



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Desarrollo de un Sistema de Acople de Modos a una
Fibra de Pocos Modos para la Multiplexación por
División Modal Usando un Modulador Espacial de
Luz de Microespejos**

Roobert David Gallego Ruiz
Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería
Medellín, Colombia

2021



Desarrollo de un Sistema de Acople de Modos a una Fibra de Pocos Modos para la Multiplexación por División Modal Usando un Modulador Espacial de Luz de Microespejos

Tesis de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones

Presentado por:

Roobert David Gallego Ruiz

Director:

Nelson Alonso Correa Rojas

Magíster en Ciencias – Física

Co-Director:

Juan Felipe Botero Vega

Doctor en Telemática

Asesora:

María Isabel Álvarez Castaño

Magíster en Ciencias – Física



**Facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia
Medellín, 2020**

Agradecimientos

A los profesores María Isabel Álvarez Castaño (asesora) y Nelson Alonso Correa Rojas (director) por guiarme y apoyarme en el desarrollo de este trabajo, por su paciencia, consejos, amistad, dedicación, enseñanza y por ese espíritu de búsqueda inagotable de conocimiento que me contagiaron.

Al profesor Juan Felipe Botero Vega (codirector), por las múltiples ayudas y recomendaciones ofrecidas cuando se presentaron situaciones que impidieron continuar con el desarrollo normal de la tesis, además de todas sus enseñanzas como docente.

A mis padres Jorge Iván Gallego Monsalve e Isabel Ruiz Hincapie los cuales siempre me han acompañado en toda mi formación, mi prima Nancy Paola Echeverri Ruiz, por su apoyo y enseñanza en la cotidianidad, a mi compañera de vida Cristina Vásquez Hernández quien siempre estuvo ahí para animarme, motivarme, asistirme con todo lo que necesité y para darme ese cálido amor que hace más llevaderos mis días.

A mis compañeros de clase Sebastian Gomez Macias y Edison Fernando Aza Casanova por su amistad y afecto que me brindaron durante mi formación.

Por último, a todas aquellas personas que aportaron en este trabajo.

Contenido

Introducción	8
Objetivos	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos	11
Marco teórico	12
Modos LP y conversión modal.....	12
Generación de haces y conversión modal utilizando un DMD	14
Multiplexaciones ópticas en telecomunicaciones.....	18
Multiplexación por División Espacial (SDM).....	20
Multiplexación por División Modal (MDM)	20
Análisis para la conversión modal simulada	22
Optimización de las máscaras a través del recocido simulado.....	22
Resultados teóricos de la conversión modal con máscaras optimizadas	24
Desarrollo experimental	30
Sintonización de modos LP en una fibra.....	30
Conversión modal	31
Resultados experimentales de la conversión modal	32
Multiplexación y demultiplexación modal.....	36
Multiplexación de modos usando un DMD	36
Demultiplexación de modos usando un DMD	40
Resultados experimentales de la multiplexación.....	45
Sistema completo para multiplexar y demultiplexar modos a través de la conversión modal	48
Conversión modal en una red de telecomunicaciones.....	49
Conclusiones y trabajo a futuro.....	52
Referencias	53
Salvedad	60
Publicación.....	61

Tabla de imágenes

Figura 1. Relación de dispersión, el eje horizontal (u), indica el valor de la raíz, el eje vertical (km), indica es el valor de la función modificada de Bessel de segundo orden.....	13
Figura 2. Amplitud de los modos confinados en el núcleo de la fibra óptica, calculados con la ecuación (1), Los primeros dos índices son los modales, los que tiene un tercer índice es porque tienen una variación azimutal ($m > 0$), por lo tanto, tienen estados de polarización lineal ortogonal.	14
Figura 3. La diferencia de fase entre los modos LP_{11} y LP_{01} , da como resultado una máscara de fase para convertir el modo incidente en el modo deseado.	14
Figura 4. Comparación entre la distribución de fase necesaria para convertir un modo LP_{01} en un modo LP_{31} , y el holograma de Lee correspondiente, que se desplegaría en el DMD. La de la izquierda va de 0 a π y la del lado derecho 0 a 1	15
Figura 5. Proceso para convertir el modo LP_{01} en el LP_{11} utilizando un DMD con máscaras codificadas.....	16
Figura 6. Diferencia entre los modos obtenidos y los modos teóricos. Resultados de las simulaciones de conversiones modales, con modo incidente LP_{01} . Amplitudes normalizadas.....	17
Figura 7. Diferencia entre los modos obtenidos y los modos teóricos. Resultados de las simulaciones de conversiones modales, con modo incidente LP_{01} . Amplitudes normalizadas.....	18
Figura 8. Los cinco dominios físicos de la luz (polarización, frecuencia, fase, tiempo y espacio) que forman las bases de todas las técnicas de comunicaciones electromagnéticas.....	20
Figura 9. Diagrama del algoritmo SA para la optimización de las máscaras de fase. Donde C_c ; correlación actual, C_p ; correlación anterior, P ; probabilidad de Boltzmann y, R ; probabilidad aleatoria.	24
Figura 10. El modo LP_{01} es convertido agregando las máscaras de fase optimizadas y sin optimizar, y el resultado de su conversión muestra una similitud mucho más aproximada a los modos teóricos para el caso de los modos optimizados.	26
Figura 11. El modo LP_{11} es convertido agregando las máscaras de fase optimizadas y sin optimizar, y el resultado de su conversión muestra una similitud mucho más aproximada a los modos teóricos para el caso de los modos optimizados.	27
Figura 12. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos y los teóricos. Las barras rojas; modos obtenidos con máscaras sin optimizar, las barras azules; modos obtenidos con máscaras optimizadas. Eje vertical; correlación entre los modos, eje horizontal; modos LP, la primera fila indica el modo obtenido, la segunda indica el modo que incide.....	28

Figura 13. Histograma del porcentaje de correlación que aumentó cada modo convertido con las máscaras de fase optimizadas.....	28
Figura 14. Matriz de correlación entre los modos obtenidos y los modos teóricos. Modo incidente <i>LP01</i>	29
Figura 15. Matriz de correlación entre los modos obtenidos y los modos teóricos. Modo incidente <i>LP11</i>	29
Figura 16. Sintonización de modos a través de la apertura numérica.	31
Figura 17. Montaje simulado de la sintonización de modos.	31
Figura 18. Montaje experimental de la conversión modal.	32
Figura 19. Modos obtenidos con la sintonización de radio modal.	32
Figura 20. Conversión modal usando máscaras sin optimizar. Los modos obtenidos son imágenes reales obtenidas en el montaje experimental.	34
Figura 21. Conversión modal usando máscaras optimizadas. Los modos obtenidos son imágenes reales obtenidas en el montaje experimental.	34
Figura 22. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos experimentalmente y los teóricos. las barras rojas; modos obtenidos con máscaras sin optimizar, Las barras azules; modos obtenidos con máscaras optimizadas. Eje vertical; correlación entre los modos, eje horizontal; modos LP. ...	34
Figura 23. Matriz de correlación de los modos <i>LP11</i> y <i>LP21</i> optimizados y sin optimizar con respecto a otros modos.	35
Figura 24. Proceso de construcción de una máscara de fase para realizar MDM con varios modos separados espacialmente. Las máscaras implementadas no están optimizadas.....	36
Figura 25. Proceso de construcción de máscaras de fase para realizar MDM utilizando máscaras optimizadas y codificadas con hologramas de Lee desplegadas en un DMD.....	37
Figura 26. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos en la multiplexación. Las barras rojas; modos obtenidos con máscaras sin optimizar, las barras azules; modos obtenidos con máscaras optimizadas. Eje vertical; correlación entre los modos, eje horizontal; modos LP.....	38
Figura 27. Histograma del porcentaje de correlación que aumentó cada modo convertido con el holograma de fase optimizado.....	38
Figura 28. Combinación de las multiplexaciones PMD y MDM. En la parte superior, multiplexación con máscaras sin optimizar; y en la inferior, optimizadas.	39
Figura 29. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos en la MDM-PDM. Las barras rojas; modos obtenidos con máscaras sin optimizar, las barras azules; modos obtenidos con máscaras optimizadas. Eje vertical; correlación entre los modos, eje horizontal; modos LP.....	40

