor de la longitud de onda central de $1.55 \mu\text{m}$. La meticulosa configuración de las secciones mono-multi-mono modos en la estructura SMS ofrece la flexibilidad necesaria para manipular y controlar la propagación de la luz según los requisitos de la aplicación.

A través de un enfoque metodológico que combina la descripción detallada y la aplicación práctica, esta tesis se sumerge en el proceso de diseño y evaluación de un filtro SMS que promete no solo mejorar la eficiencia y la selectividad en la transmisión de señales ópticas, sino también allanar el camino hacia futuras innovaciones en el campo de las comunicaciones ópticas. En última instancia, esta investigación busca contribuir al avance continuo de las tecnologías ópticas que son fundamentales en nuestra creciente demanda de conectividad y transmisión de datos.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Se propone un nuevo tipo de dispositivo de fibra óptica basado en una estructura monomodo (1 núcleo)-multimodo (7 núcleos)-monomodo (1 núcleo), conocida como SMS. El método de expansión de modo propio "LP" se utiliza para modelar la propagación de la luz en estos filtros. El dispositivo propuesto es útil como filtro de paso de banda o supresión de banda centralizado en 1.55 μm en sistemas de comunicaciones de fibra óptica. Se desea comprobar mediante el software FimmWave que el diseño de este dispositivo óptico es factible y realiza el filtrado propuesto.

1.2 Limitaciones y delimitaciones

- El uso de la computadora, ya que se encuentra en el laboratorio de la facultad y es utilizada para diversos propósitos.
- La poca información referente a filtros ópticos SMS.
- El manejo de software FimmWave debido a que la manera de usarlo solo se encuentra en su manual y se basa en guías de onda rectangulares.

1.3 Problema general de investigación

¿Es factible el diseño de un filtro espectral SMS basado sobre el modo LP_{01} en la banda de 1.55 μm ?

1.4 Problemas específicos de investigación

¿Qué factores se debe tomar en cuenta para el desarrollo del filtro espectral, habrá la suficiente información?

¿Se podrá diseñar un filtro que cumpla con parámetros necesarios del modo LP_{01} ?

¿Qué software podrá simular filtros y transiciones en fibra óptica?

¿Podrá ser una solución viable la técnica de multiplexación en el filtro de fibra óptica?

¿Cómo se facilitaría la utilización del software a futuros investigadores ante la falta de información en internet?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar un filtro espectral SMS basado sobre el modo LP₀₁ para la banda de 1.55 μm.

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar las condiciones de funcionamiento óptimo para el desarrollo de un filtro espectral a partir de una revisión bibliográfica.
- Diseñar el filtro espectral para cumplir con los parámetros necesarios del modo LP₀₁.
- Simular el filtro espectral y transiciones de la fibra óptica mediante el software “FimmWave”.
- Evaluar el nivel de prefactibilidad de la técnica de multiplexación, como solución viable para el diseño de un filtro.
- Creación de un manual de utilización del software FimmWave para facilitar su uso a futuros investigadores.

1.6 Justificación

1.6.1 Justificación teórica

Las redes de telecomunicaciones deben manejar una cantidad significativa de tráfico en los últimos años debido al aumento de los nuevos servicios multimedia y la expansión de un sector significativo de los usuarios que los utilizan. A consecuencia de este aumento de tráfico, los sistemas de comunicación requieren un mayor ancho de banda. Incluso los sistemas ópticos han enfrentado este problema debido a la demanda de capacidad, a pesar del enorme ancho de banda potencial disponible en su medio de transmisión, la fibra óptica.

La multiplexación por división en longitud de onda (WDM) es una de las posibles soluciones que se han planteado para abordar los grandes requisitos de ancho de banda. (LAUDE, 1993) es la que, en la actualidad, se considera técnicamente más factible. A diferencia de los sistemas que envían una única señal a través de la fibra óptica, los sistemas WDM aprovechan el enorme ancho de banda del medio y, además, permiten una evolución flexible y económica de las redes actuales. Esta técnica de multiplexación consiste en la transmisión, sobre una misma fibra, de múltiples portadoras ópticas moduladas, cada una de ellas centrada en diferente longitud de onda. Gracias a ello, se amplía la capacidad de transmisión aparente en la fibra, pues esta capacidad se ve multiplicada por el número de canales soportados. (SALEH, 2019)

La evolución de los sistemas WDM se ha logrado mediante la mejora de dispositivos ópticos como fibras ópticas, fuentes de luz, fotodetectores y sobre todo mediante el desarrollo de nuevos dispositivos multiplexores y demultiplexores. La importancia de los dispositivos de multiplexaje es la separación y aislamiento entre los canales que dependen de ellos y así ayuda a evitar interferencias en el sistema.

Los multiplexores y demultiplexores en los sistemas WDM requieren necesariamente algún tipo de dispositivo selectivo de longitud de onda, que en la mayoría de los casos es un filtro óptico. Por lo tanto, la investigación, búsqueda y desarrollo de varios tipos de filtros ópticos se han vuelto muy importantes. Hay filtros basados en dispersión, absorción selectiva, transmisión, reflector e interferómetro. (SENIOR, 2009)

1.6.2 Justificación metodológica

Mediante una investigación bibliográfica sobre filtros SMS y el software FimmWave se pretende simular un filtro óptico para medir su factibilidad y filtrado en la banda de 1.55 μm , junto con la proporción de un manual de utilización del software para simulaciones de fibra óptica. una vez que sean demostrados su validez y confiabilidad podrán ser utilizados en otros trabajos de investigación.

1.6.3 Justificación práctica

Un filtro óptico (SALEH, 2019) es un dispositivo capaz de seleccionar una banda de longitud de onda a transmitirse, y de suprimir el resto de las longitudes de onda que quedan fuera de dicha banda, evitando su paso. Existen diversos tipos de filtros ópticos para los sistemas WDM. (SENIOR, 2009) El objetivo de este trabajo será diseñar un filtro espectral de 7 núcleos en fibra óptica multimodo, con dos secciones monomodo idénticas a los lados, lo que se pretende con este análisis es identificar las ventajas y características que presentan estas fibras sobre los demás medios de transmisión.

El proceso del desarrollo del proyecto mostrado en la Ilustración 1-1, se explica a continuación. Primero se realizará la recolección de datos, que es el análisis de documentación relacionada con los filtros SMS de páginas con relevancia como la IEEE y el software FimmWave, principalmente de su manual de usuario el cual se centra en guías de onda rectangulares, en este caso se aplicará la información a guías de onda circulares; esta es la motivación principal para realizar un manual de utilización para futuros investigadores de fibra óptica.

En el segundo y tercer paso se diseñarán las secciones monomodo y multimodo en las cuales se colocará las diferentes variables como: ancho del recubrimiento, el ancho de cada core, sus índices de refracción, longitud de onda, etc. Luego se acoplarán colocando una sección de acople entre cada sección diseñada, la cual es necesaria para que exista la transición de la propagación del modo propio o LP_{01} entre las secciones al momento de simular; y corregirán factores de ser necesario como: Desfasamiento entre secciones, un no acoplamiento entre los anchos de los núcleos, entre otros factores que se pueden encontrar en el camino.

El cuarto paso es la experimentación o simulación donde se verá mediante el software la propagación del haz de luz a través del core central y luego se distribuirá entre los 7 cores al terminar la sección multimodo y mediante las diferentes graficas que proporciona el simulador se podrá observar si se está realizando un filtrado adecuado en la longitud de onda deseada.

Quinto y último paso, se valorarán los resultados de la simulación, como la transmisión de la luz a través de los núcleos y el filtrado de la potencia en la banda de $1.55 \mu\text{m}$ para ver si el filtro óptico es solución viable para la demultiplexación de los sistemas WDM. Los datos encontrados en este proyecto pueden servir como base de estudio para otros proyectos de investigación sobre la fibra óptica.

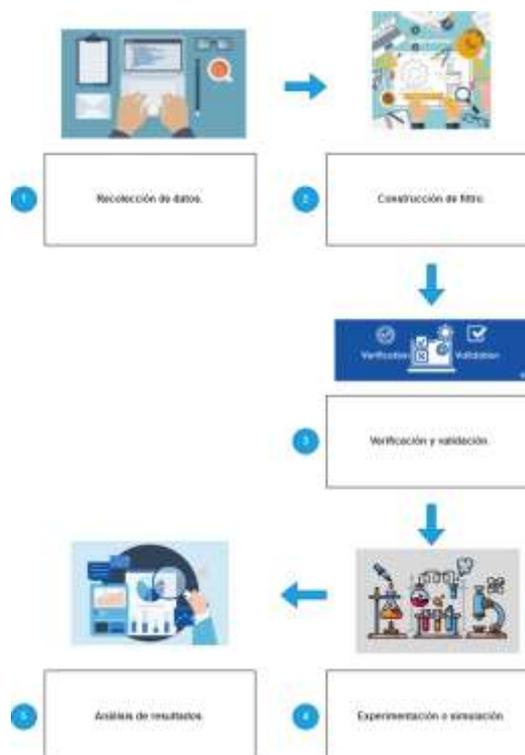


Ilustración 1-1: Pasos a seguir para el desarrollo del proyecto.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Fibras ópticas

la fibra óptica, (RAMOS, 2019), menciona que es un medio controlado de transmisión de información en forma de luz (visible o infrarroja), el cual es muy utilizado en la época moderna debido a las ventajas que ofrece frente a otros medios como: cable par trenzado, cable coaxial, aire, etc. Las ventanas típicas en las que opera la fibra óptica son las longitudes de onda 850, 1310 y 1550 nm, que corresponden a la luz infrarroja, pero esto no significa que la luz visible no funcione en las fibras ópticas, este tipo de luz tendrá una atenuación mayor que rayos infrarrojos.

En el transmisor se necesita un convertor electro-óptico para pasar señales eléctricas a señales luminosas, mientras que en el receptor se necesitará un convertor óptico-eléctrico que transforma las señales ópticas a eléctricas según Prieto citado por (RAMOS, 2019). En la Ilustración 2-1, se aprecia un esquema de la constitución de un cable de fibra óptica.

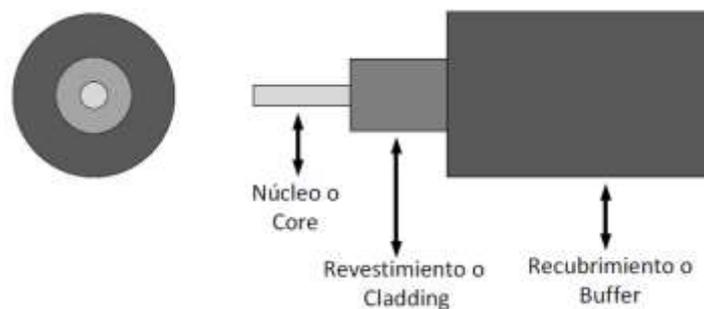


Ilustración 2-1: Cable de fibra óptica.

Fuente: (Valle, 2021)

La fibra óptica es muy frágil, por lo que requiere varios recubrimientos para que pueda utilizarse en escenarios prácticos. Ahora se describe los tres partes de un cable de fibra óptica que puede utilizarse en la práctica.

El núcleo, que transporta la luz, es la parte más pequeña de la fibra óptica, el núcleo de la fibra óptica generalmente está hecho de vidrio, aunque algunos están hechos de plástico, el vidrio utilizado en el núcleo es dióxido de silicio extremadamente puro, y en el proceso de fabricación, se utilizan dopantes como germanio, pentóxido de fósforo o aluminio para elevar el índice de refracción en condiciones controladas. Los núcleos de fibra óptica se fabrican en diferentes diámetros para diferentes aplicaciones, los núcleos de vidrio típicos van desde tan pequeños como 3,7 micrómetros hasta 200 micrómetros, los tamaños de núcleo comúnmente utilizados en

telecomunicaciones son 9 μm , 50 μm y 62,5 μm , en este sentido, los núcleos de fibra óptica de plástico pueden ser mucho más grandes que el vidrio. (VALLE, 2021).

El revestimiento, también se le conoce por cladding, rodea el núcleo y proporciona el índice de refracción más bajo para hacer que la fibra óptica funcione, y cuando se utiliza el revestimiento de vidrio, el revestimiento y el núcleo se fabrican juntos a partir del mismo material a base de dióxido de silicio en un estado de fusión permanente, el proceso de fabricación agrega diferentes cantidades de dopantes al núcleo y al revestimiento para mantener una diferencia en los índices de refracción entre ellos. (VALLE, 2021)

El recubrimiento es la capa protectora de la fibra óptica, es también conocido como, buffer, el cual, absorbe los golpes, muescas, raspaduras e incluso la humedad que podría dañar el revestimiento (RAMOS, 2019). Sin el recubrimiento, la fibra óptica es muy frágil, pues un solo corte microscópico en el revestimiento podría causar que la fibra óptica se rompa cuando se dobla, por lo tanto, el recubrimiento es esencial para todas las fibras de vidrio. De la misma manera, la chaqueta o forro según la aplicación para la cual se requiera el cable de fibra óptica se aplican varias chaquetas que fortalecen el cable para dar resistencia a la tracción, al aplastamiento, temperatura y humedad. Esta chaqueta puede contener varios hilos de fibra óptica agrupados en un solo cable y es diseñado para diferentes usos, por ejemplo, exteriores a la intemperie, o interiores el cual debe ser no inflamable.

Por sus características hacen que la atenuación por la distancia sea muy baja permitiendo el envío de señales a muy grandes distancias, superiores a cualquier medio de cobre, y debido a su complejo proceso de fabricación, a las herramientas y mano de obra especializadas para su instalación hacen que el costo sea más elevado, no obstante, la posibilidad de dar más servicios y con un mayor ancho de banda y si se hace correctamente su instalación, a largo plazo el mantenimiento es mínimo, siendo entonces muy superior la fibra óptica como el medio de transmisión por excelencia en el presente.

Un rayo de luz o en general una onda electromagnética se refracta cuando pasa de un material a otro, más concretamente cuando se propaga desde un material con cierta densidad a otro con distinta densidad. La refracción implica que una onda cambie de velocidad y dirección en el límite de los dos materiales, en este sentido, para que exista refracción la onda incidente debe llegar en forma oblicua a la superficie de separación de los dos medios. (RAMOS, 2019)

Cuando la luz que viaja en un medio ópticamente denso llega a un límite en un ángulo pronunciado o mayor que el ángulo crítico del límite, la luz se refleja por completo, a esto se le

llama reflexión interna total. Este efecto se usa en fibras ópticas para confinar la luz en el núcleo. La luz viaja a través del núcleo de la fibra, rebotando hacia adelante y hacia atrás fuera del límite entre el núcleo y el revestimiento, (TOALA, 2019) esto se debe a que, la luz debe alcanzar el límite con un ángulo mayor que el ángulo crítico, solo la luz que ingresa a la fibra dentro de un cierto rango de ángulos puede viajar por la fibra sin desviarse, este rango de ángulos se llama cono de aceptación de la fibra, y el tamaño de este cono de aceptación es una función de la diferencia de índice de refracción entre el núcleo de la fibra y el revestimiento. En la Ilustración 2-2, se muestra como dos haces de luz ingresan en un ángulo comprendido dentro del cono de aceptación y por lo tanto viaja por el núcleo de la fibra óptica, así mismo muestra como dos haces ingresan fuera de los ángulos permitidos por el cono por lo tanto son absorbidos por el recubrimiento. (VALLE, 2021)

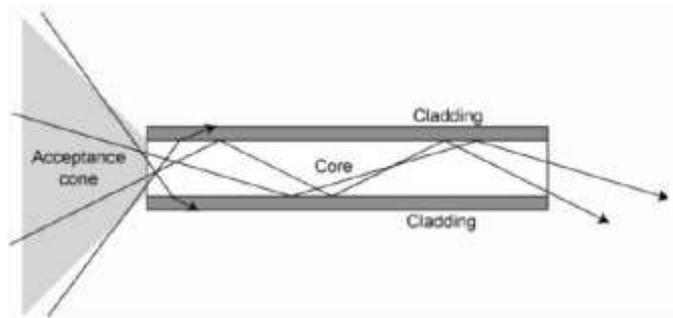


Ilustración 2-2: Incidencia de rayos de luz en el cono de aceptación.

Fuente: (TELECTRONIKA, 2018)

Las fibras ópticas se clasifican de acuerdo a los modos de transmisión en fibras monomodo y multimodo. Las fibras ópticas monomodo poseen un diámetro de núcleo muy estrecho de entre 8 μm y 10 μm permitiendo un solo modo de transmisión, requiere un acoplamiento de la luz muy confinado y preciso. El diámetro estrecho hace que haz se propague siguiendo una trayectoria muy paralela al eje de la fibra por lo que se evita el desfase al final de la transmisión y reduce la dispersión causada, atenuación típica esta entre 0,1 dB y 0,4 dB por kilómetro. (RAMOS, 2019).

Al disponer de un ancho de banda tan elevado, existe el problema de que no todas las longitudes de onda llegan al mismo tiempo a su destino, por lo que la dispersión cromática tiene un efecto muy considerable sobre el diseño. Sus bajas pérdidas y su dispersión modal inexistente la convierten en una fibra idónea para enlaces de larga distancia. Requiere de una minuciosa instalación y mantenimiento, ya que su minúsculo diámetro da lugar a un cono de aceptación sustancialmente menor que el de las fibras multimodo. (RAMOS, 2019).

2.1.1 Fibra monomodo

La fibra monomodo (ver Ilustración 2-3) tiene un cono de aceptación reducido por lo cual, la fuente de luz requerida para transmitir a través de esta fibra es más especializada y costosa. Típicamente se utiliza emisores de luz láser y lentes especializados en los receptores, esto hace que los equipos en principio tengan un costo mayor a los utilizados en fibras multimodo. (VALLE, 2021).



Ilustración 2-3 : Trayectoria en una fibra monomodo.

Fuente: (PRODUCTS, 2016)

Por las características anteriormente descritas el uso de fibra óptica monomodo, se ha generalizado para transmisión a redes WAN, en las cuales se tienen distancias de 10 km a 20 km en los ambientes metropolitanos para redes de operadores de servicios. Estas distancias difícilmente podrían ser cubiertas con fibras multimodo. (VALLE, 2021)

Las fibras monomodo se clasifican de acuerdo con su desempeño en atenuación; estas son OS1 y OS2, siendo a OS2 el estándar más reciente y, por lo tanto, con mejor desempeño para aplicaciones de planta externa.

- OS1: Para aplicaciones de interior, construcción tipo Thight Buffer y una atenuación de 1,0 dB/km.
- OS2: Para aplicaciones de planta externa, construcción tipo Loose Tube y una atenuación de 0,4 dB/km. (VALLE, 2021)

El desarrollo de la fibra óptica monomodo con su enorme capacidad de transmisión ha abierto la puerta al despliegue de redes ópticas punto a punto, de hecho, el uso de la fibra como sustituto del cable de cobre ha permitido aumentar de forma significativa la calidad del servicio (QoS) sin sufrir aumentos relevantes del precio de este, permitiendo de esta manera que cada vez haya más usuarios que adquieran este tipo de servicio. (RAMOS, 2019)

2.1.2 Fibra multimodo

La fibra multimodo, cuenta con un núcleo entre 50 o 62,5 micrones de diámetro permitiendo varios haces de luz tomando diferentes trayectorias, llamados modos, esta fibra puede transportar mucha más información llegando a velocidades de hasta 100 Gbps, pero es más susceptible a

atenuaciones por distancia y curvatura, por eso, las fibras ópticas multimodo típicamente se usan para equipos dentro de un ambiente LAN o centros de datos donde no se requiere cubrir grandes distancias, pero se necesitan altas tasas de transferencias de información. (VALLE, 2021). Poseen una atenuación típica de entre 0,3 dB y 1 dB por kilómetro, y el acoplamiento de la luz en sus diferentes modos es más sencillo, debido a esto, es posible utilizar un LED como fuente emisora, así como conectores más sencillos y una instalación y mantenimiento con menos coste que la fibra monomodo.

Hay dos tipos de fibra óptica multimodo debido al índice de refracción interno, una de ellas es la fibra de índice escalonado la cual todo el núcleo está construido de un material con el mismo índice de refracción, en la cual los diferentes haces de luz con diferentes trayectorias viajan a diferentes velocidades lo cual provoca dispersión, ya que estos llegan al receptor en distinto orden al que salieron del emisor. Por otra parte, la fibra de índice graduado está construida de tal forma que tiene diferentes índices de refracción concéntricos al núcleo lo cual, controla la forma que la luz viaja a través de las diferentes trayectorias de núcleo y, por lo tanto, garantiza la coherencia del mensaje de emisor a receptor. Como es de esperarse, la fibra de índice escalonado tiene un mejor desempeño en relación de ancho de banda y atenuación. (VALLE, 2021). En la Ilustración 2-4 se muestran fibras de índice escalonado y gradual.

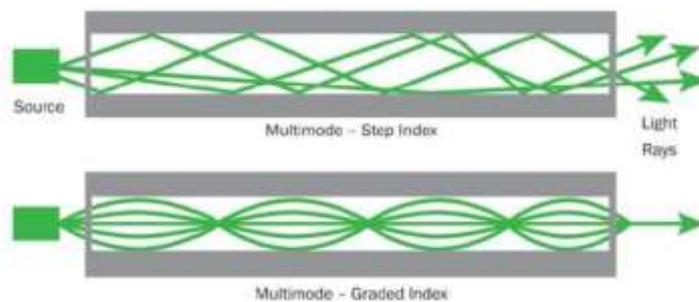


Ilustración 2-4: Fibras de índice escalonado y gradual.

Fuente: (PRODUCTS, 2016)

Los primeros sistemas de comunicaciones ópticas emplearon fibras multimodo de índice escalonado. Más tarde se desarrollarían las fibras multimodo de índice gradual que paliaron en gran medida el problema de la dispersión intermodal. (RAMOS, 2019).

De acuerdo con el aumento demanda de ancho de banda y distancia requerida para transmisión se han desarrollado cambios en la construcción y de la fibra óptica y el soporte de la fuente de luz láser la cual permite una menor atenuación que las fuentes típicas led. La clasificación de fibra óptica multimodo de acuerdo con estos parámetros es la siguiente:

- OM1: Núcleo de 62,5 μm fuente de luz led
- OM2: Núcleo de 50 μm fuente de luz led
- OM3: Núcleo de 50 μm fuente de luz Laser
- OM4: Núcleo de 50 μm fuente de luz Laser

2.1.3 Características de fibras ópticas

Las características de transmisión en una fibra óptica dependen en gran medida de la longitud de onda utilizada para transportar la información. La longitud de onda es la distancia que ocupa un ciclo de una onda electromagnética, en la Ilustración 2-5 se ilustra el espectro de longitud de onda electromagnético.

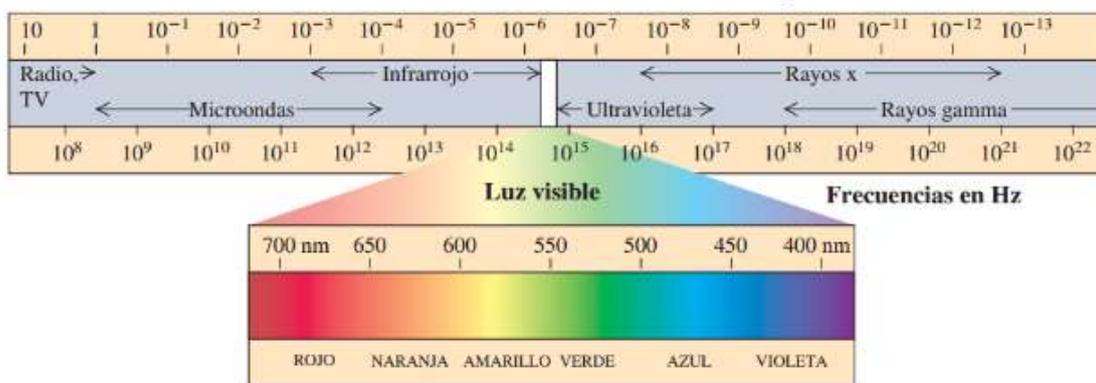


Ilustración 2-5: Espectro electromagnético.

Fuente: (Cortez Bustamante, 2016)

Se ha descubierto que, a determinadas frecuencias, las ondas pasarán a través de ciertos materiales más fácilmente; en el caso de las fibras ópticas, si se modula a determinadas frecuencias los efectos de la dispersión y las pérdidas de material debidas a propagación de ondas tienden a cancelarse unas con otras y crear ventanas como se observa en la Ilustración 2-6.

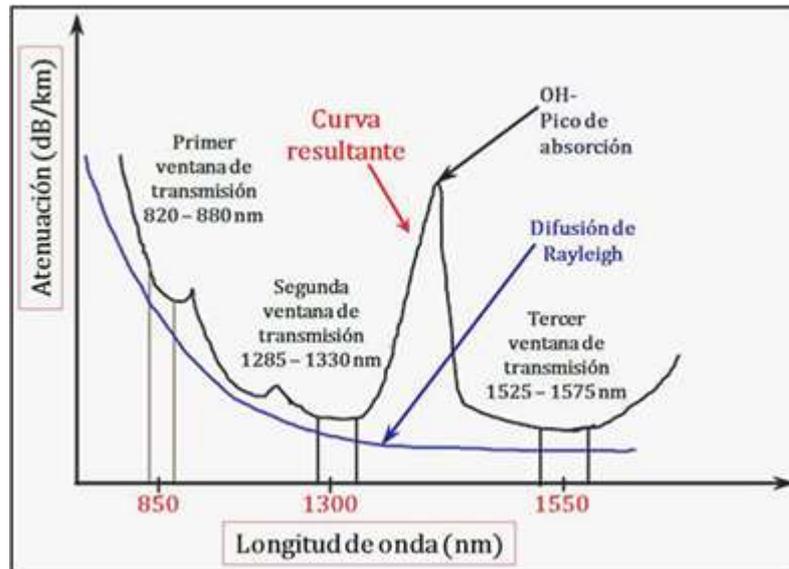


Ilustración 2-6: Ventanas de transmisión óptico.

Fuente: (COIMBRA, 2011)

2.1.3.1 Fibras ópticas comerciales y normalizadas

Los esfuerzos de estandarización iniciados en la década de los años 70 dieron sus frutos en las recomendaciones ITU-T (antes CCITT). En un principio (período 1977-1980) la G.651 normalizó las fibras ópticas multimodo de 50/125 μm ; luego (período 1981-1984) la G.652 normalizó la fibra óptica monomodo y la G.956 los sistemas de línea. Las FO monomodo para tercera ventana se encuentran normalizadas en G.653/654/655.

Las características se miden de acuerdo con normas del IEC 793, entre ellas se encuentran: la dispersión cromática, la longitud de onda de corte, el diámetro del campo modal, las dimensiones geométricas, el campo lejano y las características mecánicas.

A continuación, se identifican distintos tipos de FO con su aplicación, se trata de las FO de plástico; las multimodos para redes de datos; las monomodo para redes de alta velocidad y las FO para aplicaciones especiales.

- FO Plástica: Trabajan a longitud de onda visible (650 nm). Se utilizan en aplicaciones de automotores, audio, MIDI, etc. Se dispone de los siguientes tipos dimensionales y atenuaciones: 485/500 μm con 240 dB/km; 735/750 μm con 230 dB/km y 980/1000 μm con 220 dB/km.
- PCS: (Plastic Clad Silica) El núcleo es de silicio y las dimensiones son 200/300 μm . La atenuación es de 10 dB/km a 850 nm.

- FO 62,5/125 μm : Es una FO multimodo MM (MultiMode) con perfil de índice de refracción gradual (Graded Index). Este tipo de FO es una normalización norteamericana ANSI. Es usada en redes de datos de alta velocidad del tipo FDDI, para conexiones dúplex en anillos. Se suele conectorizar mediante terminales ST, SC o FDDI.
- FO 50/125 μm : Esta FO multimodo MM con perfil de índice parabólico es normalizada por ITU-T G.651. Usadas en la actualidad en redes de datos de corta longitud (hasta 2 km). Fue la única FO disponible hasta inicios de los años 80. Se usaba en 850 o 1300 nm.
- FO STD: Es del tipo monomodo SM (SingleMode) normalizada en ITU-T G.652. Se trata de la FO más popular en redes de telecomunicaciones actuales. Es factible de usarse en 1300 y 1550 nm. Debido a la dispersión cromática esta FO está optimizada para el cero de dispersión en 1300 nm.
- FO DS: Esta FO monomodo de dispersión desplazada DS (Dispersion Shift) se encuentra en ITU-T G.653. Permite gran ancho de banda en redes de larga distancia trabajando en tercera ventana. Esta FO, tiene el cero de dispersión cromática en 1540 nm. La dispersión tiene un valor de -2 a $+2$ ps/km.nm; la FO STD lo tiene entre $+16$ a $+18$ ps/km.nm.
- FO Minimum Loss: Es del tipo monomodo con mínima atenuación. Es normalizada en ITU-T G.654. Se aplica para enlaces de muy larga distancia en 1550 nm. Es de aplicación limitada debido a la reducida performance en cuanto a la dispersión cromática. Normalmente no es aplicable para sistemas STM-16 a 2,5 Gb/s.
- FO NZ-DS: (Non Zero-Dispersion Shift) determinada en ITU-T G.655. Es normalizada en 1994 para 1550 nm. Mejora a la G.653 para aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda WDM. La mejora en la intermodulación pasa de ser 25 dB para la G.653 a más de 50 dB en la G.655. La intermodulación es producida por alinealidades de la FO en altas potencias (por ejemplo, en amplificadores EDFA) cuando se inyectan varias longitudes de ondas de tipo WDM. El cero de dispersión cromática se encuentra en 1525 nm para las FO producidas por Lucent y en 1560 nm para las producidas por Corning. La dispersión se encuentra entre 2,6 y 6 ps/km.nm entre 1530 y 1560 nm.
- FO PDC: (Passive Dispersion Compensator) Permiten la compensación de la dispersión cromática G.652. Posee un núcleo muy estrecho (2 μm) y un salto de índice de refracción muy alto. La atenuación se incrementa, por lo que se realiza una reducción paulatina entre el núcleo de la FO normal y la de compensación de dispersión. Se utilizan algunos metros de FO de compensación por varios km de FO standard G.652. La dispersión negativa es del orden de -100 ps/km.nm a 1550 nm. Por ejemplo, en el mercado se encuentran módulos de compensación para 40 y 80 km de FO. El retardo disminuye con la longitud

de onda (1700 ps a 1556 nm y 1000 ps a 1557 nm). El centro de la banda 1556-1557 puede correrse para otras longitudes de ondas necesarias.

- FO Erbio Doped: La FO utilizada en amplificadores ópticos EDFA consisten en un tramo de una decena de metros de FO dopada con Tierras Raras. En 1984 se adoptó el ion trivalente de Erbio Er^{3+} para realizar estas FO activas. El Erbio en la FO tiene la propiedad de absorber energía a una longitud de onda y emitir energía en forma de emisión estimulada coherente con la señal de entrada (normalmente a 1550 nm).
- FO PM: (Polarization Maintaining) Este tipo de FO-SM permite transmitir una luz polarizada con una relación de 30 dB entre los ejes ortogonales. Se logra mediante un núcleo no simétrico en ambos ejes (un cladding interno oval o dos núcleos adicionales sobre un mismo eje). Se utiliza en óptica integrada, giróscopos ópticos, sensores y sistemas coherentes. Una FO puede actuar como polarizador debido a que cada eje tiene una longitud de onda de corte distinta; de forma tal que entre ambas longitudes de onda una polaridad se atenúa y la otra no. Este efecto se encuentra en un rango de 30 a 40 nm y permite formar polarizadores. (ARES, 2013)

Desde la Tabla 2-1 hasta la Tabla 2-6, se muestran las características de las FO definidas por el ITU-T en la serie G.65x.

Tabla 2-1: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas EIA-492.

EIA-492; ISO/IEC 793. FIBRA MULTIMODO 62,5/125.	
Apertura numérica	NA de 0,275 (tolerancia 0,015).
Perfil de índice de refracción	Parabólico (graded index). Usado en redes de datos y FDDI.
Índice de refracción	1,9 %.
Diámetro del núcleo	62,5 μm (tolerancia 3 μm).
Diámetro del revestimiento (Cladding)	125 μm (tolerancia 1 μm).
Recubrimiento de silicona Coating	245 μm (tolerancia 10 μm).
Longitud de onda de aplicación	850 y 1300 nm.
Atenuación a 850 nm	Entre 3 y 3,2 dB/km.
Atenuación a 1300 nm	Entre 0,7 y 0,8 dB/km.
Ancho de banda a 850 nm	Entre 200 y 300 MHz.km.
Ancho de banda a 1300 nm	Entre 400 y 600 MHz.km

Fuente: (ARES, 2013)

Tabla 2-2: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas ITU-T G.651.

ITU-T (CCITT) G.651. FIBRA MULTIMODO 50/125.	
Apertura numérica	NA=0,18 a 0,24 (tolerancia 10%)
Perfil del índice de refracción	parabólico
Diámetro del núcleo	50 μm (tolerancia 3 μm) y del revestimiento 125 μm (3 μm)
Recubrimiento de silicona Coating	245 μm (tolerancia 10 μm)
Error de concentricidad	6%
Error de circularidad del núcleo	6%
Error de circularidad del revestimiento	2%
Atenuación a 850 nm	Entre 2,7 y 3 dB/km
Atenuación a 1300 nm	Entre 0,7 y 0,8 2 dB/km
Ancho de banda a 850 nm	Entre 300 y 500 MHz
Ancho de banda a 1300 nm	Entre 500 y 1000 MHz

Fuente: (ARES, 2013)

Tabla 2-3: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas ITU-T G.652.

ITU-T G.652. FIBRA MONOMODO STANDARD.	
Longitud onda corte	1,18 a 1,27 μm
Diámetro del campo modal	9,3 (8 a 10) μm (tolerancia 10%)
Diámetro del revestimiento	125 μm (tolerancia 3 μm)
Recubrimiento de silicona Coating	245 μm (tolerancia 10 μm). Acrilato curado con UV.
Error de circularidad del revestimiento	2%
Error de concentricidad del campo modal	1 μm
Atenuación	de 0,4 a 1 dB/km en 1300 nm
Atenuación	de 0,25 a 0,5 dB/km en 1550 nm
Dispersión cromática 1285-1330 nm	3,5 ps/km.nm
Dispersión cromática 1270-1340 nm	6 ps/km.nm
Dispersión cromática en 1550 nm	20 ps/km.nm

Fuente: (ARES, 2013)

Tabla 2-4: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas ITU-T G.653.

ITU-T G.653. FIBRA SM DISPERSION SHIFT.	
Diámetro del campo modal	8 (7 a 8,3) μm (tolerancia 10%)
Diámetro del revestimiento	125 μm (tolerancia 3 μm)
Recubrimiento de silicona Coating	245 μm (tolerancia 10 μm)
Error de circularidad del revestimiento	2%
Error de concentricidad del campo modal	1 μm
Atenuación	inferior a 0,25 a 0,5 dB/Km en 1550 nm
Atenuación	inferior a 1 dB/Km en 1300 nm
Dispersión cromática	3,5 ps/km.nm entre 1525-1575 nm

Fuente: (ARES, 2013)

Tabla 2-5: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas ITU-T G.654.

ITU-T G.654. FIBRA SM DE MINIMA ATENUACION.	
Diámetro del revestimiento	125 μm (tolerancia 3 μm)
Error de circularidad del revestimiento	2 %
Error de concentricidad del campo modal	1 μm
Recubrimiento de silicona Coating	245 μm (tolerancia 10 μm)
Atenuación	inferior a 0,15 a 0,25 dB/Km a 1550 nm
Dispersión cromática	20 ps/km.nm en 1550 nm

Fuente: (ARES, 2013)

Tabla 2-6: Características principales de Fibras Ópticas normalizadas ITU-T G.655.

ITU-T G.655. SM NON ZERO DISPERSION SHIFT.	
Diámetro del campo modal	8,4 μm (tolerancia 0,6 μm). Diámetro núcleo 6 μm .
Diámetro del revestimiento	125 μm (tolerancia 1 μm)
Longitud de onda de corte	1260 nm
Atenuación	Desde 0,22 a 0,30 dB/Km en 1550 nm
Dispersión cromática	4,6 ps/km.nm en 1550 nm
Zona de dispersión no-nula	Desde 1540 a 1560 nm

Fuente: (ARES, 2013)

2.1.4 Propagación luminosa

Las ondas luminosas que se propagan por el interior de las fibras ópticas muestran ciertos comportamientos que dependen principalmente de los fenómenos de reflexión y refracción. El efecto de la refracción se puede observar fácilmente introduciendo una varilla en agua; se puede ver que la varilla parece quebrarse bajo la superficie; en realidad lo que sucede es que la luz reflejada por la varilla su imagen cambia de dirección al salir del agua, debido a la diferencia de índices de refracción entre el agua y el aire. Por otro lado, el fenómeno de reflexión puede observarse en un espejo donde, en este caso, la mayor parte de la luz no puede atravesar el material y se refleja al medio anterior. Estos fenómenos dependen tanto de los materiales como de los ángulos de incidencia de la luz. (CORTEZ BUSTAMANTE, 2016)

2.1.5 Pérdidas de señal o atenuación

Es probable que la pérdida de potencia en un cable de fibra óptica sea la característica más importante del cable, con frecuencia se llama atenuación la pérdida de potencia, y produce una pérdida de potencia de la onda luminosa al atravesar el cable, la atenuación tiene varios efectos adversos sobre el funcionamiento, que incluyen la reducción del ancho de banda del sistema, la rapidez de transmisión de información, la eficiencia y la capacidad general del sistema.

En general, las fibras multimodales tienden a tener mayores pérdidas de atenuación que los cables unimodales, debido principalmente a la mayor dispersión de la onda luminosa, producida por las impurezas. Un cable con pérdida de 3 dB reduce la potencia de salida a 50% de la potencia de entrada. Aunque la pérdida total de potencia es de principal importancia, la atenuación de un cable óptico se expresa, en general, en decibelios de pérdida por unidad de longitud. La atenuación se representa con un valor positivo de dB, porque por definición es una pérdida. La Tabla 2-7, es una lista de atenuaciones, en dB/km, para diversos tipos de cables de fibra. (WAYNE, 2003)

Tabla 2-7: Atenuación en el cable de fibra óptica.

Tipo de cable	Diámetro del núcleo μm	Diámetro del revestimiento μm	Longitud de banda	Atenuación (dB/km)
Unimodal	8	125	1300	0.5
	5	125	1300	0.4
Índice graduado	50	125	850	4
	100	10	850	5
Índice escalonado	200	350	850	6
	300	440	850	6
PCS	200	350	790	10
	400	550	790	10
Plástico	—	750	650	400
	—	1000	650	400

Fuente: (WAYNE, 2003)

Las pérdidas de transmisión en los cables de fibra óptica son una de las características más importantes de la fibra, las pérdidas en la fibra causan una reducción de la potencia luminosa y, en consecuencia, reducen el ancho de banda del sistema, la rapidez de transmisión de información, la eficiencia y la capacidad general del sistema. Las principales pérdidas en la fibra son:

2.1.5.1 Pérdidas por absorción.

Son pérdidas que se producen debido a impurezas de los materiales con los que se fabrica la fibra óptica, estas impurezas absorben el rayo de luz transportado y lo convierte en calor, básicamente, las pérdidas por absorción se originan por los rayos ultravioletas, rayos infrarrojos y por la presencia de iones hidroxilo, las pérdidas por absorción ultravioleta se debe a la excitación electrónica (cambio de nivel de un electrón), cada uno de estos saltos da lugar a absorción de energía y a pérdidas, la absorción ultravioleta disminuye apreciablemente a medida que la longitud de onda crece, por lo tanto, en longitudes por encima de 1000 nm su influencia es casi nula, y la absorción infrarrojos en cambio en esta opción actúa en la región infrarroja donde los fotones de luz son absorbidos por los átomos de las moléculas del núcleo de vidrio, los fotones absorbidos se convierten en vibraciones mecánicas aleatorias, características del calentamiento,

dichas pérdidas crece exponencialmente con la longitud de onda y es despreciable por debajo de los 1400 nm. (PANCHI HERRERA, 2016)

2.1.5.2 Pérdidas por dispersión en material o de rayleigh.

La pérdida de Rayleigh ocurre cuando los rayos de luz que viajan a través de una fibra óptica en su camino chocan con partículas extrañas en el medio del material, cuyo diámetro es mucho más pequeño que la longitud de onda de la señal óptica, causando distorsión, los rayos que caen dispersos en muchas direcciones, parte del haz difractado escapa a través del revestimiento y la otra parte continúa a lo largo de las fibras, las pérdidas de Rayleigh tienen mayor influencia en longitudes de onda que están comprendidas entre 400 nm y 1100 nm, por tanto, para evitarlas se debe utilizar longitudes de onda lo más altas posible. (PANCHI HERRERA, 2016)

2.1.5.3 Dispersión cromática, o de longitudes de onda.

La dispersión cromática en la fibra ocurre debido al ancho espectral de la fuente de luz, es decir, los transmisores que operan con láseres o LED's producen un rango de longitudes de onda, cada una de ellas viaja a diferente velocidad de propagación produciendo diferentes retardos, que al final de la fibra ocasionan el ensanchamiento del pulso emitido y por ende la dispersión limita la velocidad máxima del sistema de transmisión, esta es la principal causa de la dispersión cromática, ya que depende intrínsecamente del material y afecta tanto a fibras multimodo como monomodo. (PANCHI HERRERA, 2016)

2.1.5.4 Dispersión modal.

Esto sucede cuando diferentes rayos de luz llegan al final de la fibra en diferentes momentos debido a diferentes caminos. Si se envían varios pulsos a través de la fibra a alta velocidad, se superpondrán debido a la dispersión y el receptor no podrá distinguir dónde comienza un pulso y dónde termina el siguiente, lo que limita el ancho de banda para una determinada longitud de fibra, este efecto sólo ocurre en las fibras multimodo, aunque se puede reducir en forma considerable en fibras de índice graduado. (WAYNE, 2003)

2.1.5.5 Pérdidas por acoplamiento.

Estas pérdidas ocurren en la unión de fibras y pueden presentarse por tres formas ya sea la conexión de fuente luminosa a la fibra, conexión de la fibra a fibra y conexión de fibra a fotodetector, las pérdidas en las uniones se deben, con más frecuencia, a uno de los siguientes problemas de alineación: desalineamiento lateral, desalineamiento de entrehierro, desalineamiento angular y acabados superficiales imperfectos. (WAYNE, 2003)

2.1.6 *Perdidas por radiación*

Las pérdidas por radiación se deben principalmente a pequeños cambios de dirección y dobleces de la fibra. En esencia hay dos tipos de dobleces: los microdobleces y los dobleces con radio constante. El micro doblamiento se debe a variaciones en las velocidades de contracción térmica del núcleo y del material de revestimiento. Un micro doblez es un doblez o imperfección geométrica en miniatura del eje de la fibra, que representa una discontinuidad en ella en donde puede presentarse la dispersión de Rayleigh. Las pérdidas en microdobleces en general constituyen menos de 20% de la atenuación en una fibra. Los dobleces de radio constante se deben a demasiada presión y tensión y, en general, se presentan cuando se doblan las fibras durante su manejo o instalación. (WAYNE, 2003)

2.1.6.1 *Perdidas por curvatura*

En los sistemas de comunicación óptico, se tiene curvaturas a lo largo del tendido de la fibra, las cuales dependen de un radio de curvatura lo que produce un efecto en el comportamiento de la intensidad de radiación en la señal que se propaga a través de la fibra, los modos de mayor orden se escapan del núcleo hacia el revestimiento como se muestra en la Ilustración 2-7, esta anomalía se le conoce como pérdidas por macrocurvaturas. (CASTAÑEDA ROMERO, 2018)

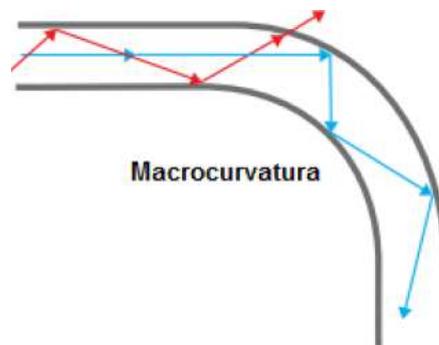


Ilustración 2-7: Perdidas por Macrocurvaturas.