Figura 30. Histograma del porcentaje de correlación que aumentó cada modo convertido con el holograma de fase optimizado.....	40
Figura 31 Proceso de demultiplexación de un DMD. Primer paso, diseño de hologramas de fase con múltiples portadoras. Segundo paso, conversión de los modos incidentes en el modo fundamental. Tercer pasó, umbral de intensidad.....	42
Figura 32. Proceso de demultiplexación de un DMD. Primer paso, diseño de hologramas de fase con múltiples portadoras optimizada. Segundo paso, conversión de los modos incidentes en el modo fundamental. Tercer pasó, umbral de intesidad.....	43
Figura 33. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos en la demultiplexación. Las barras rojas; modos obtenidos con máscaras sin optimizar, las barras azules; modos obtenidos con máscaras optimizadas. Eje vertical; correlación del modo fundamental con el obtenido, eje horizontal; modos LP.	44
Figura 34. Histograma del porcentaje de correlación que aumentó cada modo convertido con el holograma de fase optimizado.....	44
Figura 35. Matriz de correlación de la demultiplexación, el eje vertical corresponde al modo fundamental teórico y el horizontal a los modos recibidos después de convertidos.	45
Figura 36. Multiplexación a través de la superposición de una máscara sin optimizar y con una optimizada. Ambas máscaras se codifican con Lee. El modo incidente es el LP01.....	46
Figura 37. Multiplexación a través de la superposición de máscaras optimizadas y codificadas con Lee. El modo incidente es el LP01	47
Figura 38. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos en la multiplexación experimental usando un SLM-DMD. las barras rojas representan la correlación entre los modos obtenidos con los modos teóricos de la Figura 36, mientas las barras azules son las de la Figura 37. Eje vertical; correlación entre los modos, eje horizontal; modos LP.	48
Figura 39. Montaje simulado de un sistema de comunicaciones basado en la conversión modal compuesto por tres etapas: 1. Multiplexación, 2. Canal y 3. Demultiplexación.	49
Figura 40. Topología de red en anillo compuesta por fibras de pocos modos entre los nodos y fibra monomodal entre los nodos y los clientes.....	50
Figura 41. Elementos que componen el nodo de una red de telecomunicaciones de topología en anillo que utiliza las técnicas MDM y WDM.....	51

Introducción

Las comunicaciones a fibra óptica son la base de las telecomunicaciones actuales gracias a que permiten transmitir una gran cantidad de datos entre largas distancias con pocas pérdidas [1], [2]. Para su aplicación, se han explotado los grados de libertad físicos o dominios de la luz, como el tiempo, la frecuencia, la polarización, la cuadratura y el espacio [3]. En los últimos diez años, este último dominio ha sido foco de numerosas investigaciones porque ha permitido superar el límite físico de las comunicaciones actuales [4]–[7].

Las dimensiones de la luz han sido aprovechadas a través de diferentes métodos [8]. Así pues, en el caso de la dimensión temporal, se han implementado técnicas de Multiplexación por División de Tiempo Óptico (OTDM, Optical Time Division Multiplexing), donde se lograron transmitir 160 Gbit/s en un tren intercalado de bits [9]. En la frecuencia, se han aplicado como Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing), la cual permite el envío de múltiples canales en paralelo en un ancho de banda definido en el espectro electromagnético, logrando la transmisión de 2.64 Tbit/s a través de 132 canales cada uno con una capacidad de 20 Gbit/s [10]. Esta última es la más común en los sistemas de comunicaciones ópticas actuales [4], [7], [11]–[13].

Por otro lado, la implementación de los diferentes dominios de la luz de forma simultánea, ha logrado la transferencia de grandes tasas de información [14], como es el caso de la combinación entre el dominio del tiempo y la frecuencia, usando las técnicas OTDM/WDM [15], [16]; o la frecuencia y el espacio, con las técnicas WDM y Multiplexación por División de Modos (MDM, Mode-Division Multiplexing) [17]. La implementación de estas técnicas también ofrece soluciones a problemas fundamentales, tales como la Asignación de Enrutamiento y Longitudes de Onda o RWA (Routing and Wavelength Assignment) [18]–[21], donde se pueden enviar dos longitudes de onda por el mismo cable físico separadas por modos.

El aumento en la demanda de transmisión de datos en las comunicaciones por fibra óptica ha mostrado un crecimiento exponencial desde sus inicios [4], [22], [23], que se ha logrado satisfacer a través de diferentes tecnologías y/o técnicas. Sin embargo, en la última década la cantidad de datos transmitidos está alcanzando el límite de Shannon, también conocido como límite físico en estos sistemas, lo que implica que la capacidad de crecimiento irá disminuyendo hasta el punto de no poder sostener la creciente demanda de transmisión de bits [1], [14], [24].

Las técnicas de Multiplexación por División Espacial (SDM, Spatial Light Modulation) han sido foco de múltiples estudios, porque han demostrado superar el límite físico [4], [22], [23], [25], donde estas se implementan utilizando Fibras de Pocos Modos (FMF, Few Mode Fiber), Fibra Monomodo (SMF, Single Mode Fiber), Fibras Multinúcleo (MCF, Multi-Core Fiber), Fibras de cristal fotónico, entre otras [4]. La MDM es una de las técnicas de SDM, en la que, los canales son modos de propagación que viajan por el núcleo de la fibra óptica, que suele ser una FMF. Esta técnica ha permitido transmisiones de 0.19 Tbits/s a una distancia de 1200 km, transmitiendo 3 modos en una FMF, multiplexando cada uno a su vez con WDM [4]. También, ha permitido transmisiones de 9.6 Tbits/s a una distancia de 900 km utilizando, igualmente, 3 modos en una FMF [26].