Fuente: (CASTAÑEDA ROMERO, 2018)

También aparecen otras curvas que se derivan de la propia fibra, porque cada hilo de fibra no está aislado, sino que va con otros hilos en formas determinadas, donde cada una de ellas afecta la disposición de las otras produciendo pequeñas curvaturas o deformaciones de los hilos, con radios menores. A estas curvas se les da el nombre de microcurvaturas y producen pérdidas por microcurvaturas. (Andrés Felipe CABEZAS, 2014)

Para el caso de las microcurvaturas, en las que las irregularidades de la fibra aparecen en el momento de cableado de la fibra, por lo que a veces se les llama pérdidas por cableado o empaquetado, la atenuación se deberá al acoplo repetido entre modos que se propagan y modos que se radian. Si los rayos al chocar con las irregularidades cambian de ángulo, se podría decir que los rayos ahora no se propagarán dentro de la fibra, sino que se radiarán. Para unos casos habrá interferencia destructiva y para otros constructiva como se ilustra en la Ilustración 2-8.



Ilustración 2-8: Pérdidas por Microcurvaturas.

Fuente: (Andrés Felipe CABEZAS, 2014)

Si el haz de radiación considerado de un solo modo se propaga dentro de una fibra curvada con radio r , la distribución de la intensidad de radiación tendrá diferentes velocidades, sobre todo la intensidad de la energía atenuada cerca al revestimiento, por cuanto, por la parte superior de la curva los rayos deberán ir a una velocidad mayor que los del radio interior, ya que aquellos recorrerán mayor distancia. Por lo tanto, es posible que la energía del modo tienda a radiar en la parte externa y la radiación que se transmite por la fibra pierde parte de su intensidad.

Este tipo de pérdidas también se llaman pérdidas por radiación en las curvas. Los valores típicos de pérdidas por micro curvaturas que aparecen cuando se hace el cableado de los hilos, pueden llegar a ser de 1 a 2dB/km. (CASTAÑEDA ROMERO, 2018)

2.1.7 Apertura numérica de la fibra óptica (an)

La abertura numérica se relaciona en forma estrecha con el ángulo de aceptación y es la Ilustración de mérito que se suele usar para medir la magnitud del ángulo de aceptación, Se usa la abertura numérica para describir la capacidad de reunir la luz que tiene una fibra óptica, mientras mayor sea la magnitud de la abertura numérica, la fibra acepta mayor cantidad de luz externa, como se puede apreciar en la Ilustración 2-9, para fibras unimodales o multimodales, la abertura numérica se define como el seno del ángulo máximo que un rayo de luz que entra a la fibra puede formar con el eje de la fibra, y propagarse por el cable por reflexión interna, es decir, el seno del medio ángulo de aceptación. Los rayos de luz que entran al cable desde el exterior del cono de aceptación entrarán al revestimiento y, en consecuencia, no se propagarán por el cable. (WAYNE, 2003)

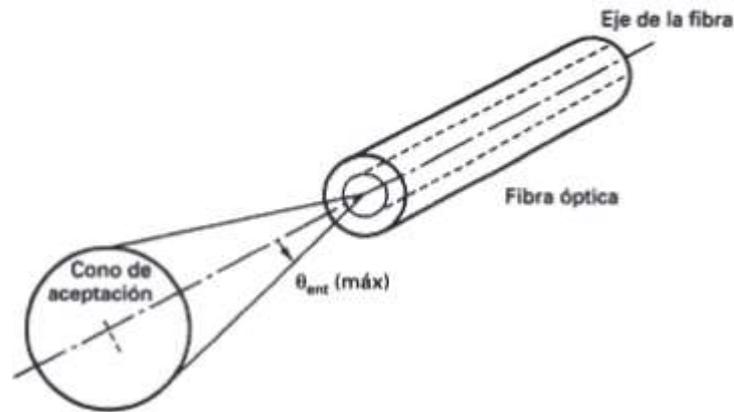


Ilustración 2-9: Apertura numérica.

Fuente: (WAYNE, 2003)

2.2 Multiplexación por división de longitud de onda

Se define a la multiplexación como al proceso que permite la transmisión de información procedente de varias fuentes sobre un mismo medio físico, es decir a la compartición del canal por diferentes señales. Con lo cual se logra un aumento sustancial en el rendimiento del medio. (RAMOS, 2007)

Existen diversos tipos de multiplexación, entre ellas la multiplexación por división de tiempo, multiplexación por división de frecuencia, multiplexación por división de código y la multiplexación por división de longitud de onda. Todas con el objetivo común de llevar sobre el mismo canal de transmisión más información proveniente de diferentes fuentes, evitando de esta manera el aumento de costos al ocupar un canal por cada fuente de información. (MILLAN, 2013)

La multiplexación por división de longitud de onda, WDM (Wavelength Division Multiplexing), tiene su origen en la posibilidad de acoplar las salidas de varias fuentes emisoras de luz, cada una con diferente longitud de onda, sobre una misma fibra óptica. Después de la transmisión a través de la fibra, las señales de cada longitud de onda diferentes pueden ser separadas entre sí hacia diferentes detectores en su extremo final. (PERADA, 2004) Este concepto queda reflejado en la Ilustración 2-10, en el esquema presentado se indica la operación de trabajo básica de un sistema WDM, es decir, diferentes señales de diferentes longitudes de onda que utilizan canales diferentes entran a un equipo, el cual se encarga de multiplexarlas para luego enviar toda la información por un solo enlace de fibra óptica hasta llegar a un demultiplexor, el cual mediante un proceso inverso puede separar estas señales para obtener la información original.

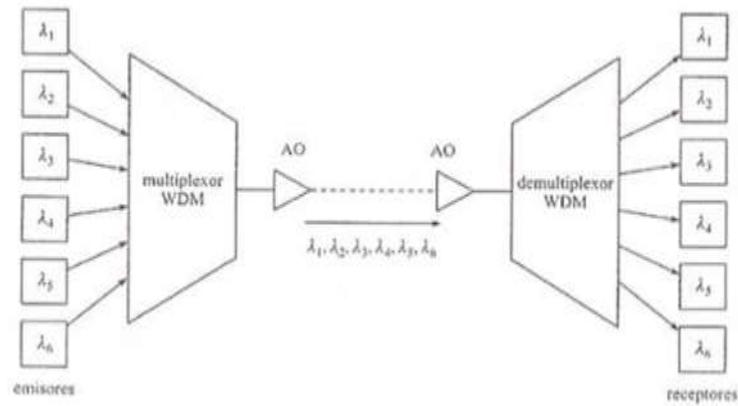


Ilustración 2-10: Esquema General de un Sistema WDM Punto a Punto.

Fuente: (RAMOS, 2007)

Los comienzos de WDM datan de fines de la década de los 80's donde se utilizaban dos longitudes de onda ampliamente espaciadas en las regiones de los 1310nm y 1550nm (o 850nm y 1310nm), algunas veces llamadas WDM de banda ancha (Wideband WDM). A principios de los 90's apareció la segunda generación de WDM, conocida como WDM de banda estrecha (Narrowband WDM), en la cual se utilizaban entre dos y ocho canales separados aproximadamente 400GHz en la ventana de los 1500nm. Esta tecnología fue mejorada a mediados de los años 90, con los sistemas DWDM, llegando a utilizar de 64 a 160 canales empaquetados densamente a intervalos de 50GHz y 25GHz; logrando por lo tanto a un aumento considerable de la capacidad de transmisión en la fibra. Actualmente se puede encontrar sistemas WDM de hasta 320 canales los cuales alcanzan velocidades de transmisión del orden de Tbps (Tera bits por segundo). (RAMOS, 2005)

2.2.1 Densidad de canales

Para el caso de utilizar fibra óptica convencional o de silíceo, las regiones donde usualmente se localizan los canales son la segunda y tercera ventana para cortas distancias. Pero para largas distancias, debido a la limitación que presentan los amplificadores ópticos, la región de trabajo se reduce a la tercera ventana (1535 – 1560 nm); tal como se observa en la Ilustración 11-2, se dispone de un ancho de banda de 3THz, para casos de fibras especiales que utilicen desde la tercera hasta la quinta ventana el ancho de banda disponible es de 15THz.

La tecnología WDM realiza una multiplexación en frecuencia de señales ópticas, por eso la ITU (International Telecommunications Union) ha realizado una estandarización de las frecuencias a utilizar, para esto se ha elegido como frecuencia central de 193.1THz lo cual corresponde a la longitud de onda central de 1552.524 nm con una separación de 100GHz o 50GHz. La separación

es uniforme si se representa en el dominio de la frecuencia, pero no sería igual si se hiciera en el dominio de las longitudes de onda, esto se puede observar en la Ilustración 2-11.

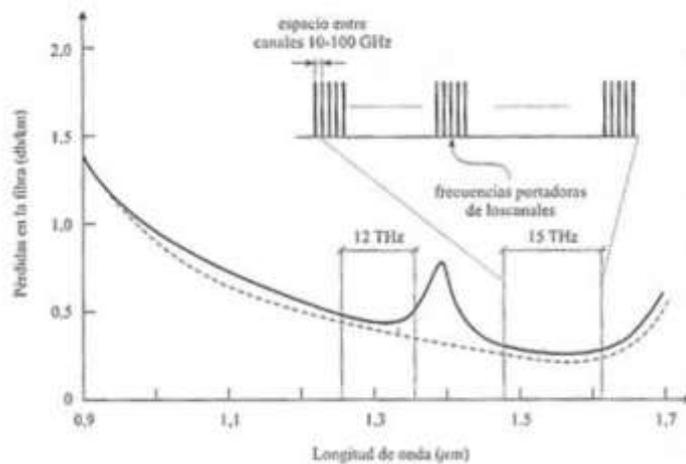


Ilustración 2-11: Ancho de Banda de un canal transmitido en WDM.

Fuente: (RAMOS, 2005)

La normativa de la ITU no establece que solamente se utilicen estos espaciamientos entre longitudes de onda, por eso en diversas aplicaciones se tienen separaciones entre canales de 25GHz y en algunos ambientes de laboratorio se ha llegado a separaciones de 1GHz. (PERADA, 2004)

2.2.2 Técnicas de multiplexación y demultiplexación por división de longitud de onda

La manera más simple de multiplexar y demultiplexar señales luminosas es utilizando un prisma, tal como se indica en la Ilustración 2-12, en la cual se presenta un proceso de demultiplexación, en el que un rayo de luz poli-cromática impacta en la superficie del prisma, este prisma actúa como un medio de dispersión y provoca que el rayo inicial se divida en varios rayos monocromáticos, los cuales tienen una longitud de onda y ángulo de salida específico.

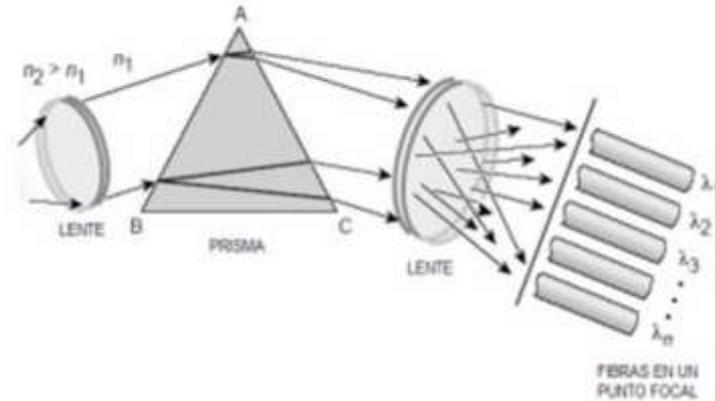


Ilustración 2-12: Demultiplexación por refracción de prisma.

Fuente: (RAMOS, 2005)

Finalmente, con la ayuda de un lente se puede enfocar estos haces de luz hacia un arreglo de fibras de recepción, el cual sirva para enviar las longitudes de onda obtenidas a los detectores ópticos. Otro método es el basado en el principio de difracción junto con el fenómeno de interferencia óptica, donde luz poli-cromática con diferente ángulo y ubicación espacial pasa a través de un lente, el cual se enfoca hacia una red de difracción, como se muestra en la Ilustración 2-13.

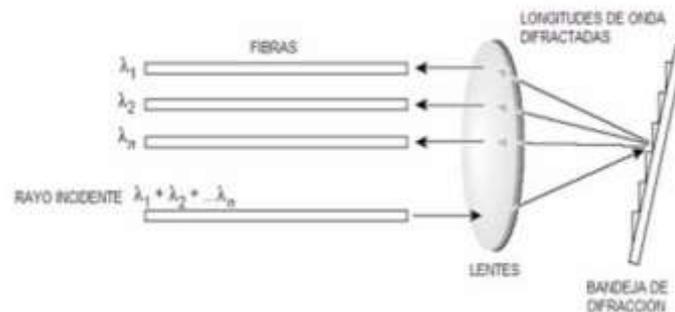


Ilustración 2-13: Multiplexación por Red de Difracción.

Fuente: (RAMOS, 2005)

Esta red de difracción refleja las longitudes de onda independientes hacia un conjunto de lentes para enfocarlas a un arreglo de fibras receptoras las cuales envían la señal hacia los detectores respectivos. (RAMOS, 2005)

2.3 Filtros ópticos

Los filtros ópticos son elementos que según el mecanismo de funcionamiento se pueden catalogar en filtros de interferencia o filtros tinturados (Un tinturante es una capa de vidrio pigmentado de resinas gelatinosas, los cuales son relativamente fáciles de fabricar y más baratos que los filtro de interferencia), las dos clases de filtros tienen como objetivo principal el de aislar una longitud de

onda de varias que puedan transportarse por un sistema de fibra óptica, por esta razón son indispensables en sistemas que utilicen WDM. (Z. OLAF, 2008) En la Tabla 2-8 se puede observar una comparación entre estos filtros, la mayoría de filtros utilizados comúnmente corresponden a filtros de interferencia.

Tabla 2-8: Comparación de las Propiedades de dos clases de Filtros Ópticos.

Tipo de filtro	Filtro de interferencia	Filtro tinturado
Principio	Reflexión/Transmisión	Absorción/Transmisión
Mínimo de ancho espectral	Menor a 1 nm	Aproximadamente 10 nm
Construcción	Múltiples capas transparentes. Rejillas de reflexión. Interferómetro Mach-Zehnder	Capa de sustrato dopado con partículas tinturantes.
Dependencia del ángulo de incidencia	Si	No
Dependencia de la polarización	Parcialmente	No

Fuente: (MILLAN, 2013)

2.3.1 Filtro etalón o fabry perot

Uno de los filtros ópticos más utilizados es el filtro etalón, el cual consiste en una cavidad formada por dos espejos paralelos. La luz ingresa desde una fibra de entrada en la cavidad y se refleja un cierto número de veces entre los espejos. Ajustando la distancia entre los espejos se puede seleccionar una única longitud de onda que se propague en la cavidad, mientras que el resto de las longitudes de onda se interfieren destructivamente. (MILLAN, 2013)

2.3.2 Interferómetro

Otro tipo de filtro óptico es el interferómetro MZ (Mach-Zehnder), cuyo esquema se indica en la Ilustración 2-14. La longitud del camino óptico en una de las guías de onda se controla mediante un retardo ajustable en una de las dos ramas del interferómetro, capaz de producir una diferencia de fase de 180° entre las dos señales cuando éstas se recombinan. Las longitudes de onda para las

que la diferencia de fase es 180° , son filtradas. Construyendo una cadena con estos elementos, se puede seleccionar la única longitud de onda deseada. (MILLAN, 2013)

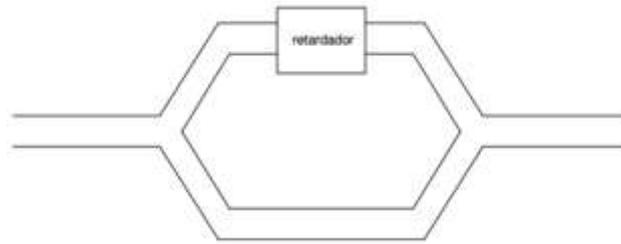


Ilustración 2-14: Interferómetro MZ.

Fuente: (MILLAN, 2013)

2.3.3 Filtro fabry perot liquid crystal

Los filtros FP-LC (Fabry Perot Liquid Crystal), constituyen una prometedora línea de investigación tecnológica. El índice de refracción del cristal líquido (LC) es modulado por una corriente eléctrica para filtrar la longitud de onda deseada, de igual manera que en un filtro electro-óptico. El tiempo de sintonía es del orden de milisegundos y el rango de sintonía va desde los 10 nm hasta 40 nm. Estos filtros tienen bajos requerimientos de potencia y su fabricación es muy barata. (PATEL, y otros, 1990)

2.3.4 Filtros fbg (fiber bragg grating)

Otro tipo de filtro de interferencia es aquel que utiliza rejillas de dispersión en su estructura, estas rejillas se encargan de filtrar una o más longitudes de onda de una señal WDM, por lo que son muy utilizados en la recepción de señales WDM. Entre los dispositivos con rejillas de difracción, están los conocidos como FBG (Fiber Bragg Grating), los cuales tienen rejillas de dispersión de Bragg inscritas en el núcleo de una fibra óptica; las rejillas de dispersión son esencialmente una capa plana de material transparente con surcos paralelos incrustados a lo largo de esta capa, su estructura se puede apreciar en la Ilustración 2-15.

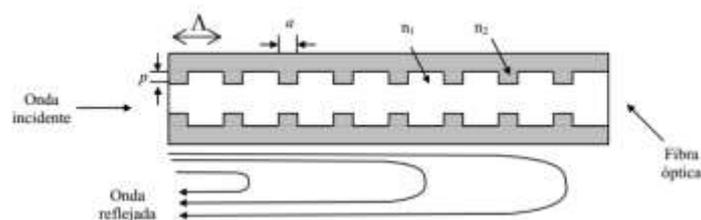


Ilustración 2-15: Estructura de una FBG.

Fuente: (GAXIOLA, 2005)

La rejilla separa la luz en sus distintas longitudes de onda mediante la reflexión de la luz incidente en los surcos. Para ciertos ángulos bien determinados, sólo una longitud de onda interfiere constructivamente y el resto de longitudes lo hacen destructivamente, esto permite seleccionar la longitud de onda deseada ubicando un filtro sintonizable a la longitud de onda adecuada en el ángulo apropiado.

Una fibra que disponga de una rejilla de Bragg es foto inducida por una variación periódica del índice de refracción en el núcleo de una fibra óptica. La rejilla de Bragg reflejará una longitud de onda filtrada de vuelta a la fuente, mientras pasan el resto de las longitudes de onda. Sin embargo, las rejillas de Bragg presentan una mediana dependencia de la temperatura del medio, por lo que se requiere que la temperatura esté estable para que las rejillas trabajen sin problemas, caso contrario el filtro no será tan selectivo y dejará pasar más longitudes de onda que la requerida. (GAXIOLA, 2005)

La longitud de onda a la que un filtro basado en FBG puede sintonizarse se la puede calcular con la expresión (2-1), la cual establece la relación entre la longitud de onda que se requiera reflejar y el espaciamiento de los surcos. La onda reflejada tiene una longitud de onda λ_B , Λ es el valor del distanciamiento de los surcos y n_1 representa el índice de refracción efectivo de la fibra.

$$\lambda_B = 2\Lambda n_1 \quad (2-1)$$

En la Ilustración 2-16. Se puede apreciar el esquema de un filtro óptico con el uso de rejillas de Bragg, para el funcionamiento adecuado se necesita incluir un acoplador de -3dB en el sistema, en el cual, por la entrada 1 se ingresa la señal WDM al acoplador y se envía hacia la rejilla de Bragg, debido a esta rejilla por la salida 3 se tiene la señal original filtrada la longitud de onda y en la salida 2 se presenta la longitud de onda buscada.

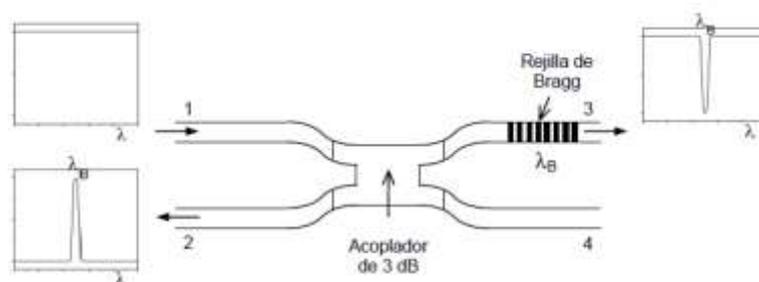


Ilustración 2-16: Filtro Óptico con FBG.

Fuente: (FLORES, 2010)

Otra alternativa para el filtrado de longitudes de onda es el uso de filtros TFF, estos elementos son semejantes a los filtros FBG, con la excepción de que son fabricados depositando capas de

bajo y alto índice de refracción alternadamente sobre una capa de sustrato. Esta tecnología tiene como inconvenientes: baja estabilidad térmica, altas pérdidas de inserción y pobre característica espectral. (FLORES, 2010)

2.3.5 Filtros awg (arrayed waveguide grating)

En la Ilustración 2-17. se presenta el funcionamiento esquemático de un filtro AWG, en este caso un haz de luz que se propaga y empieza su camino desde la guía de onda transmisora para después ingresar a la primera zona FPR (Free Propagation Region), la cual produce que el rayo de luz diverja lateralmente. Al momento de la recepción en la apertura de entrada, el rayo es acoplado hacia el arreglo de guías de onda y se propaga individualmente hacia la apertura de salida a través de cada guía de onda. La longitud del arreglo de guías de onda se escoge de tal manera que la diferencia entre las distancias de las trayectorias ópticas para guías de onda adyacentes sea igual a un múltiplo de la longitud de onda central del filtro.

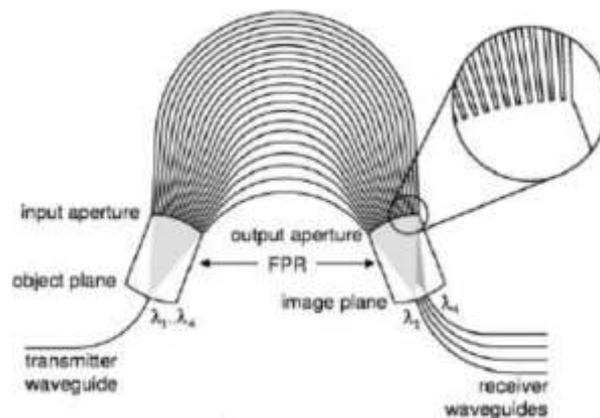


Ilustración 2-17: Estructura de un filtro AWG.

Fuente: (GAXIOLA, 2005)

Para esta longitud de onda central, los campos en las guías de onda individuales llegan a la apertura de salida con igual desfase, y por esta razón la distribución de campos de la apertura de entrada es semejante a la disposición de campos en la apertura de salida, lo que produce que el rayo divergente vuelva a converger con igual amplitud y distribución de fase.

La separación espacial de las guías de onda receptoras depende linealmente de la longitud del arreglo de guías de onda, si se aumenta esta longitud se introduce una desviación en el haz de salida asociado con un cambio del punto focal en el plano de la imagen final, esta desviación además está en función de la longitud de onda del haz de luz de salida. Si las guías de onda receptoras son ubicadas en posiciones apropiadas a lo largo del plano de imagen, se pueden obtener las longitudes de onda individuales en cada fibra receptora. (GAXIOLA, 2005)

2.3.6 Filtros tff (thin-film filter)

La estructura de los filtros TFF se basan en varias capas o películas finas (thin film) con diferentes índices de refracción, la variación de estos índices de refracción no es tomada al azar, sino cumpliendo una regla específica.

Para el buen funcionamiento de estos filtros el índice de refracción de la capa inicial debe ser mayor que el índice de refracción del aire, las demás capas deben ir alternando su índice de refracción entre mayor y menor hasta llegar a la capa de sustrato, la cual tiene el mayor índice de refracción que las anteriores.

Además de la variación del índice de refracción, para asegurarse que el rayo de luz tenga una variación de fase de 180° , es decir se refleje completamente, el espesor de cada capa deber ser igual a la cuarta parte de la longitud de onda que se necesite separar, esta estructura se puede apreciar en la Ilustración 2-18. (MACLEOD, 2001)

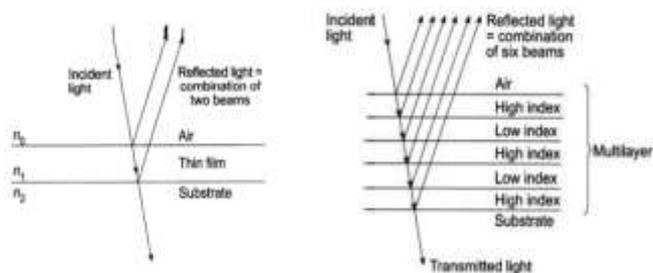


Ilustración 2-18: Estructura de un filtro TFF.

Fuente: (MACLEOD, 2001)

2.4 Filtro óptico sms

Donlagic y Culshaw han propuesto una nueva estructura de sensor de microcurvatura que consta de dos fibras monomodo (SM) idénticas empalmadas axialmente en ambos extremos de una fibra de núcleo parabólico multimodo (MM). Esta estructura se ha denominado estructura de fibra SMS (Modo único-Multimodo-Modo único). Los autores han asumido que solo el modo fundamental está acoplado (acoplado en el extremo de entrada (salida) de la sección de fibra de detección multimodo. Tal condición se cumpliría solo cuando los tamaños de los puntos de los modos fundamentales de las fibras monomodo y multimodo coincidan exactamente y tampoco haya desalineación axial en los empalmes. Si alguna de las condiciones anteriores no se cumple, los modos de orden superior de la fibra multimodo también se excitarán/acoplarán en el extremo de entrada/salida de la fibra multimodo. Además, en una fibra de núcleo parabólico, dado que las

constantes de propagación de los distintos modos están espaciadas casi por igual, se espera que la potencia acoplada a la fibra monomodo de salida sea extremadamente sensible a la diferencia de fase desarrollada entre varios modos en el extremo de salida de la sección de fibra multimodo. Por lo tanto, el rendimiento de la estructura del sensor de fibra SMS debe depender en gran medida de la longitud de onda de funcionamiento y también de la longitud de la fibra multimodo. (D. DONLAGIC, 1999)

Los filtros de paso de banda/detención de banda ópticos son un componente esencial en los sistemas de telecomunicaciones donde se requiere que un cierto rango de longitudes de onda esté presente o ausente en la señal óptica. Debido a su baja pérdida, tamaño compacto, respuesta de alta frecuencia y facilidad de inserción en los canales de comunicación de fibra óptica existentes, los filtros de fibra óptica son preferibles a sus contrapartes electrónicas y ópticas integradas. En la literatura (A. KUMAR, 2003) (W. S. MOHAMMED, 2006) (J. E. A. LOPEZ, 2010) se han informado varios diseños de filtros de paso de banda basados en estructuras de fibra monomodo multimodo (SMS). En principio, se puede lograr una acción de filtro de paso de banda haciendo coincidir los tamaños de punto de los modos fundamentales de SMF y MMF en la longitud de onda central del filtro (A. KUMAR, 2003). En longitudes de onda cercanas a la longitud de onda central, la mayor parte de la luz se acoplará al modo fundamental del MMF y, por lo tanto, se acoplará, dando un máximo de transmisión. Lejos de la longitud de onda central, se excitan múltiples modos y la potencia transmitida dependerá de la diferencia de fase acumulada entre los modos de propagación, produciendo máximos y mínimos periódicos en el espectro de transmisión. Por lo tanto, la estructura se comportará como un filtro de paso de banda para longitudes de onda entre los dos mínimos de transmisión a cada lado de la longitud de onda coincidente del tamaño del punto. En tal esquema, sin embargo, el ancho de banda del filtro será extremadamente grande ya que los tamaños de punto de SMF/MMF no varían mucho con la longitud de onda. En otro esquema, la acción del filtro de paso de banda se logra seleccionando la longitud del MMF de tal manera que, a una determinada longitud de onda, la distribución del campo en su extremo de salida sea la imagen del campo de entrada (W. S. MOHAMMED, 2006), (J. E. A. LOPEZ, 2010). Por lo tanto, hay un pico en la transmisión en esta longitud de onda, y en otras longitudes de onda en las que no se produce la autoimagen, la potencia transmitida se reduce. La ventaja de este esquema es que la longitud de onda del filtro central se puede ajustar fácilmente a otro valor simplemente cambiando la longitud MMF para que la autoimagen para la nueva longitud MMF ahora se logre en otra longitud de onda. Un filtro óptico que es simple y de bajo costo, pero versátil en el sentido de que su longitud de onda central y ancho de banda se pueden sintonizar y se puede cambiar entre los modos de paso de banda y de supresión de banda, sería definitivamente más atractivo que otros filtros ópticos.

2.4.1 Fibra de 7 core

De todas las estructuras MCF, se considera la MCF homogénea, idéntica, de 7 núcleos que consta de un núcleo central etiquetado (1) que está rodeado concéntricamente por seis núcleos distribuidos hexagonalmente, etiquetados (2–7) como se muestra en la Ilustración 2-19. Debido a la simplicidad del diseño y la fabricación, se supone que cada núcleo tiene un diámetro e índice de refracción idénticos, d_c y n_{co} , respectivamente, mientras que el revestimiento tiene un índice de refracción de n_{cl} . También se supone que la sección transversal MCF es uniforme a lo largo del eje z y cada núcleo individual admite solo un modo guiado fundamental (LP_{01}).

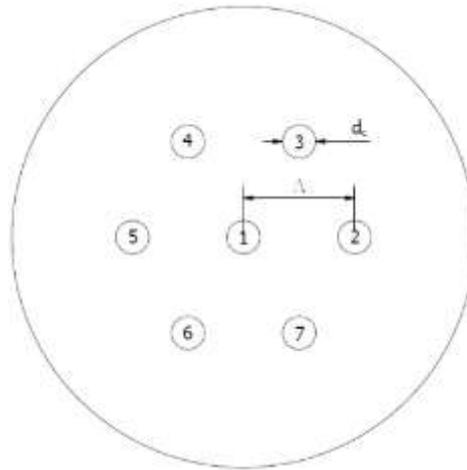


Ilustración 2-19: Estructura de fibra de siete núcleos que consta de 6 núcleos distribuidos simétricamente alrededor de un núcleo central.

Fuente: (SAMIR, 2017)

Si la amplitud del modo fundamental del core p es $A_p(z)$, la constante de propagación para el modo fundamental del núcleo p es β_p entonces los campos eléctrico y magnético en el core p^{th} se puede escribir en términos de su función de amplitud modal en la sección transversal multiplicada por la función de propagación en la dirección z como:

$$\vec{E}_p(z) = \vec{A}_p(z)e^{-j\beta_p z} \quad (2-2)$$

$$\vec{H}_p(z) = \vec{A}_p(z)e^{-j\beta_p z} \quad (2-3)$$

La interacción entre los modos del 7CF viene dada por un conjunto de ecuaciones de modo acoplado (Y. HUO, 2004), (SNYDER, 1972), (A. W. SNYDER, 1983), (OKAMOTO, 2006), (H. A. HAUS, 1983), (F. Y. M. CHAN, 2012), Se puede escribir como:

$$\frac{d\vec{H}_p(z)}{dz} = -C\vec{A}(z) \quad (2-4)$$

Donde $\vec{A}(z) = [\vec{A}_1(z)\vec{A}_2(z) \dots \vec{A}_7(z)]^T$ es la amplitud del campo eléctrico transversal en la posición z para cada núcleo y el superíndice T denota la transpuesta de la matriz o vector, z es la dirección de propagación y C es la matriz de acoplamiento que describe la interacción entre pares de núcleos cuya separación es Λ . La matriz de acoplamiento está dada por:

$$C = j \begin{bmatrix} 0 & k & k & k & k & k & k \\ k & 0 & k & 0 & 0 & 0 & k \\ k & k & 0 & k & 0 & 0 & 0 \\ k & 0 & k & 0 & k & 0 & 0 \\ k & 0 & 0 & k & 0 & k & 0 \\ k & 0 & 0 & 0 & k & 0 & k \\ k & k & 0 & 0 & 0 & k & 0 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Todos los trabajos reportados para el cálculo del coeficiente de acoplamiento se realizaron usando métodos numéricos, por ejemplo, elementos finitos, o usando aproximaciones analíticas, o una combinación de ambos. El coeficiente de acoplamiento entre dos guías de ondas monomodo paralelas se puede calcular utilizando una definición rigurosa en términos de la integral de superposición (SAMIR, 2017), (Shen LIU, 2014):

$$k_{pq} = \frac{\omega \epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n_{co}^2 - n_{cl}^2) E_p^* E_q^* dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_z (E_p^* \times H_q - E_q \times H_p^*) dx dy} \quad (2-6)$$

Donde E_p, E_q, H_p, H_q son las distribuciones de campo eléctrico y magnético del modo LP_{01} de los núcleos p, q respectivamente.

2.4.2 Análisis de la dinámica de acoplamiento de modos

En un 7CF (Fibra de 7 cores) homogéneo en el que todos los núcleos tienen el mismo tamaño y seis están dispuestos simétricamente alrededor del núcleo central, solo hay dos coeficientes de acoplamiento en la estructura, es decir, uno para el acoplamiento entre dos núcleos externos adyacentes y otro para el acoplamiento entre el núcleo central y los externos. el coeficiente de acoplamiento de los núcleos no adyacentes puede despreciarse; por lo tanto, el sistema de ecuaciones diferenciales acopladas de 7 por 7 obtenido de la ecuación. (2-4) se reduce a dos ecuaciones que se pueden resolver analíticamente para la amplitud del campo eléctrico en los núcleos central y (cualquiera de los) externo (Armando PEREZ-LEIJA, 2013):

$$A_1(z) = \left[\left(\cos(\sqrt{7}kz) + \frac{i}{\sqrt{7}} \sin(\sqrt{7}kz) \right) \right] e^{-ikz} \quad (2-7)$$

$$A_p(z) = -\frac{i}{\sqrt{7}} \sin(\sqrt{7}kz) e^{-ikz} \quad p \neq 1 \quad (2-8)$$

En la situación experimental, la sección MCF se empalma entre dos fibras monomodo (SMF). La radiación de excitación se lanza solo al núcleo central, es decir, $A_1(0) = 1$ y $A_p(0) = 0$ para todos los núcleos externos. Dado que la potencia normalizada $P = |A|^2$ es una simple expresión para la evolución z de la potencia del modo normalizado se puede obtener como:

$$P_1(z) = |A_1(z)|^2 = \frac{1}{7} + \frac{6}{7} \cos^2(\sqrt{7}kz) \quad (2-9)$$

$$P_p(z) = |A_p(z)|^2 = \frac{1}{7} \sin^2(\sqrt{7}kz) \quad p \neq 1 \quad (2-10)$$

Esto conduce a un intercambio periódico de energía entre los núcleos a lo largo de la fibra.

2.4.3 Método de expansión en modo propio

El método EME ha sido bien conocido en fotónica durante algún tiempo a través del método film-mode-matching (FMM) (SUDBO, 1993), (OLINER, y otros, 1981). Se basa en la idea de que cualquier solución de las ecuaciones de Maxwell en la región de la guía de ondas se puede escribir en términos de una superposición de los modos de propagación hacia adelante (propagación a lo largo de $+z$) y hacia atrás (propagación a lo largo de $-z$). El campo en cualquier sección se puede escribir como una combinación lineal de los modos propios 2D. Con las correspondientes constantes de propagación β_k . Dichos modos se pueden calcular usando el solucionador de modo de Fimmwave:

$$\psi(x, y, z) = \sum_{i=1}^N (c_i^f e^{j\beta_i z} + c_i^b e^{-j\beta_i z}) \psi_i(x, y) \quad (2-11)$$

Donde $\psi_i[\vec{E}_i, \vec{H}_i]$ es el perfil modal, β_k es la constante de propagación correspondiente y c_i^f, c_i^b son los coeficientes de amplitud compleja hacia adelante y hacia atrás respectivamente. El esquema de la estructura utilizada para simular el acoplamiento y la potencia transferida entre los núcleos en el 7CF se muestra en la Ilustración 2-20. La estructura consta de una pequeña longitud de 7CF entre dos SMF idénticos. La luz se acopla al núcleo central de entrada mediante una fibra de entrada monomodo de $4,8 \mu\text{m}$. Luego, la potencia se acopla a los núcleos circundantes a lo largo del 7CF. Finalmente, la potencia de transmisión se recolecta de la guía de onda de salida monomodo "recta" y "desplazada" que tiene un radio similar a la fibra de entrada monomodo y los núcleos en la sección 7CF.

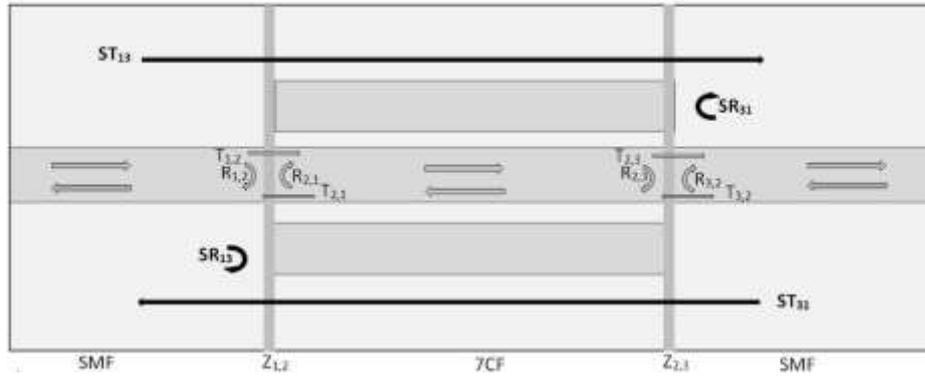


Ilustración 2-20: Varias reflexiones y transmisiones en un dispositivo S7S.

Fuente: (SAMIR, 2017)

Los campos en todo el dispositivo se obtienen utilizando el enfoque de matriz de dispersión que involucra excitaciones modales hacia adelante y hacia atrás para el campo en cada una de estas secciones y aplicando las condiciones de continuidad y ortogonalidad para los campos de modo a través de la interfaz entre secciones consecutivas para expresar los campos que se alejan de la junta en términos de los campos incidentes en la junta. Los campos eléctricos tangenciales deben ser los mismos en cada lado de la interfaz.

$$\sum_{i=1}^N (a_i^f e^{j\beta_i z} - a_i^b e^{-j\beta_i z}) E_{i,t}^m(x, y) = \sum_{i=1}^N (b_i^f e^{j\beta_i z} - b_i^b e^{-j\beta_i z}) E_{i,t}^{m+1}(x, y) \quad (2-12)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} (E_{x,i} H_{y,j} - E_{y,j} H_{x,i}) ds = \delta_{ij} \quad (2-13)$$

Donde a_i^f , a_i^b son los coeficientes de la delantera y modos hacia atrás al comienzo de la sección m y b_i^f , b_i^b son los coeficientes de los modos hacia adelante y hacia atrás al comienzo de la sección $m+1$. $E_{i,t}^m(x, y)$, $E_{i,t}^{m+1}(x, y)$ son el modo eléctrico tangencial de campos en las secciones consecutivas m , $m+1$. La matriz de dispersión conjunta expresa los campos que se alejan del nudo en términos de los campos incidentes en el nudo como en (T. P. FELICI, 2003).

2.5 Modos de operación

2.5.1 Guías circulares

Las guías circulares tienen aplicaciones muy específicas e importantes. En particular, son útiles en los sistemas de radar que necesitan una antena giratoria y en la fabricación de muchos dispositivos de microondas que requieren de una unión que gire libremente, tales como atenuadores y cambiadores de fase de alta precisión. Para analizar las propiedades de transmisión de una guía de ondas circular, conviene utilizar un sistema de coordenadas cilíndricas. En la

Ilustración 2-21 se muestra la geometría de la guía, cuyo radio interno es a y transmite potencia en la dirección z . (NERI, 2013)

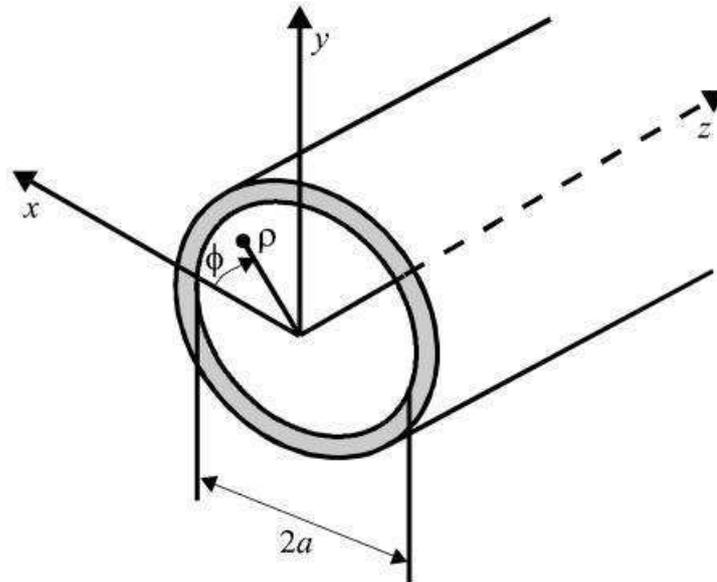


Ilustración 2-21: Guía de ondas circular y sistema de coordenadas polares.

Fuente: (NERI, 2013)

Los modos TE y TM, las ecuaciones generales son:

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + (\gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon) H_z = 0 \quad (2-14)$$

Para los modos TE

Y

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + (\gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon) E_z = 0 \quad (2-15)$$

Para los modos TM

Ahora es necesario trabajar con ecuaciones similares a las (2-14) y (2-15), pero en coordenadas polares. Después de resolverlas y aplicar las condiciones de frontera correspondientes a la geometría circular, se obtendrán las distribuciones de campo en el interior de la guía. De la Ilustración 2-21, inmediatamente se ve que E_ϕ deberá valer cero en la frontera, es decir, cuando $\rho=a$ y para toda ϕ , suponiendo que el conductor sea perfecto. Asimismo, para los modos TE, $E_z=0$ en todos los puntos interiores; y para los modos TM, $E_z \neq 0$, con excepción de la frontera, donde $E_z=0$ para toda ϕ , puesto que no puede haber componente tangencial de campo eléctrico en el conductor perfecto. Las ecuaciones diferenciales finales que hay que resolver para la guía circular son:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + (\gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon) H_z = 0 \quad (2-16)$$

Para los modos TE

Y

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + (\gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon) E_z = 0 \quad (2-17)$$

Para los modos TM

Estas ecuaciones pueden ser resueltas por el método de separación de variables. La solución general contiene funciones de Bessel de primera y segunda clase, de orden m : $J_m(h\rho)$ y $N_m(h\rho)$. A la función Bessel de segunda clase también se le conoce como función Neumann, y por ello se denota con la letra N . Dicha solución general es:

$$\Psi = \left[\frac{AJ_m(h\rho) + BN_m(h\rho)}{f_1(\rho)} \right] \left[\frac{C \cos m\phi + D \sin m\phi}{f_2(\phi)} \right] e^{-\gamma z} \quad (2-17)$$

en donde Ψ puede ser H_z o E_z , A , B , C y D son constantes y:

$$h^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon \quad (2-18)$$

Sin embargo, la función Neumann tiene una singularidad en $\rho = 0$, es decir, tiende a menos infinito cuando su argumento tiende a cero. Como sería imposible tener un campo de magnitud infinita en el centro de la guía, donde $\rho = 0$, esto quiere decir que la constante B en la ecuación (2-18) debe considerarse igual a cero para toda m . Para otro tipo de problema, por ejemplo, si hubiese una barra metálica axial, la función Neumann sí podría ser empleada en la solución general, pues $\rho = 0$ no sería un punto de campo. Por otra parte, la constante m deber ser un número entero, ya que la geometría circular del problema exige que cada vez que ϕ se incremente en 2π , se vuelva a obtener el mismo valor para el campo. Esta condición de periodicidad conduce a elegir las funciones $\cos m\phi$ y $\sin m\phi$ indicadas en la solución general dada por la ecuación (2-18). Pero no es necesario usar las dos funciones; cualquiera de ellas es suficiente, según la referencia que se elija para el ángulo $\phi = 0^\circ$. Como se acostumbra a utilizar la función $\cos m\phi$, la solución final adopta la forma siguiente, ignorando por el momento el término $e^{-\gamma z}$:

$$\Psi = A_0 [J_m(h\rho) \cos m\phi] \quad (2-19)$$

en donde A_0 es una constante.

Las condiciones de frontera del problema impondrán los valores que pueda tener h , según se trate de modos de propagación TE o TM. Cada valor de h , a su vez, definirá el valor de la constante de propagación, de acuerdo con la ecuación (2-18).

Una vez conocida H_z (para los modos TE) o E_z (para los modos TM), las demás componentes de campo se obtienen a partir de las mismas ecuaciones de Maxwell, con $\gamma = j\beta$, como:

$$E_\rho = \frac{1}{h^2} \left[-j\beta \frac{\partial E_z}{\partial \rho} - j \frac{\omega\mu}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right] \quad (2-20)$$

$$E_\phi = \frac{1}{h^2} \left[j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial \rho} - j \frac{\beta}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right] \quad (2-21)$$

$$H_\rho = \frac{1}{h^2} \left[-j\beta \frac{\partial H_z}{\partial \rho} + j \frac{\omega\mu}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right] \quad (2-22)$$

$$H_\phi = \frac{1}{h^2} \left[-j\omega\mu \frac{\partial E_z}{\partial \rho} - j \frac{\beta}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right] \quad (2-23)$$

Recuérdese que $E_z = 0$ para los modos TE y $H_z = 0$ para los modos TM, de manera que las ecuaciones (2-20) – (2-23) se simplifican acordemente. (NERI, 2013)

2.5.1.1 Los modos te

La componente de campo H_z de los modos TE se obtiene sustituyendo a Ψ por H_z en la ecuación (2-19):

$$H_z = A_0 J_m(h\rho) \cos m\phi \quad (2-24)$$

De la ecuación (2-21), considerando que $E_z = 0$ para los modos TE, se obtiene la siguiente condición de frontera en $\rho = a$:

$$E_\phi|_{\rho=a} = \frac{1}{h^2} \left[j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right]_{\rho=a} = 0 \implies \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \Big|_{\rho=a} = 0 \quad (2-25)$$

Si ahora la ecuación (24-2) es derivada con relación a ρ , se tiene:

$$\frac{\partial H_z}{\partial \rho} = A_0 h J'_m(h\rho) \cos m\phi \quad (2-26)$$

De modo que, como en general $A_0 h \cos m\phi \neq 0$, en la frontera debe cumplirse lo siguiente:

$$\frac{\partial H_z}{\partial \rho} \Big|_{\rho=a} = \boxed{0 = J'_m(h\rho) \Big|_{\rho=a}} \quad (2-27)$$

Las cuatro funciones iniciales de Bessel de primera clase se muestran en la Ilustración 2-22. La naturaleza oscilatoria de estas funciones permite tabular los argumentos para los cuales valen cero, es decir, cuando se cruza el eje de las abscisas. Así, por ejemplo, la función $J_0(h\rho)$ tiene el valor cero cuando $h\rho = 2.405, 5.520, 8.654, \dots$ Estas raíces ($n = 1, 2, 3, \dots$) dan origen a la

nomenclatura de cada uno de los modos de propagación en la guía. Por comodidad, en la Tabla 2-9. se incluyen las primeras raíces de las primeras tres funciones de Bessel.

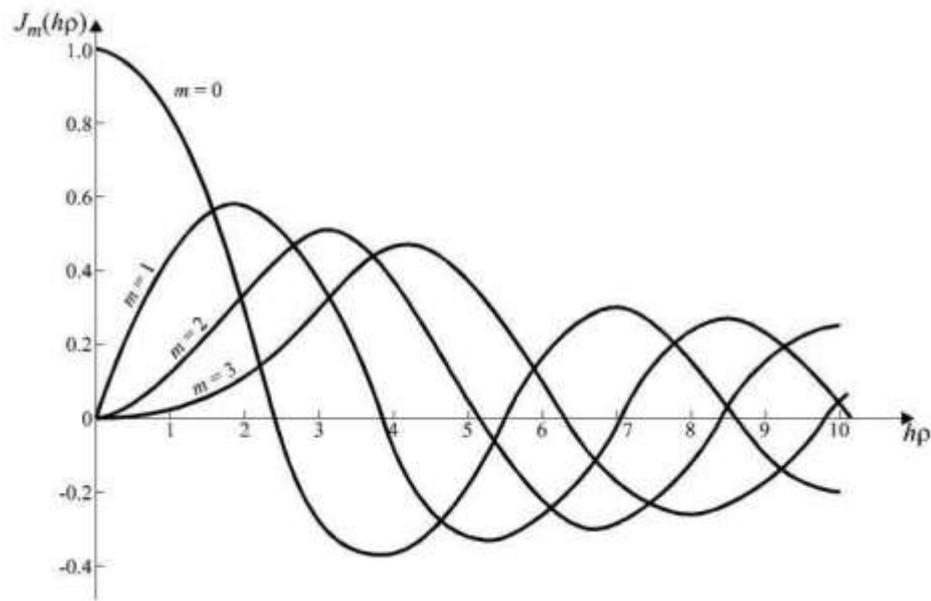


Ilustración 2-22: Funciones Bessel de primera clase, $J_m(h\rho)$.

Fuente: (NERI, 2013)

Tabla 2-9: Raíces $(h\rho)_{mn}$ para las cuales $J_m(h\rho) = 0$.

	n=1	N=2	n=3	...
m=0	2.405	5.520	8.654	...
m=1	3.832	7.016	10.173	...
m=2	5.136	8.417	11.620	...
⋮	⋮	⋮	⋮	

Fuente: (NERI, 2013)

Por definición, la derivada de cada función $J_m(h\rho)$ vale cero en sus puntos máximos y mínimos, descartando discontinuidades como la de $J_0(h\rho)$ en $h\rho = 0$. De manera que, por ejemplo y haciendo referencia a la Ilustración 22-2, $J'_m(h\rho) = 0$ cuando $h\rho = 1.841, 5.331, 8.536, \dots$. Cada una de estas raíces está asociada con un modo de propagación mn determinado. Así, por ejemplo, $n = 1$ para la primera raíz en 1.841, $n = 2$ para la segunda raíz en 5.331, y así sucesivamente. Luego, la combinación de $J'_m(h\rho) = 0$ [$m = 1$] con la raíz 5.331 [$n = 2$] está asociada con el modo TE_{12} . En la Tabla 2-10 se proporcionan las primeras raíces de las derivadas de las primeras tres funciones de Bessel. Si las raíces $(h\rho)_{mn}$ para las cuales $J'_m(h\rho) = 0$ son designadas con la nomenclatura s_{mn} , entonces la ecuación (2-27) se indica que:

Tabla 2-10: Raíces $(h\rho)_{mn}$ para las cuales $J'_m(h\rho) = 0$.

	n=1	n=2	n=3	...
m=0	3.832	7.016	10.173	...
m=1	1.841	5.331	8.536	...
m=2	3.054	6.706	9.969	...
⋮	⋮	⋮	⋮	

Fuente: (NERI, 2013)

$$ha = s_{mn} \Rightarrow h = \frac{s_{mn}}{a} \text{ para los modos TE}_{mn}. \quad (2-28)$$

Por lo tanto, sustituyendo la ecuación (2-28) en (2-18), se obtiene que la constante de propagación para los modos TE_{mn} en la guía circular cumple con:

$$\gamma^2 = h^2 - \omega^2 \mu \epsilon = \left(\frac{s_{mn}}{a} \right)^2 - \omega^2 \mu \epsilon \quad (2-29)$$

Se deduce que habrá propagación en la guía a partir de la frecuencia en la que γ sea imaginaria pura. Dicha frecuencia de corte se obtiene igualando la ecuación (2-29) con cero:

$$\omega_{c_{mn}}^2 \mu \epsilon = \left(\frac{s_{mn}}{a} \right)^2 \Rightarrow \omega_{c_{mn}} = \frac{s_{mn}}{a \sqrt{\mu \epsilon}}$$

Como $\omega = 2\pi f$ y $\frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$ es la velocidad v de la onda, la expresión anterior puede escribirse también como:

$$f_{c_{mn}} = \frac{s_{mn} v}{2\pi a} \quad (2-30)$$

En cuanto a la constante de fase de cada modo mn , en función de la frecuencia, también se obtiene de la ecuación (2-29):

$$\gamma = j\beta = j\sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - \left(\frac{s_{mn}}{a} \right)^2} = j\sqrt{(2\pi)^2 f^2 \mu \epsilon - \left(\frac{2\pi}{v} \right)^2 f_{c_{mn}}^2} \Rightarrow \beta_{mn} = \frac{2\pi}{v} \sqrt{f^2 - f_{c_{mn}}^2} \quad (2-31)$$

Para concluir nuestro estudio de los modos TE ($E_z = 0$), recuerde que la componente H_z está dada por la ecuación (2-24). Las demás componentes de los campos eléctrico y magnético se obtienen a partir de las ecuaciones (2-20) – (2-23), realizando las derivadas parciales correspondientes:

$$E_\rho = \frac{j\omega\mu m}{h^2 \rho} A_0 J_m(h\rho) \sin m\phi \quad (2-32)$$

$$E_\phi = \frac{j\omega\mu}{h} A_0 J'_m(h\rho) \cos m\phi \quad (2-33)$$

$$H_\rho = -\frac{j\beta}{h} A_0 J'_m(h\rho) \cos m\phi = -\frac{\beta}{\omega\mu} E_\phi \quad (2-34)$$

$$H_\phi = \frac{j\beta m}{h^2 \rho} A_0 J_m(h\rho) \sin m\phi = \frac{\beta}{\omega\mu} E_\rho \quad (2-35)$$

En la Ilustración 2-23. Se muestra el patrón de los campos transversales del modo TE₁₁ ($m=1$, $n=1$, $h=S_{11}/a$). En la siguiente sección se demuestra que este modo es el dominante en una guía circular, y si su patrón se compara con guías rectangulares, se observa que los patrones de la distribución de los campos de los modos dominantes en la guía rectangular y la circular son muy similares, particularmente en el centro de ambas guías. En realidad, con un poco de imaginación, el patrón del modo TE₁₁ (dominante) se podría deducir gráficamente, degenerando o alterando poco a poco la geometría de la guía rectangular para transformarla en circular, respetando las condiciones de frontera en la superficie interior (conductor perfecto). Esta similitud de patrones hace posible que el modo dominante de una guía rectangular pueda generar o “lanzar” al modo dominante dentro de una guía circular, y viceversa, mediante una estructura o unión de transición geométrica que generalmente se denomina *transformador de modos*. Esta estructura que transforma al modo dominante TE₁₀ de la guía rectangular en el modo dominante TE₁₁ de la circular, y viceversa, se emplea en la fabricación de diversos dispositivos de microondas, tales como los atenuadores de rotación, etc. (NERI, 2013)

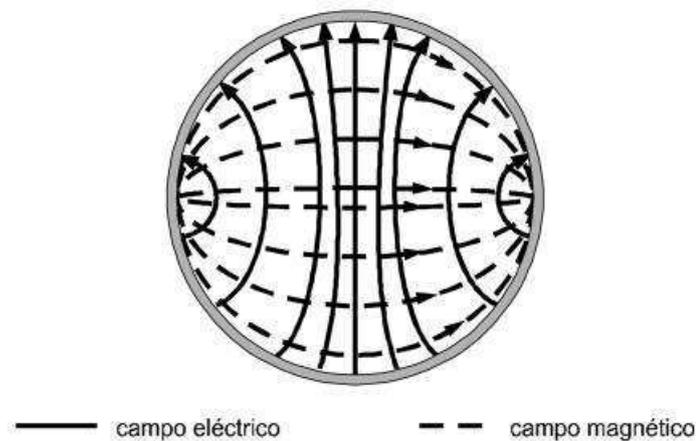


Ilustración 2-23: Campos transversales del modo de propagación TE₁₁ en una guía circular.

Fuente: (NERI, 2013)

2.5.1.2 Los modos tm

En este caso, $H_z = 0$ y E_z está dada por la ecuación (2-19):

$$E_z = B_0 J_m(h\rho) \cos m\phi \quad (2-36)$$

Ahora la condición de frontera que debe cumplirse es simplemente:

$$E_z|_{\rho=a} = 0 \quad (2-37)$$

De manera que, por observación de la ecuación (2-36), se deduce que:

$$E_z|_{\rho=a} = \boxed{0 = J_m(h\rho)|_{\rho=a}} \quad (2-38)$$

Siguiendo un razonamiento análogo al que se hizo para los modos TE en la sección anterior, y designando como t_{mn} a las raíces $(h\rho)_{mn}$ para las cuales $J_m(h\rho) = 0$ dadas en la Tabla 2-9, se tiene:

$$ha = t_{mn} \Rightarrow h = \frac{t_{mn}}{a} \quad \text{para los modos TM}_{mn}. \quad (2-39)$$

y

$$\gamma^2 = \left(\frac{t_{mn}}{a}\right)^2 - \omega^2 \mu \epsilon \quad (2-40)$$

La frecuencia de corte a partir de la cual hay propagación de estos modos TM_{mn} está dada, por lo tanto, por una expresión similar a la ecuación (2-30), pero con t_{mn} en lugar de s_{mn} :

$$f_{c_{mn}} = \frac{t_{mn}v}{2\pi a} \quad (2-41)$$

y la constante de fase se calcula también con la misma ecuación (2-31) de los modos TE, sustituyendo la frecuencia de corte adecuada. Nuevamente, las demás componentes de los campos eléctrico y magnético se obtienen a partir de las ecuaciones (2-20) – (2-23), realizando las derivadas parciales correspondientes sobre la función E_z dada por la ecuación (2-36) y haciendo $H_z = 0$:

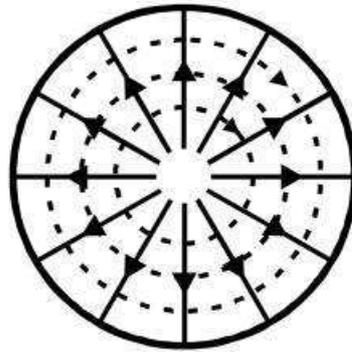
$$E_\rho = -\frac{j\beta}{h} B_0 J'_m(h\rho) \cos m\phi \quad (2-42)$$

$$E_\phi = \frac{j\beta m}{h^2 \rho} B_0 J_m(h\rho) \sin m\phi \quad (2-43)$$

$$H_\rho = -\frac{j\omega\epsilon m}{h^2 \rho} B_0 J_m(h\rho) \sin m\phi = -\frac{\omega\epsilon}{\beta} E_\phi \quad (2-44)$$

$$H_\phi = -\frac{j\omega\epsilon}{h} B_0 J'_m(h\rho) \cos m\phi = \frac{\omega\epsilon}{\beta} E_\rho \quad (2-45)$$

Como ejemplo, en la Ilustración 2-24. Se muestra el patrón de los campos transversales del modo TM_{01} ($m = 0, n = 1, h = t_{01}/a$). Este modo posee simetría circular y resulta útil, por ejemplo, en el diseño de uniones giratorias para los sistemas de radar. Al comparar las frecuencias de corte, se observa que la del primer modo TE (TE_{11}) es menor que la del primer modo TM (TM_{01}). Por lo tanto, el modo TE_{11} es el *modo dominante* en una guía circular. (NERI, 2013)



— campo eléctrico - - - - campo magnético

Ilustración 2-24: Campos transversales del modo de propagación TM_{01} en una guía circular.

Fuente: (NERI, 2013)

2.5.2 Propagación y ecuación característica en una fibra índice escalonado

En la Ilustración 2-25 se muestran la fibra óptica por ser analizada y el sistema de coordenadas empleado. La geometría cilíndrica de la fibra es similar a la de la guía de ondas circular estudiada anteriormente, y por lo tanto las componentes E_z y H_z de la fibra deben satisfacer las mismas ecuaciones (2-15) y (2-16), con las condiciones de frontera adecuadas.

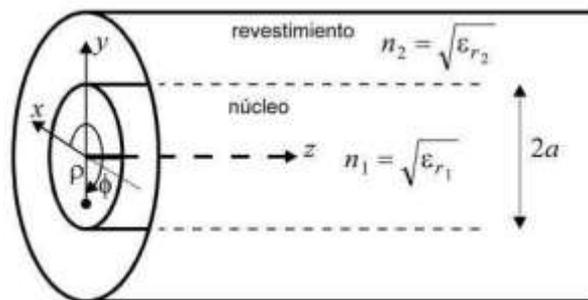


Ilustración 2-25: Sistema de coordenadas para analizar la propagación en una fibra óptica con núcleo de radio a .

Fuente: (NERI, 2013)

De acuerdo con las condiciones de frontera que se empleen al resolver las ecuaciones (2-15 y 2-16). La solución en el caso de las guías circulares metálicas es más sencilla que la que se busca ahora, pues solamente podía haber modos TE y TM. Pero como se verá más adelante, en una fibra óptica, salvo en un caso particular, ninguna de las dos componentes E_z o H_z puede valer cero. Esto da origen a los modos de propagación llamados híbridos, designados como HE y EH en donde ambas componentes axiales existen, y el análisis matemático se vuelve más complejo. Por lo que

al núcleo se refiere, dado que ε_1 es constante para toda ρ , es evidente que la forma de la solución de la ecuación (2-15 y 2-16) es similar a la que se encontró para la guía circular:

$$\Psi = J_m(h_1\rho) \cos m\phi e^{-\gamma z} \quad (\rho < a) \quad (2-46)$$

en donde, a partir de la ecuación (18-2):

$$h_1^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu_0 \varepsilon_1 \quad (\mu_r = 1, \varepsilon_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r_1}) \quad (2-47)$$

Para puntos de campo dentro del revestimiento, una solución similar a la ecuación (2-46) no es válida, porque la función $J_m(h\rho)$ es proporcional apenas a $\frac{1}{\sqrt{h\rho}}$ cuando m es muy grande, y se necesita una disminución mucho más rápida en la dirección ρ , de tipo exponencial, para que la mayor parte de la potencia sea transmitida a lo largo del núcleo. Para esto, es preciso que la constante h^2 sea negativa:

$$h_2^2 = -(\gamma^2 + \omega^2 \mu_0 \varepsilon_2) \quad (\mu_r = 1, \varepsilon_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r_2}) \quad (2-48)$$

y entonces, la solución en el revestimiento queda como:

$$\Psi = K_m(h_2\rho) \cos m\phi e^{-\gamma z} \quad (\rho < a) \quad (2-49)$$

En donde $K_m(h\rho)$ es una función Bessel modificada de segunda clase, que decrece exponencialmente hacia cero conforme $h\rho$ aumenta. También es posible utilizar funciones Hankel de orden m , de primera o segunda clase, cuyos argumentos son imaginarios ($j h\rho$ o $-j h\rho$, respectivamente). Estas funciones son empleadas en algunos textos y están relacionadas proporcionalmente con las funciones Bessel modificadas por medio de un coeficiente real o imaginario, según el valor de m . En cuanto a la gráfica de las funciones $K_m(h\rho)$, su comportamiento decreciente con ρ se muestra en la Ilustración 2-26.

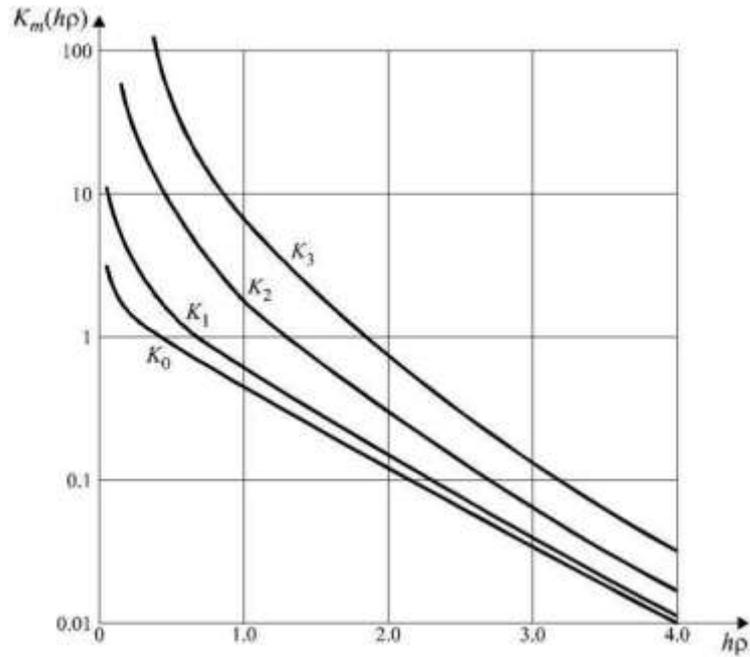


Ilustración 2-26: Gráfica de las funciones Bessel modificadas $K_m(h\rho)$.

Fuente: (NERI, 2013)

Siguiendo un criterio similar al que se planteó al estudiar las guías circulares, habrá propagación en la fibra a partir de una cierta frecuencia de corte, cuando γ se vuelva imaginaria pura ($\gamma = j\beta$). Para esta condición, de la ecuación (2-47) se obtiene, con h_1^2 positiva, que:

$$\beta^2 < \omega^2 \mu_0 \varepsilon_1$$

y de la ecuación (2-49), con h_2^2 negativa, se obtiene:

$$\beta^2 > \omega^2 \mu_0 \varepsilon_2$$

Por lo tanto, juntando ambos resultados anteriores:

$$\omega^2 \mu_0 \varepsilon_2 < \beta^2 < \omega^2 \mu_0 \varepsilon_1 \quad (2-50)$$

Este rango para β^2 también se puede expresar en términos de los índices de refracción del núcleo (n_1) y del revestimiento (n_2), recordando que

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} = \sqrt{\varepsilon_r} \Rightarrow \varepsilon = n^2 \varepsilon_0$$

quedando la ecuación (2-50) como:

$$\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 n_2^2 < \beta^2 < \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 n_1^2$$

y dado que la velocidad de la luz en el vacío es igual a

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

el rango para la constante de fase β está dado finalmente por:

$$\frac{\omega n_2}{c} < \beta < \frac{\omega n_1}{c} \quad (2-51)$$

Nótese que en el presente análisis la solución dada por la ecuación (2-49) supone que el revestimiento se extiende muchísimo en la dirección ρ (en teoría, hasta el infinito), para garantizar que los campos de los modos de propagación en la guía decrezcan exponencialmente hasta alcanzar valores despreciables al final del revestimiento. En la práctica, dicho revestimiento es lo suficientemente grueso, de tal manera que los campos no llegan a salir del mismo y, por lo tanto, la suposición anterior es válida. En la frontera núcleo-revestimiento, al tratarse de dos materiales dieléctricos, debe haber continuidad para toda z en la componente tangencial axial y en la componente tangencial en la dirección ϕ de los campos \mathbf{E} y \mathbf{H} (pues no hay corriente en la frontera), es decir:

$$\left. \begin{aligned} E_{z_1}(\rho = a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z) &= E_{z_2}(\rho = a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z) \\ H_{z_1}(\rho = a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z) &= H_{z_2}(\rho = a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z) \\ E_{\phi_1}(\rho = a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z) &= E_{\phi_2}(\rho = a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z) \\ H_{\phi_1}(\rho = a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z) &= H_{\phi_2}(\rho = a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z) \end{aligned} \right\} (2-52)$$

Las soluciones generales para H_z en el núcleo y en el revestimiento, con sus coeficientes respectivos, se obtienen de las ecuaciones (2-46) y (2-49). Los coeficientes elegidos satisfacen los requerimientos (2-52) de continuidad cuando $\rho = a$:

$$H_z = \left[\frac{A}{J_m(h_1 a)} \right] J_m(h_1 \rho) \cos m\phi e^{-\gamma z} \quad (\rho \leq a) \quad (2-53)$$

$$H_z = \left[\frac{A}{K_m(h_2 a)} \right] K_m(h_2 \rho) \cos m\phi e^{-\gamma z} \quad (\rho \geq a) \quad (2-54)$$

Se observa que cuando $\rho = a$ (frontera dieléctrico-dieléctrico) en las ecuaciones (2-53) y (2-54), los resultados para H_z son idénticos. En cuanto a las soluciones generales para E_z , también pueden deducirse, con sus coeficientes respectivos para las regiones del núcleo y el revestimiento, a partir de las ecuaciones (2-46) y (2-49), pero eligiendo la función $\text{sen } m\phi$ en lugar de $\text{cos } m\phi$. Esto es necesario para satisfacer las demás condiciones de continuidad del problema. Así que:

$$E_z = \left[\frac{B}{J_m(h_1 a)} \right] J_m(h_1 \rho) \text{sen } m\phi e^{-\gamma z} \quad (\rho \leq a) \quad (2-55)$$

$$E_z = \left[\frac{B}{K_m(h_2 a)} \right] K_m(h_2 \rho) \sin m\phi e^{-\gamma z} \quad (\rho \geq a) \quad (2-56)$$

Nuevamente, se nota que cuando $\rho = a$ en las ecuaciones (2-55) y (2-56), los resultados para E_z son idénticos en la frontera, cumpliéndose con los requerimientos (2-52) de continuidad. Las demás componentes de los campos \mathbf{E} y \mathbf{H} pueden determinarse a partir de las componentes axiales anteriores, despejándolas con un poco de álgebra de la primera ecuación de Maxwell, (2-20), en coordenadas cilíndricas. Las expresiones resultantes, considerando que h_2 debe ser negativa para $\rho > a$, son:

$$E_\phi = \left(\frac{j\omega\mu}{h_1^2} \right) \frac{\partial H_z}{\partial \rho} - \left(\frac{j\beta}{h_1^2 \rho} \right) \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \quad (\rho \leq a) \quad (2-57)$$

$$E_\phi = - \left(\frac{j\omega\mu}{h_2^2} \right) \frac{\partial H_z}{\partial \rho} + \left(\frac{j\beta}{h_2^2 \rho} \right) \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \quad (\rho \geq a) \quad (2-58)$$

$$H_\phi = - \left(\frac{j\beta}{h_1^2 \rho} \right) \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \left(\frac{j\omega\varepsilon_1}{h_1^2} \right) \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \quad (\rho \leq a) \quad (2-59)$$

$$H_\phi = \left(\frac{j\beta}{h_2^2 \rho} \right) \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \left(\frac{j\omega\varepsilon_2}{h_2^2} \right) \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \quad (\rho \geq a) \quad (2-60)$$

Nótese que los dos términos del lado derecho en cada una de estas últimas cuatro ecuaciones tienen el mismo comportamiento en azimut (dirección ϕ), después de efectuar las derivadas parciales correspondientes. Esta sincronía se obtiene gracias a que se eligió la función $\sin m\phi$ para las componentes E_z dadas por las ecuaciones (2-55) y (2-56). Finalmente, las componentes en ρ son:

$$E_\rho = \left(-\frac{j}{h_1^2} \right) \left[\left(\frac{\omega\mu}{\rho} \right) \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + (\beta) \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right] \quad (\rho \leq a) \quad (2-61)$$

$$E_\rho = \left(\frac{j}{h_2^2} \right) \left[\left(\frac{\omega\mu}{\rho} \right) \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + (\beta) \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right] \quad (\rho \geq a) \quad (2-62)$$

$$H_\rho = \left(-\frac{j}{h_1^2} \right) \left[(\beta) \frac{\partial H_z}{\partial \rho} - \left(\frac{\omega\varepsilon_1}{\rho} \right) \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right] \quad (\rho \leq a) \quad (2-63)$$

$$H_\rho = \left(\frac{j}{h_2^2} \right) \left[(\beta) \frac{\partial H_z}{\partial \rho} - \left(\frac{\omega\varepsilon_2}{\rho} \right) \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right] \quad (\rho \geq a) \quad (2-64)$$

En la ecuación (2-51) se indicó el rango de valores para la constante de fase β , pero aún falta calcularla para cada modo de propagación. Para ello, a continuación, se planteará la ecuación característica que hay que resolver para encontrarla, satisfaciendo las condiciones de continuidad restantes dadas por (2-52), es decir, que E_ϕ y H_ϕ deben ser iguales en ambos dieléctricos para $\rho=a$. Pero antes de establecer estas ecuaciones de continuidad, conviene adoptar la notación siguiente para simplificar la escritura de las expresiones finales:

$$\left[\frac{1}{J_m(h_1 a)} \right] \left[\frac{\partial}{\partial \rho} J_m(h_1 \rho) \right]_{\rho=a} = h_1 \left[\frac{J'_m(h_1 a)}{J_m(h_1 a)} \right] = h_1 f_m(h_1 a) \quad (2-65)$$

$$\left[\frac{1}{K_m(h_2 a)} \right] \left[\frac{\partial}{\partial \rho} K_m(h_2 \rho) \right]_{\rho=a} = h_2 \left[\frac{K'_m(h_2 a)}{K_m(h_2 a)} \right] = h_2 g_m(h_2 a) \quad (2-66)$$

$$h_1 a = p \quad (2-67)$$

$$h_2 a = q \quad (2-68)$$

Ahora sí, la penúltima ecuación de continuidad se obtiene igualando (2-57) con (2-58) en la frontera, y como en ambos miembros se cancelan los términos $\cos m\phi e^{-\nu z}$, queda:

$$\left(\frac{j\omega\mu}{h_1^2} \right) [Ah_1 f_m(h_1 a)] - \left(\frac{j\beta}{h_1^2 a} \right) [mB] = \left(\frac{j\omega\mu}{h_2^2} \right) [Ah_2 g_m(h_2 a)] + \left(\frac{j\beta}{h_2^2 a} \right) [mB]$$

Simplificando y utilizando las igualdades (2-67) y (2-68):

$$\frac{A\omega\mu}{h_1} f_m(p) - \frac{Bm\beta}{h_1 p} = -\frac{A\omega\mu}{h_2} g_m(q) + \frac{Bm\beta}{h_2 q}$$

y dividiendo todos los términos por a :

$$\frac{A\omega\mu}{p} f_m(p) - \frac{Bm\beta}{p^2} = -\frac{A\omega\mu}{q} g_m(q) + \frac{Bm\beta}{q^2} \quad (2-69)$$

Asimismo, la última ecuación de continuidad se obtiene igualando (2-59) con (2-60) en la frontera, donde $\rho=a$, y cancelando los términos $\sin m\phi e^{-\nu z}$ en ambos miembros:

$$-\left(\frac{j\beta}{h_1^2 a} \right) [-Am] - \left(\frac{j\omega\varepsilon_1}{h_1^2} \right) [Bh_1 f_m(h_1 a)] = \left(\frac{j\beta}{h_2^2 a} \right) [-Am] + \left(\frac{j\omega\varepsilon_2}{h_2^2} \right) [Bh_2 g_m(h_2 a)]$$

Simplificando:

$$\frac{\beta Am}{h_1 p} - \frac{\omega\varepsilon_1 B}{h_1} f_m(p) = -\frac{\beta Am}{h_2 q} + \frac{\omega\varepsilon_2 B}{h_2} g_m(q)$$

y nuevamente dividiendo todos los términos por a :

$$\frac{Am\beta}{p^2} - \frac{B\omega\varepsilon_1}{p} f_m(p) = -\frac{Am\beta}{q^2} + \frac{B\omega\varepsilon_2}{q} g_m(q) \quad (2-70)$$

Como β debe satisfacer en forma simultánea las ecuaciones (2-69) y (2-70) de continuidad para E_ϕ y H_ϕ , respectivamente, en ambas ecuaciones se puede despejar el cociente B/A e igualarlos, de la manera siguiente:

De la ecuación (2-69):

$$A \left[\frac{\omega\mu}{p} f_m(p) + \frac{\omega\mu}{q} g_m(q) \right] = B \left[\frac{\omega\beta}{p^2} + \frac{\omega\beta}{q^2} \right]$$

$$\frac{B}{A} = \frac{\omega\mu \left[\frac{f_m(p)}{p} + \frac{g_m(q)}{q} \right]}{m\beta \left[\frac{1}{p^2} + \frac{1}{q^2} \right]} \quad (2-71)$$

De la ecuación (2-70):

$$A \left[\frac{m\beta}{p^2} + \frac{m\beta}{q^2} \right] = B \left[\frac{\omega\varepsilon_2}{q} g_m(q) + \frac{\omega\varepsilon_1}{p} f_m(p) \right]$$

$$\frac{B}{A} = \frac{m\beta \left[\frac{1}{p^2} + \frac{1}{q^2} \right]}{\omega \left[\frac{\varepsilon_2}{q} g_m(q) + \frac{\varepsilon_1}{p} f_m(p) \right]} \quad (2-72)$$

Igualando (71-2) con (72-2) se obtiene la ecuación que hay que resolver para encontrar el valor de β de cada uno de los modos de propagación. Recordando que $\mu = \mu_0$ para los dos dieléctricos, dicha ecuación adopta la forma:

$$\omega^2 \mu_0 \left[\frac{f_m(p)}{p} + \frac{g_m(q)}{q} \right] \left[\frac{\varepsilon_1 f_m(p)}{p} + \frac{\varepsilon_2 g_m(q)}{q} \right] = m^2 \beta^2 \left[\frac{1}{p^2} + \frac{1}{q^2} \right]^2 \quad (2-73)$$

Recuérdese, a partir de las ecuaciones (2-47), (2-48), (2-67) y (2-68), que p y q también contienen a la incógnita β , además de la frecuencia ω , por lo que la ecuación (2-73), en la que también van incluidas las funciones Bessel J_m y K_m , así como sus derivadas, no se puede resolver directamente con facilidad. Es necesario utilizar métodos numéricos para resolver la ecuación, y las raíces serán aquellas para las cuales, en general, ni E_z ni H_z valgan cero (modos híbridos).

Para entender cómo se designan los modos de propagación de acuerdo con sus subíndices mn , conviene analizar nuevamente las funciones Bessel graficadas en la Ilustración 2-22. Debido a su comportamiento oscilatorio, la función J_m pasará n veces por el eje de ordenada igual a cero, y por lo tanto habrá n raíces para cada valor de m . Cada combinación posible de m y n corresponde a un modo de propagación diferente, y su constante de fase se puede designar como β_{mn} . Y por lo que se refiere a la designación de los modos, éstos pueden ser TE_{mn} , TM_{mn} , EH_{mn} o HE_{mn} .

Los modos TE y TM en una fibra óptica son un caso muy particular y solamente ocurren cuando $m = 0$, pues entonces los campos son circularmente simétricos e independientes de la coordenada ϕ . Para cualquier otro valor de $m \neq 0$, los modos son híbridos (EH o HE). En un modo HE, H_z contribuye mayoritariamente al campo transversal; y en un modo EH, E_z es la componente que contribuye más a dicho campo transversal.

El caso especial de $m = 0$ permite simplificar la ecuación característica para encontrar a β , pues la ecuación (2-70) se reduce a:

$$B \left[\frac{\omega \varepsilon_2}{q} g_m(q) + \frac{\omega \varepsilon_1}{p} f_m(p) \right] = 0$$

Esta ecuación se satisface si $B = 0$, por lo que al sustituir dicho valor de B en la ecuación (2-69), se tiene una ecuación característica mucho más simple que la ecuación (2-73):

$$A\omega\mu \left[\frac{f_m(p)}{p} + \frac{g_m(q)}{q} \right] = 0$$

y dividiendo ambos miembros entre $A\omega\mu$:

$$\frac{f_m(p)}{p} + \frac{g_m(q)}{q} = 0 \quad (2 - 74)$$

Esta ecuación simplificada también pudo haberse obtenido directamente de la ecuación (2-73), con $m = 0$ y tomando en cuenta que $\varepsilon_1 \neq 0$ y $\varepsilon_2 \neq 0$. Ahora bien, de acuerdo con las ecuaciones (2-55) y (2-56), $E_z = 0$, ya que $B = 0$ y $m = 0$; por lo tanto, la ecuación (2-74) corresponde a la ecuación característica de β_{0n} para los modos TE_{0n} . La ecuación correspondiente para los modos TM_{0n} se obtiene haciendo $A = 0$ (véanse las ecs. 2-53 y 2-54), de manera que $H_z = 0$ y la ecuación (2-70) adopta la forma:

$$B\omega \left[\frac{\varepsilon_1}{p} f_m(p) + \frac{\varepsilon_2}{q} g_m(q) \right] = 0$$

y como ni B ni ω pueden valer cero, se tiene que:

$$\frac{\varepsilon_1}{p} f_m(p) + \frac{\varepsilon_2}{q} g_m(q) = 0 \quad (2 - 75)$$

Por facilidad, las ecuaciones características de β para los modos transversales e híbridos se concentran en la Tabla 2-11.

Tabla 2-11: Ecuación característica de β para una fibra óptica de índice escalonado.

m	Modos	Ecuación
0	TE _{0n}	$\frac{f_m(p)}{p} + \frac{g_m(q)}{q} = 0$
0	TM _{0n}	$\frac{\varepsilon_1}{p} f_m(p) + \frac{\varepsilon_2}{q} g_m(q) = 0$
≥ 1	EH _{mn} y HE _{mn}	$\omega^2 \mu_0 \left[\frac{f_m(p)}{p} + \frac{g_m(q)}{q} \right] \left[\frac{\varepsilon_1 f_m(p)}{p} + \frac{\varepsilon_2 f_m(p)}{q} \right] = m^2 \beta^2 \left[\frac{1}{p^2} + \frac{1}{q^2} \right]^2$
$p = h_1 a \quad q = h_2 a \quad h_1^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_1 - \beta^2 \quad h_2^2 = \beta^2 - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_2$		

Fuente: (NERI, 2013)

A V se le da el nombre de frecuencia normalizada V , o parámetro V , o número V , y es un parámetro muy importante relacionado con la condición de corte de la fibra. Es un número adimensional que define cuántos modos diferentes puede haber simultáneamente en la fibra a una frecuencia determinada.

En el caso de una fibra óptica, la condición de corte de un modo se define como el punto en el que ese modo ya no queda restringido a propagarse en la región del núcleo y la zona cercana de su revestimiento, sino que los campos se extienden mucho más allá de la geometría cilíndrica de la fibra, y ésta radia, como si fuese una antena cilíndrica, en lugar de guiar la potencia de la señal a lo largo de la fibra. Matemáticamente, esta condición de corte equivale a decir que q y q^2 tienden al valor cero en la ecuación característica (2-73).

La expresión para calcular la frecuencia normalizada V dada por la siguiente ecuación:

$$V = \left(\frac{2\pi a}{\lambda_0} \right) [n_1^2 - n_2^2]^{1/2} \quad (2-76)$$

Cuando $m = 0$, las condiciones de corte para los modos HE_{0n} son idénticas a las de los EH_{0n}. Recuérdese que $m = 0$ reduce la ecuación característica general a las ecuaciones (2-74) y (2-75), cuyas soluciones son, respectivamente, los modos TE_{0n} y TM_{0n}. Por lo tanto, las frecuencias de corte normalizadas (V_c) para estos modos son idénticas y corresponden a las raíces de $J_0(V)$, mismas que son $V = 2.405, 5.520$, etcétera. Para $m = 2$, los modos HE_{2n} tienen una condición de corte que se obtiene más fácilmente a partir de la ecuación:

$$p \frac{J_0(p)}{J_1(p)} = q \frac{K_0(q)}{K_1(q)} \quad (2-77)$$

En el corte, cuando $q \rightarrow 0$, debe satisfacerse la relación

$$p \frac{J_0(p)}{J_1(p)} = 0$$

El primer cruce por cero de J_0 ocurre cuando $p = V = 2.405$, y como tanto p como $J_1(p)$ están definidos y son diferentes de cero, entonces el punto de corte del modo HE_{21} sí es $V = 2.405$. Asimismo, el punto de corte correspondiente para el modo HE_{22} sería el siguiente cruce por cero de la función J_0 , es decir, $V = 5.520$. Finalmente, para el resto de los modos HE_{mn} , cuando $m > 2$, el procedimiento es similar al de $m = 2$, sustituyendo los subíndices correctos en la ecuación anterior. Así, para $m = 3$ se tendrá que satisfacer $J_1(p) = 0$; para $m = 4$, $J_2(p) = 0$; y, generalizando, $J_{m-2}(p) = 0$ ($m \geq 2$). Para comodidad del lector, todas las condiciones de corte que se han deducido se muestran concentradas en la Tabla 2-12.

Tabla 2-12: Condiciones para la frecuencia de corte normalizada ($V_c = p$) de los modos de propagación en una fibra de índice escalonado.

m	Modos	Condición	Primeras raíces (V_c)			
			n=1	n=2	n=3	
0	TE_{0n} TM_{0n}	$J_0(V_c)=0$	2.405	5.520	8.654	
1	HE_{1n}	$J_1(V_c)=0$	0	3.832	7.016	
1	EH_{1n}	$J_1(V_c)=0$	3.832	7.016	10.173	
≥ 2	HE_{mn}	$J_{m-2}(V_c)=0$	2.405	5.520	8.654	(m=2)
			3.832	7.016	10.173	(m=3)
			5.136	8.417	11.620	(m=4)
≥ 2	EH_{mn}	$J_m(V_c)=0$	5.136	8.417	11.620	(m=2)
			⋮	⋮	⋮	⋮

Fuente: (NERI, 2013)

Los patrones del campo eléctrico transversal de estos primeros cuatro modos (HE_{11} , TE_{01} , TM_{01} y HE_{21}) en el núcleo de la fibra se mostraron ya en la Ilustración 2-27. Cuando el número de modos es muy grande, se puede estimar rápidamente por medio de la relación aproximada siguiente:

$$M = \frac{V^2}{2} \quad (2-78)$$

en donde M es el número de modos de propagación en la fibra. (NERI, 2013)

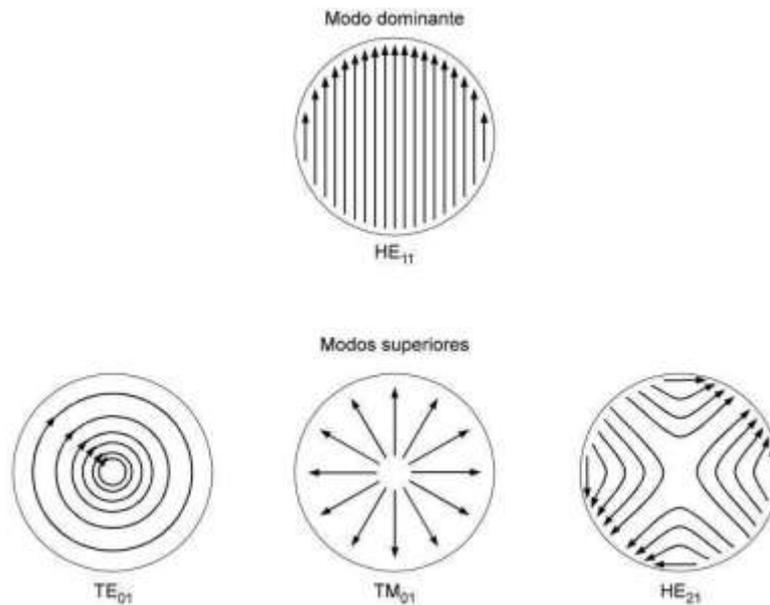


Ilustración 2-27: Vista transversal de las líneas de campo eléctrico del modo dominante y de los tres primeros modos superiores siguientes en una fibra óptica de índice escalonado.