Utilizar la técnica MDM requiere la implementación de un proceso de conversión modal [27], que consiste en transformar un modo óptico incidente en otro modo, a través de modificaciones de fase y amplitud. Se han desarrollado varios métodos para la conversión modal, entre ellos la utilización de Elementos Ópticos Difractivos (DOE, Diffractive Optical Elements) [28], máscaras de fase [29]–

[31], Rejillas de fibra de Bragg (FGB, Fiber Bragg Fiber) [32], [33], actuadores mecánicos y térmicos [34]–[36]; y Moduladores Espaciales de Luz (SLM, Spatial Light Modulator) [27], [37], [38]. De acuerdo con el dispositivo que se implemente, la conversión puede ser estática o dinámica.

La conversión modal dinámica permite la construcción de redes ópticas flexibles, o reconfigurables, que integren MDM con las demás técnicas tradicionales, y que posibiliten un fácil escalamiento sin demasiadas modificaciones de hardware. Para este fin, los conversores modales basados en moduladores espaciales de luz se destacan por su facilidad para convertir entre cualquier modo y tener la capacidad de insertarse fácilmente en los sistemas actuales.

En términos generales, hay dos clases de SLM, principalmente. Los SLM basados en cristal líquido (LC-SLM), modulan un frente de onda a través de retardos de fase producidos por cambios de birrefringencia en el cristal líquido, y que son controlados a través de voltajes en un arreglo de electrodos. Se han usado ampliamente en electrónica de consumo, conformación de haces y pulsos, así como también en metrología y formación de imágenes [39].

Los LC-SLM pueden modular directa y puntualmente la fase sobre un frente de onda. Sin embargo, la alta viscosidad del cristal líquido implica que tiene tasas de refrescamiento de solo unas decenas de Hertz. Además, como operan por retardos por cambios de birrefringencia, son altamente dependientes del estado de polarización de la luz y de su longitud de onda. Es decir, el rango de modulación de fase y amplitud es función de la longitud de onda y del estado de polarización. Adicionalmente, el cristal líquido no solo cambia la polarización, sino que también depolariza [39], [40].

Por otro lado, se está popularizando el uso de moduladores espaciales de luz basados en dispositivos digitales de microespejos (DMD, Digital Micromirror Devide), de Texas Instruments [41], [42]. Los DMD son dispositivos microelectromecánicos que consisten en un arreglo de microespejos, dispuestos de forma similar a los píxeles de una pantalla digital. Cada microespejo puede inclinarse controladamente entre dos estados discretos. De esta forma, al operar por reflexión, los dos estados de inclinación de cada microespejo producen reflectancias binarias de 1 y 0 (Estados digitales On y Off). Desplegando distribuciones espaciales de reflectancias, es posible conformar frentes de onda a través de procesos difractivos, como la reconstrucción de hologramas de amplitud binaria [43]. Este dispositivo se ha utilizado en tecnología de procesamiento digital de luz [43] y, en comunicaciones ópticas, se ha usado en MDM usando haces Laguerre-Gauss con Momento Angular Orbital (OAM, Orbital Momentum Angular), en la que se realizó una optimización de los modos utilizando un algoritmo de difusión de error que permitió obtener modos ópticos de alta fidelidad [44].

A diferencia de los LC-SLM, los DMD pueden tener una tasa de refrescamiento superior a los 10 KHz. Además, al operar por reflexión en microespejos, su desempeño es independiente del estado de polarización de la luz. Por otra parte, como operan a través del efecto global de difracción, la longitud de onda no afecta el rango de modulación, y es solo un factor de escala. Los límites en longitud de onda de operación están definidos por los rangos espectrales de las películas antirreflectivas que se aplican en la lámina de vidrio que protege el DMD, y en los materiales de la matriz microelectromecánica que sostiene los microespejos [45]. El método más simple para modular luz con un DMD utiliza hologramas de reflectancia binaria, llamados hologramas de Lee [44], [46].

En este trabajo realizó un montaje simulado (todas las simulaciones de este trabajo se realizaron en Python 3.0) y parte experimental de la multiplexación y demultiplexación modal, de modos Linealmente Polarizados (LP), mediante un conversor modal utilizando un DMD con máscaras de fase desplegadas. Todo proceso de conversión modal con este dispositivo se realizó en el espacio

libre, por lo tanto, se presentaron diferencias con los modos que viajan por dentro de una fibra óptica debido a las condiciones de frontera. Para obtener modos semejantes a los que viajan dentro del núcleo de una fibra, se construyó un algoritmo que optimizara las máscaras de fase desplegadas en el DMD, de manera que se obtuvieran modos parecidos a los deseados. Para medir la similitud entre los modos se utilizó una ecuación de correlación conocida como función espacial de frecuencia. En el estado del arte no se encontró un trabajo en el que se usara el DMD como conversor modal entre modos LP, por tal motivo nuestro trabajo es novedoso. La implementación de este dispositivo hizo resaltar numerosas ventajas como: construcción de un montaje sencillo sin requerir muchos dispositivos; lo que reduciría también el costo de bit transmitido, es fácil de usar; no requiere de una calibración en cada uso, como es el caso de los SLM-LC, independiente de la polarización, la variación de la longitud de onda no afecta la modulación, posee una tasa de refrescamiento alta, se adapta fácilmente a las técnicas de multiplexación actuales, y permite tener un control de la conversión modal. Como trabajo a futuro queda la construcción de un montaje de comunicación completo de conversión modal en el que se acoplen nuevamente a una de FMF los modos convertidos, de tal forma, que se pueda medir como mejora la eficiencia de acople entre los obtenidos con máscaras sin optimizar y optimizadas. Adicionalmente, la construcción de la técnica MDM, donde se acoplen al mismo tiempo varios modos convertidos a diferentes FMF y sean demultiplexados en el receptor.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar experimentalmente un sistema de acople de modos a una fibra óptica de pocos modos en un sistema de multiplexación por división modal usando un modulador espacial de luz de microespejos-

Objetivos específicos

- Diseñar y optimizar las máscaras de fase a desplegar en el modulador espacial de luz para incrementar la eficiencia de acople.
- Diseñar un montaje experimental que permita realizar la conversión modal para la multiplexación mediante un modulador espacial de luz de microespejos.
- Implementar un montaje experimental que permita acoplar los modos convertidos en el DMD para determinar la eficiencia de acople.
- Analizar el desempeño del sistema a través de medidas ópticas y comparaciones numéricas.