Fuente: (NERI, 2013)

2.5.3 Modos linealmente polarizados

Los modos linealmente polarizados (LP) en una fibra óptica no son más que combinaciones de los otros tipos de modos de propagación (TE, TM, HE y EH). Esta nueva clasificación teórica, que data de hace unos veinte años, se basa en la existencia de modos degenerados y tiene la especial característica de que permite visualizar cada conjunto de modos con facilidad. Para comprender el criterio de esta ingeniosa clasificación y la correspondencia que hay entre cada modo LP y los modos tradicionales TM, TE, EH y HE, conviene partir de la Ilustración 2-28. En ella se observa que las parejas de modos $HE_{m+1,n}$ y $EH_{m-1,n}$ tienen constantes de propagación muy similares (compruébese, por ejemplo, con $m = 2$ y $n = 1$); y lo mismo ocurre también para los tríos de modos TE_{0n} , TM_{0n} y $HE_{2,n}$ (verifíquese en la Ilustración, con $n = 1$). Más aún, recuérdese que al simplificar la ecuación característica o de dispersión en la sección anterior, lo cual es válido en la práctica para fibras de salto de índice pequeño ($n_1 - n_2 \ll 1$), las soluciones cuasi-analíticas obtenidas conducen a frecuencias de corte normalizadas idénticas para los conjuntos de modos $\{HE_{11}\}$, $\{TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}\}$, $\{HE_{31}, EH_{11}\}$, $\{HE_{12}\}$, ... (refiérase a las ecs. (77-2) y a la Tabla 12-2).

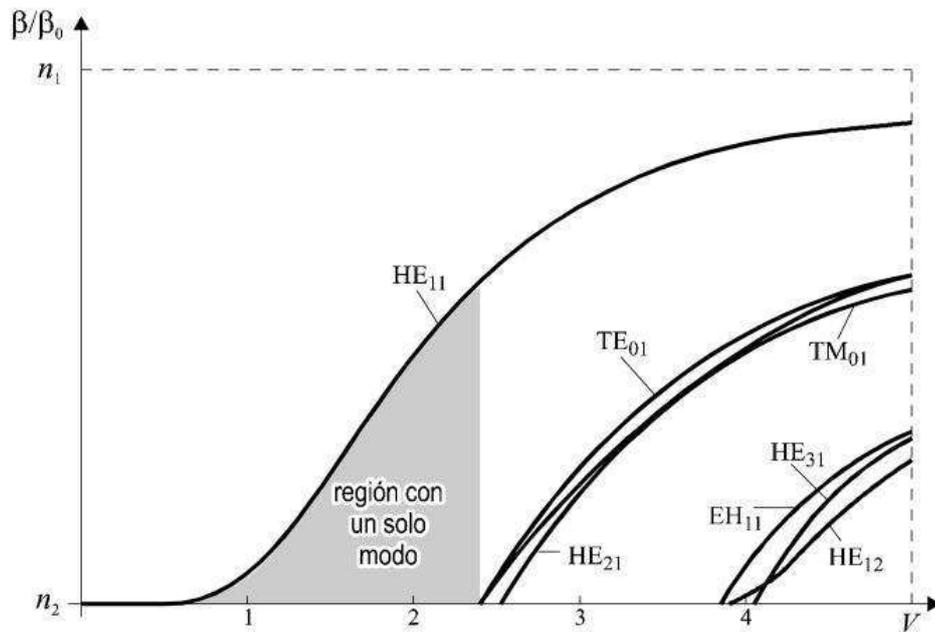


Ilustración 2-28: Constante de fase β normalizada con relación a la constante de fase en el espacio libre, en función de la frecuencia normalizada V , para los primeros modos de propagación en una fibra óptica de índice escalonado.

Fuente: (NERI, 2013)

En términos generales, como los modos $HE_{m+1,n}$ y $EH_{m-1,n}$ tienen características de propagación cuasi-idénticas, se consideran como modos degenerados. Por lo tanto, en lugar de tomarlos en cuenta separadamente, se puede usar una combinación lineal de ellos y considerar al resultado como un nuevo modo. Así por ejemplo, si se emplea la combinación $HE_{m+1,n} + EH_{m-1,n}$, se puede demostrar que el resultado de tal superposición es un campo eléctrico total polarizado en la dirección x ; ésta es la razón por la que al nuevo modo se le llama linealmente polarizado. Por otra parte, si se efectúa la combinación $EH_{m-1,n} - HE_{m+1,n}$, se llega a un campo eléctrico total polarizado en la dirección y . Se concluye, entonces, que es posible combinar ciertos modos y obtener configuraciones de campo con patrones linealmente polarizados (o, al menos, muy cercanos a dicha situación en la práctica). A estas combinaciones se les denomina modos LP_{mn} . En la Tabla 2-13 se indica la correspondencia entre los primeros modos linealmente polarizados y los modos exactos tradicionales que los forman. Nótese que no hay una relación aparente entre los subíndices de los modos LP y los subíndices de los modos que los forman; sin embargo, en general, las siguientes relaciones se cumplen:

Modos	Modos de los que proviene
LP_{0n}	HE_{1n}
LP_{1n}	TE_{0n}, TM_{0n} y HE_{2n}
$LP_{mn}(m \geq 2)$	$HE_{m+1,n}$ y $EH_{m-1,n}$

Por último, a manera de ilustración, en la la Ilustración 29-2 se muestra cómo se obtienen dos de los cuatro posibles modos LP_{11} , haciendo las sumas $HE_{21} + TE_{01}$ y $HE_{21} + TM_{01}$. En ambos casos resultan campos eléctricos totales polarizados en la dirección x. Los otros dos modos LP_{11} restantes son similares a los de la Ilustración, pero polarizados en la dirección y; es decir, su obtención equivale a rotar la fibra sobre su eje por un ángulo de 90° . (NERI, 2013)

Tabla 2-13: Correspondencia entre los primeros modos LP y los modos tradicionales que los forman por superposición lineal.

		V_c
LP_{01}	HE_{11}	0
LP_{11}	$HE_{21}, TE_{01}, TM_{01}$	2.405
LP_{21}	HE_{31}, EH_{11}	3.832
LP_{02}	HE_{12}	3.832
LP_{31}	HE_{41}, EH_{21}	5.136
LP_{12}	$HE_{22}, TE_{02}, TM_{02}$	5.520

Fuente: (NERI, 2013)

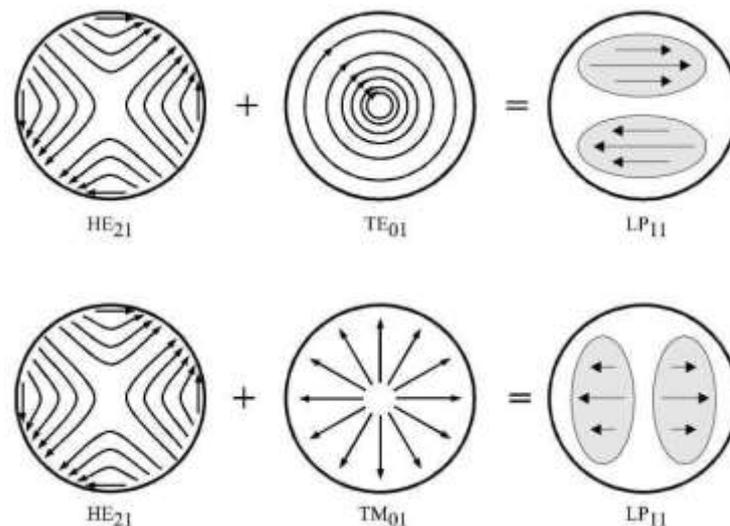


Ilustración 2-29: Obtención de dos modos LP_{11} . El campo eléctrico resultante está polarizado en la dirección x.

Fuente: (NERI, 2013)

2.6 Fimmwave

FIMMWAVE está diseñado para modelar una variedad de estructuras de guía de ondas bidimensionales y tridimensionales. Incluye una variedad de interfaces de usuario especialmente diseñadas que facilitan la definición de diferentes tipos de guías de ondas. Además, proporciona

una variedad de solucionadores de modos diferentes para modelar estas estructuras, con una selección de métodos semianalíticos o numéricos. Por lo tanto, permite al usuario elegir el método más eficiente y preciso para el diseño en particular.

FIMMWAVE tiene 3 interfaces distintas para la definición de guías de onda. La interfaz RWG es la herramienta más natural para definir estructuras de crecimiento epitaxial, mientras que la FWG está diseñada para definir dispositivos cilíndricos simétricos, como una fibra óptica. Una interfaz más genérica es la MWG, donde el usuario puede diseñar prácticamente cualquier cosa como un conjunto de formas primitivas: rectángulos, elipses, etc., incluidos objetos de índice graduado o incluso una fibra perforada.

Cada método de resolución de modo tiene sus ventajas y dominio de competencia y FIMMWAVE permite al usuario aprovecharlo al máximo. También incluye un escáner/buscador de modo robusto y totalmente automático: el MOLAB (Mode List Auto Builder) que le permite definir los modos que desea de manera flexible, como "los primeros 10 modos tipo TE con un índice efectivo inferior a 1,75". (Desing, 2022)

2.6.1 *El solucionador fmm (film mode matching)*

Este solucionador es un solucionador de guía de ondas totalmente vectorial semianalítico basado en el método de coincidencia de modo de película (FMM) de Sudbo. El solucionador localiza casi cualquier orden de modo horizontal o vertical de polarización arbitraria o mixta.

Dado que el método FMM es analítico, su velocidad y precisión no tienen comparación con ninguna técnica numérica cuando el método FMM se aplica dentro de su dominio de competencia. Esto hace que el solucionador FMM sea el solucionador de elección para estructuras de crecimiento epitaxial o, en general, para guías de ondas que tienen grandes partes de índice de refracción uniforme. El solucionador complejo FMM también puede manejar estructuras con pérdidas, metálicas y con fugas o radiantes, e incluye una versión de solucionador de curvas que calcula los modos de una guía de ondas doblada rigurosamente en coordenadas cilíndricas. (Desing, 2022)

2.6.2 *Solucionadores de modo numérico: solucionadores fdm (diferencia finita) y fem (elemento finito)*

Si bien los métodos semianalíticos como FMM Solver son buenos para estructuras que constan de grandes áreas uniformes, los métodos numéricos como FDM y FEM Solvers son mejores para

guías de ondas con una gran cantidad de características o para modelar estructuras de índice graduado. (Desing, 2022)

2.6.3 Solucionador *fdm*

Este solucionador implementa un método de diferencias finitas completamente vectorial y se puede utilizar con condiciones de contorno eléctricas/magnéticas, transparentes, ABC y periódicas y con capas PML (capas perfectamente coincidentes). También están disponibles versiones semivectoriales y unidimensionales del FDM Solver. El FDM Solver permite modelar con precisión guías de ondas con perfiles de índice de refracción de paso alto, interfaces inclinadas/curvas y perfiles de gradiente. También tiene en cuenta las características más pequeñas que el tamaño de la cuadrícula. Además, ahora se puede utilizar como solucionador de curvas. La mayoría de las herramientas disponibles para FMM Solver, como planos de simetría, pulido de listas de modos propios, etc., también se implementan para FDM Solver. (Desing, 2022)

2.6.4 Solucionador *fem*

Esto implementa el conocido método FEM, resolviendo guías de onda tanto reales como complejas, incluyendo efectos vectoriales y anisotrópicos. El FEM Solver también es mucho mejor para modelar estructuras con grandes cantidades de metal. (Desing, 2022)

2.6.5 Solucionador *cilíndrico*

Si su licencia incluye el módulo Cylindrical Solvers, tiene acceso a dos solvers para calcular modos en guías de ondas cilíndricas simétricas (típicamente fibras ópticas): el GFS Solver (General Fiber Solver) y el FDM Fiber Solver. (Desing, 2022)

2.6.6 Otro solucionador

FIMMWAVE también tiene un solucionador de índice efectivo para el modelado rápido de estructuras 2D o delta-n bajo. (Desing, 2022)

2.6.7 *Fimmprop*

FIMMWAVE puede trabajar con el módulo de extensión FIMMPROP para modelar estructuras cuya sección transversal varía en la dirección de propagación. Las estructuras que varían en pasos discretos se pueden modelar con la ayuda de integrales superpuestas en los pasos para determinar el acoplamiento entre modos. De esta manera, se pueden modelar convertidores de modo, convertidores de polarización, acopladores MMI y acopladores direccionales. Las estructuras que

varían continuamente, como los ahusamientos, las uniones en Y y dispositivos similares, también se pueden modelar utilizando una versión generalizada de este enfoque (análisis modal local). Las ventajas de la velocidad con respecto a la propagación del haz no son tan significativas, pero aún quedan ventajas considerables en muchos casos, incluida su capacidad totalmente bidireccional. FIMMWAVE puede modelar una serie de problemas difíciles de resolver, incluidas guías de ondas con pasos de alto índice de refracción y acopladores direccionales con un acoplamiento muy débil entre cada brazo. (Desing, 2022)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLOGICO

En este capítulo se detalla el desarrollo y proceso de creación de las diferentes secciones del filtro SMS, su acoplamiento, y mediante simulaciones por medio del software fimmwave, también se realiza recolección de información en cuanto a la potencia que atraviesa toda la estructura, su multiplexación en la sección multicore y su filtrado en la banda de 1.55 μm .

3.1 Enfoque de investigación

El proyecto de investigación tiene un enfoque descriptivo, cuantitativo debido a que se emplea los resultados obtenidos de la potencia que se transmite en la longitud de onda deseada, y las atenuaciones alrededor de esta frecuencia central para determinar si el filtro cumple con su correcto funcionamiento. El valor de potencia normalizada que atraviesa el core central con respecto a los cores laterales se emplea como valor objetivo, a través de la manipulación de las variables como longitud de la sección multicore, índices de refracción de los cores y del cladding, distancia entre los cores, etc.

3.2 Nivel de Investigación

El nivel de investigación es descriptivo y aplicativo por medio del análisis bibliográfico realizado en el capítulo 1 y el análisis del desempeño del filtro óptico SMS mediante su simulación con el software FimmWave, con el objetivo de medir la prefactibilidad del desarrollo de este novedoso sistema de filtrado.

En base a los resultados obtenidos se determina valores de longitud adecuados de la sección multicore, índice de refracción para los núcleos y el cladding, separación entre núcleos para el correcto filtrado en la longitud de onda deseada.

3.3 Diseño de investigación

El diseño de la presente investigación tiene como propósito cumplir con los objetivos de estudio. Siendo este de tipo análisis bibliográfico y aplicativo, ya que se manipula los diferentes parámetros establecidos previamente con la finalidad de realizar el análisis de resultados de la simulación con el software FimmWave que es una herramienta para el diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica a nivel de propagación de la señal.

3.3.1 Según la manipulación o no de la variable independiente

La variable dependiente en el desarrollo de este filtro es la potencia, la cual varía de acuerdo a la manipulación de los diferentes parámetros de la sección multicore como su longitud, índices de refracción, etc. Se observa el filtrado adecuado en la longitud de onda deseada, misma que se consideró como variable independiente.

3.3.2 Según las intervenciones en el trabajo de campo

La recolección de datos se realiza mediante los instrumentos de medición incorporados en el software de simulación. Específicamente, para obtener la potencia recibida, a través de la visualización del haz de la luz que atraviesa la estructura del filtro y mediante las gráficas de potencia, que corrobora los niveles de potencia en la longitud de onda central y sus longitudes de onda laterales.

3.4 Tipo de estudio

Realizando un estudio descriptivo y aplicativo donde se evalúa la factibilidad del diseño de este novedoso filtro por medio de la simulación en el software FimmWave, a través de la manipulación de las variables de los componentes que conforman las secciones monocore, multicores y monocore. Con el objetivo final de tener un filtro óptico pasa/rechaza banda en una longitud de onda central deseada.

3.5 Población y Planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra

Este proyecto de investigación se centra en el análisis del diseño de un filtro óptico, basado en simulaciones, por lo que no se requiere de población y muestra.

3.6 Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

El diseño propuesto se observa en la Ilustración 3-1. Esta muestra la estructura formada de tres secciones, la primera y la última son secciones de fibra monomodo y la estructura central está compuesta de una fibra multimodo de 7 núcleos; entre cada parte existe una pequeña sección de junta que se representa con color azul que es necesaria para que exista acoplamiento entre secciones de acuerdo a los parámetros del software de simulación y una adecuada transmisión de potencia entre las secciones.

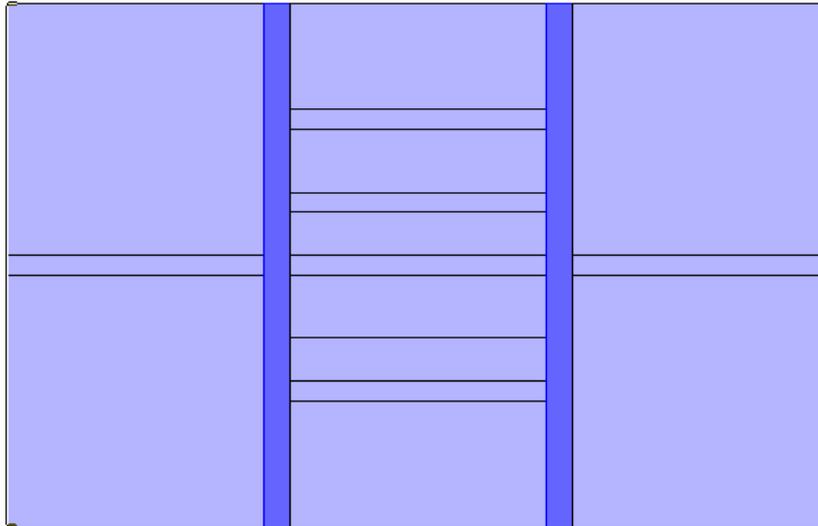


Ilustración 3-1: Estructura del filtro óptico SMS (Single-Multu-Single).

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

Cada núcleo actúa como un canal independiente para la propagación de la luz, este haz se propaga a través de la sección monomodo de la izquierda de la Ilustración 3-1, cuando llega a la sección multimodo se multiplexa y se reparte a los 7 núcleos y en la sección final se verifica que se obtuvo una adecuada potencia que se transmite a la longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$.

El diseño de la estructura multinúcleo que se ilustró en el capítulo anterior se coloca nuevamente en la Ilustración 3-2. Para simular la dinámica de propagación del diseño se basa en los parámetros en la Tabla 3-1. En función de la longitud de la sección multinúcleo de la fibra óptica, a una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$, la luz se lanza al núcleo central del MCF. Luego, la potencia transmitida en cada núcleo es detectada por una guía de ondas monomodo.

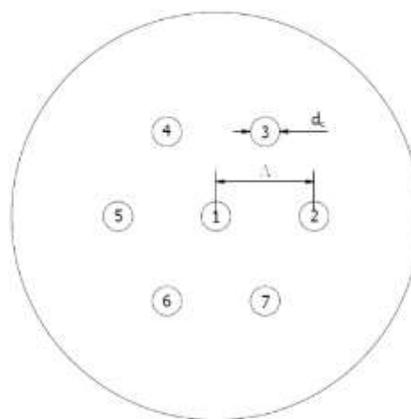


Ilustración 3-2: Estructura de fibra de siete núcleos con sus parámetros.

Fuente: (SAMIR, 2017)

Tabla 3-1: Parámetros MCF y sus valores.

Parámetros	Valores
d_c (Diámetro de los cores)	4.8 μm
d_l (Diámetro del cladding)	125 μm
Δ (Distancia entre los cores)	30 μm
n_{co} (Índice de refracción de los cores)	1.445
n_{cl} (Índice de refracción del cladding)	1.44
Longitud de la sección	4.5 m

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

La fórmula para calcular la distancia mínima entre núcleos de una fibra óptica multinúcleo se puede obtener utilizando el concepto de paso de fibra óptica, que es la distancia entre el centro de un núcleo y el centro del siguiente núcleo adyacente. La fórmula general para calcular esta distancia es:

$$\Delta_{\min} = \frac{d_l}{(\#\text{cores}-1)} = \frac{125 \mu\text{m}}{(7-1)} = 20.83 \mu\text{m} \quad (3-1)$$

Es importante tener en cuenta que esta fórmula asume que los núcleos están dispuestos equidistantemente alrededor de la circunferencia de la fibra óptica. Además, la distancia entre los núcleos en una fibra óptica multinúcleo de 7 cores de 30 μm se elige para maximizar la capacidad de transmisión, minimizar las interferencias y facilitar la fabricación y alineación precisa de los núcleos.

Para la posición y diámetro de los 7 núcleos que componen la sección multicore se ven en la Tabla 3-2 y. Dichos parámetros se enlistan de acuerdo a los números de núcleo dado en la Ilustración 3-2.

Tabla 3-2: Posición y ancho de los núcleos de la sección MCF.

Núcleo	Posición X	Posición Y	Ancho
1	$d_l/2$	$d_l/2$	d_c
2	$d_l/2 + \Delta$	$d_l/2$	d_c
3	$d_l/2 + \Delta * \cos(_PI/3)$	$d_l/2 + \Delta * \sin(_PI/3)$	d_c
4	$d_l/2 + \Delta * \cos(120 * _PI/180)$	$d_l/2 + \Delta * \sin(120 * _PI/180)$	d_c
5	$d_l/2 - \Delta$	$d_l/2$	d_c
6	$d_l/2 + \Delta * \cos(240 * _PI/180)$	$d_l/2 + \Delta * \sin(240 * _PI/180)$	d_c
7	$d_l/2 + \Delta * \cos(300 * _PI/180)$	$d_l/2 + \Delta * \sin(300 * _PI/180)$	d_c

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

Para la propagación en el núcleo central se tiene que activar la opción de **cfseg** que se muestra en la Ilustración 3-3. Esto se hace en cada una de las secciones permitiendo que la propagación solo se realice en el core seleccionado.

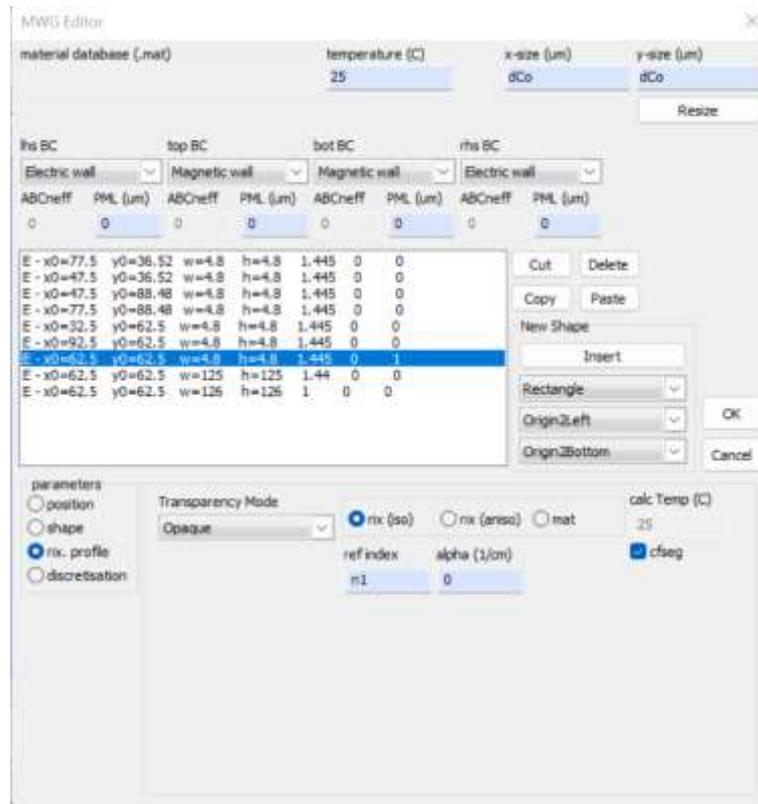


Ilustración 3-3: Activación del cfseg en el core central.

Realizado por: (ALTAFUJA, 2023)

La elección del modo de operación se observa en la Ilustración 3-4, se escoge el modo FDM ya que proporciona el solucionador más potente de FIMMWAVE, gracias a su capacidad para calcular superposiciones de modos muy rápidamente. Al darle clic en el botón “edit solver parms” esto muestra el panel FDM solver Parameters, donde se agrega la variable de lambda con un valor de 1.55, Ilustración 3-5.

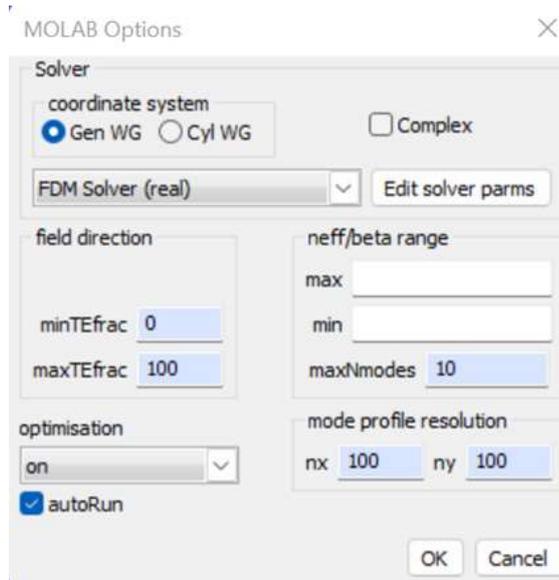


Ilustración 3-4: MOLAB Options.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

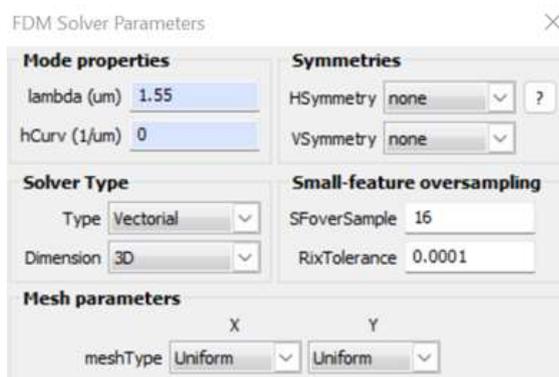


Ilustración 3-5: FDM Solver Parameters.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

A continuación, se tiene que elegir los modos de operación, siguiendo este orden: Se da clic en “Mode Finder” - “Build List” – “New Build” – “Start” el resultado se observa en la Ilustración 3-6. Esto permite ver como se está propagando cada modo en los cores, se debe tomar en cuenta que este proceso se tiene que realizar por cada sección de la estructura.

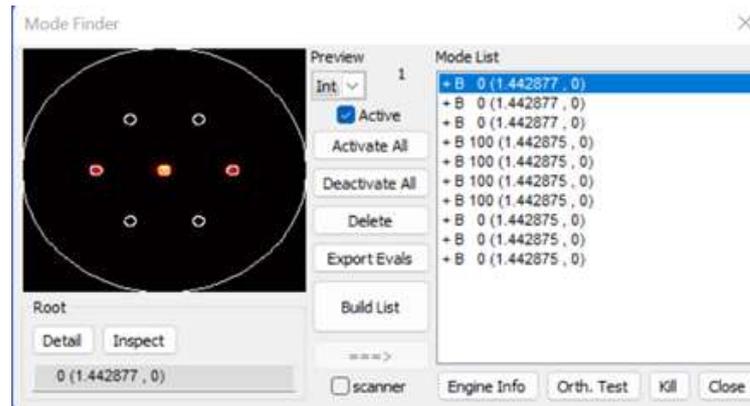


Ilustración 3-6: Modos de operación a través de los cores.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados de las experimentaciones realizadas, que abarcan diversos aspectos del filtro. Primero, se midió la propagación de la potencia utilizando diferentes longitudes de $\frac{1}{2}$, 1, 2, 3, 4 y 5 metros de la sección multinúcleo, con el objetivo de determinar la longitud adecuada para el funcionamiento óptimo del filtro. Luego, se analizó la respuesta del filtro en función de diferentes longitudes de onda, que se encuentran en el rango de $1 \mu\text{m}$ hasta $1.6 \mu\text{m}$, enfocándose particularmente en las longitudes de onda centrales de $1.6 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ y $1.45 \mu\text{m}$. Esto se hizo en función de la respuesta obtenida con cada longitud de la sección multinúcleo mencionada anteriormente.

Además, se evaluaron la potencia y las correspondientes longitudes de onda centrales de operación para los diferentes modos de propagación disponibles en el simulador. Por último, se analizó el funcionamiento preciso y adecuado del filtro mediante la propagación de la luz y su respuesta en términos de potencia y longitud de onda.

4.1 Prueba en diferentes distancias de la sección multicore.

4.1.1 A medio metro.

En la Ilustración 4-1, exhibe la cantidad de energía transmitida a través del filtro con una distancia de medio metro, donde el haz de luz atraviesa el núcleo principal o central. En la Ilustración 4-2, se ve la potencia con que sale al final de la sección multinúcleo y la distribución en los núcleos laterales debido a la multiplexación.

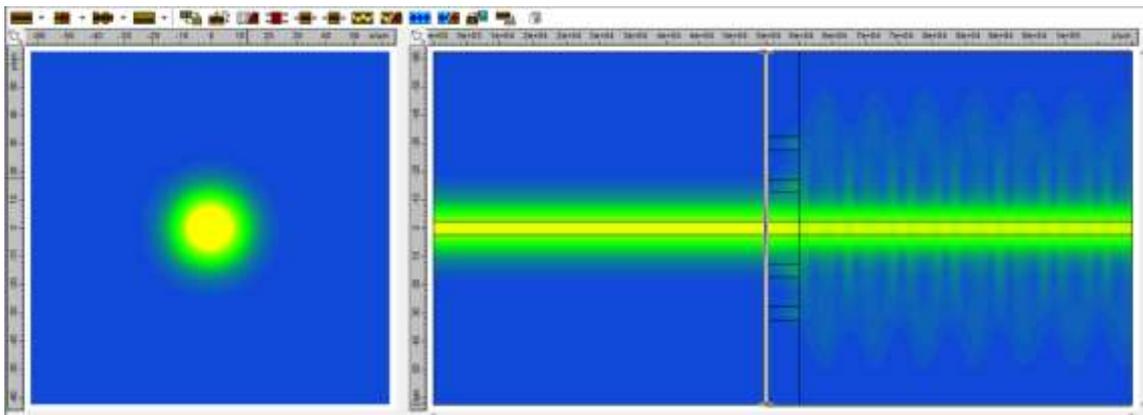


Ilustración 4-1: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a medio metro a la longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

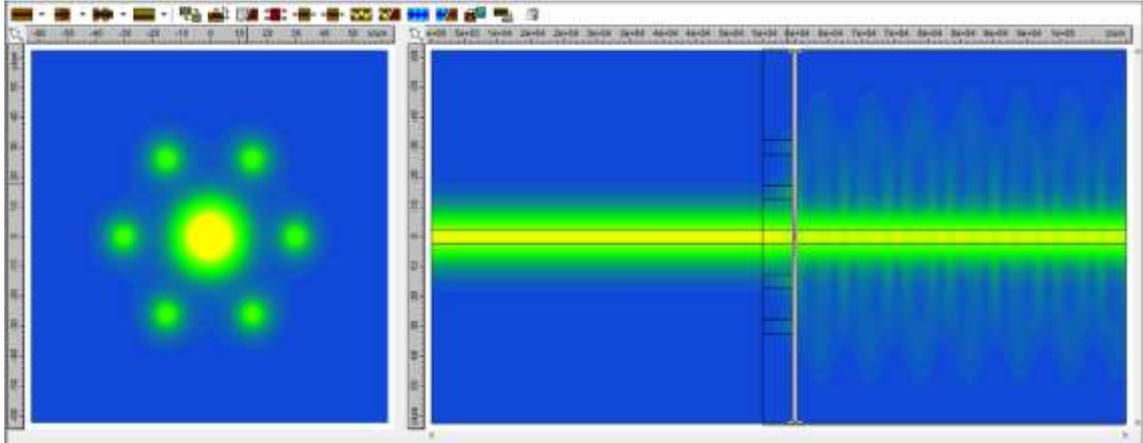


Ilustración 4-2: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a medio metro de distancia a $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

En la Ilustración 4-3, se muestra la potencia transmitida en el modo fundamental LP_{01} o también conocido como linealmente polarizado, correspondiente a la longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$, a una distancia de medio metro en su sección multicore. En la sección final de la Ilustración 4-2 se nota la atenuación de potencia de salida a comparación con la potencia de entrada debido a una pérdida de alrededor de 20% visualizada en la longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$ de la ilustración 4-3 y una dispersión de potencia.

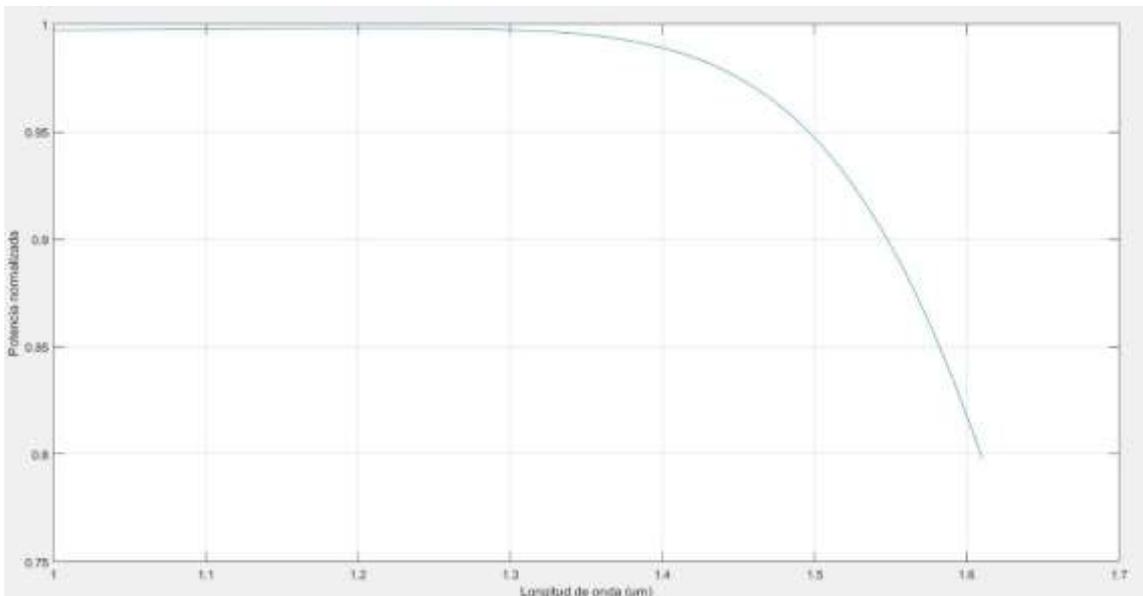


Ilustración 4-3: Potencia normalizada a medio metro de distancia a una longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

4.1.2 A un metro.

En la Ilustración 4-4, exhibe la cantidad de energía transmitida a través del filtro con una distancia de 1 metro, donde el haz de luz atraviesa el núcleo central. En la Ilustración 4-5, se ve la potencia con que sale al final de la sección multinúcleo y la distribución en los núcleos laterales debido a la multiplexación.

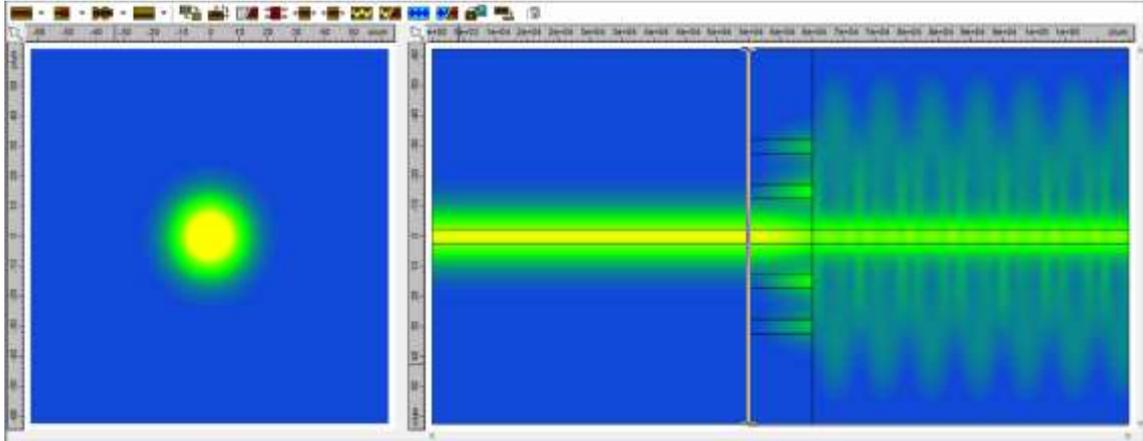


Ilustración 4-4: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a 1 metro a la longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

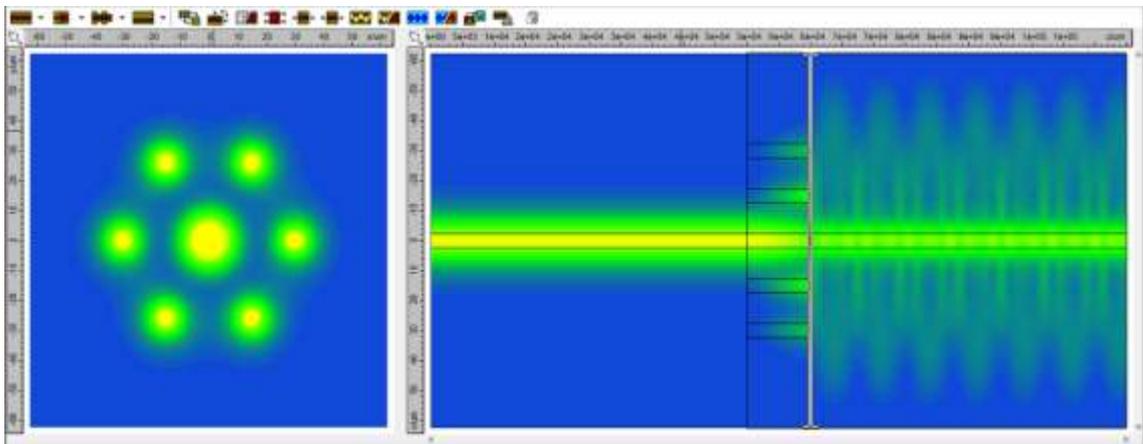


Ilustración 4-5: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 1 metro de distancia a $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

En la Ilustración 4-6, se muestra la potencia transmitida en modo fundamental LP_{01} , correspondiente a la longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$ a una distancia de un metro en su sección multinúcleo. En la sección final de la Ilustración 4-5 se nota la atenuación de potencia de salida a

comparación con la potencia de entrada debido a una pérdida de alrededor de 60 % visualizada en la longitud de onda de 1.6 μm de la ilustración 4-6, junto con una dispersión de potencia.

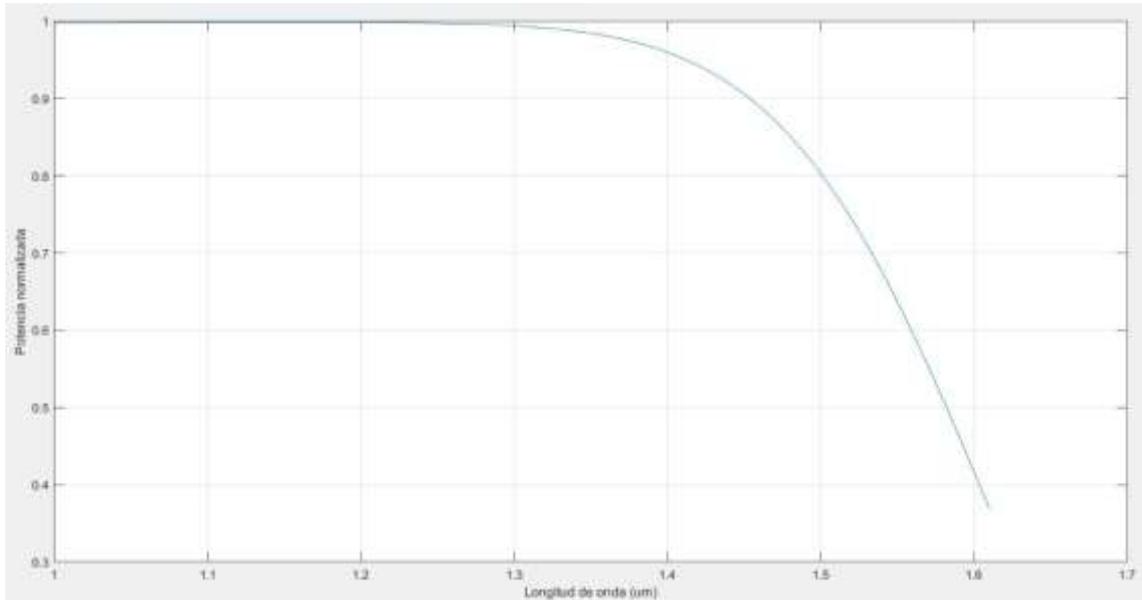


Ilustración 4-6: Potencia normalizada a 1 metro de distancia a una longitud de onda de 1.6 μm .
Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

4.1.3 A dos metros.

En la Ilustración 4-7, exhibe la cantidad de energía transmitida a través del filtro con una distancia de 2 metros en la sección multinúcleo, donde el haz de luz atraviesa el núcleo central. En la Ilustración 4-8, se ve la potencia con que sale al final de la sección multinúcleo y la distribución en los núcleos laterales debido a la multiplexación.

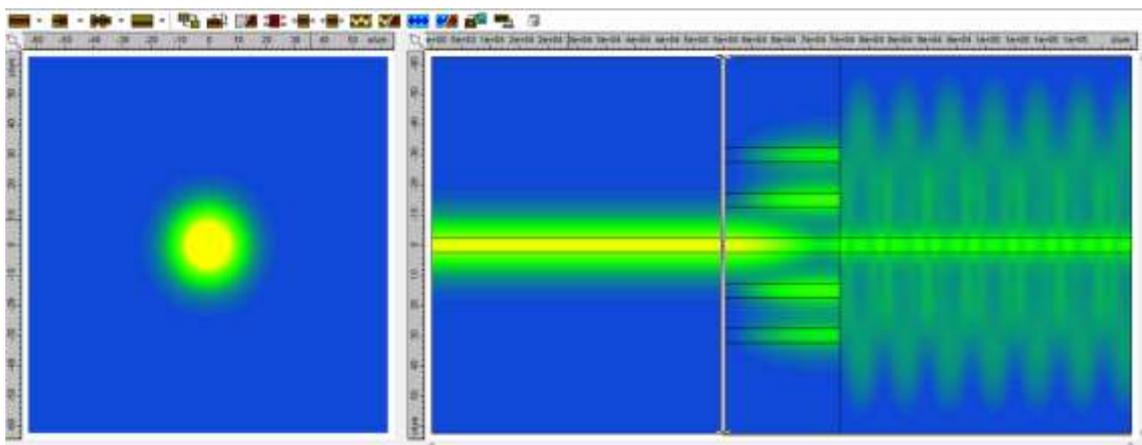


Ilustración 4-7: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a 2 metros a la longitud de onda de 1.6 μm .
Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

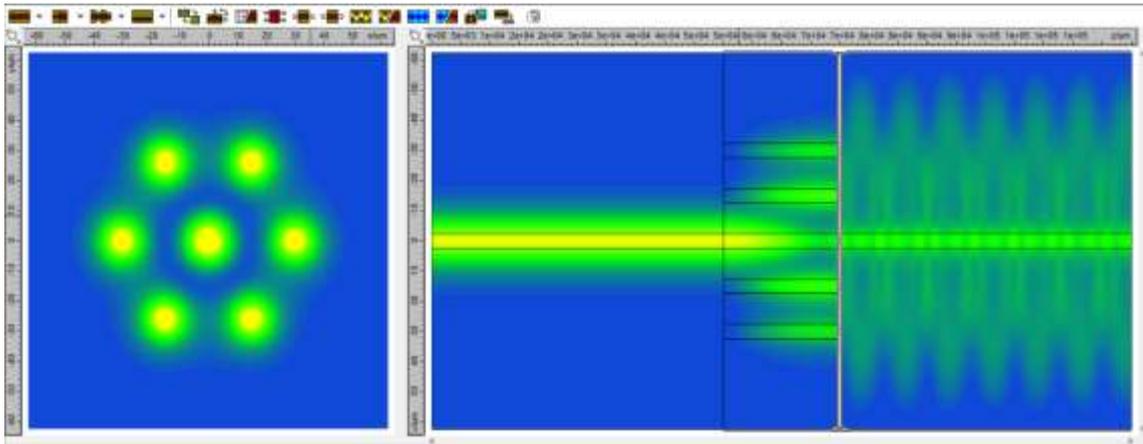


Ilustración 4-8: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 2 metros de distancia a $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

En la Ilustración 4-9, se muestra la potencia transmitida en modo fundamental LP_{01} , correspondiente a la longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$ a una distancia de dos metros en su sección multinúcleo. En la sección final de la Ilustración 4-8 se nota la atenuación de potencia de salida a comparación con la potencia de entrada de alrededor de 85 % visualizada en la Ilustración 4-9 junto con una dispersión de potencia en la longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$.

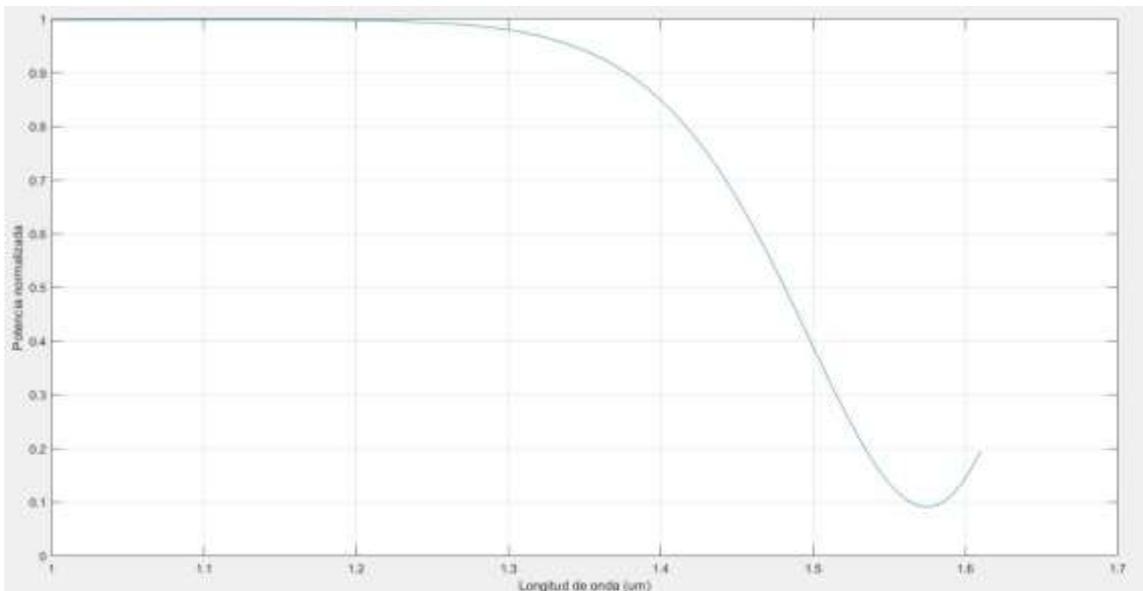


Ilustración 4-9: Potencia normalizada a 2 metros de distancia a una longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

4.1.4 A tres metros.

En la Ilustración 4-10, exhibe la cantidad de energía transmitida a través del filtro con una distancia de 3 metros en su sección multinúcleo, donde el haz de luz atraviesa el núcleo principal a una longitud de onda de 1.55 μm . En la Ilustración 4-11 se ve la parte final de la transmisión y la distribución en los núcleos laterales debido a la multiplexación a una longitud de onda 1.55 μm y la Ilustración 4-12 a una longitud de onda de 1.6 μm .

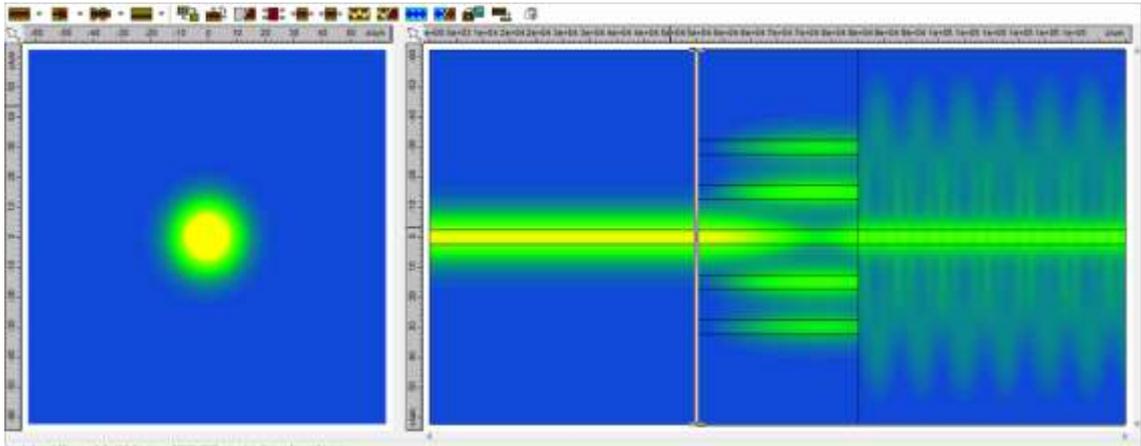


Ilustración 4-10: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a 3 metros a la longitud de onda de 1.55 μm .

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

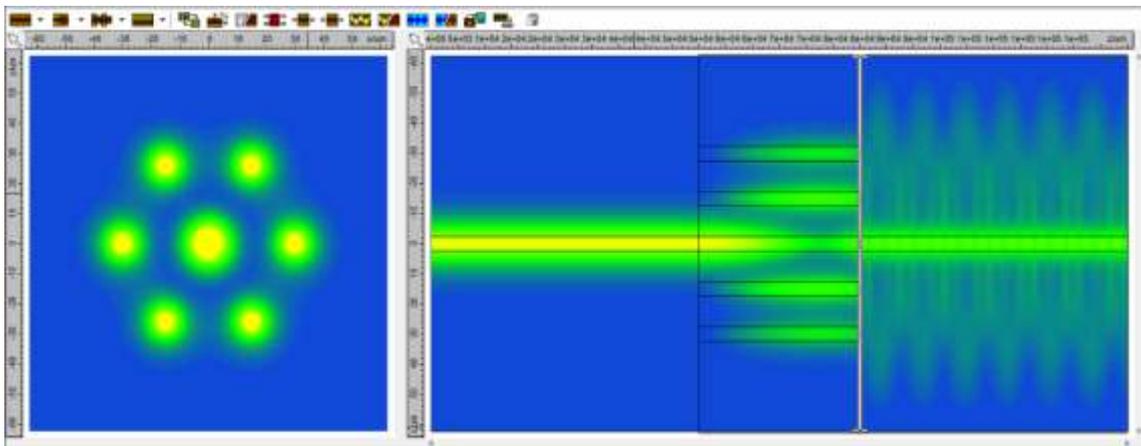


Ilustración 4-11: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 3 metros de distancia a 1.55 μm .

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

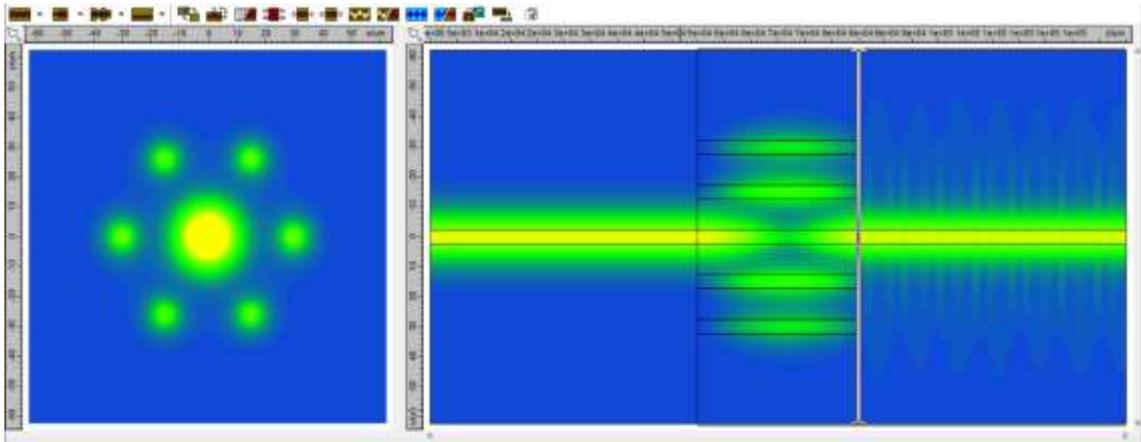


Ilustración 4-12: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 3 metros de distancia a $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

En la Ilustración 4-13, se muestra la potencia transmitida en modo fundamental LP_{01} , correspondiente a las longitudes de onda de $1.55 \mu\text{m}$ y $1.6 \mu\text{m}$ a una distancia de tres metros en su sección multinúcleo, los niveles de potencia en dichas longitudes de onda se reflejan en las secciones finales de las Ilustraciones 4-11 y 4-12, ya que la potencia de entrada tiene atenuación en su salida de alrededor de 70 % y 10 % respectivamente visualizada en la Ilustración 4-13 en las longitudes de onda de $1.55 \mu\text{m}$ y $1.6 \mu\text{m}$, junto con una dispersión de potencia.

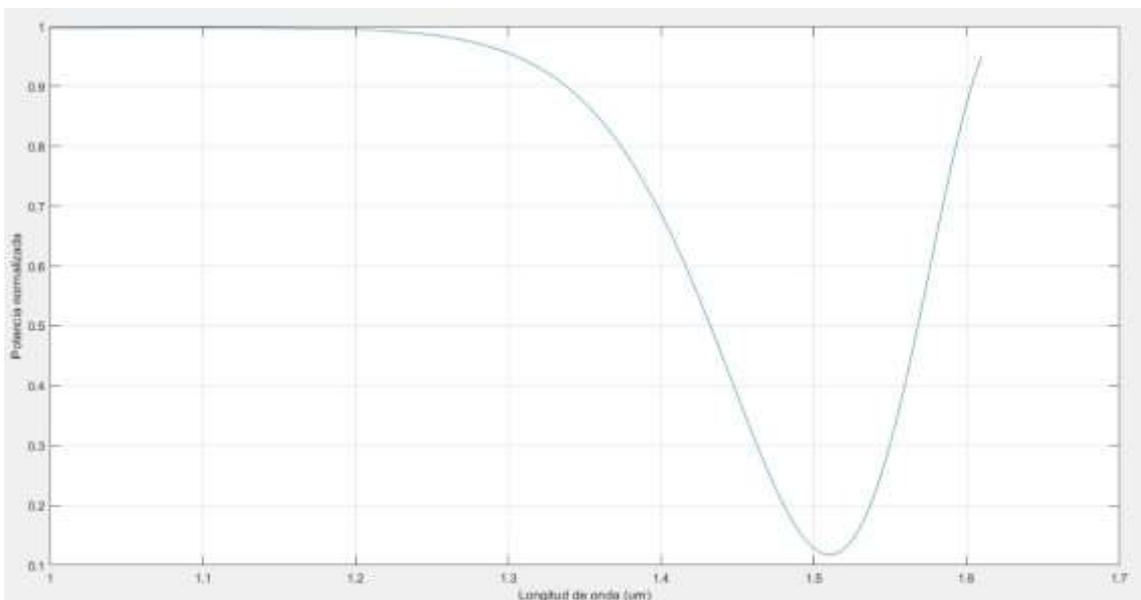


Ilustración 4-13: Potencia normalizada a 3 metros de distancia a longitudes de onda de $1.55 \mu\text{m}$ y $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

4.1.5 A cuatro metros.

En la Ilustración 4-14, exhibe la cantidad de energía transmitida a través del filtro con una distancia de 4 metros en la sección multinúcleo, donde el haz de luz atraviesa el núcleo principal a una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$. En la Ilustración 4-15 se ve la parte final de la transmisión y la distribución en los núcleos laterales debido a la multiplexación a una longitud de onda $1.55 \mu\text{m}$, la Ilustración 4-16 a una longitud de onda de $1.6 \mu\text{m}$ y la Ilustración 4-17 a una longitud de onda de $1.45 \mu\text{m}$.

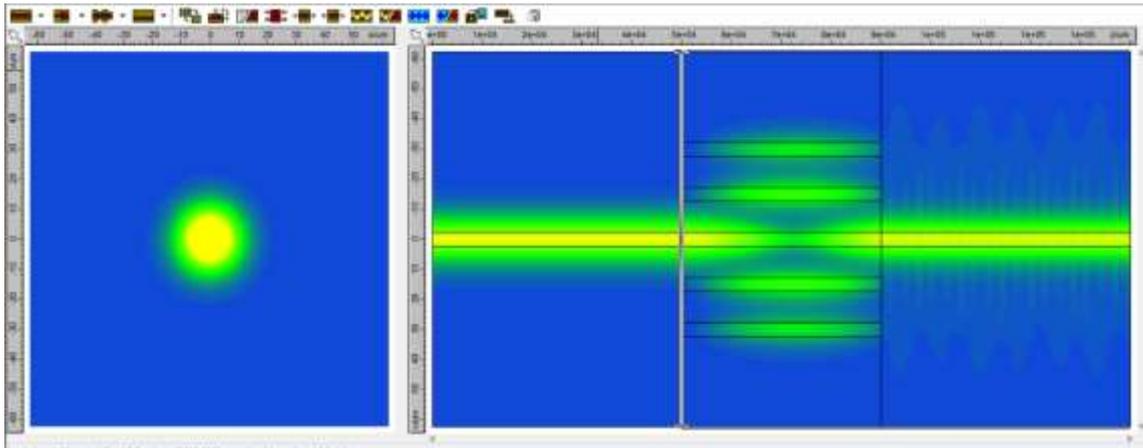


Ilustración 4-14: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a 4 metros a la longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

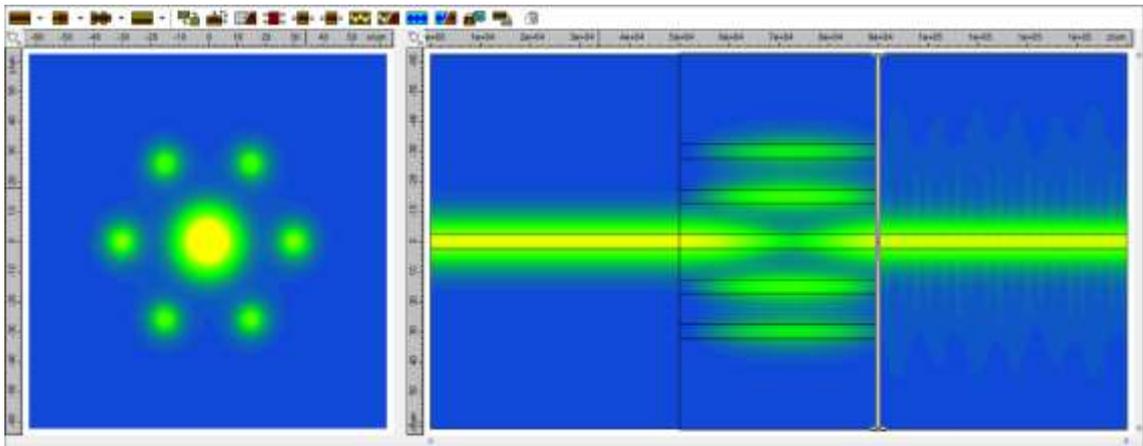


Ilustración 4-15: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 4 metros de distancia a $1.55 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

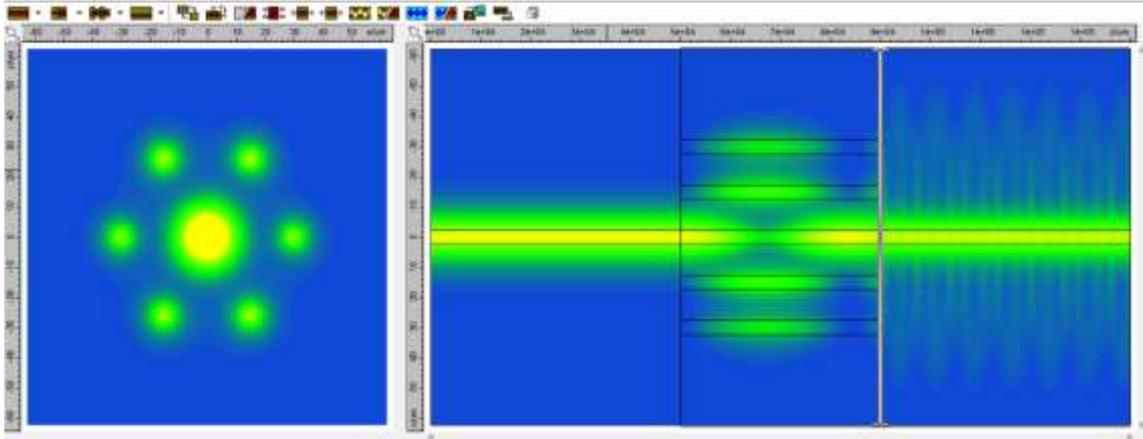


Ilustración 4-16: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 4 metros de distancia a $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

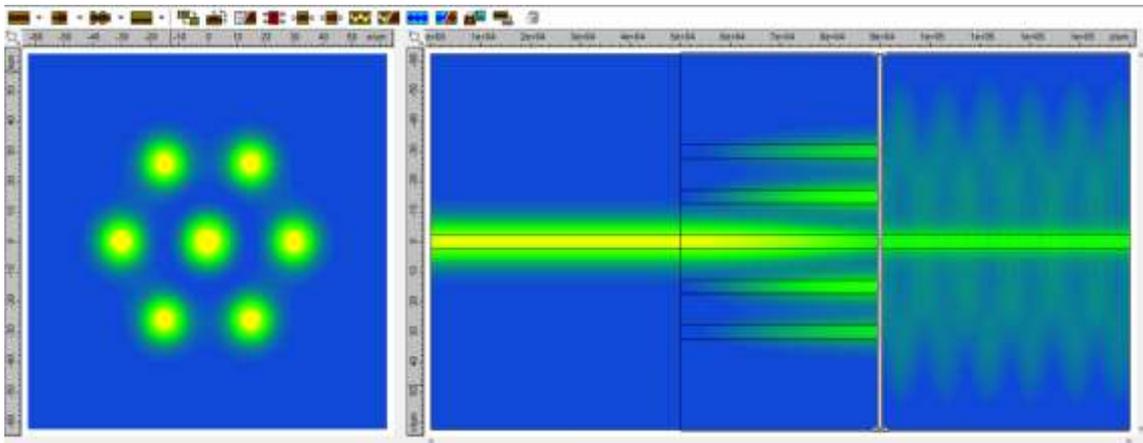


Ilustración 4-17: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 4 metros de distancia a $1.45 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

En la Ilustración 4-18, se muestra la potencia transmitida en modo fundamental LP_{01} , correspondiente a las longitudes de onda de $1.45 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ y $1.6 \mu\text{m}$ a una distancia de cuatro metros en su sección multinúcleo. Los niveles de potencia en dichas longitudes de onda se reflejan en las secciones finales de las Ilustraciones 4-15, 4-16 y 4-17, ya que la potencia de entrada tiene atenuación en su salida en los tres casos de alrededor de 20 %, 30% y 80% respectivamente, visualizadas en la Ilustración 4-18, junto con una dispersión de potencia.

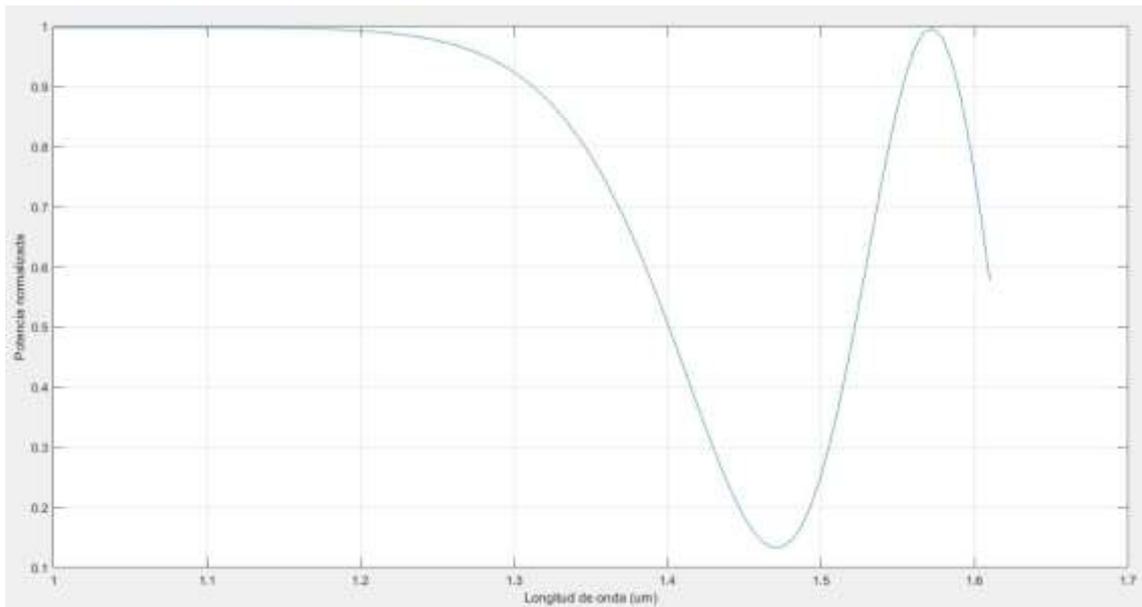


Ilustración 4-18: Potencia normalizada a 4 metros de distancia a longitudes de onda de 1.45 μm , 1.55 μm y 1.6 μm .

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

4.1.6 A cinco metros.

En la Ilustración 4-19, exhibe la cantidad de energía transmitida a través del filtro con una distancia de 5 metros en su sección multinúcleo, donde el haz de luz atraviesa el núcleo principal a una longitud de onda de 1.55 μm . En la Ilustración 4-20 se ve la parte final de la transmisión y la distribución en los núcleos laterales debido a la multiplexación a una longitud de onda 1.55 μm , la Ilustración 4-21 a una longitud de onda de 1.6 μm y la Ilustración 4-22 a una longitud de onda de 1.45 μm .

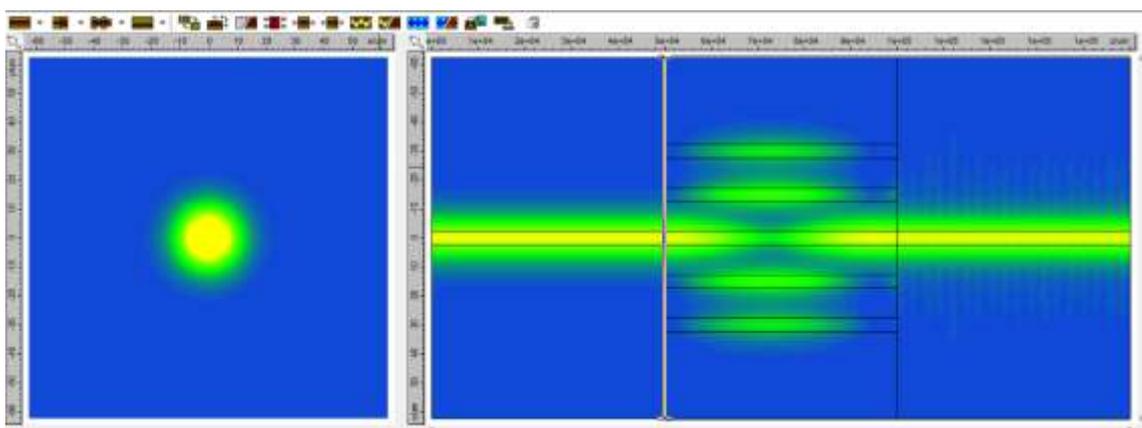


Ilustración 4-19: Transmisión de potencia en la parte inicial de la sección multicore a 5 metros a la longitud de onda de 1.55 μm .

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

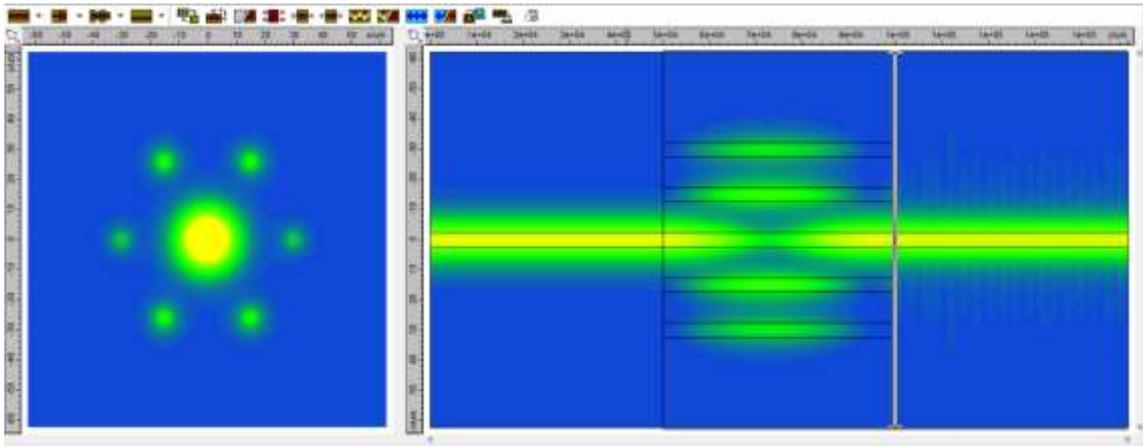


Ilustración 4-20: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 5 metros de distancia a $1.55 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

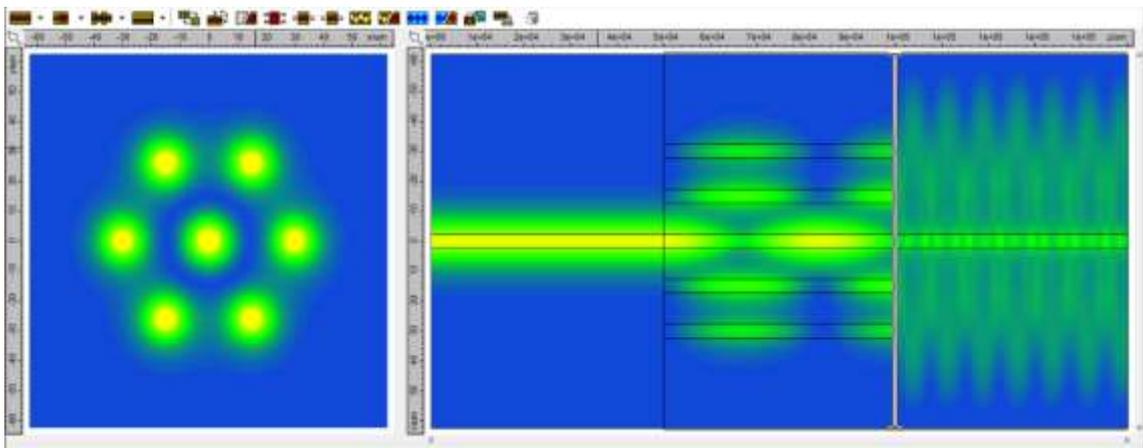


Ilustración 4-21: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 5 metros de distancia a $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

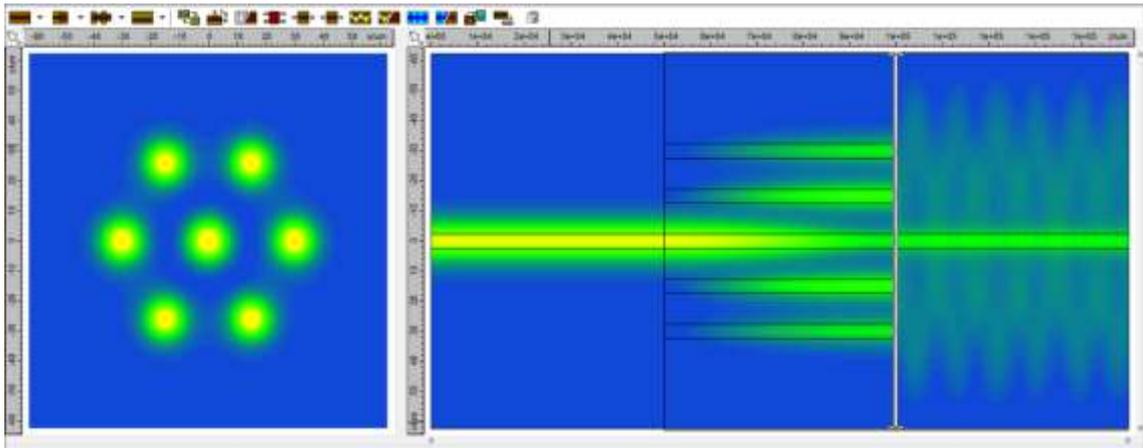


Ilustración 4-22: Transmisión de potencia y multiplexación en la parte final de la sección multicore a 5 metros de distancia a $1.45 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

En la Ilustración 4-23, se muestra la potencia transmitida en modo fundamental, correspondiente a las longitudes de onda de $1.45 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ y $1.6 \mu\text{m}$ a una distancia de cinco metros en su sección multinúcleo. Los niveles de potencia de las longitudes de onda de $1.6 \mu\text{m}$ y $1.45 \mu\text{m}$ se reflejan en las secciones finales de las Ilustraciones 4-21 y 4-22, ya que la potencia de entrada tiene atenuación en sus salidas de alrededor de 90% y 85 % respectivamente, cabe mencionar que hay dispersión de potencia en las secciones finales de las ilustraciones mencionadas anteriormente. La potencia de la longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$ es la misma que la de entrada ya que es la longitud de onda central del filtro, todo esto se visualiza en la Ilustración 4-23.

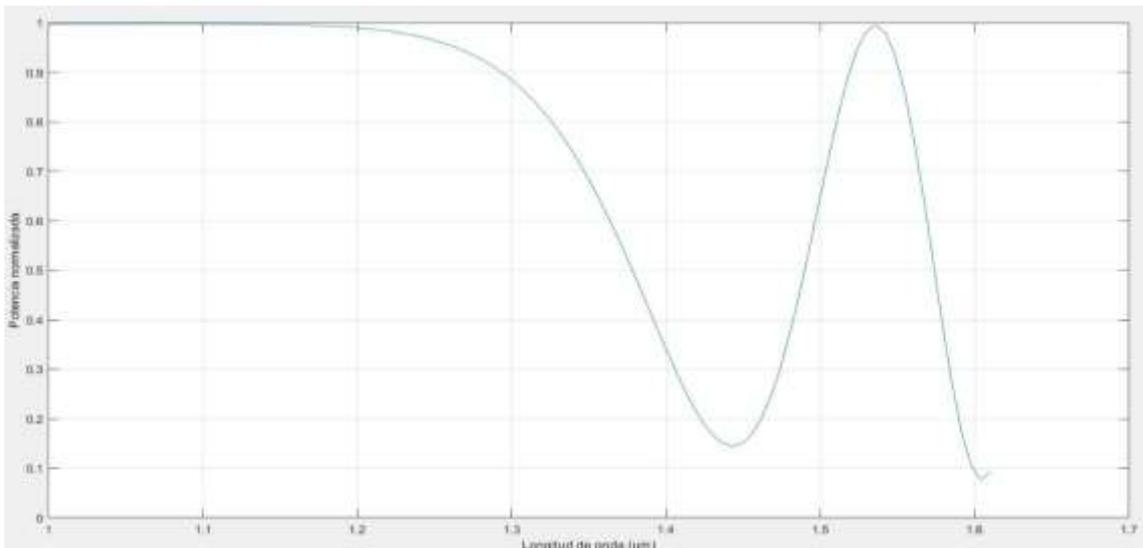


Ilustración 4-23: Potencia normalizada a 5 metros de distancia a longitudes de onda de $1.45 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ y $1.6 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

4.2 Modos de operación.

4.2.1 Modo uno.

En la Ilustración 4-24 se observan las variaciones de la potencia transferida desde el núcleo central hacia los núcleos externos en función de la longitud de onda. La característica importante es el caso correspondiente a la transmisión máxima a una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$. Por lo tanto, la selectividad de la longitud de onda se basa en el principio de que la luz dirigida al núcleo central lo atravesará y llegará a su final, excepto en ciertas longitudes de onda donde se acopla y aparece al final de los otros núcleos. Es decir, el filtro óptico está funcionando como un filtro pasa banda en la longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$ y rechaza banda en la longitud de onda $1.45 \mu\text{m}$.

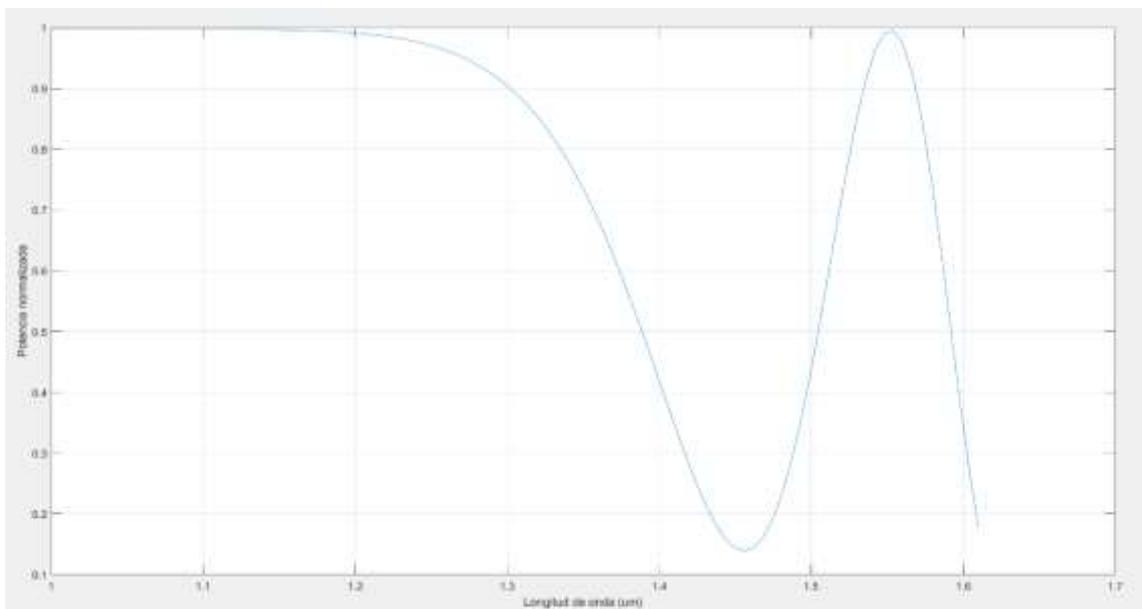


Ilustración 4-24: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 1.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

4.2.2 Modo dos.

En la Ilustración 4-25 se visualiza el nivel de potencia de este modo, que no sobrepasa un tercio de la potencia normalizada del filtro SMS y su frecuencia de operación que es de $1.46 \mu\text{m}$ aproximadamente.

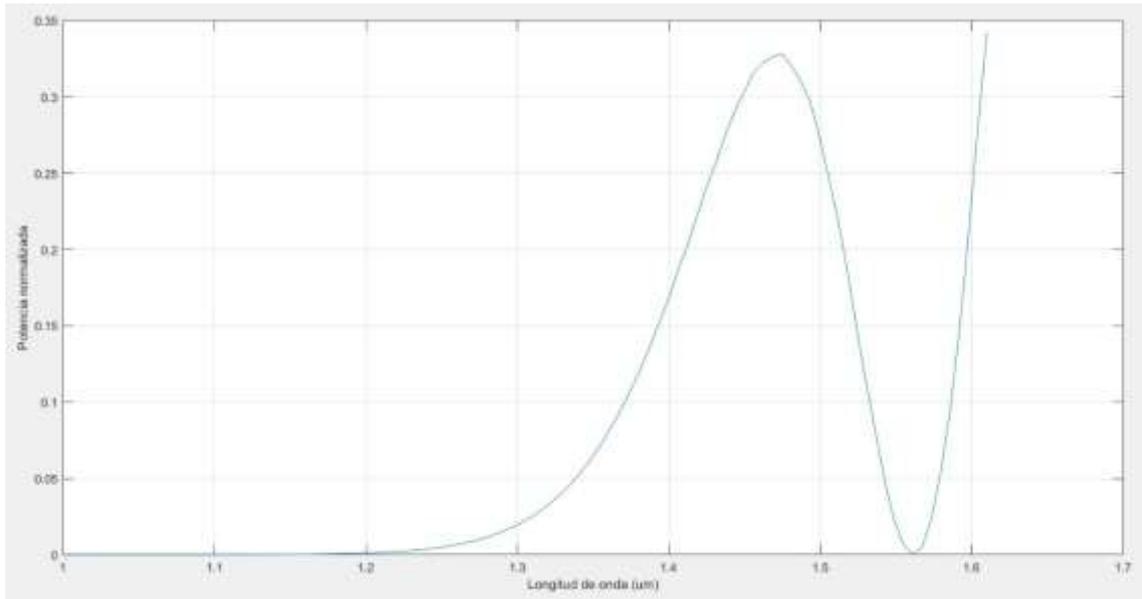


Ilustración 4-25: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 2.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

4.2.3 Modo tres.

En la Ilustración 4-26 se visualiza el nivel de potencia de este modo, que es sumamente pequeño y su frecuencia de operación que es de 1.46 μm aproximadamente. Por lo tanto, este modo de operación no puede ser considerado para tener un filtrado adecuado.

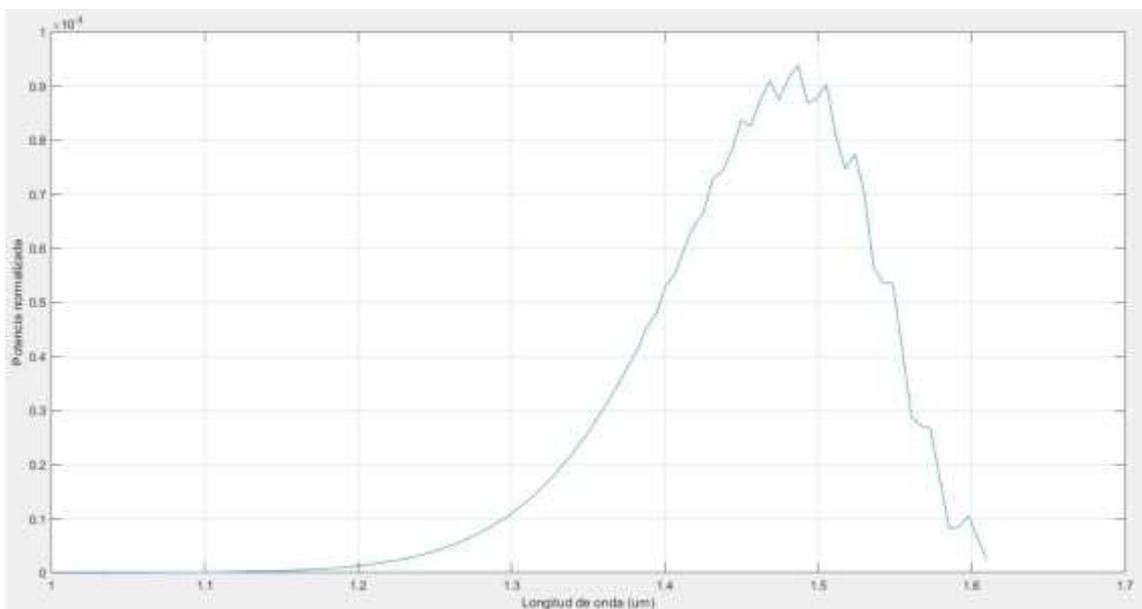


Ilustración 4-26: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 3.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

4.2.4 *Modo cuatro.*

En la Ilustración 4-27 se visualiza el nivel de potencia de este modo, que es sumamente pequeño y su frecuencia de operación que es de 1.46 μm aproximadamente. Por lo tanto, este modo de operación no puede ser considerado para tener un filtrado adecuado.

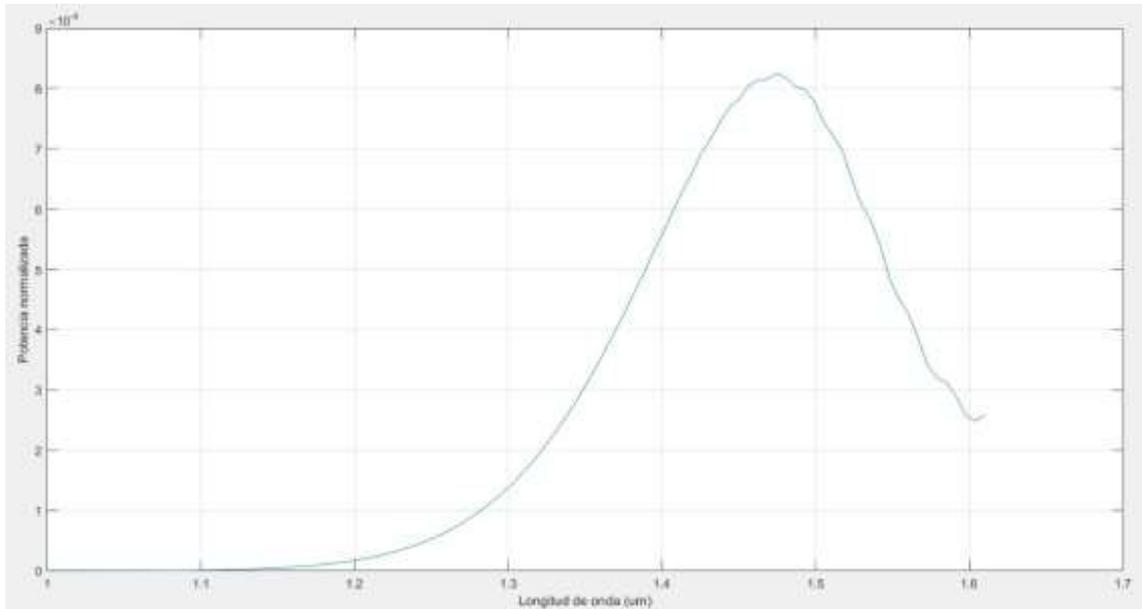


Ilustración 4-27: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 4.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

4.2.5 *Modo cinco.*

En la Ilustración 4-28 se visualiza el nivel de potencia de este modo, que es sumamente pequeño y su frecuencia de operación que es de 1.46 μm aproximadamente. Por lo tanto, este modo de operación no puede ser considerado para tener un filtrado adecuado.

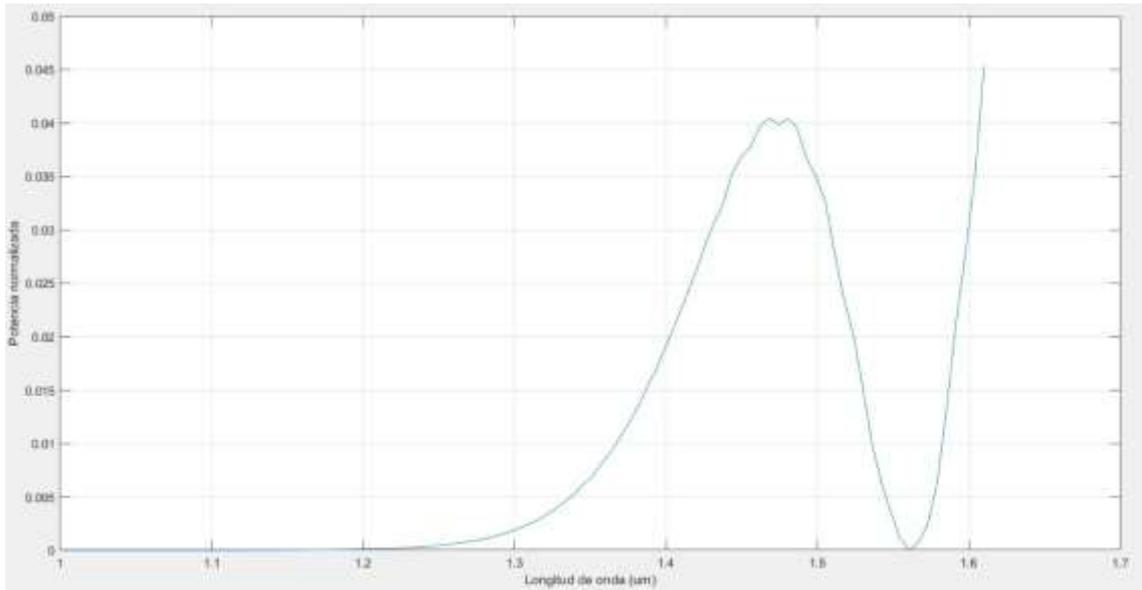


Ilustración 4-28: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 5.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

4.2.6 *Modo seis.*

En la Ilustración 4-29 se visualiza el nivel de potencia de este modo, que es sumamente pequeño y su frecuencia de operación que es de 1.46 μm aproximadamente. Por lo tanto, este modo de operación no puede ser considerado para tener un filtrado adecuado.