Marco teórico

Modos LP y conversión modal

Los modos linealmente polarizados (LP, Linearly Polarized), son un conjunto de modos ópticos en guías de onda cilíndricas de índice en escalón (como las fibras ópticas convencionales), que se identifican por poseer una constante de propagación similar. Estos modos se describen a través de combinaciones lineales de las soluciones de la ecuación de onda en un medio confinado (exceptuando el modo fundamental, que se puede calcular de forma directa) [47]. Los modos LP se presentan cuando la diferencia de los índices de refracción entre el núcleo y el recubrimiento de una fibra óptica es pequeña (guía débil o aproximación de onda escalar) [48]. Con esta aproximación se asume que el campo eléctrico es casi transversal. La ecuación de campo de los modos guiados se puede escribir como [30], [49].

$$E_{ml} = \begin{cases} J_m\left(\frac{r}{a}u_{m,l}\right)\cos(m\theta) & r \leq a \\ \frac{J_m(u_{m,l})}{K_m(w_{m,l})}K_m\left(w\frac{r}{a}\right)\cos(m\theta) & r > a \end{cases} \quad (1)$$

Donde E_{ml} , es la amplitud del campo eléctrico en coordenadas cilíndricas (r, θ, z) de un haz de luz que se propaga en la dirección positiva de la coordenada z ; J_m , es la función de Bessel de primer tipo; K_m , es la función modificada de Bessel de segundo tipo; m y l , son números enteros positivos ($m \geq 0$ y $l > 0$) y se conocen como el valor de los índices modales, el primero es la variación azimutal; que indica la cantidad de divisiones que pasan por el centro del núcleo, y el segundo la radial; que son el número de máximos alrededor del núcleo de la fibra, para cada valor de m , existen l soluciones, esto es lo que define los índices de los modos (LP_{ml}); a , es el radio del núcleo de la fibra; $u_{m,l}$, es el vector de onda transversal; y $w_{m,l}$, es la constante transversal evanescente del recubrimiento. Estos dos últimos términos se relacionan con la constante de propagación β de la siguiente manera:

$$u = a \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (2)$$

$$w = a \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (3)$$

Donde k_0 ; se conoce como el número de onda en el espacio libre, n_1 y n_2 ; es el índice de refracción del núcleo y el recubrimiento respectivamente.

La ecuación (1) es trascendental, lo que implica que no posee una solución analítica. Por lo tanto, para encontrar las raíces que permitan obtener una o varias de sus soluciones se utilizan métodos numéricos (se utilizó el lenguaje de programación Python versión 3.0 para buscar las soluciones). El cálculo de estas raíces se realiza con la condición de guía débil o relación de dispersión.

$$\frac{J_m(u)}{u J_{m-1}(u)} = -\frac{K_m(w)}{w k_{m-1}(w)} \quad (4)$$

La Figura 1 muestra las curvas de cada uno de los lados de la ecuación (4), donde se indica que las líneas de color azul corresponden a los medios guiados; núcleo de la fibra, y las líneas de color naranja

corresponde a los medios irradiados: recubrimiento de la fibra. Cuando hay una intersección entre estas líneas (las líneas verticales son asíntotas, por lo tanto, se excluyen como raíces), se indica que se cumplió la condición de guía débil. Cada intersección representa un modo, por ejemplo, en la Figura 1 se muestra que la fibra óptica podría propagar 3 modos, más sus degenerados (LP_{01} , LP_{11} y LP_{21}).

Al reemplazar las soluciones de la ecuación (4) en la ecuación (1) y los demás parámetros físicos de la fibra (radio del núcleo, longitud de onda de operación, índices de refracción del núcleo y el recubrimiento) [2], [47], es posible conocer cuáles son los modos que viajan por la fibra. En la Figura 2 se muestran la amplitud de todos los modos LP calculados con las raíces encontradas y su respectiva variación azimutal.

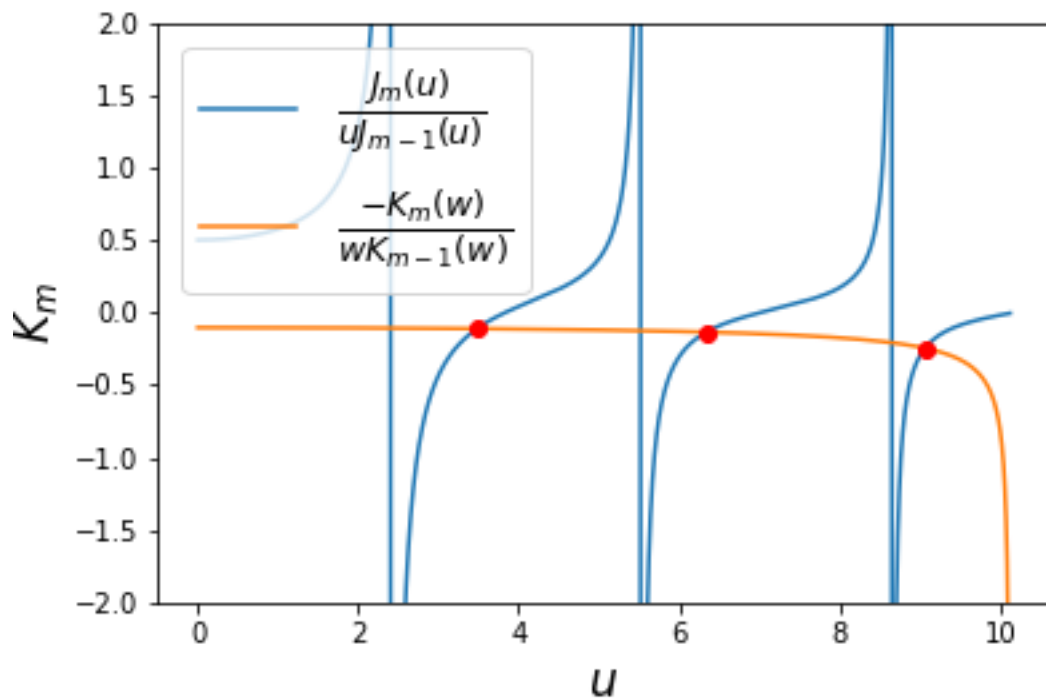


Figura 1. Relación de dispersión, el eje horizontal (u), indica el valor de la raíz, el eje vertical (k_m), indica es el valor de la función modificada de Bessel de segundo orden.

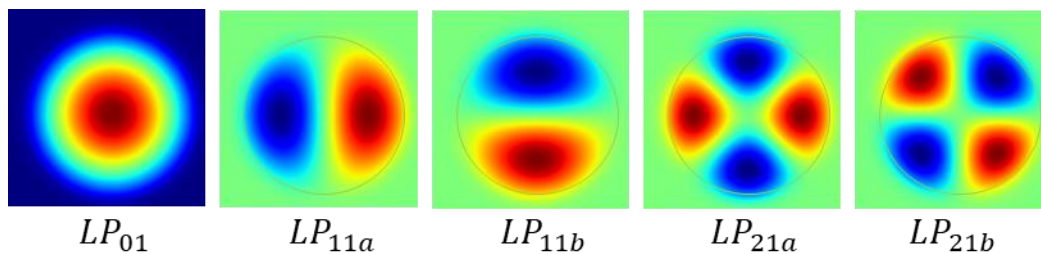


Figura 2. Amplitud de los modos confinados en el núcleo de la fibra óptica, calculados con la ecuación (1). Los primeros dos índices son los modales, los que tiene un tercer índice es porque tienen una variación azimutal ($m > 0$), por lo tanto, tienen estados de polarización lineal ortogonal.