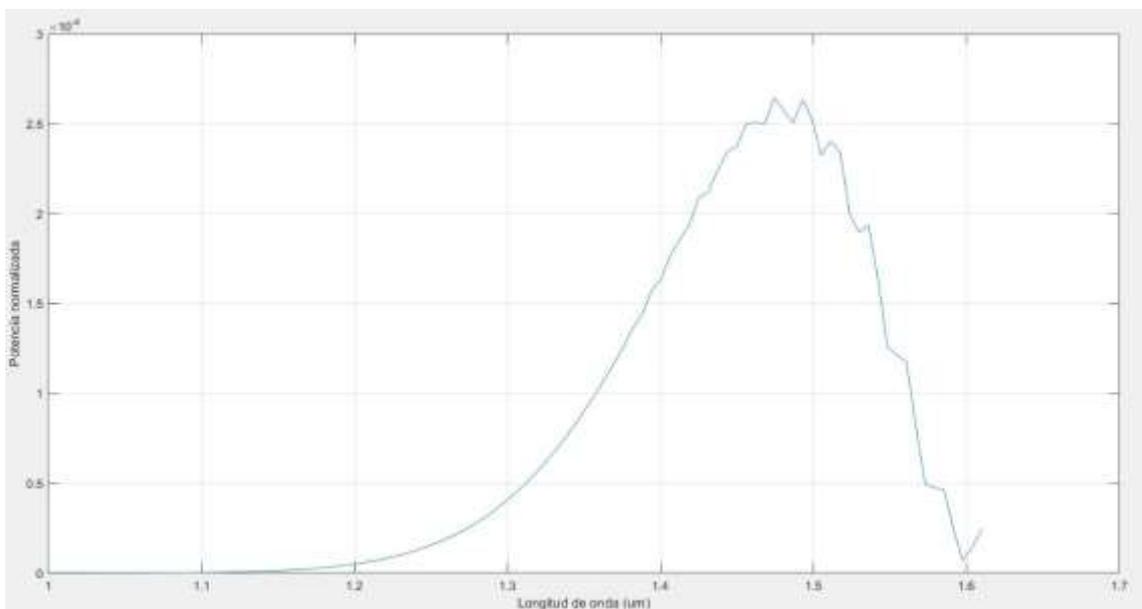


Ilustración 4-29: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 6.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

4.2.7 *Modo siete.*

En la Ilustración 4-30 se visualiza el nivel de potencia de este modo, que es sumamente pequeño y su frecuencia de operación que es de 1.46 μm aproximadamente. Por lo tanto, este modo de operación no puede ser considerado para tener un filtrado adecuado.

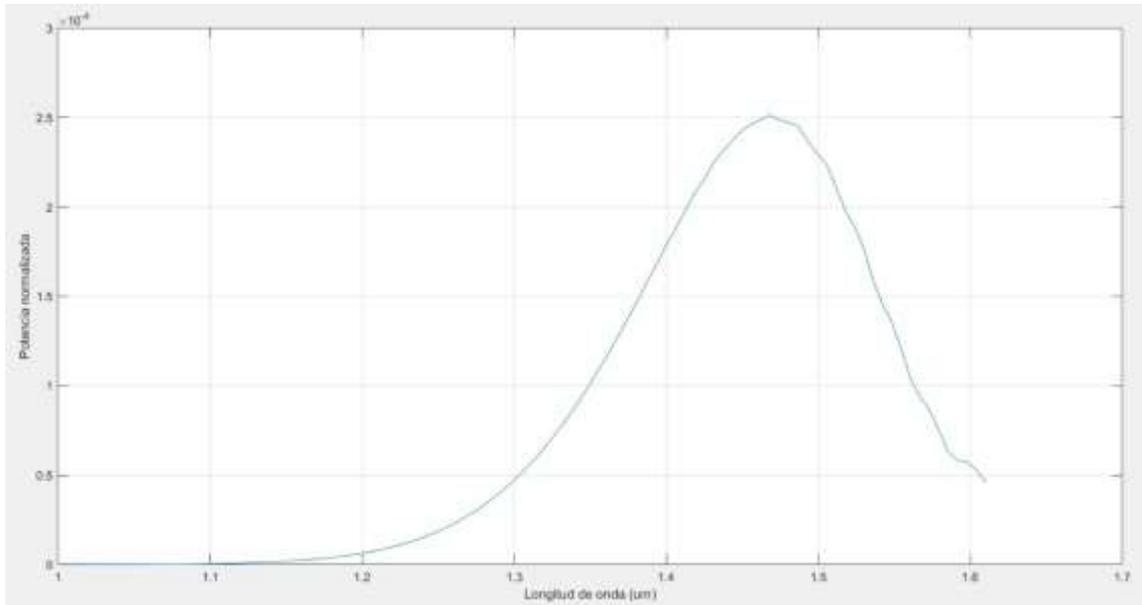


Ilustración 4-30: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 7.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

4.2.8 *Modo ocho.*

En la Ilustración 4-31 se visualiza el nivel de potencia de este modo, que es sumamente pequeño y su frecuencia de operación que es de 1.46 μm aproximadamente. Por lo tanto, este modo de operación no puede ser considerado para tener un filtrado adecuado.

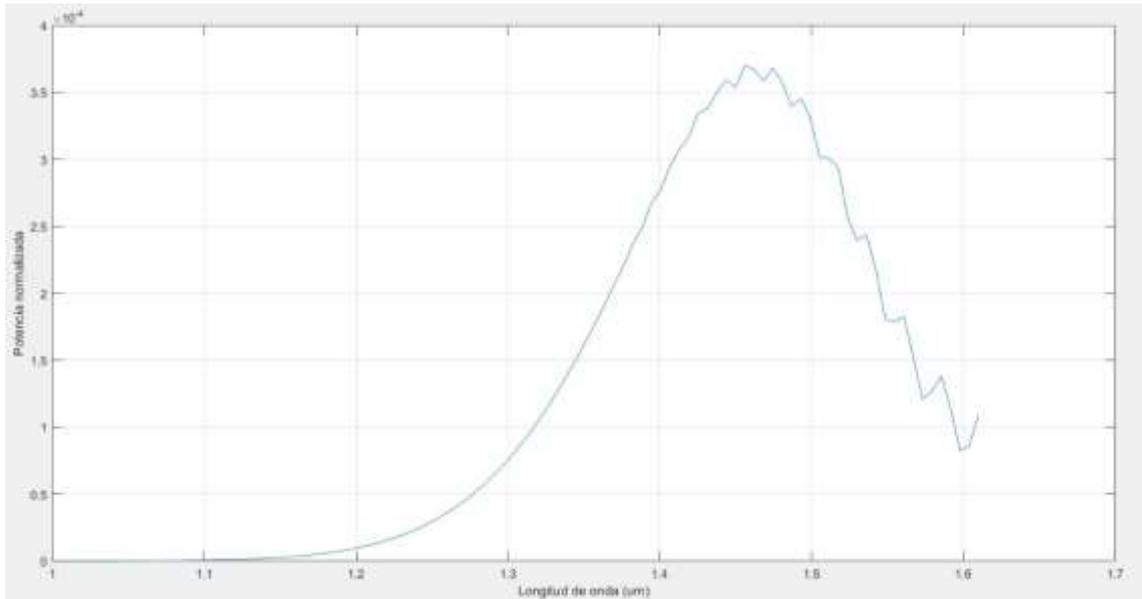


Ilustración 4-31: Longitud de onda de operación y potencia normalizada del modo 8.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

4.3 Resultados finales.

Para simular la dinámica de propagación del diseño del filtro SMS “Single-Multi-Single” basado en la Tabla 3.1 del capítulo anterior, en función de la longitud de la fibra, a una longitud de onda de 1.55 µm, la luz se lanza al núcleo central del MCF “Fibra multicore”. El resultado se presenta en la Ilustración 4-32. En la Ilustración 4.33, la cual muestra cómo la potencia se transfiere a los núcleos externos “multiplexación” después del acoplamiento entre la sección inicial y la multicore, luego oscila a lo largo del 7CF. Por último, en la Ilustración 4-34, la potencia transmitida en el núcleo central es detectada por una guía de onda monomodo en la parte final de la estructura que tiene un radio igual al de los núcleos en el 7CF con una potencia igual a la de entrada.

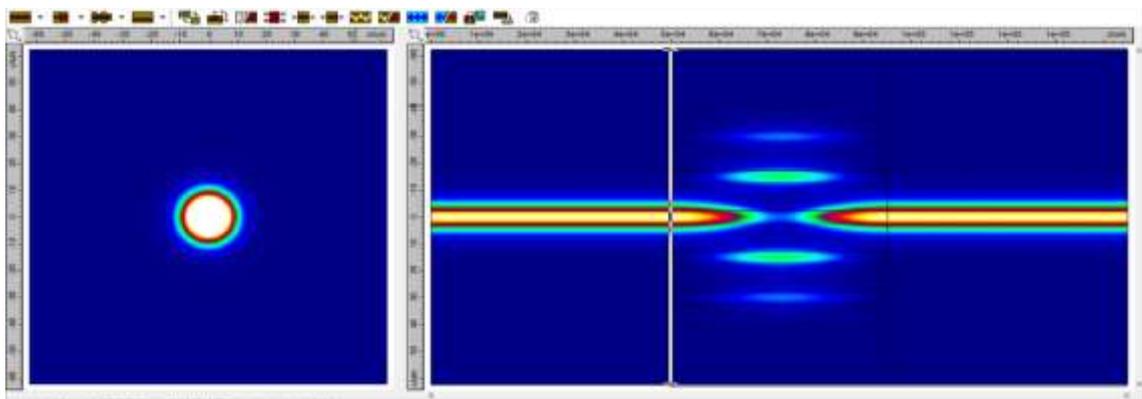


Ilustración 4-32: Transmisión de potencia al inicio de la sección multicore con una longitud de onda de 1.55 µm.

Realizado por: (ALTAFUYA, 2023)

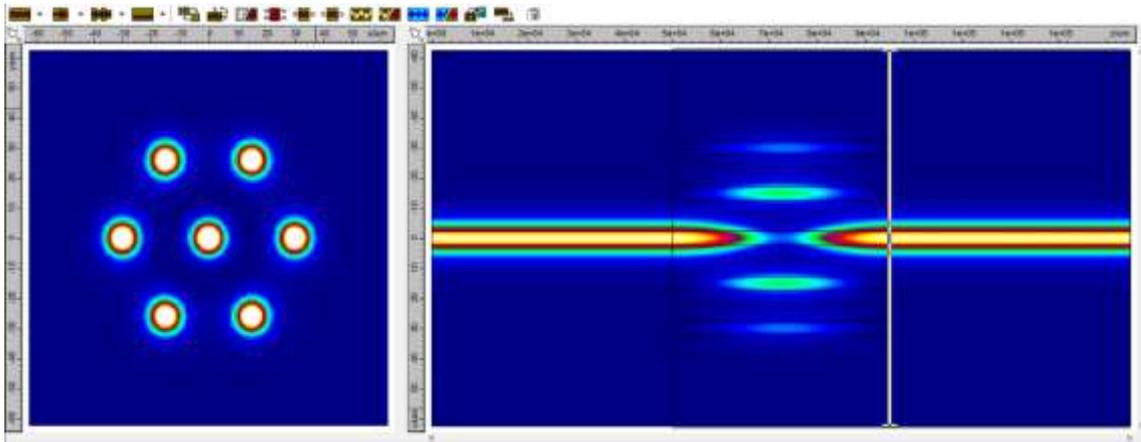


Ilustración 4-33: Transmisión de potencia en el centro de la sección multicore con una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

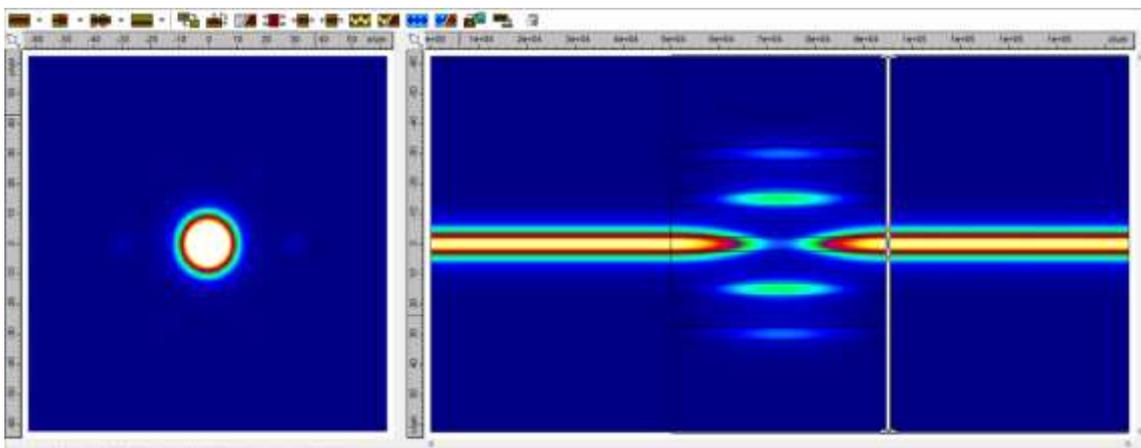


Ilustración 4-34: Transmisión de potencia en al final de la sección multicore con una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

En la Ilustración 4-35, se exhibe los diferentes modos de operación principalmente el modo de operación fundamental LP_{01} o modo 1 que es, en el que se centra este trabajo de investigación. Este modo tiene la mayor potencia y realiza el filtrado en la banda de operación deseada de $1.55 \mu\text{m}$ a 3 dB con un ancho de banda de $0.9 \mu\text{m}$. En la longitud de onda de $1.45 \mu\text{m}$ el filtro trabaja como rechaza banda, con un ancho de banda de $0.12 \mu\text{m}$ a 3 dB. Los demás modos tienen potencias bajas de operación, el único que podría ser tomado en cuenta como interferencia cocanal a $1.45 \mu\text{m}$ es el modo 2, ya que tiene una potencia aproximada de $1/3$ del máximo de la potencia normalizada.

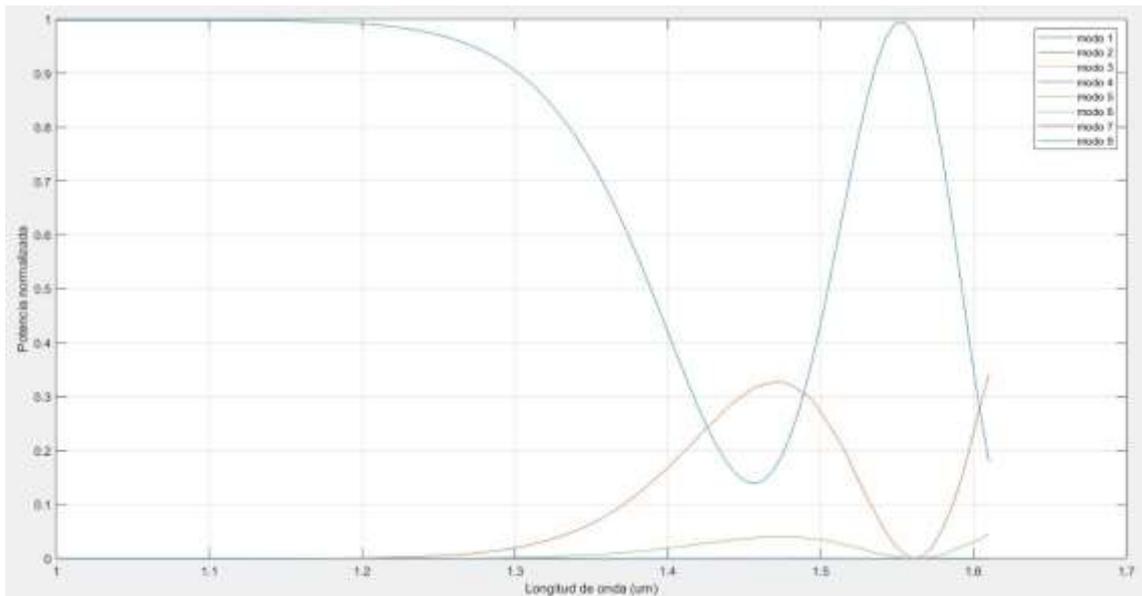


Ilustración 4-35: Longitud de onda de operación y potencia normalizada de todos los modos de operación.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

El filtro solo funciona adecuadamente cuando se transmite en el núcleo central en la parte inicial, y se recibe por ese mismo núcleo en la sección final. Si se recepta en los cores laterales se obtiene la respuesta que se muestra en la Ilustración 4-36, la cual es una respuesta de baja potencia sin un filtrado adecuado, lo mismo sucede si se alimenta por un core lateral cualquiera y se recepta en el core central de la salida.

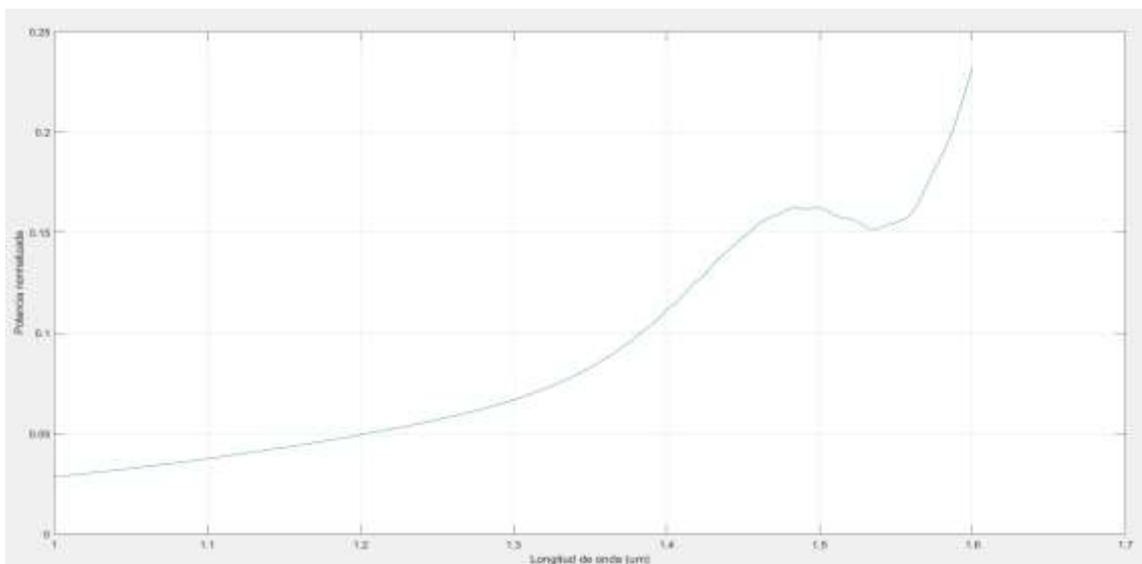


Ilustración 4-36: Respuesta de los cores laterales al propagar en el core central de la sección multicore y viceversa.

Realizado por: (ALTAFUYYA, 2023)

4.4 Discusión de los resultados.

En este estudio, se examinaron las respuestas visuales de potencia en el filtro a diferentes distancias de la sección multinúcleo de $\frac{1}{2}$, 1, 2, 3, 4 y 5 metros. Estas respuestas permitieron observar cómo la potencia se atenúa en distintas longitudes de onda ($1.6 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ y $1.45 \mu\text{m}$) según cada distancia de la sección. Mediante estas observaciones, se determinó que la distancia óptima es de 4.5 metros para que el filtro funcione como pasa banda en la longitud de onda central de $1.55 \mu\text{m}$ y rechaza banda en la longitud de onda de $1.45 \mu\text{m}$.

Las atenuaciones se calcularon a partir de las gráficas de potencia en función de las longitudes de onda, lo que permitió obtener los porcentajes de atenuación en las longitudes de onda centrales de $1.6 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ y $1.45 \mu\text{m}$, dependiendo de la distancia de la sección multinúcleo.

Al analizar las respuestas de los diferentes modos de propagación, se destacó el desempeño en el modo principal LP_{01} o modo 1. En este modo, se logra el filtrado deseado con niveles de potencia óptimos. En contraste, los otros modos de propagación presentan potencias muy bajas y frecuencias centrales cercanas a $1.45 \mu\text{m}$, lo que los hace irrelevantes para el funcionamiento del filtro.

El resultado final es un diseño óptimo del filtro SMS en la longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$, demostrado con las gráficas de propagación de potencia mediante el haz de luz y la gráfica de operación de los diferentes modos de propagación, donde se observa el funcionamiento preciso del filtro en función del modo fundamental LP_{01} y los demás modos de propagación que son irrelevantes debido a su baja potencia, excepto el modo 2 que podría ser considerado como una interferencia cocanal en la longitud de onda de $1.45 \mu\text{m}$.

En conclusión, esta investigación permitió identificar la distancia óptima de la sección multinúcleo, sus parámetros de diseño como: índices de refracción del cladding y los núcleos, su distancia entre núcleos, el diámetro de los núcleos y del cladding, enfocado en el modo fundamental LP_{01} para obtener el diseño de un filtro SMS altamente eficiente en la longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El diseño del filtro espectral SMS basado en el modo LP₀₁ para la banda de 1.55 μm mejora las comunicaciones ópticas debido a su capacidad para seleccionar y transmitir señales en esta frecuencia clave. Este filtro no solo permite un mayor ancho de banda y una menor pérdida de señal, sino que también es un precursor el camino hacia futuras innovaciones tecnológicas.
- El análisis exhaustivo de las condiciones de funcionamiento óptimo para el desarrollo de este filtro espectral, basado en una sólida revisión bibliográfica, ha resultado en una conclusión positiva a pesar de la sumamente escasa información referente a este filtro.
- El exitoso diseño del filtro espectral que cumple con los parámetros necesarios del modo LP₀₁ representa un logro en el campo de la óptica y las comunicaciones. Al alcanzar este objetivo, hemos creado una herramienta tecnológica poderosa y altamente eficiente que permitirá un procesamiento de señales ópticas de manera precisa y selectiva.
- La realización exitosa de la simulación del filtro espectral SMS y las transiciones de la fibra óptica a través del software "FimmWave" representa un avance enfocado en la tecnología óptica ya que, gracias a esta simulación, hemos obtenido una comprensión profunda y precisa de cómo se comporta el filtro y cómo se producen las transiciones en la fibra óptica.
- La evaluación del nivel de prefactibilidad de la técnica de multiplexación como solución viable para el diseño de un filtro ha arrojado resultados positivos, ya que, gracias a ella ofrece ventajas significativas, como el aumento de la capacidad de transmisión, la reducción de costos y la optimización del rendimiento general del sistema óptico con su filtrado en la banda desea.
- La creación del manual de utilización del software FimmWave para fibra óptica, facilita y agiliza el diseño de fibras monomodo, multimodo, multimodo con compresión de los núcleos y fibras SMF, gracias a su detallada secuencia de pasos para la creación de dichas estructuras. Permitiendo a los usuarios aprovechar al máximo todas las capacidades y funcionalidades del software, enfocado en guías circulares.

RECOMENDACIONES

- Es imprescindible y altamente recomendado colocar adecuadamente las secciones de junta entre las secciones monomodo inicial, multimodo y monomodo final en el sistema del filtro SMS. Estas juntas son cruciales para garantizar una transmisión eficiente y continua de la señal a lo largo de todo el filtro, asegurando su correcto funcionamiento y rendimiento óptimo. La falta de juntas entre estas secciones podría resultar en la pérdida completa de señal.
- Para asegurar una propagación adecuada y efectiva en todas las secciones del filtro, es esencial activar siempre la casilla "cfseg" en el núcleo de diseño. Esta opción, conocida como "Constant Field Segment" o "Segmento de Campo Constante", juega un papel fundamental en el correcto funcionamiento del filtro y en la garantía de una transmisión óptima de la señal a lo largo de todo el dispositivo. Al activar la casilla "cfseg", se establece un campo eléctrico constante en el núcleo, lo que significa que la propagación de la señal no experimentará cambios abruptos o inesperados en la velocidad de fase a medida que atraviesa el filtro.
- Antes de comenzar la ejecución de la simulación, es fundamental realizar la generación de los modos de propagación en cada sección del filtro. Esta etapa previa es crítica para asegurar que la propagación a través del filtro concuerde con una transmisión realista en condiciones reales, teniendo en cuenta las características inherentes de los diferentes tipos de fibras ópticas que componen el sistema. Al simular los modos de propagación, se obtienen datos esenciales sobre la distribución espacial del campo eléctrico y las características de propagación de la señal en cada sección.

BIBLIOGRAFÍA

- KUMAR, A., VARSHNEY, R. K., ANTONY S. C., & SHARM, P.** 2003. "Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures". Vol. 219.
- SNYDER, A. W., & LOVE, J.** 1983. Optical Waveguide Theory. Canberra, Australia : Springer Science & Business Media, p. 724. 0-412-09950-0.
- CABEZAS, Andrés Felipe , & PINTO, Ricardo Alfonzo.** 2014. Sistemas de comunicaciones ópticas. Bogotá : UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.
- ARES, Roberto.** CARACTERISTICAS DE LAS FIBRAS OPTICAS. [Online] Abril 23, 2013. https://mhe.es/cf/ciclos_informatica/844819974X/archivos/unidad2_recurso2.pdf.
- PEREZ-LEIJA, Armando, GRAFE, Markus, HERNANDEZ-HERREJON, J. C, MOYACESSA, Hector, SZAMEIT, Alexander, & CHRISTODOULIDES, Demetrios N.** 2013. Generation of multipartite single photon W states in waveguide lattices. San Jose, California, United States : Optica Publishing Group. p. 1. 978-1-55752-972-5.
- CASTAÑEDA ROMERO, Paulo Alejandro.** Análisis y Simulación del Fenómeno de Dispersión Cromática en la Fibra Óptica Monomodo ITU-T G.652 e ITU-T G.655. [Online] EPN, Marzo 20, 2018. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19307>.
- XIA, Cen, BAI, Neng, OZDUR, Ibrahim, ZHOU, Xiang, & LI, Guifang.** Supermodes for optical transmission. Middletown, NJ, 07748, USA : Opt. Express 19, 2011.
- COIMBRA, Edison.** El canal óptico: la fibra óptica. [Online] Abril 14, 2011. <https://es.slideshare.net/edisoncoimbra/81-el-canal-ptico-la-fibra-ptica>.
- CORTEZ BUSTAMANTE, Pablo Ernesto.** Manual práctico para el cableado de la red aérea de fibra óptica de Telconet en la ciudad de Quito. [Online] Octubre 27, 2016. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16820>.
- DONLAGIC, D., & CULSHAW, B.** Microbend sensor structure for use in distributed and quasi-distributed sensor systems based on selective launching and filtering of the modes in graded index multimode fiber. s.l. : Journal of Lightwave Technology, 1999. Vol. 17. 0733-8724.
- PHOTHON, Desing.** FIMMWAVE. Oxford : s.n., 2022.
- DRAGIC, P., & BALLATO, J.** «Glass: The Carrier of Light - A Brief History of Optical Fiber». International Journal of Applied Glass Science. 2016.
- CHAN, F. Y., LAU, A. P., & TAM, H. Y.** Mode coupling dynamics and communication strategies for multi-core fiber systems. s.l. : Optics Express, 2012. Vol. 20, 4, p. 4.
- FLORES, I.** «Aplicaciones y Diseño de las Rejillas en Fibra Óptica en la Ingeniería en Telecomunicaciones. [Online] Universidad Nacional Autónoma de México, 2010. <https://docplayer.es/39218227-Aplicaciones-y-diseno-de-las-rejillas-en-fibra-optica-en-la-ingenieria-en-telecomunicaciones.html>.

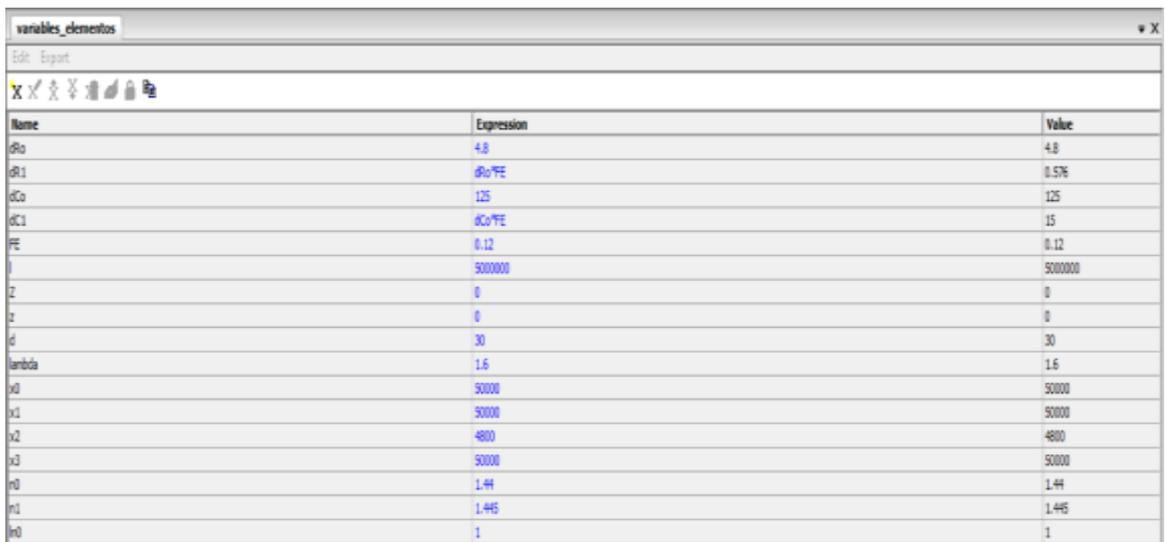
- GAXIOLA, I.** Simulador de un sistema de Comunicación Óptico empleando multicanalización por división de longitudes de onda (WDM). [Online] 2005. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/387/OmarIvanGaxiola.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- HAUS, H. A., & MOLTER-ORR, L.** Coupled multiple waveguide systems. s.l. : IEEE Journal of Quantum Electronics, 1983. Vols. QE-19, p. 5. 0018-9197.
- LOPEZ, J. E., GUZMAN, A. C., ARRIOJA, D. A., AGUILAR, R. S., & WA, P. L.** “Tunable multimode-interference bandpass fiber filter”. Opt. Lett, 2010, Vol. 35.
- DANDAPAT, Krishnendu, KUMAR, Gyanendra, & MANI TRIPATHI, Saurabh.** Single-Multi-Single Mode Fiber Optic Structure Based Tunable Wavelength Division Multiplexing Channel Isolation Filter. Kanpur, India : International Conference on Fibre Optics and Photonics 2016. ISBN: 978-1-943580-22-4.
- LAUDE, Jean-Pierre.** Wavelength Division Multiplexing. Michigan : Prentice-Hall international series in optoelectronics, 1993. ISBN 0134898656.
- ABRAMOWITZ, M., PARRY-HILL, M., JOHNSON, I., & DAVIDSON, M.** Physics of Light and Color. [Online] Marzo 26, 2014. [http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/filters/absorption/..](http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/filters/absorption/)
- MACLEOD, H. A.** Thin-Film Optical Filters. Tucson, Arizona : Institute of Physics Publishing, 2001. 0-7503-0688-2.
- MILLAN, R.** Redes y Tecnología WDM. [Online] ESPE, 2013. <https://www.ramonmillan.com/documentos/trabajos/PFCCapitulo2.pdf>.
- NERI, Rodolfo.** Líneas de transmisión. Xalapa, México : Universidad Veracruzana, 2013. 978-607-502-187-4.
- OKAMOTO, K.** Fundamentals of Optical Waveguides. s.l. : Academic Press, 2006. p. 555. 978-0-12-525096-2.
- OLINER, A.A., et al.** Guidance and Leakage Properties of a Class of Open Dielectric Waveguides: Part II - New Physical Effects. s.l. : IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1981. Vol. 29, 9, p. 9. 0018-9480.
- PANCHI HERRERA, Myriam Fabiola.** “Diseño de una red GPON para la empresa Cine Cable TV”. [Online] PUCE, 2016. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13176>.
- PATEL, J. S., et al.** Electrically tunable optical filter for infrared wavelength using liquid crystals in a Fabry–Perot étalon. s.l. : Appl. Phys. Lett, 1990. Vol. 57, 17.
- PERADA, J., & MARTIN, A.** Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones. s.l. : PEARSON EDUCACION, 2004. pp. 393-403. 9788420540085.

- PRODUCTS FIBER OPTIC NETWORK.** Single-mode Fiber vs. Multimode Fiber: Which to Choose? [Online] Septiembre 13, 2016. <https://www.fiberopticshare.com/single-mode-fiber-vs-multimode-fiber-choose-2.html>.
- RAMOS, A.** Diseño e implementación de una red de acceso con fibra óptica utilizando tecnología VDSL/FTTX para mejorar los servicios de telecomunicaciones, de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones Empresa Pública en Guano. [Online] 2019. <http://dspace.espech.edu.ec/handle/123456789/13354>.
- RAMOS, B.** Diseño de un Enlace WDM sobre la Red Troncal de Fibra Óptica Quito - Guayaquil de Andinatel S.A. [Online] ESPE, 2005. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/87>.
- RAMOS, E. P.** Simulador de ondas WDM (Optical Division Multiplexing) para el laboratorio de sistemas avanzados de telecomunicaciones. [Online] 2007. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/95>.
- SALEH, Bahaa E.** Fundamentals of Photonics, 3rd Edition. Boston : Wiley, 2019. ISBN: 9781119506874.
- SAMIR, Ahmed.** A seven-core-fiber spectral filter based on LP 01-LP 01 mode coupling. [Online] OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS-RAPID COMMUNICATIONS, Noviembre 2017. <https://www.researchgate.net/publication/321775859>.
- SENIOR, J. M.** Optical Fiber Communications: Principles and Practice. Harlow, England : Prentice Hall, 2009. ISBN: 978-0-13-032681-2.
- LIU, Shen, WANG, Yiping, LIAO, Changrui, WANG, Guanjun, LI, Zhengyong, WANG, Qiao, ZHOU, Jiangtao, YANG, Kaiming, ZHONG, Xiaoyong, ZHAO, Jing, & TANG, Jian.** High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry–Perot interferometer. China : Optics Letters, 2014. Vol. 39, 7, p. 1.
- SNYDER, A. W.** Coupled-Mode Theory for Optical Fibers. s.l. : Journal of the Optical Society of America, 1972. Vol. 62, 11, p. 11.
- SUDBO, A. S.** Film mode matching: a versatile numerical method for vector mode field calculations in dielectric waveguides. s.l. : Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A, 1993. Vol. 2, 3, p. 211.
- FELICI, T. P., GALLAGHER, D. F.** Improved waveguide structures derived from new rapid optimization techniques. United Kingdom : Photon Design, 2003. p. 69.
- TELECTRONIKA.** Fibra Óptica: principios y fabricación. [Online] Junio 28, 2018. <https://www.telectronika.com/articulos/fibra-optica/que-es-la-fibra-optica-principios-fabricacion-y-usos/>.

- TOALA, J.** Diseño de un módulo para el uso básico de la fibra óptica para la asignatura de telecomunicaciones de la carrera de Ingeniería en Computación y redes. [Online] 2019. <http://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/1520/1/UNESUM-ECU-REDES-2019-03.pdf>.
- VALLE, J.** Diseño de red pasiva de fibra óptica para servicios de telecomunicaciones y su modelo de gobierno para un edificio de comercios y oficinas. [Online] 2021. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/15776/>.
- MOHAMMED, W. S., SMITH, P. W., & X. G.** "All-fiber multimod interference bandpass filter". Opt. Lett, 2006, Vol. 31.
- WAYNE, Tomasi.** Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. [book auth.] PEARSON EDUCACIÓN. México : ISBN: 970-26-0316-1, 2003.
- HUO, Y., CHEO, P. K., & KING, G.** Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier. s.l. : Opt. Express, 2004. Vol. 12, 25, p. 25.
- OLAF, Z., JÜRGEN, K., PETER, E. Z., & DAWN, W. D.** Optical Short Range Transmission System. Belin : POF Handbook,, 2008. 978-540-76628-5.

ANEXOS

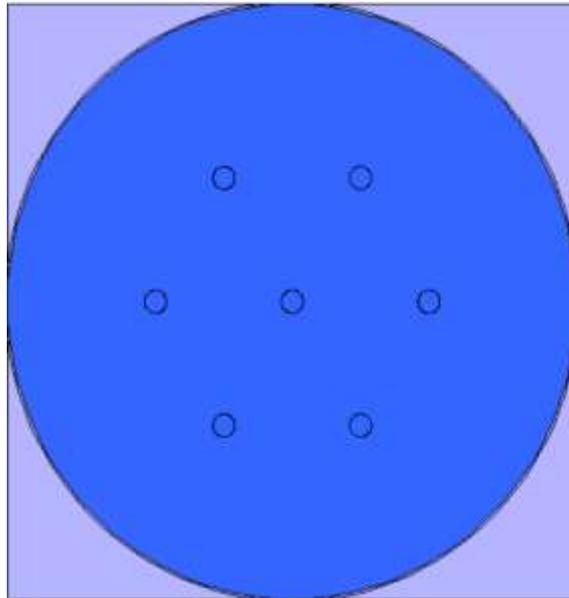
ANEXO A: DIFERENTES VARIABLES DE EXPERIMENTACION EN EL SIMULADOR.



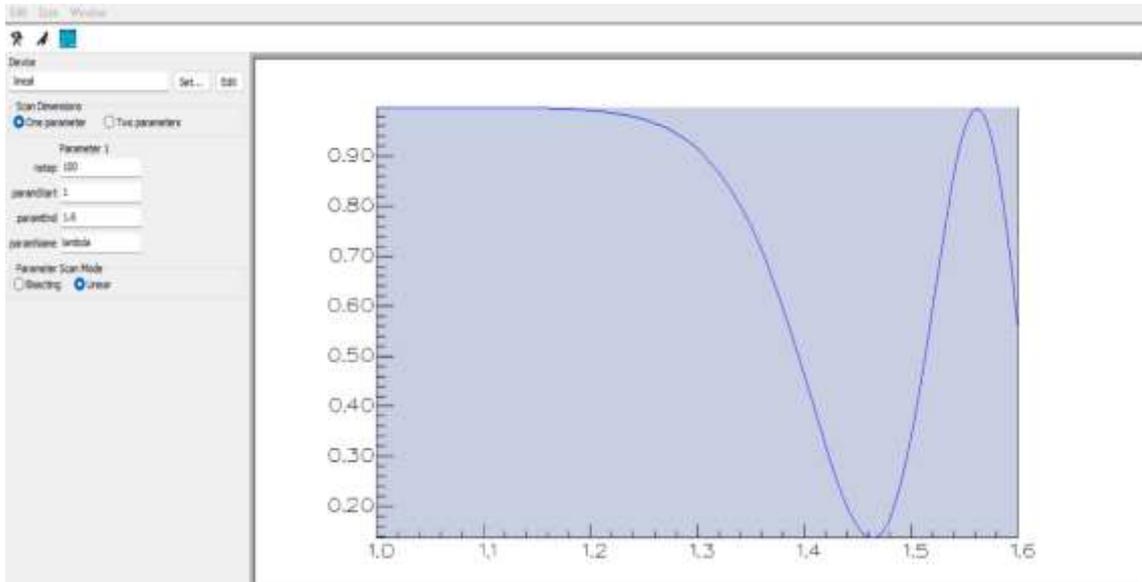
The screenshot shows a window titled "variables_elementos" with a menu bar containing "Edit" and "Export". Below the menu bar is a toolbar with icons for search, delete, add, and refresh. The main area contains a table with three columns: "Name", "Expression", and "Value".

Name	Expression	Value
ρ_0	4.8	4.8
ρ_{l1}	ρ_0/γ_E	0.576
ρ_{Co}	125	125
ρ_{Cl1}	ρ_{Co}/γ_E	15
FE	0.12	0.12
l	500000	500000
Z	0	0
z	0	0
d	30	30
lambda	1.6	1.6
x0	5000	5000
x1	5000	5000
x2	4800	4800
x3	5000	5000
n0	1.44	1.44
n1	1.445	1.445
n0	1	1

ANEXO B: DISEÑO DE LA SECCION MULTINUCLEO CON UNA CAPA DE AIRE PARA EXPERIMENTACION.



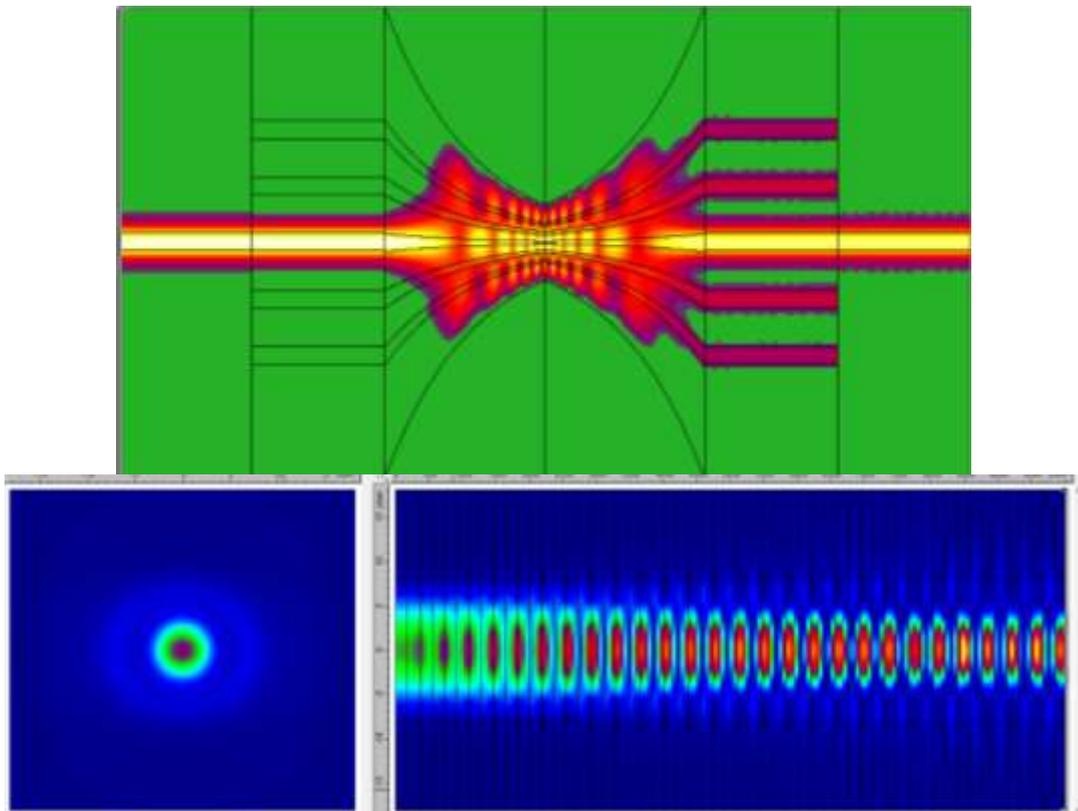
ANEXO C: RESPUESTA DEL FILTRADO OBTENIDO DEL SIMULADOR.



MANUAL

FIMMWAVE

MULTICORE



INDICE

1.	INTRODUCCION	10
2	GENERAR UN NUEVO PROYECTO	12
3	CREAR UNA FIBRA MULTICORE	15
3.1	Para la parte de multicore, se debe tener 7 cores, los cuales se agregan de la siguiente manera.17	
3.1.1	Para la parte del centro derecho se debe usar los siguientes valores y variables ...	19
3.1.2	Para la parte del centro izquierdo se debe usar los siguientes valores y variables.	21
3.1.3	Para la parte superior derecha se debe usar los siguientes valores y variables.....	22
3.1.4	Para la parte superior izquierda se debe usar los siguientes valores y variables ...	24
3.1.5	Para la parte inferior derecha se debe usar los siguientes valores y variables.	25
3.1.6	Para la parte inferior izquierda se debe usar los siguientes valores y variables	27
4	FIMMPROP	30
4.1	CREAR UN SMF.....	39

1. INTRODUCCION

Bienvenido al Manual de Guía de Ondas Circulares en Fimmwave. Este manual está diseñado para proporcionarte una guía paso a paso sobre cómo diseñar, simular y analizar guías de ondas circulares utilizando el software Fimmwave.

Fimmwave es una potente herramienta de simulación electromagnética utilizada para modelar y analizar dispositivos ópticos, como guías de ondas, fibras ópticas, acoplamientos y componentes fotónicos en general. En este manual, nos centraremos específicamente en las guías de ondas circulares, que son estructuras curvas utilizadas para transmitir señales ópticas con baja pérdida y mínima dispersión.

A lo largo de este manual, aprenderás los fundamentos teóricos de las guías de ondas circulares. Además, te familiarizarás con la interfaz de usuario de Fimmwave y las herramientas necesarias para crear y configurar tus propias guías de ondas circulares en el entorno de simulación.

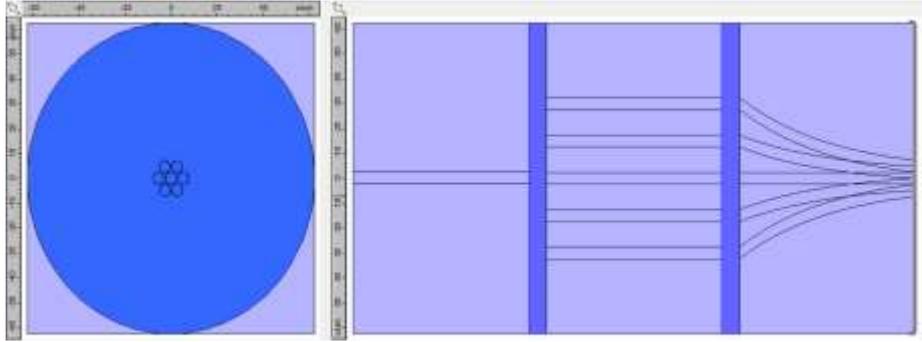
FIMMWAVE admite una variedad de diferentes editores de guía de ondas, adaptados para diferentes propósitos:

- La guía de ondas RWG, que puede definir “guías de ondas rectangulares”. Este es el formato de guía de ondas nativo para el Solucionador de FMM y el Solucionador de Índice Efectivo.
- La guía de ondas FWG, que puede describir fibras y otras fibras simétricas circulares guías de ondas
- La guía de onda MWG, que puede definir “guías de onda de geometría mixta”. Este forma de guía de ondas le permite definir una guía de ondas como una serie de formas, incluidas formas graduadas y perfiles 2D. Nos centraremos en guías de onda MWG y FWG.

La guía de onda MWG define una "guía de onda de geometría mixta". Esta forma de guía de ondas le permite definir una guía de ondas como una serie de formas geométricas. Cada forma puede ser una de:

- rectangulares
- elíptica
- polinomio
- fibra perforada

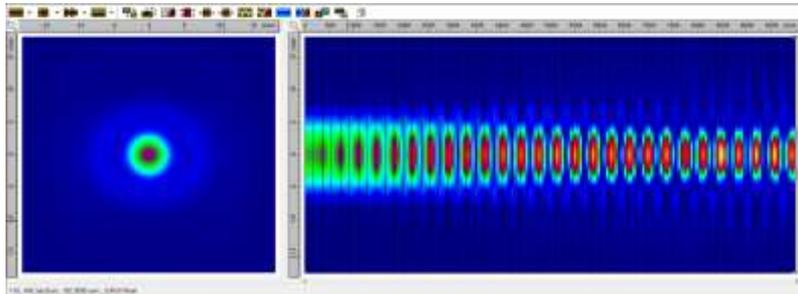
Las formas que defina pueden superponerse; por este medio se pueden crear formas bastante complejas. P.ej. para obtener guías circulares, compresión de las guías circulares. Aquí hay un ejemplo de lo que se puede lograr.



La guía de ondas FWG, esta forma define una guía de ondas de fibra de índice escalonado de simetría circular. De hecho hay 3 formas de la guía de ondas FWG:

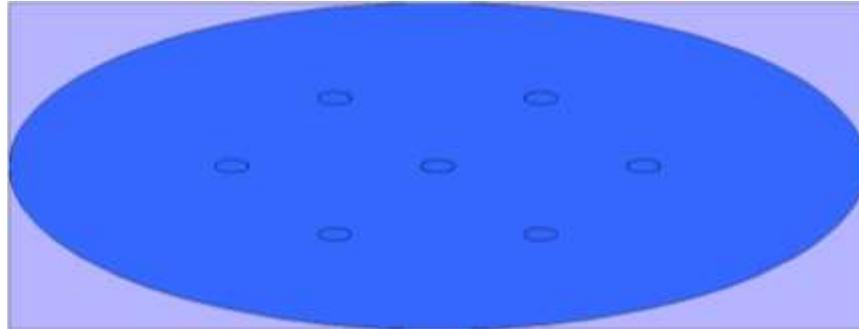
- Forma 1: Perfil de índice escalonado: la fibra está definida por una serie de capas, cada una de índice de refracción.
- Forma 2: Modo Gaussiano - la fibra se define simplemente por la forma de su fundamental Modo.
- Forma 3: perfil estriado: la fibra tiene un índice de refracción definido en puntos discretos n_i , y un spline cúbico se utiliza para obtener $n(r)$ en otras posiciones.

Aquí hay un ejemplo de lo que se puede obtener.

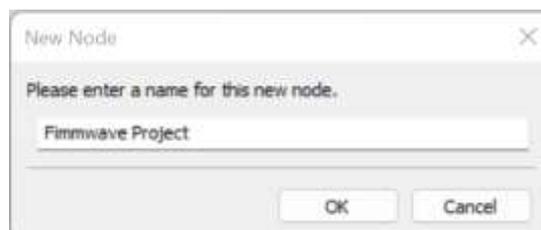


6. GENERAR UN NUEVO PROYECTO

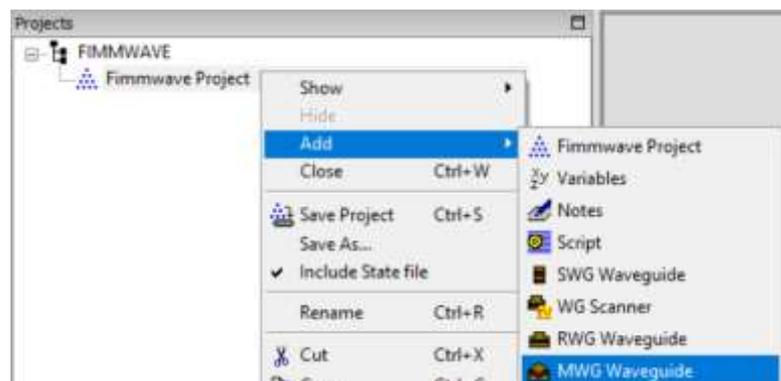
Aquí se realiza el proceso de creación de una fibra óptica multinúcleo de 7 núcleos, separados simétricamente, como se muestra a continuación.



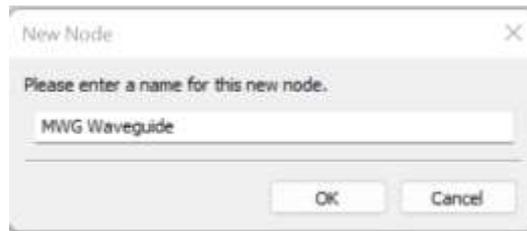
Clic en .



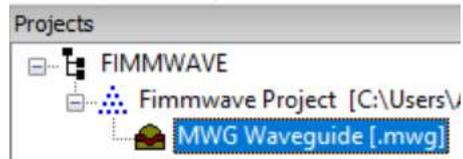
Clic derecho sobre el proyecto para agregar un modo.



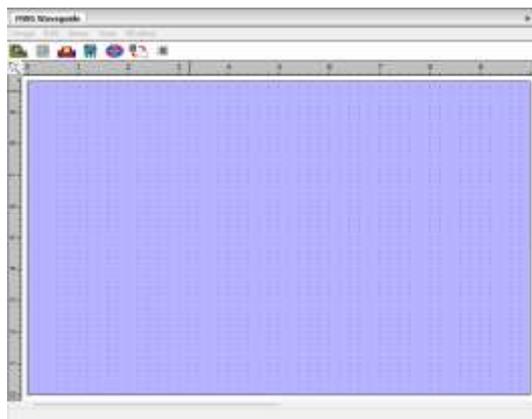
Dar un nombre y dar clic en OK.



El icono de la guía de onda  aparecerá a continuación.



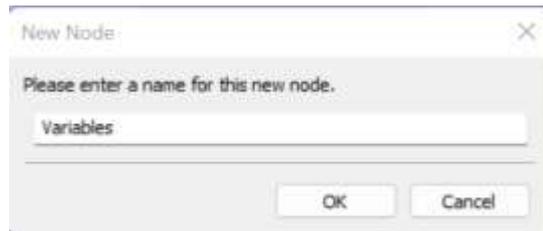
Doble clic sobre el nodo, debería aparecer lo siguiente.



Para un mejor funcionamiento se recomienda trabajar con variables. A continuación, se debe dar clic derecho sobre el proyecto -> add -> variables.



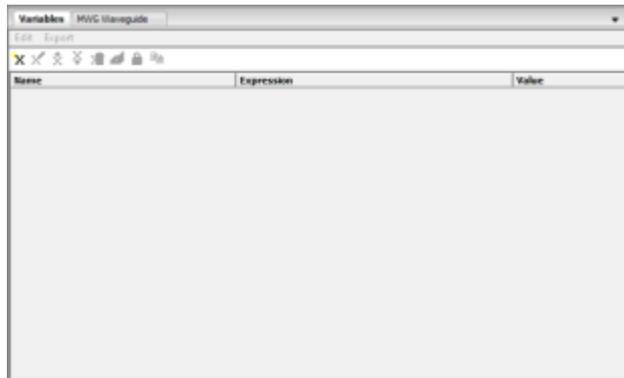
Escribir un nombre.



Doble clic sobre el nodo.



Debe aparecer de esta forma.



Para agregar una variable se debe dar clic en el botón .



Debe aparecer de esta forma.

Name	Expression	Value
L	0	0

Clic sobre el valor 0 para cambiarlo.

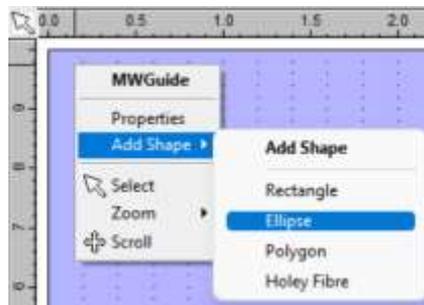


Name	Expression	Value
L		0

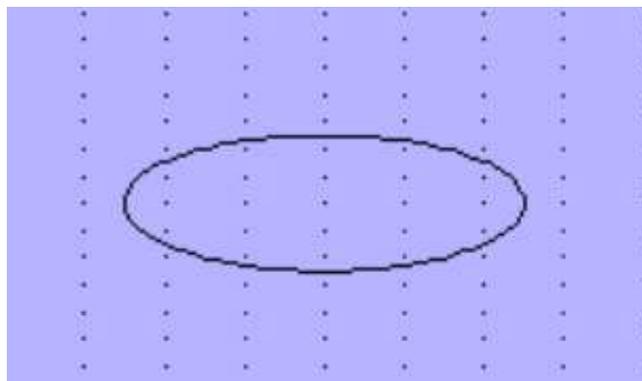
Nota: Se debe tomar en cuenta que todos los valores están en micrómetros

7. CREAR UNA FIBRA MULTICORE

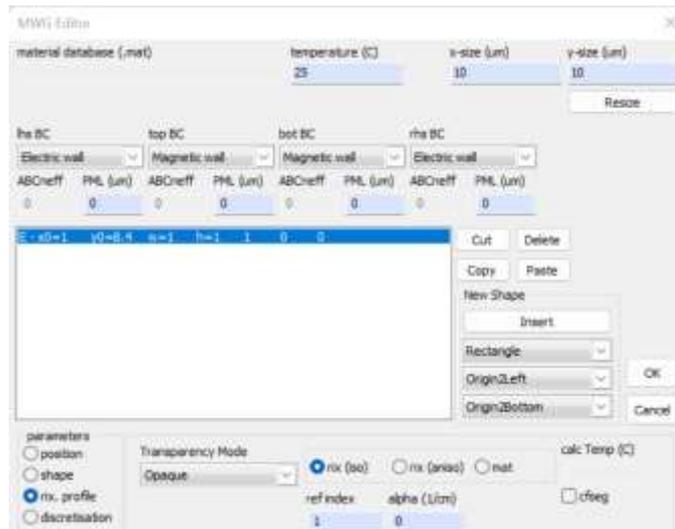
Clic derecho sobre el modo -> add shape -> ellipse.



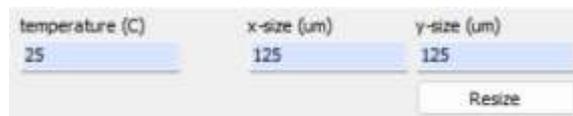
Debe aparecer de esta forma



Para editar los parámetros se debe dar clic en el siguiente botón  y debe aparecer la siguiente ventana.



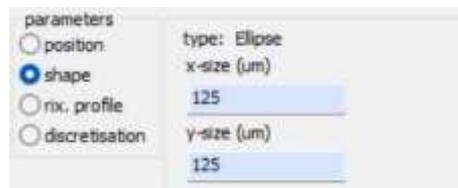
Procedemos a cambiar el valor en X y Y



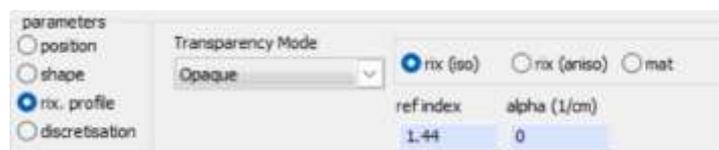
Procedemos a cambiar la posición.



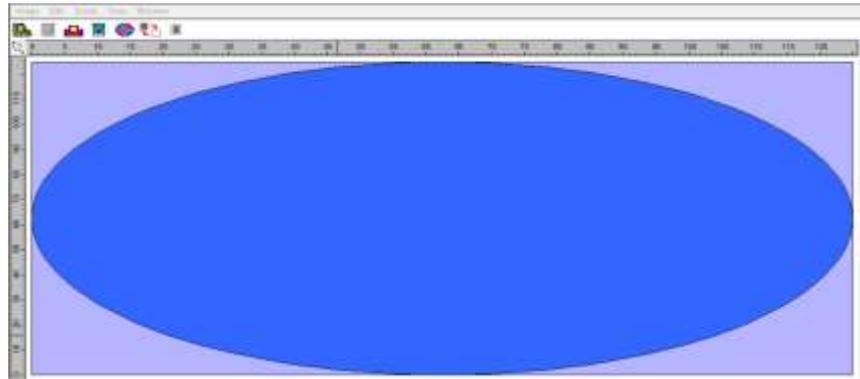
Cambiamos la forma, el valor debe ser el mismo que el valor en X y Y



Cambiamos el índice de reflexión.

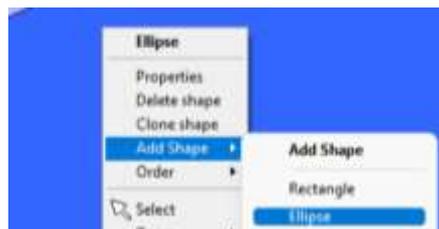


Damos clic en OK y se debe ver de la siguiente manera.

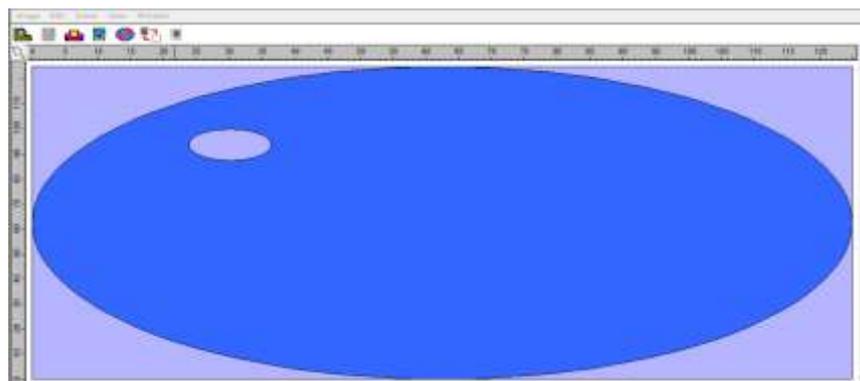


7.1 Para la parte de multicore, se debe tener 7 cores, los cuales se agregan de la siguiente manera.

Clic derecho sobre el modo -> add shape -> ellipse.



Se muestra de la siguiente forma.



Para editar los parámetros se debe dar clic en el siguiente botón .

Para la parte del centro se debe usar los siguientes valores y variables.

Posición:



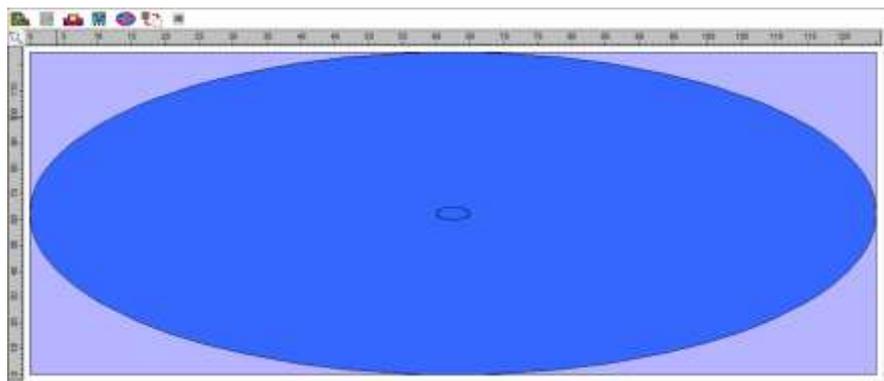
Cambiamos la forma con la siguiente variable dRo.



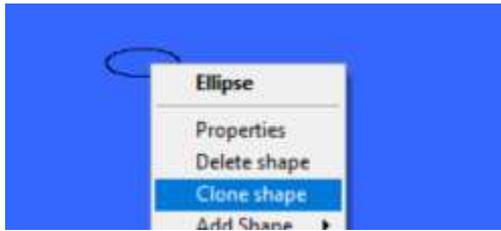
Cambiamos el índice de reflexión a 1.45 ya que el valor del core y el cladding deben ser distintos y activamos la casilla de **cfseg** (El indicador cfseg le permite especificar regiones de la sección transversal para usar para calcular el factor de confinamiento y el factor de llenado).



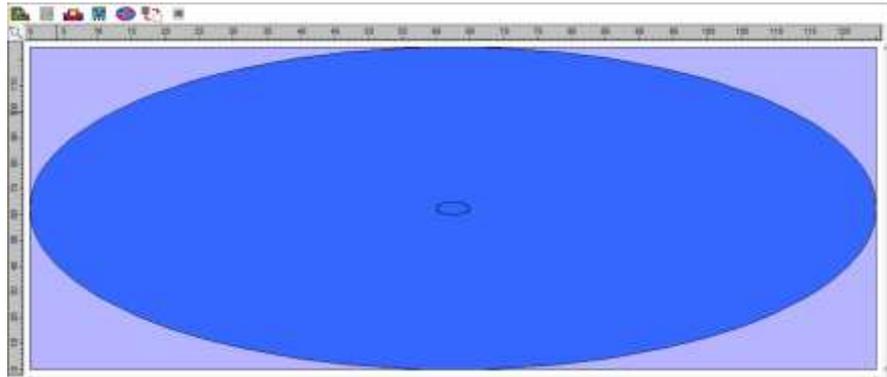
Damos clic en OK y se debe ver de la siguiente manera.



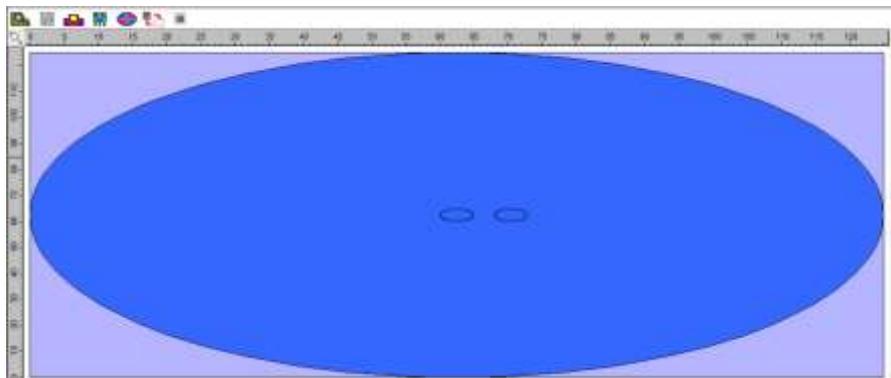
Para agilizar el proceso de creación de los cores se puede clonar y editar directamente, esto se hace de la siguiente forma. Clic derecho sobre el core central -> clone shape.



Se visualizará de la siguiente forma.



Clic sobre el core para moverlo.



Para editar los parámetros se debe dar clic derecho -> propiedades.



7.1.1 *Para la parte del centro derecho se debe usar los siguientes valores y variables*

Posición:

Se debe utilizar las variables:

$$X: dCo/2+d*\exp(\ln(FE)*Z)$$

$$Y: dCo/2$$

Siendo

Cladding(dCo): 125

Distancia entre cores (d):30

Factor de estiramiento (FE):0.16

Z: 0



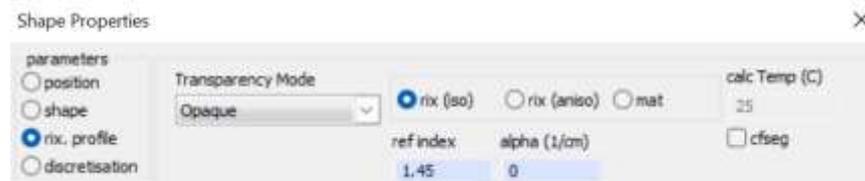
Cambiamos la forma con la siguiente variable:

$$X: dRo*\exp(\ln(FE)*Z)$$

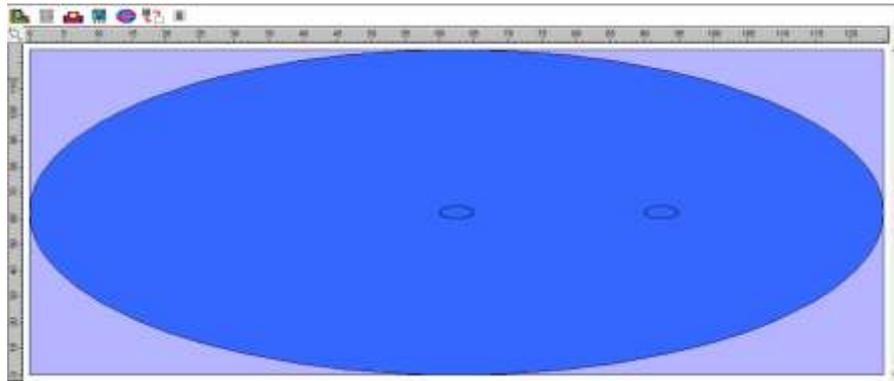
$$Y: dRo*\exp(\ln(FE)*Z)$$



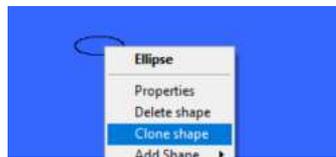
Cambiamos el índice de reflexión a 1.45 ya que el valor del core y el cladding deben ser distintos.



Damos clic en OK y se debe ver de la siguiente manera.



Clic derecho sobre el core central -> clone shape.



7.1.2 Para la parte del centro izquierdo se debe usar los siguientes valores y variables.

Posición:

Se debe utilizar las variables:

$$X: dCo/2-d*\exp(\ln(FE)*Z)$$

$$Y: dCo/2$$

Siendo

Cladding (dCo): 125

Distancia (d):30

Factor de estiramiento (FE):0.16

Z: 0



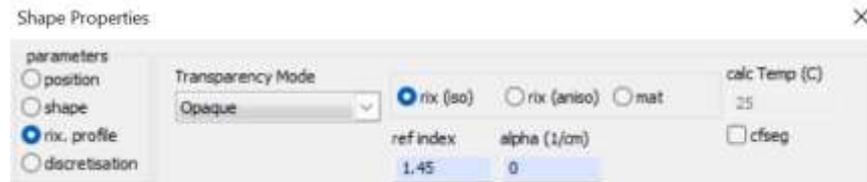
Cambiamos la forma con la siguiente variable:

$$X: dRo*\exp(\ln(FE)*Z)$$

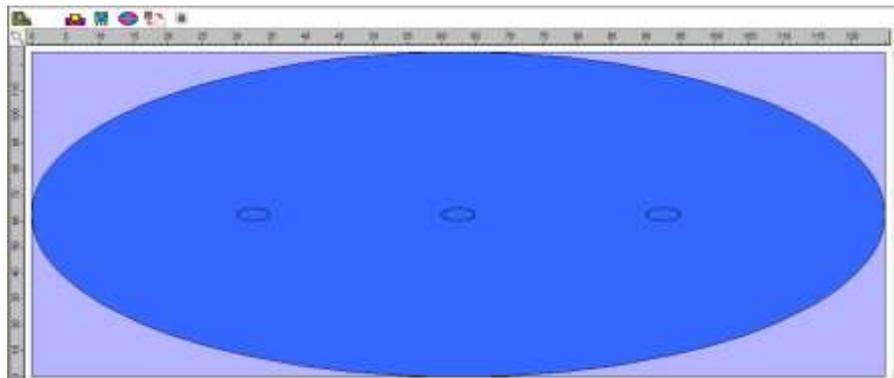
$$Y: dRo*\exp(\ln(FE)*Z)$$



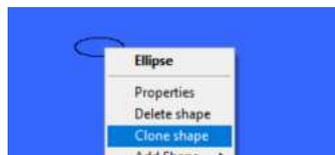
Cambiamos el índice de reflexión a 1.45 ya que el valor del core y el cladding deben ser distintos.



Damos clic en OK y se debe ver de la siguiente manera.



Clic derecho sobre el core central -> clone shape.



7.1.3 Para la parte superior derecha se debe usar los siguientes valores y variables.

Posición:

Se debe utilizar las variables:

$$X: dCo/2+d*\cos_PI/3*\exp(\ln(FE)*Z)$$

$$Y: dCo/2+d*\sin_PI/3*\exp(\ln(FE)*Z)$$

Siendo

Cladding (dCo): 125
 Distancia (d): 30
 Factor de estiramiento (FE): 0.16
 Z: 0



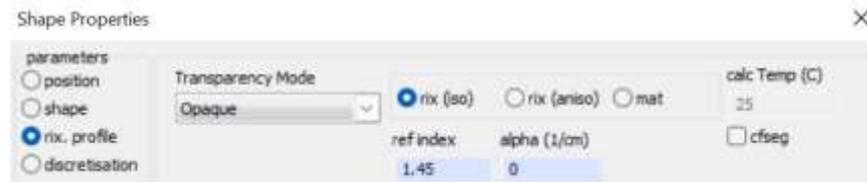
Cambiamos la forma con la siguiente variable:

$$X: dRo*exp(\ln(FE)*Z)$$

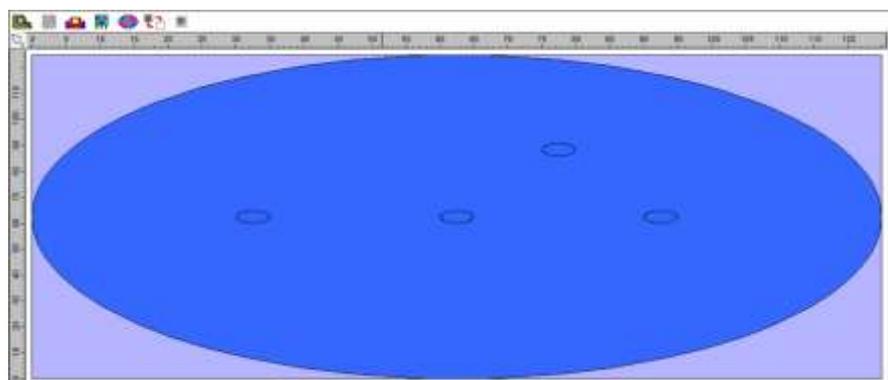
$$Y: dRo*exp(\ln(FE)*Z)$$



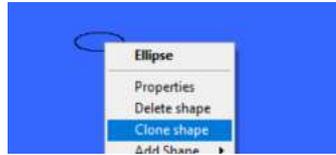
Cambiamos el índice de reflexión a 1.45 ya que el valor del core y el cladding deben ser distintos.



Damos clic en OK y se debe ver de la siguiente manera.



Clic derecho sobre el core central -> clone shape.



7.1.4 Para la parte superior izquierda se debe usar los siguientes valores y variables

Posición:

Se debe utilizar las variables:

$$X: dCo/2+d*\cos(120*_PI/180)*\exp(\ln(FE)*Z)$$

$$Y: dCo/2+d*\sin(120*_PI/180)*\exp(\ln(FE)*Z)$$

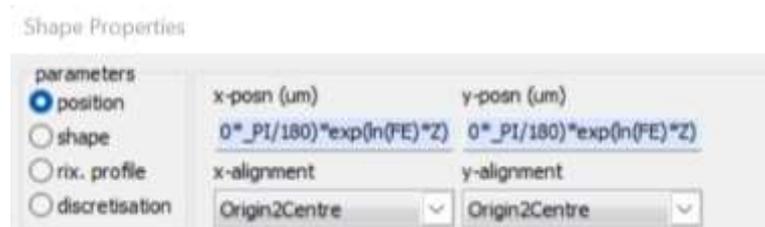
Siendo

Cladding (dCo): 125

Distancia (d): 30

Factor de estiramiento (FE): 0.16

Z: 0



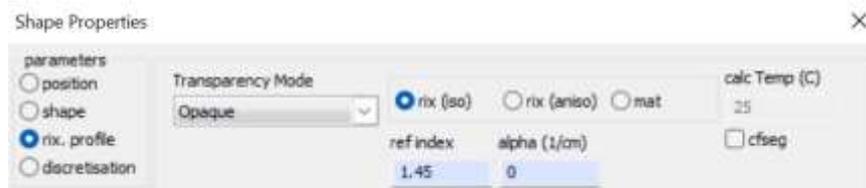
Cambiamos la forma con la siguiente variable:

$$X: dRo*\exp(\ln(FE)*Z)$$

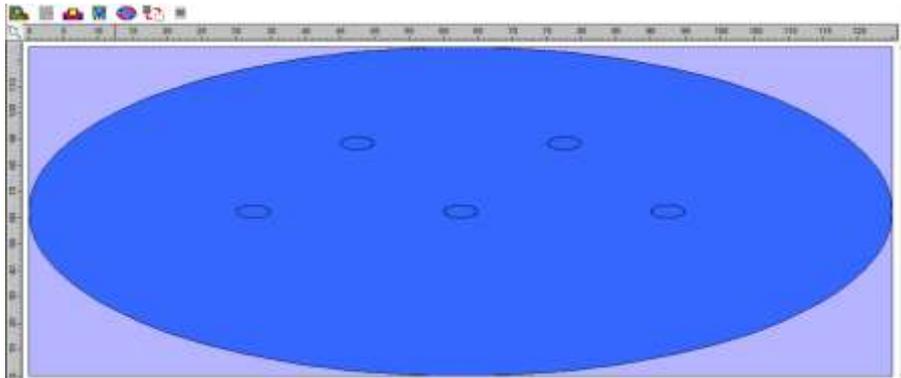
$$Y: dRo*\exp(\ln(FE)*Z)$$



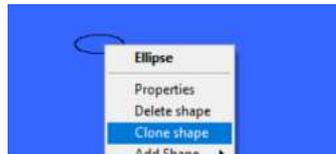
Cambiamos el índice de reflexión a 1.45 ya que el valor del core y el cladding deben ser distintos.



Damos clic en OK y se debe ver de la siguiente manera.



Clic derecho sobre el core central -> clone shape.



7.1.5 Para la parte inferior derecha se debe usar los siguientes valores y variables.

Posición:

Se debe utilizar las variables:

$$X: dCo/2+d*\cos(300*_PI/180)*\exp(\ln(FE)*Z)$$

$$Y: dCo/2+d*\sin(300*_PI/180)*\exp(\ln(FE)*Z)$$

Siendo

Cladding (dCo): 125

Distancia (d): 30

Factor de estiramiento (FE): 0.16

Z: 0



Cambiamos la forma con la siguiente variable:

$$X: dRo*exp(\ln(FE)*Z)$$

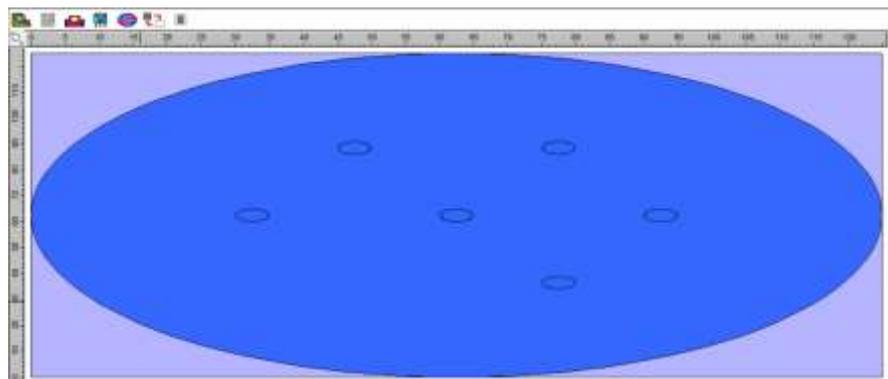
$$Y: dRo*exp(\ln(FE)*Z)$$



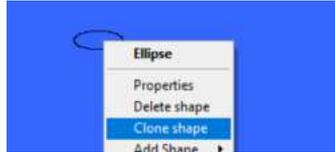
Cambiamos el índice de reflexión a 1.45 ya que el valor del core y el cladding deben ser distintos.



Damos clic en OK y se debe ver de la siguiente manera.



Clic derecho sobre el core central -> clone shape.



7.1.6 Para la parte inferior izquierda se debe usar los siguientes valores y variables

Posición:

Se debe utilizar las variables:

$$X: dCo/2+d*\cos(240*_PI/180)*\exp(\ln(FE)*Z)$$

$$Y: dCo/2+d*\sin(240*_PI/180)*\exp(\ln(FE)*Z)$$

Siendo

Cladding (dCo): 125

Distancia (d): 30

Factor de estiramiento (FE): 0.16

Z: 0



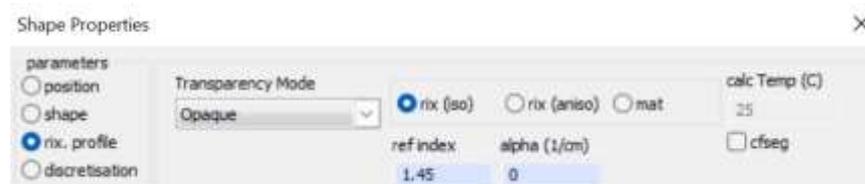
Cambiamos la forma con la siguiente variable:

$$X: dRo*\exp(\ln(FE)*Z)$$

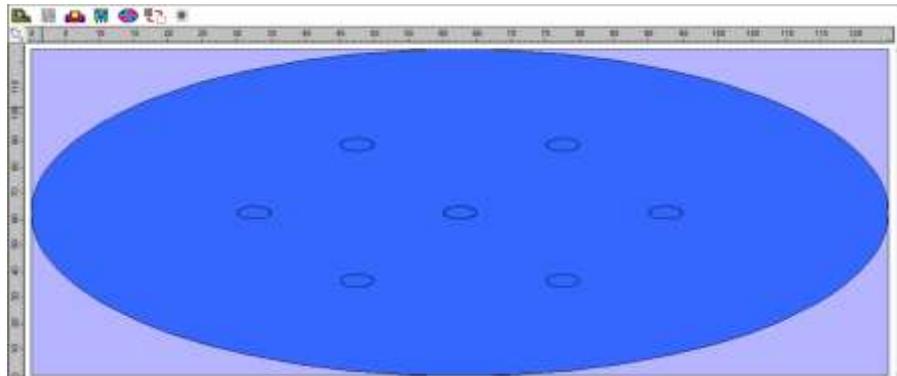
$$Y: dRo*\exp(\ln(FE)*Z)$$



Cambiamos el índice de reflexión a 1.45 ya que el valor del core y el cladding deben ser distintos.



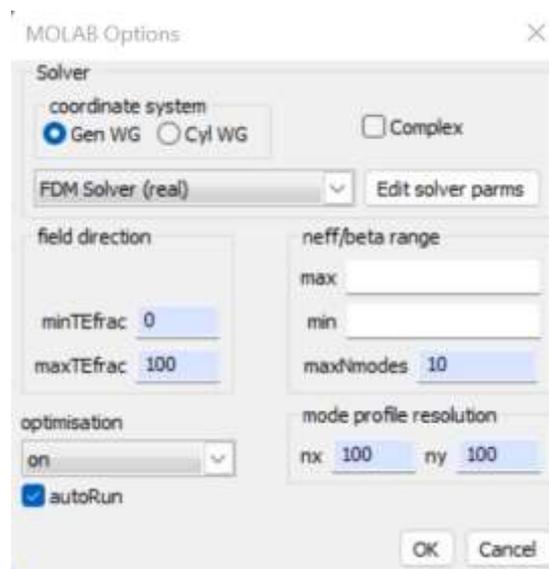
Damos clic en OK y se debe ver de la siguiente manera.



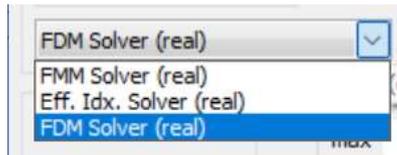
Las variables utilizadas se deben ver de la siguiente forma:

Name	Expression	Value
dCo	125	125
dRo	4.8	4.8
Z	0	0
fE	0.16	0.16
d	30	30

Una vez realizado todos los pasos anteriores procedemos a dar clic en el botón  para escoger el modo en el que se va a trabajar, a continuación, se debe ver el siguiente panel.



Haga clic en la flecha desplegable en el cuadro Solver. Esto revelará la lista de solucionadores reales disponibles en coordenadas cartesianas en FIMMWAVE.

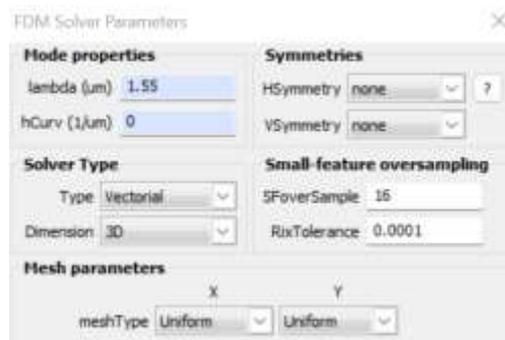


Tenga en cuenta que, si marca la casilla Complejo, accederá a la lista de los solucionadores de modo complejo.



Nota: Para la simulación de fibra multicore escogemos el modo FDM ya que proporciona el solucionador más potente de FIMMPROP, gracias a su capacidad para calcular superposiciones de modos muy rápidamente.

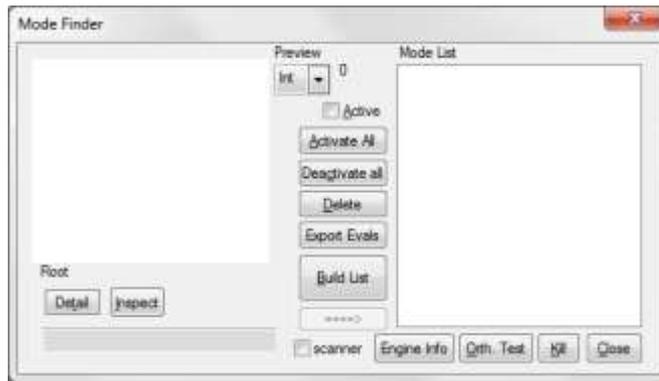
Clic en el botón **Edit solver parms** esto muestra el panel del resolvidor FDM, donde agregaremos la variable de lambda con un valor de 1.55



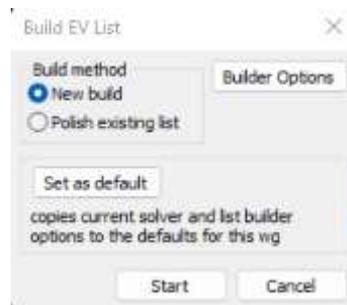
Clic OK.



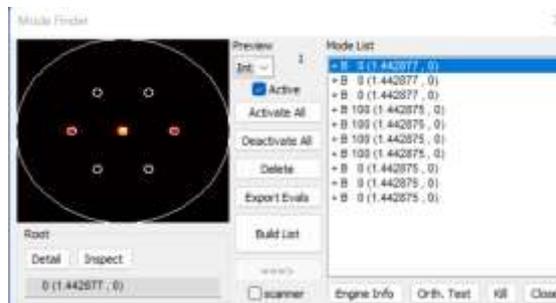
A continuación, dar clic en el botón  para encontrar los modos. El programa hará algunos cálculos preliminares y después de un breve retraso, aparecerá el panel Mode Finder.



Clic en **Build List** y seleccionar **New build -> Start**.



Se debe ver de la siguiente forma.

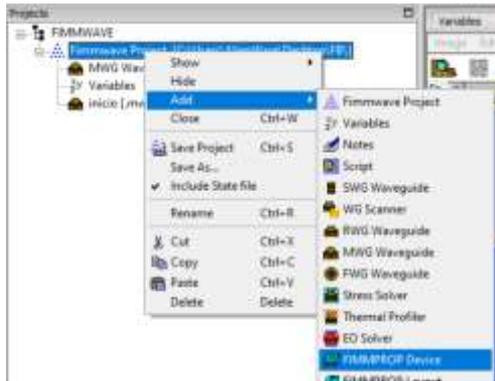


Clic en close para guardar la lista.

Nota: Esto permite ver como se está propagando cada modo en los cores. Se debe tomar en cuenta que se debe agregar tanto al inicio como al final un puerto por lo cual se debe crear otro nodo.

8. FIMMPROP

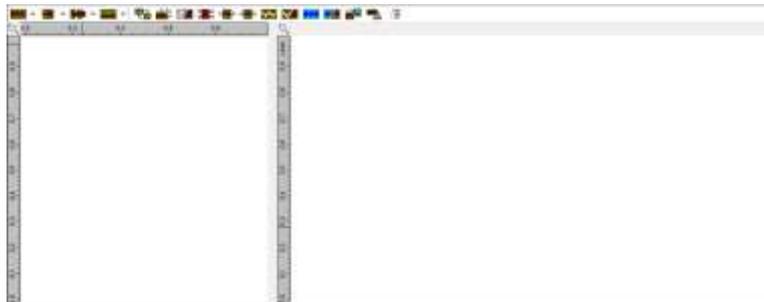
Se procede a crear un nodo de fimmprop de la siguiente forma.