La conversión modal consiste en transformar un modo incidente a otro, usualmente dentro de la misma familia de modos, en este caso entre modos LP. Esta transformación se realiza a través de cambios de fase, por lo tanto, se calcula la diferencia de fase que existe entre el modo incidente y el modo deseado. Esta diferencia de fase es la que se agrega al modo incidente para obtener un nuevo modo. Para agregar la fase existen varios métodos como máscaras de fase, birrefringencias inducidas, redes de Bragg, entre otros. En este trabajo se implementaron máscaras de fase desplegadas en un DMD para agregar la diferencia de fase al modo incidente. En la Figura 3 se muestra el proceso para calcular la fase deseada, siendo esta igual a la diferencia de fase entre el modo deseado y el modo incidente, esta fase deseada se conoce como la máscara de fase.

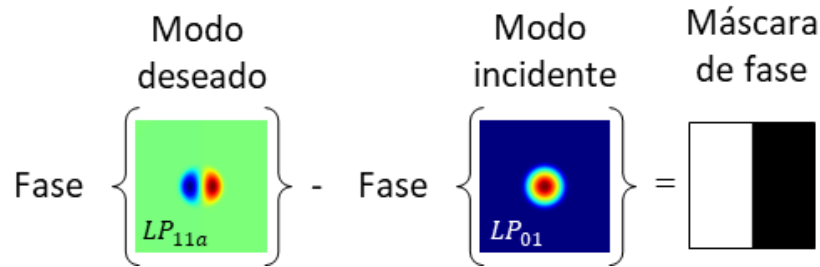


Figura 3. La diferencia de fase entre los modos LP_{11} y LP_{01} , da como resultado una máscara de fase para convertir el modo incidente en el modo deseado.

Generación de haces y conversión modal utilizando un DMD

La conversión modal consiste en tomar un modo incidente y convertirlo en un modo deseado, es fundamental para la multiplexación modal [27], [35]. Se puede realizar de forma estática o dinámica, donde la última tiene ventajas en flexibilidad, escalabilidad y capacidad de integración. Además, se tiene control del modo que deseamos obtener a la salida del conversor y su fidelidad.

La generación y conversión de haces usando un DMD implica modificar la fase y la amplitud de un haz o modo incidente. Aunque los DMD operan a través de distribuciones espaciales de reflectancia binaria, es posible usar varios métodos para modular independientemente la fase y la amplitud de la luz [43]. La forma más simple, y muy efectiva, de realizar esto es desplegando en el DMD hologramas de amplitud binaria, llamados hologramas de Lee [43], [46]. Estos hologramas provienen de una aproximación que se realiza al considerar la difracción de campo lejano, en donde se considera que un campo óptico se puede construir a partir de la superposición de ondas planas, y estas ondas planas se representan en el holograma como la superposición de rejillas de difracción binarias con diferentes direcciones y periodos. De esta manera, si se tiene un campo óptico con una amplitud $A(x, y)$ y fase $\varphi(x, y)$, representado como:

$$\psi(x, y) = A(x, y)e^{i\varphi(x, y)} \quad (5)$$

Para codificar el campo óptico en un holograma binario, se utiliza la siguiente función de transmitancia [46], [50].

$$T(x, y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{sign} \left[\cos \left(\frac{2\pi x}{x_0} + \pi p(x, y) \right) - \cos(\pi w(x, y)) \right] \quad (6)$$

Donde *sign*; es la función signo; el término $\frac{2\pi x}{x_0}$ representa un portador espacial (rejilla lineal con periodo espacial x_0) que separa los órdenes de difracción cuando se hace la reconstrucción del holograma a través de planos conjugados de Fourier. El término $w(x, y)$ está relacionado con la amplitud, y $p(x, y)$ con su fase. Se pueden escribir como:

$$w(x, y) = \frac{1}{\pi} \sin^{-1}[A(x, y)] \quad (7)$$

$$p(x, y) = \frac{1}{\pi} \varphi(x, y) \quad (8)$$

En la Figura 4 se muestra la comparación entre la distribución de fase necesaria para convertir un modo LP_{01} en un modo LP_{31} , y el holograma de Lee correspondiente, que se desplegaría en el DMD.

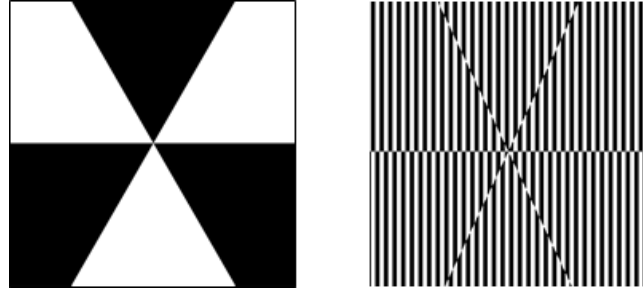


Figura 4. Comparación entre la distribución de fase necesaria para convertir un modo LP_{01} en un modo LP_{31} , y el holograma de Lee correspondiente, que se desplegaría en el DMD. La de la izquierda va de 0 a π y la del lado derecho 0 a 1.

Para obtener los modos convertidos utilizando un DMD, desplegando los hologramas sobre este, se requieren dos sistemas $4f$ como se muestra en la Figura 5. En el primer sistema $4f$ se realiza la conversión modal. El modo óptico que sale de la fibra óptica es llevado por la lente L1 sobre el DMD donde se le agrega la fase necesaria para su conversión a través del despliegue de la transmitancia $T(x, y)$. El DMD se ubica en el plano conjugado entre el plano de entrada de la lente L1 y el plano de salida de la lente L2. De esta forma, por ser un sistema confocal, cada lente realiza una transformada óptica de Fourier (\mathcal{F}) entre sus planos focales anterior y posterior [51]. La luz que sale del DMD es colectada por L2, la cual la enfoca en el filtro espacial. Este solo permite que pase el orden de difracción +1, bloqueando físicamente el orden cero y los demás órdenes. Luego, El segundo sistema $4f$ toma el haz filtrado y lo proyecta sobre una cámara para su registro, o lo ingresa a una fibra óptica para su propagación.

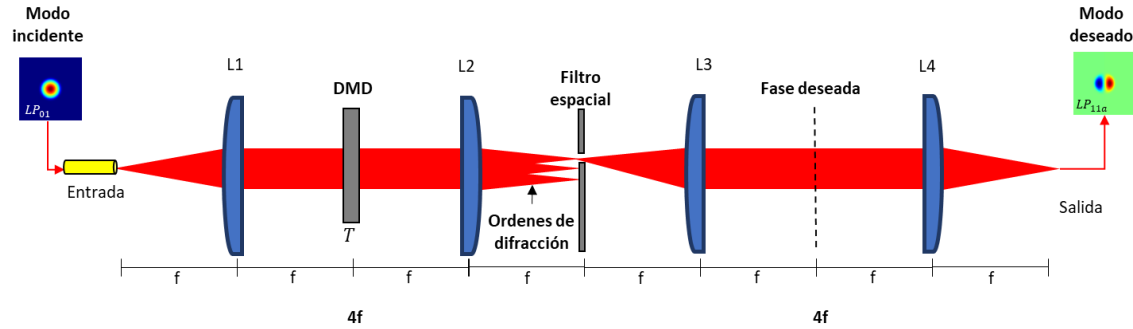


Figura 5. Proceso para convertir el modo LP_{01} en el LP_{11} utilizando un DMD con máscaras codificadas.

Matemáticamente, la conversión modal de este sistema, justo después del plano del filtro espacial, se puede representar de la siguiente forma:

$$MD = \mathcal{F}(\mathcal{F}(MI) * T) \quad (9)$$

Donde MD ; es el modo deseado a la salida, MI ; el modo incidente, T ; la máscara de fase.

En las Figura 6 y Figura 7 se muestran resultados simulados de conversiones modales, con modos incidentes LP_{01} y LP_{11} . Es muy importante notar que los modos ópticos LP son modos guiados y definidos por las condiciones de frontera que encuentran al propagarse a lo largo de una fibra óptica. Como la conversión se realiza en el espacio libre, las condiciones de frontera son diferentes, en consecuencia se presentan diferencias entre los modos obtenidos y los modos teóricos deseados [27], [52]. Para obtener modos similares a los que viajan dentro de la fibra se pueden optimizar las distribuciones de fase de manera que se obtenga un aumento de la fidelidad entre los modos convertidos y los teóricos. Esto posibilita que se puedan volver a acoplar a una fibra óptica.

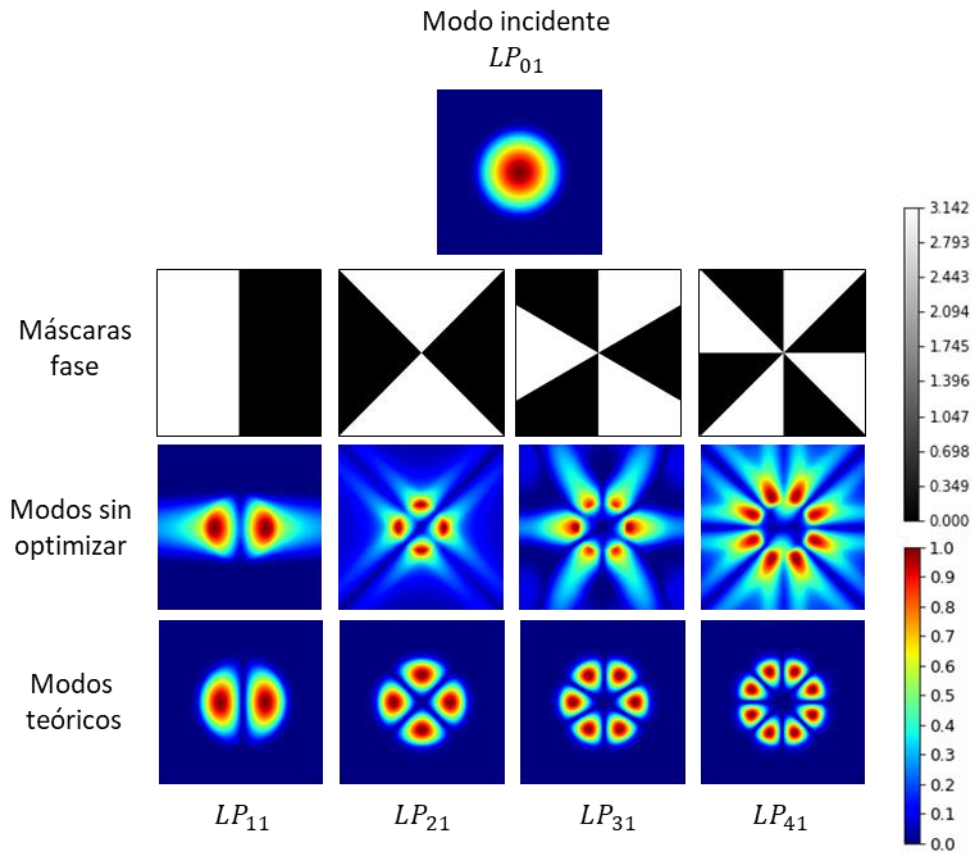


Figura 6. Diferencia entre los modos obtenidos y los modos teóricos. Resultados de las simulaciones de conversiones modales, con modo incidente LP_{01} . Amplitudes normalizadas.

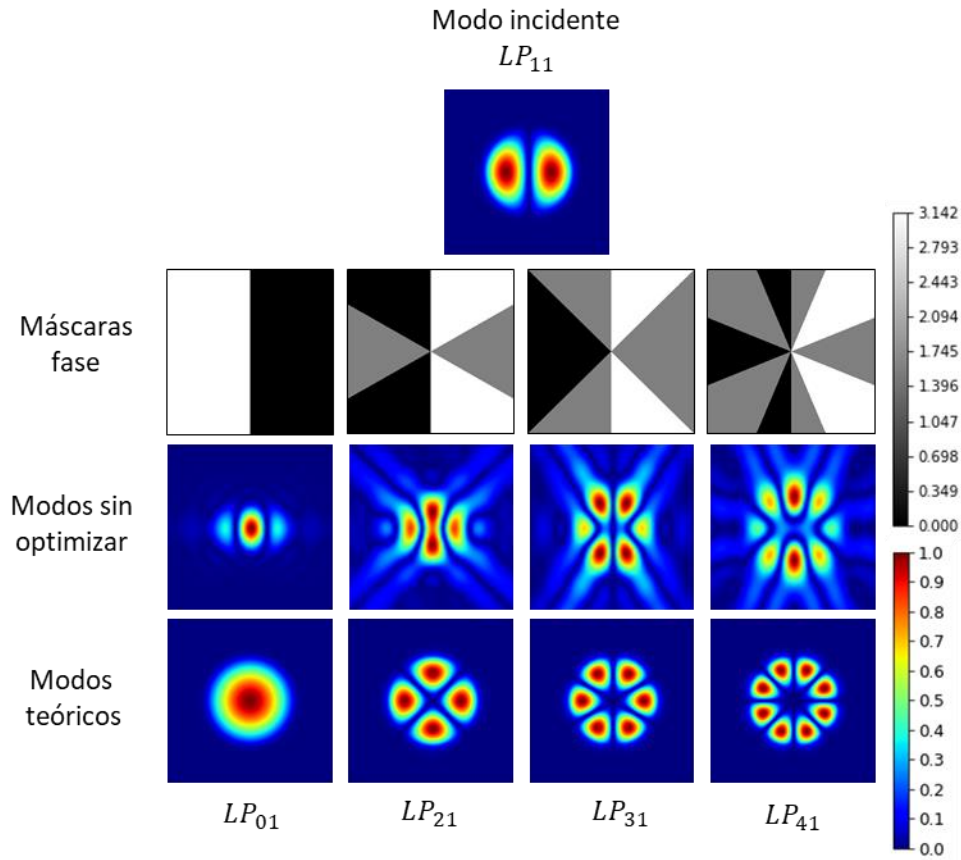


Figura 7. Diferencia entre los modos obtenidos y los modos teóricos. Resultados de las simulaciones de conversiones modales, con modo incidente LP_{01} . Amplitudes normalizadas.