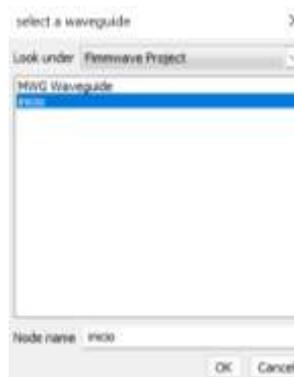
Doble clic sobre el nodo creado.



Aparecerá la siguiente ventana.



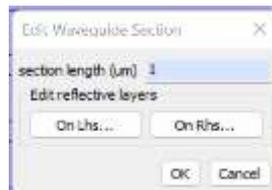
Se procederá a agregar un nodo de la siguiente forma dando clic en el siguiente botón .



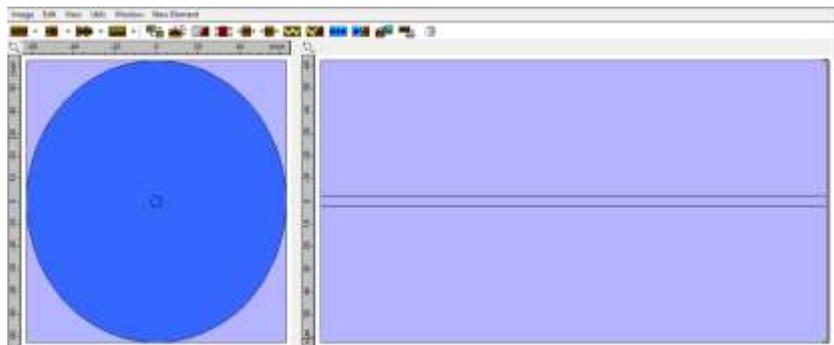
Se elige el nodo creado y se da clic en OK.



Clic en Accept.



Agregar un valor para la longitud en micrometros y dar clic en OK. Se debe ver lo siguiente.



Si se desea agregar otro nodo, se debe hacer lo siguiente: Dar clic en el botòn  para realizar una juntura.



Clic en OK.

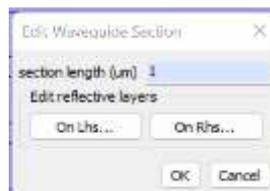
Se procederá ha agregar un nodo de la siguiente forma dando clic en el siguiente botòn .



Se elige el nodo creado y se da clic en OK.



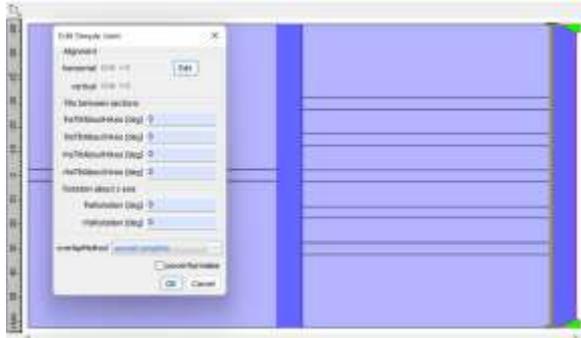
Clic en Accept.



Agregar un valor para la longitud en micrometros y dar clic en OK. Se debe ver lo siguiente.



Si se desea agregar un modo en forma de taper se realiza el siguiente proceso: Dar clic en el botón  para realizar una junta.



Clic en OK.

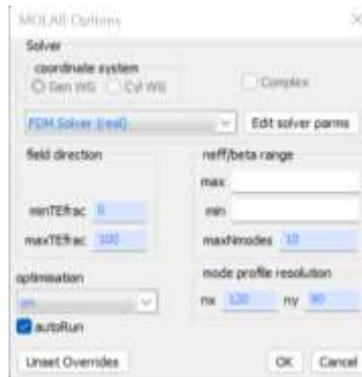
Clic en la flecha de botón  para desplegar lo siguiente.



Clic en . Aparecera lo siguiente.



Se elige el nodo creado y se da clic en OK. Y se puede visualizar la ventana de las opciones con los parámetros antes seleccionados en el modo MWG.



Clic en OK y aparecerá la siguiente ventana para editar los parámetros del taper.



Desplegar el Taper shape y seleccionar.

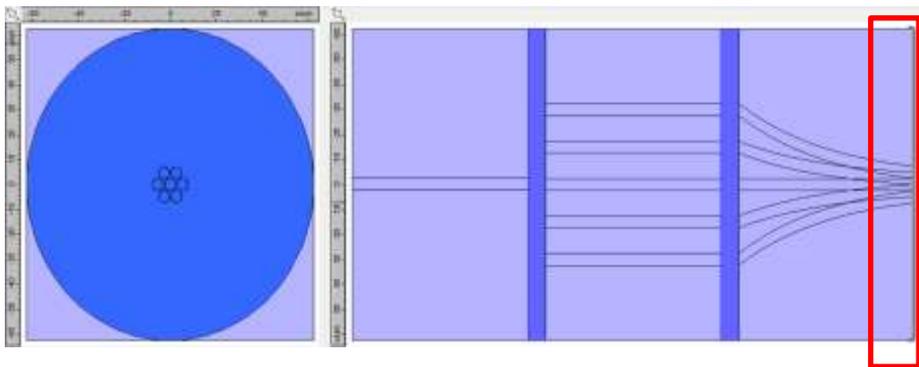


Clic en OK y debe verse de la siguiente forma.

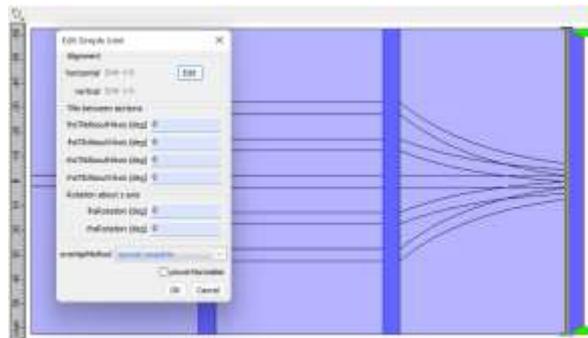
Al inicio:



Al final:

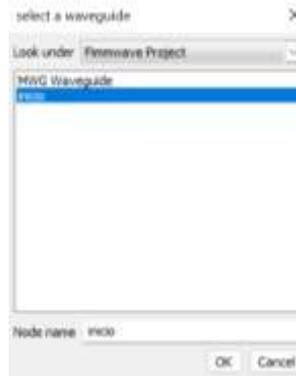


Se procederá a agregar el puerto del último de la siguiente forma. Dar clic en el botón  para realizar una junta.



Clic en OK.

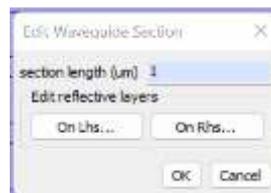
Clic en el botón  - Y debe aparecer la siguiente ventana.



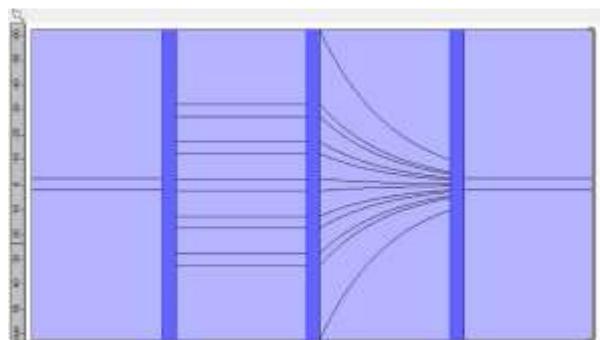
Se elige el nodo creado y se da clic en OK.



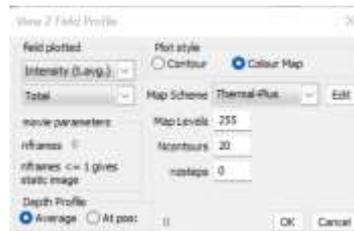
Clic en Accept.



Agregar un valor para la longitud en micrometros y dar clic en OK. Se debe ver lo siguiente,



A continuación, clic en el botón .

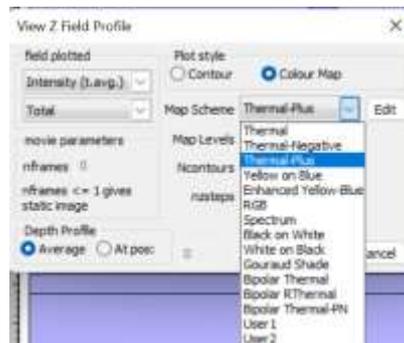


Clic en Edit, aquí se puede editar la distorsión de la propagación, en este caso se pondrá el valor de 0.2

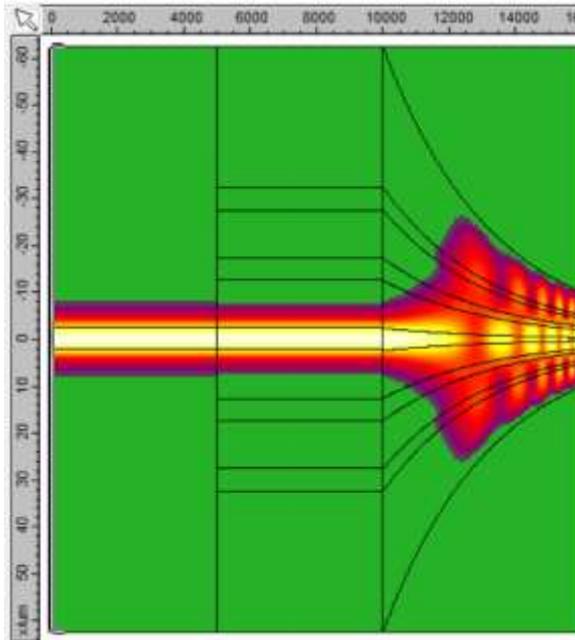


Clic en OK.

Si desplegamos la parte de Map Scheme podemos cambiar el color que deseemos para la propagación.

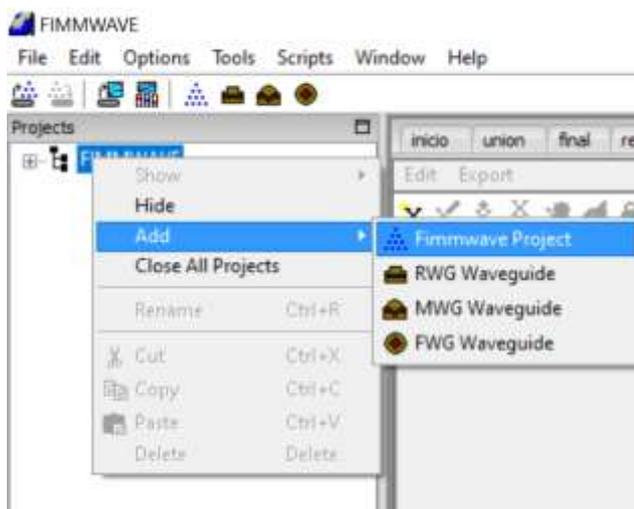


Clic OK, lo cual hará que la simulación empiece. Lo cual se muestra de la siguiente forma.

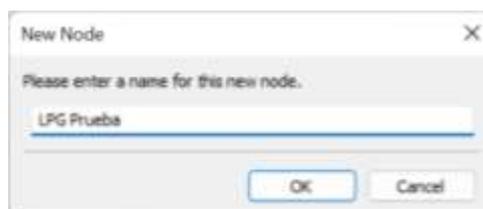


8.1 CREAR UN SMF

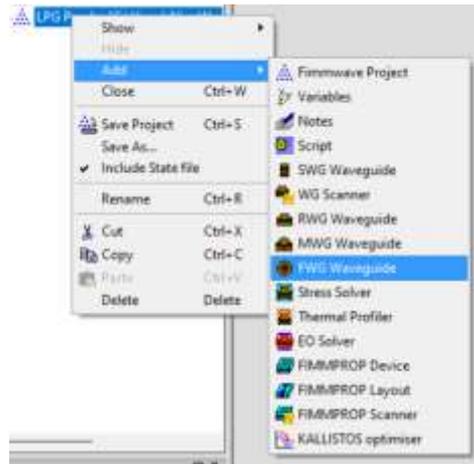
Creamos un Fimmwave Project de la siguiente manera:



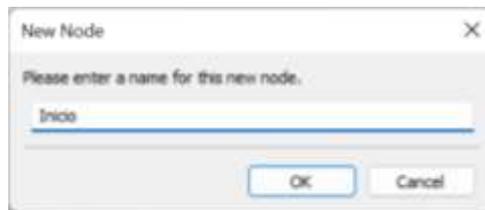
Escribimos un nombre:



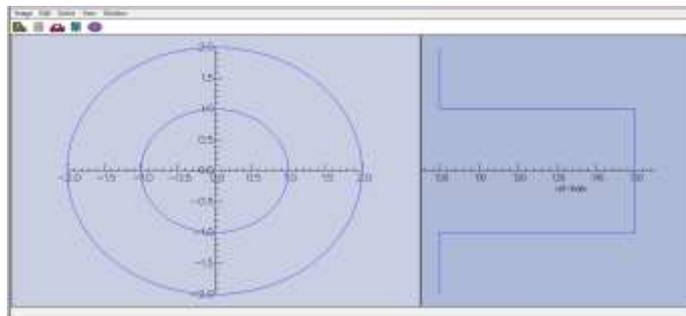
Clic derecho en el proyecto:



Escribimos el nombre, para este ejemplo será:

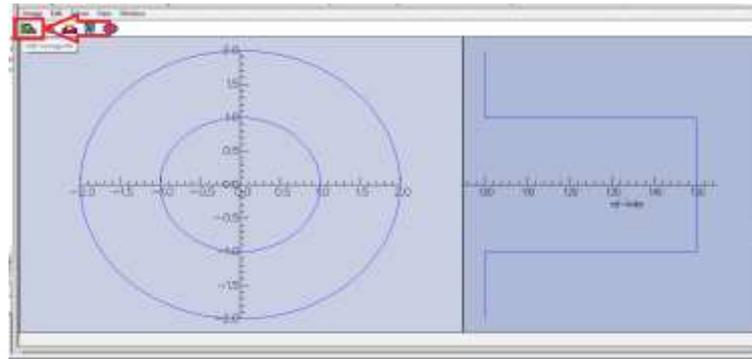


Se generará la siguiente interfaz:

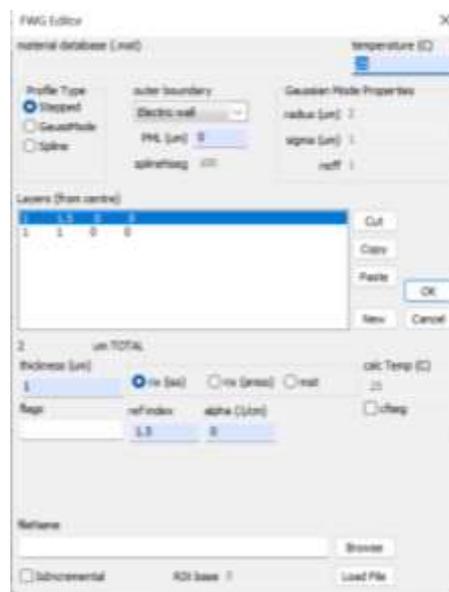


En donde nuestra circunferencia exterior representa el revestimiento(cladding) y la interna nuestro núcleo (core), aquí se puede agregar n circunferencias dependiendo de nuestra necesidad de simulación.

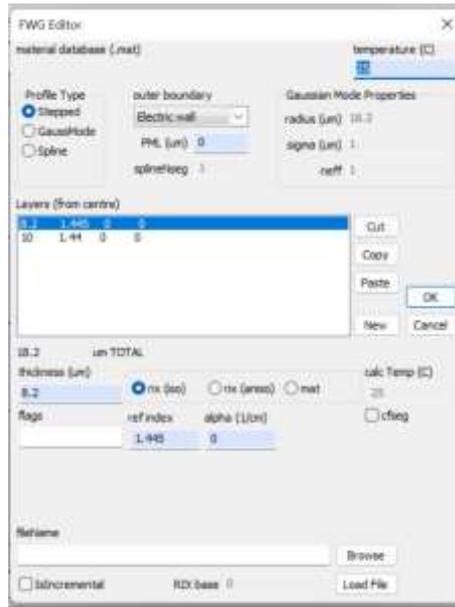
Nos dirigimos a “edit waveguide” de la siguiente manera:



Nos aparecerá la siguiente ventana “FWG Editor”, con sus valores por defecto luego de la creación del archivo.



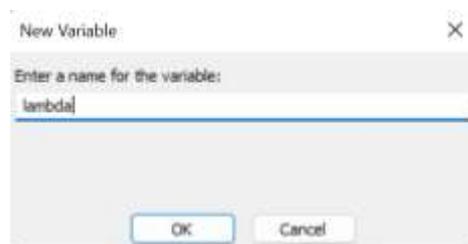
Aquí podremos seleccionar el tipo de guía que deseamos simular, temperatura, espesor y un índice de refracción. En este caso nos enfocaremos en editar **las capas, espesor y índice de refracción**. Para este ejemplo se utilizará dos capas.



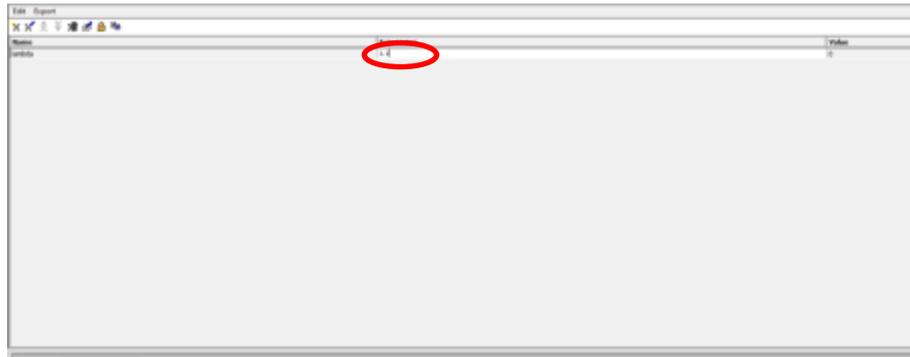
Creemos una asignación para declarar variables para facilitar el manejo de los distintos valores que utilizemos.



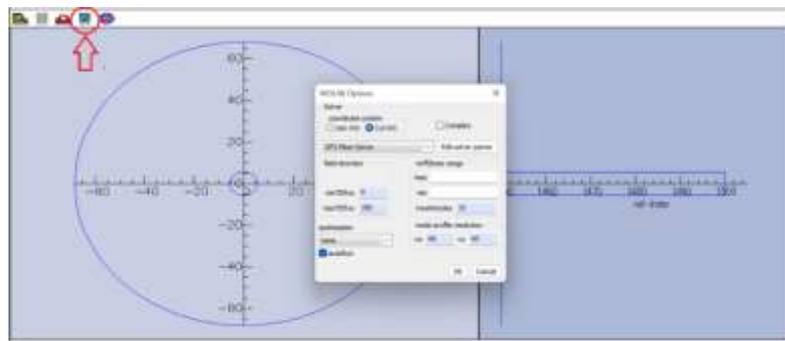
Ingresamos el nombre:



Ingresaremos 1.1 para este ejemplo:



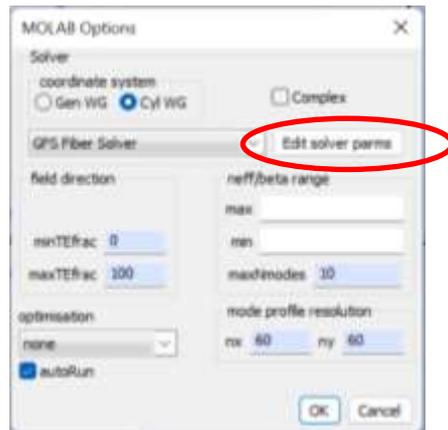
Ingresamos a “MOLAB OPTIONS”.



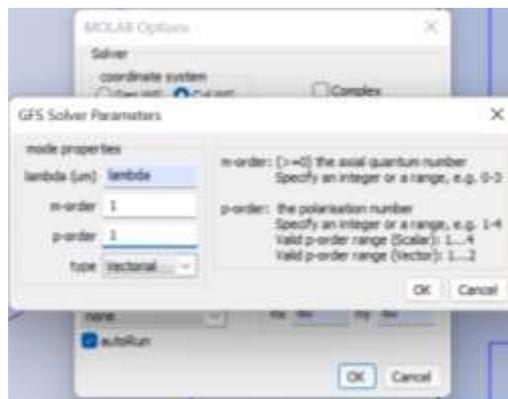
En este paso vamos a elegir el solucionador que sea de nuestro interés para la simulación:



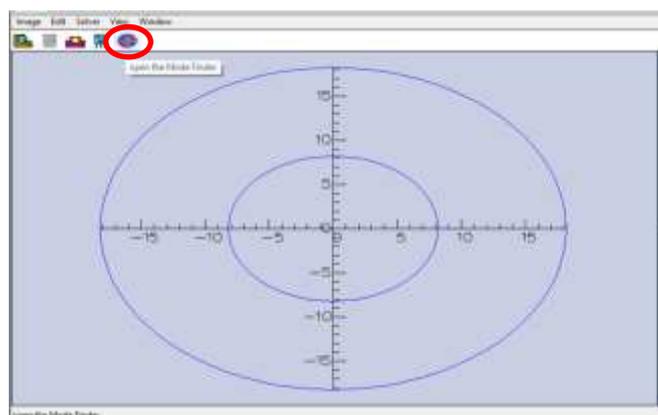
Se utilizará el siguiente:



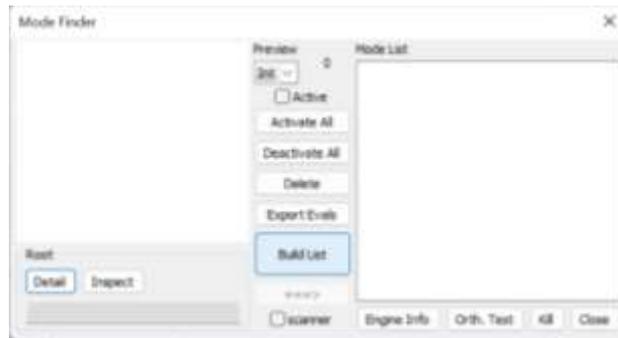
Ingresaremos a editar parámetros del solucionador e ingresaremos la variable creada anteriormente con el valor “m” y “p” necesarios:



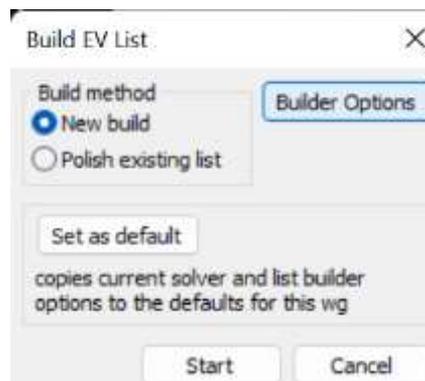
Clic en “Mode Finder”.



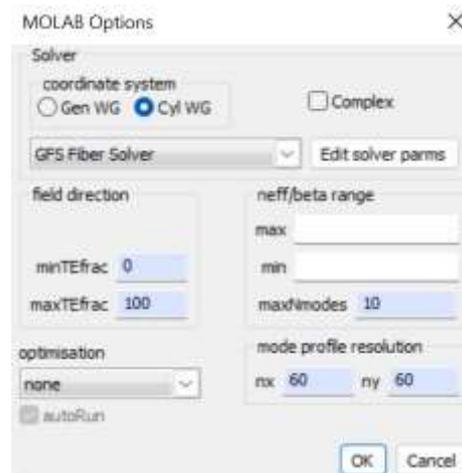
Se abrirá la siguiente ventana:



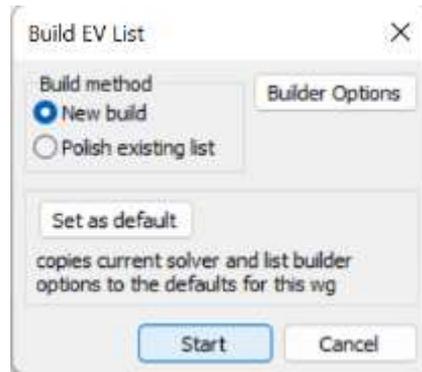
Clic en “Builder Options”.



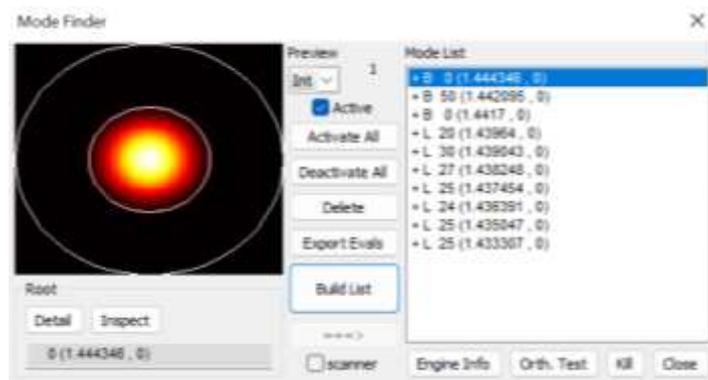
Se generará la siguiente interfaz, parecida a la ya utilizada anteriormente, en este caso de igual manera se ingresará a editar parámetros del solucionador e ingresaremos los valores colocados en la sección anterior y los maxNmodes será cantidad de modos que se generará:



Clic en “Start”.

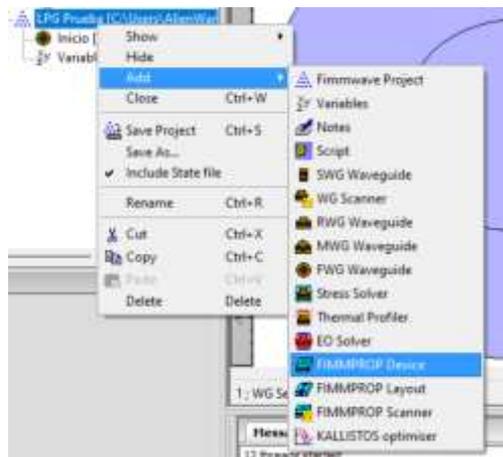


Se procesarán los modos de propagación de la fibra, para este caso se ingresaron un $\text{maxNmodes}=10$.

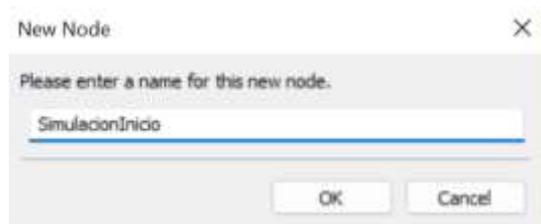


Finalizamos la configuración en esta sección.

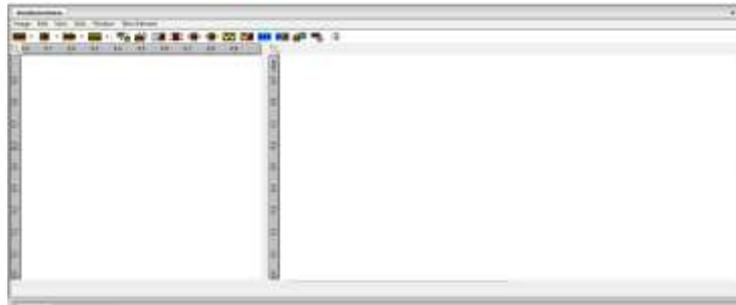
Nos dirigimos a nuestro proyecto creado inicialmente, clic derecho y nos dirigimos a “FIMMPROP Device”:



Colocamos el nombre:



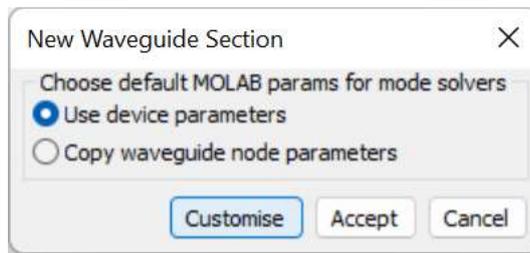
Se abrirá la siguiente interfaz, ingresamos a:



Seleccionamos nuestro archivo LPG que diseñamos y clic en ok:

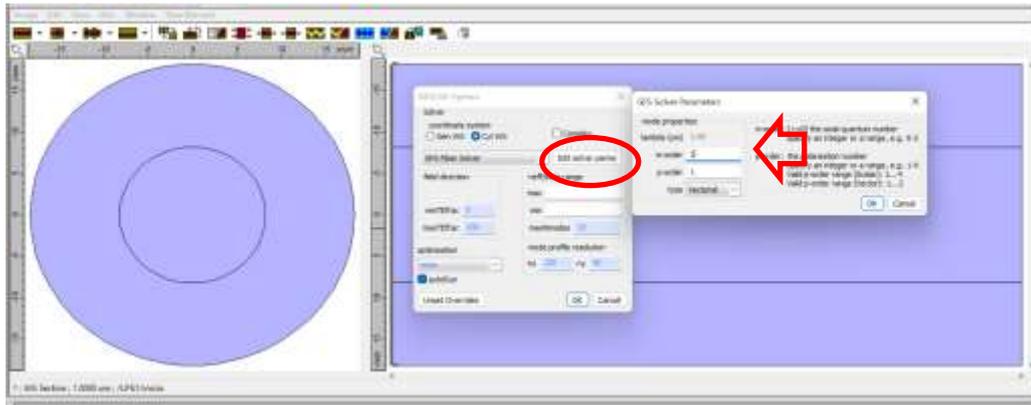


Clic en "Customise":



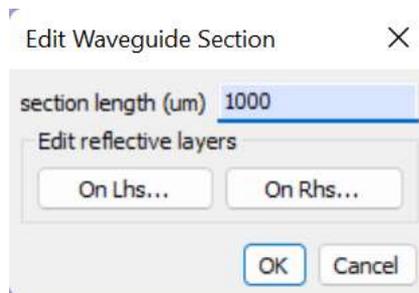
Si todo se generó y se muestra lo siguiente:

configuro correctamente

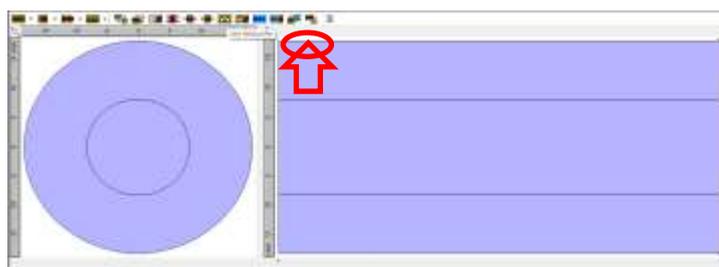


En la siguiente ventana de "MOLAB Options" verificaremos que los valores de "m" y "p" sean los correctos.

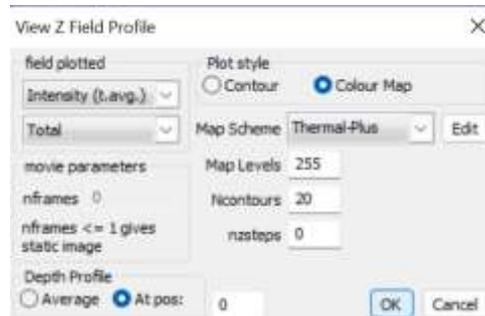
Ingresamos la longitud que va a tener nuestra fibra se fijara un valor de 1000 μm :



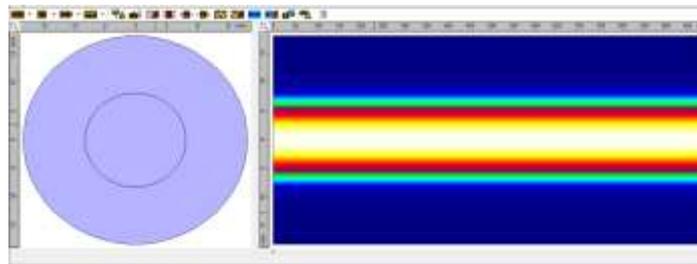
Daremos clic en "view field profile":



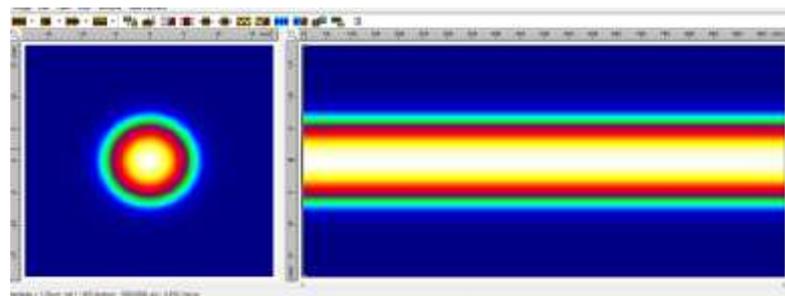
En la siguiente interfaz se seleccionara lo siguiente, se utilizara “Intensity” y “Total” para los campos, y Thermal-Plus para el color de propagación.



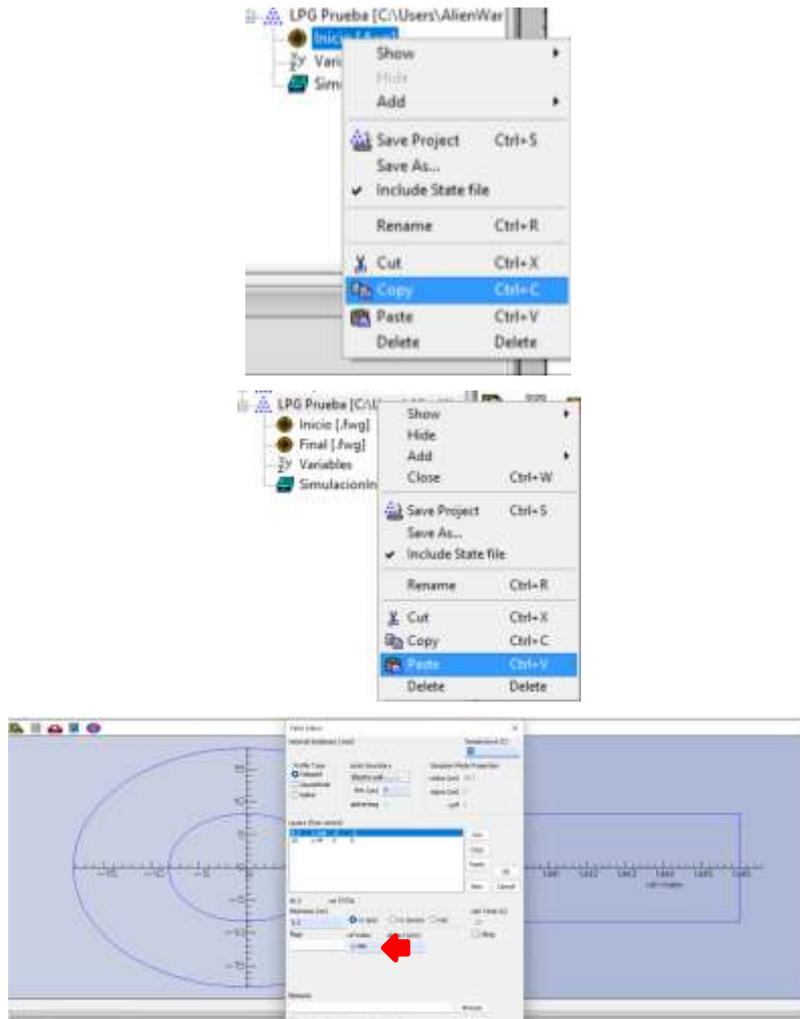
Finalmente se generará la propagación por la fibra:



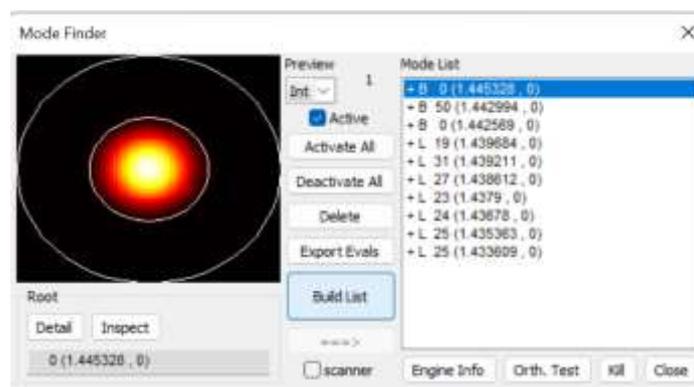
Podemos dar clic en cualquier parte de nuestra fibra y obtendremos una grafica en 2D de modo de propagación, guiándonos por la intensidad de los colores.



Para observar de una mejor manera la propagación de la onda, crearemos otra sección idéntica a nuestro archivo LPG denominado “Inicio”, para minorar los pasos podemos copiar y pegarlo en nuestro proyecto y generar otro archivo con una variación en el coeficiente de reflexión, de la siguiente manera:



Del mismo modo solo ejecutaremos el “Mode Finder” para obtener los 10 valores necesarios para la simulación de la fibra.

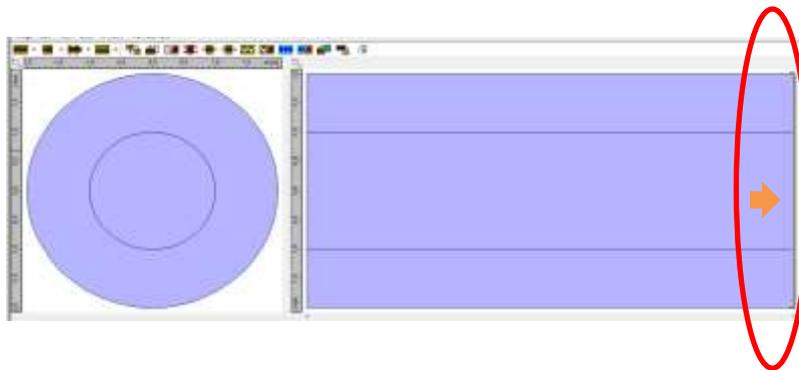


Crearemos otro archivo en el proyecto “FIMMPROP Device”, para unir estos dos nuevos archivos generados y observar el comportamiento entre estas dos con la pequeña variación en el coeficiente de reflexión.

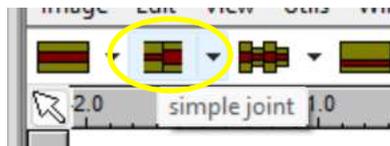


Se puede observar que para generar nuevamente la simulación aparecerán los archivos que tengamos generados en el proyecto con su respectivo nombre.

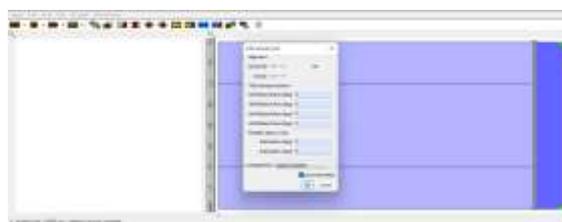
Una vez generado el archivo Inicio, se recomienda dar clic izquierdo en el borde final de la fibra, de la siguiente manera:



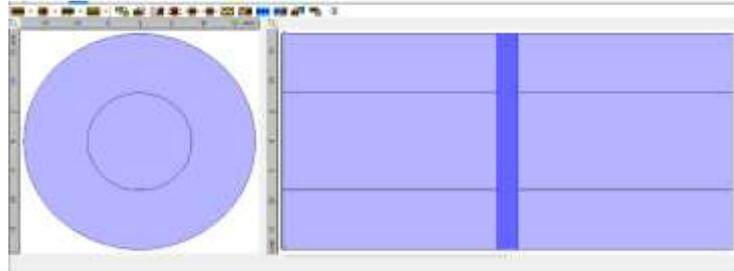
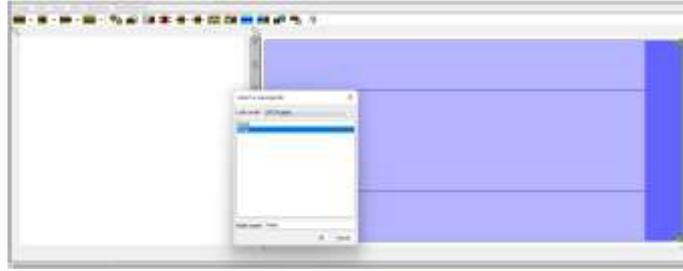
Nos dirigimos:



Y seleccionaremos lo siguiente, observando que unos triángulos de color verde han aparecido en los extremos en la parte final de la fibra.

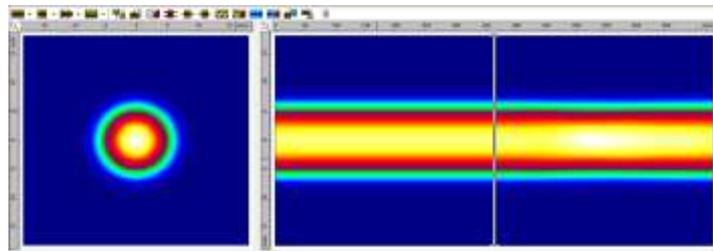


Repetimos el proceso inicial, con la diferencia que en este caso se ingresara el segundo archivo creado "final" configuraremos de igual manera que se configuro el primer archivo.



Si todo se configuro correctamente se obtendrá la siguiente fibra, unida por dos secciones con la variación en una ya mencionada.

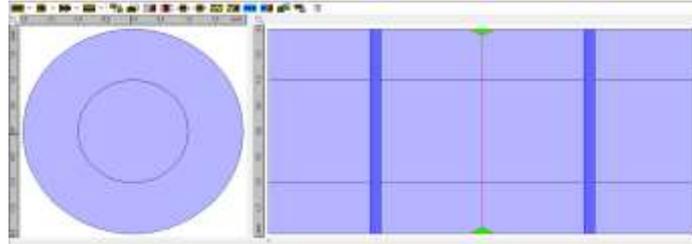
Ejecutaremos la acción “view field profile” y se obtendrá la fibra simulada.



Se puede observar que en la segunda sección de la fibra, en la mitad existe una variación en los colores de propagación siendo de un tono más blanco, verificando el comportamiento en función del coeficiente de reflexión.

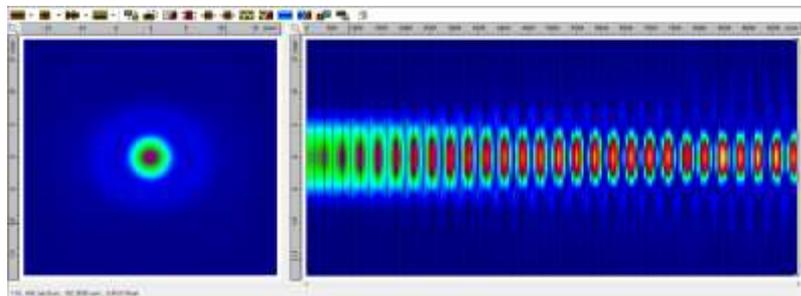
Vamos observaremos este comportamiento del par de fibras creadas, pero repitiendo el par de fibras de tal podamos replicarlo n veces el tipo de fibra que necesitemos, dependiendo de nuestras condiciones de diseño.

Para este ejemplo se recomienda crear nuevamente otro “FIMMPROP Device” con el nombre deseado, para este caso lo que haremos de una manera manual, se realizara un barrido de izquierda derecha sin soltar el clic izquierdo hasta finalizar toda la fibra y presionaremos ctrl+C, nos colocaremos en el extremo final de fibra y presionaremos ctrl+v.



Este proceso se puede repetir las veces que se necesite analizar el comportamiento de la propagación por la fibra, de la misma manera considerar el procesamiento computacional que puede requerir para realizar esta simulación.

Para finalizar este ejemplo de LPF, se ejecutará un archivo “FIMMPROP Device” de 110 secciones con el par de fibras ya creadas anteriormente, teniendo una periodicidad de este par de fibras respectivamente 110 veces.





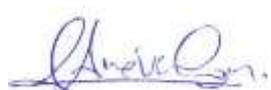
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 09/11/2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: MARCELO ADRIAN ALTAFUYA CHILA
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
Carrera: TELECOMUNICACIONES
Título a optar: INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
f. Analista de Biblioteca responsable:  Ing. Fernanda Arévalo M.