Multiplexaciones ópticas en telecomunicaciones

La multiplexación es una técnica que permite enviar múltiples señales o flujos de información por un mismo canal. Permite ampliar la capacidad para transmitir datos y aumenta el número de conexiones entre dispositivos sin requerir un enlace dedicado, lo que a su vez permite ahorrar costos y espacio en la infraestructura de una red física. En las comunicaciones de fibra óptica existen variedad de técnicas de multiplexación y modulación que aprovechan los dominios físicos de la luz [3], estos se listan a continuación.

La Polarización se ha utilizado para enviar transmisiones simultáneas de varios flujos de información separadas por los estados ortogonales del mismo haz de luz [3]. La técnica de multiplexación que ha implementado este dominio es la Multiplexación por División de Polarización (PDM, Polarization Division Multiplexing) que permite transmitir señales independientes en diferentes estados de polarización con la misma longitud de onda logrando un esquema de modulación efectivo que incrementa tasa de bits y la eficiencia espectral [53]–[55].

EL siguiente dominio es la frecuencia que permite transmitir múltiples flujos de información en paralelo por un mismo canal, cada uno de estos flujos debe transmitirse a una frecuencia diferente. La WDM es la técnica que utiliza este dominio, donde multiplexa un número de portadoras ópticas a diferentes longitudes de ondas de un haz de luz. Basado en el ancho de banda que se disponga, pueden

existir un número específico de canales que de acuerdo a su cantidad permite utilizar técnicas como: normal (WDM), gruesa (Coarse-WDM) y densa (Dense-WDM) [3], [56], [57]. La WDM es más común en las comunicaciones a fibra óptica porque permite mejorar la capacidad de la red sin requerir nuevos tendidos de cableado, además su capacidad ha venido mejorando con la implementación de amplificadores, pureza del núcleo, entre otras [55], [58].

Otro de los dominios de la luz es la Fase, que se refiere a la parte real e imaginaria de una onda electromagnética, esta es utilizada para mejorar la eficiencia espectral e incrementar la cantidad de bits enviados por símbolo [3], [58], [59]. Diferentes técnicas como, multiplexación por división de fase, donde se mejora la calidad de la información transmitida en canales con Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN, Additive White Gaussian Noise) [60], O aumentando la capacidad de los sistemas WDM a través de modulaciones de amplitud y fase sin portadora [61].

La dimensión temporal, que consiste en enviar un símbolo después de otro, es decir, en sucesión. La técnica de multiplexación conocida que utiliza este dominio físico es la OTDM [15], [62], cuyo principio básico es que cada una de las secuencias de datos de banda base se le asigna una serie de intervalos de tiempo en el canal multiplexado, de esta manera, por el canal se transmiten una serie de símbolos de diferentes fuentes que serán recibidas en la misma ranura de tiempo por el receptor para hacerla llegar a su destino [63].

Finalmente, el dominio es el espacio, consiste en establecer múltiples rutas de datos distinguibles separados espacialmente. Este dominio ha llamado mucho la atención en la última década debido a que puede manejar el crecimiento exponencial del tráfico en las futuras redes ópticas [4], [22], [23], [25], [64]. Una de las técnicas más comunes que utilizan este dominio es la MDM que consiste en transmitir flujos de información por los modos que viajan en el núcleo de una fibra óptica multimodal. Una de las ventajas que ofrecen las técnicas que usan el dominio espacial que pueden combinarse fácilmente con técnicas como WDM, PDM, OTDM, entre otros [65].

La Figura 8 muestra ejemplos específicos relacionados con las comunicaciones ópticas

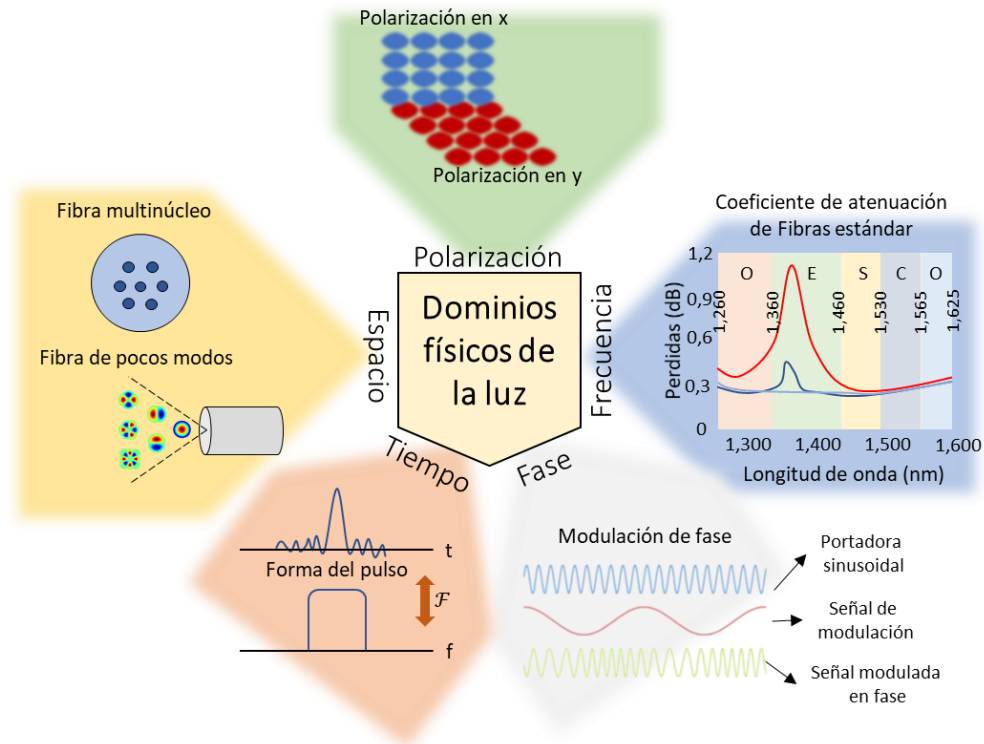


Figura 8. Los cinco dominios físicos de la luz (polarización, frecuencia, fase, tiempo y espacio) que forman las bases de todas las técnicas de comunicaciones electromagnéticas.

Multiplexación por División Espacial (SDM)

La SDM es una de las técnicas más antiguas de multiplexación [66], que permite generar más canales por un mismo medio de transmisión sin requerir ancho de banda espectral adicional, incrementando a su vez la capacidad de datos que se pueden transmitir por este. Alrededor del 2010 se empezó a explotar este dominio comercialmente con el arreglo de diferentes fibras monomodo en paralelo que se conocían como Multiplexación por División de Fibra (FDM, Fiber Division Multiplexing) [22], [67].

Las técnicas SDM se han venido enfocando en fibras que soporten múltiples núcleos y/o en núcleos que toleren varios modos, como una SMF. Las Fibras Multinúcleo (MCF, Multi-Core Fiber), donde las trayectorias son definidas por una matriz de núcleos monomodo físicamente distintos, Fibra Multi-Modo (MMF, Multi-Mode Fiber), permite que viajen más modos por el núcleo en comparación con la SMF; FMF; esta fibra posee el radio del núcleo un poco más grande que la SMF permitiendo que puedan viajar algunos modos adicionales al fundamental; Fibra Multinúcleo de Pocos Modos (FM-MCF, Few-Mode Multi-Core Fiber), en cada uno de sus núcleos pueden viajar varios modos incluyendo el modo fundamental [4], [67], [68].

Multiplexación por División Modal (MDM)

Está técnica se ha venido estudiando e implementando en transmisiones a largas distancias usando medios confinados y en cortas distancias a través del espacio libre [4], [22], [43]. Se realiza

usualmente con una FMF, donde los modos ópticos de propagación actúan como canales independientes, de acuerdo al medio y a las capacidades de detección pueden emplear (modos LG, modos vectoriales, modos LP, Hermitianos, entre otros) [23], [69]–[72]. Existen dos tipos de FMF que se utilizan para estas técnicas: las que poseen un gran Retardo Diferencial de Grupo Modal (DMGD, Differential Mode Group Delay) [73], [74], son una opción porque disminuyen la interferencia de los modos que se transmiten por la fibra, sin embargo, compensar los retardos es complejo; y las que poseen un DMGD cercano a cero, aunque aumentan el riesgo de interferencia entre los modos que viajan por la fibra, al mismo tiempo, hacen que sea fácil compensar el poco retardo entre estos [37], [74], [75].

MDM ha logrado transmisiones de hasta 1200 Km, con una velocidad de transmisión de 80 Gbs–1 por modo, enviando 3 modos por un canal físico y multiplexando en cada uno varias longitudes de onda alcanzando una velocidad de transmisión de 240 Gb/s [4]. Por otra parte, se alcanzaron velocidades de transmisión de hasta 3.5 Tbit/s a una distancia de 1000 km [22]. Las capacidades alcanzadas son el resultado de técnicas híbridas, en las que se combinan MDM con WDM. Estas se han convertido en una opción para aprovechar los recursos actuales a través de las libertades que ofrecen las ondas electromagnéticas [14], [76]. Una parte clave en multiplexar y demultiplexar en MDM es el conversor modal, puesto que permite tener un control de cuál o cuáles modos se van a enviar por el canal fibra [35].

Un caso particular de la MDM es la OAM que es una cantidad física que poseen algunos haces, estas son aprovechadas para ser transmitidas generalmente en el espacio libre [77], [78] permitiendo comunicaciones por el orden de los Tbit/s, no obstante, los modos LG dependen de la polarización y del medio de propagación si se está trabajando en medios confinados [71], lo que requiere el uso de fibras altamente birrefringentes para mantenerla estable y evitar que la forma del modo se pierda durante su recorrido por la fibra o cuando se acopla a esta. Por el contrario, los modos LP mantienen más su forma en trayectos extensos y en los acoplos desde el espacio libre a la fibra [4], [26],[79], [80].

Análisis para la conversión modal simulada

Optimización de las máscaras a través del recocido simulado

Existen varios métodos de optimización, como los mecanismos voraces, la colonia de hormigas, el recocido simulado (SA, Simulated Annealing), entre otros [81]. Algunos de estos métodos se han utilizado en ocasiones similares, como es el caso en que optimizaron las máscaras de fase utilizando el algoritmo de recocido simulado, para realizar conversión modal utilizando SLM-LC [27]. Así mismo, se han optimizado máscaras de fase usando el algoritmo de error de difusión, para obtener modos mas similares a los OAM [44], [82]. De igual modo, se ha implementado el algoritmo Gerchberg–Saxton (GS), que fue el primer algoritmo iterativo basado en la transformada de Fourier y es el algoritmo tradicional para el diseño de hologramas o máscaras de fase [83]–[86], sin embargo, GS opera con el modulo cuadrado de las imágenes, y para optimizar los modos LP es necesario tener la información de amplitud. En este trabajo se implementó el algoritmo de recocido simulado, donde la correlación entre las imágenes es la función objetivo.

Para medir la similitud entre los modos obtenidos con la conversión, usando las máscaras de fase, y los modos teóricos, se calculó su correlación. Existen varios métodos para medir la correlación entre imágenes [87], [88], como la similitud estructural [89], Spearman [90], [91], Error Cuadratico Medio (MSE, Mean Square Error) [92], función espacial de frecuencia [93]–[95], anillo de Fourier [96], y Pearson [74], [78], [84]–[91]. En este trabajo se implementó la función espacial de frecuencia, puesto que permite trabajar con números complejos, y además no trabaja con el modulo cuadrado de las imágenes, sino con su amplitud. Esta función es el producto entre la imagen obtenida y la referencia conjugada, acotado por el producto de ambas areas, se define como [93]–[95]:

$$r = \frac{|\iint I_m * I_r^* dA|^2}{(\iint |I_r|^2 dA)(\iint |I_m|^2 dA)} \quad (10)$$

Donde I_r , I_m , son la imagen referencia y la modificada respectivamente.

Con la métrica seleccionada, se procede a construir el algoritmo SA para optimizar las máscaras de fase. Este algoritmo es una metaheurística que se inspiró en el proceso de enfriamiento de sólidos. El funcionamiento del SA empieza tomando una temperatura (T) y energía (E) alta. En el caso de T , disminuye de manera constante, y entre menor sea la constante de reducción se puede obtener una solución más aproximada. La variación de energía (ΔE), es el valor que se calcula en cada perturbación para buscar un óptimo. Una de las ventajas del SA es que diversifica la zona de búsqueda aceptando malas soluciones (Escapar de óptimos locales). La probabilidad de aceptarlas se basa en la distribución de Boltzmann. A medida que la temperatura disminuye, es menos probable que se acepten malas soluciones [27], [81]. Esta distribución se define.

$$P = e^{\frac{-\Delta E}{T}} \quad (11)$$

En la Figura 9 se describe el proceso para optimizar las máscaras de fase usando el algoritmo construido. Este comienza encontrando la máscara de fase inicial (M1), que se obtiene de la diferencia de fases entre los modos teóricos incidente y el deseado (Figura 3). Luego, se realiza la conversión modal usando M1 en la ecuación (6). Después, un solo píxel aleatorio de la máscara se cambia a un valor aleatorio en el rango de fase, generando una máscara modificada (M2). Se realiza nuevamente

la conversión modal con M2, posteriormente se calcula la correlación de los modos obtenidos con el modo teórico. El coeficiente de correlación entre el modo teórico y el obtenido con M1, se nombrará correlación previa (C_p); por el mismo lado, el coeficiente de correlación obtenido con M2, se nombrará correlación actual (C_c). Ambas correlaciones se calculan utilizando la ecuación (10).

Si $C_c > C_p$, el resultado es aceptado y M1 se iguala a M2. En el caso donde $C_c < C_p$, el algoritmo usa la ecuación (11) para calcular la probabilidad de Boltzmann (P), y se calcula también, una probabilidad aleatoria (R). Si $P > R$ el resultado es aceptado y luego, M1 se iguala a M2. Si $P < R$ el resultado es descartado y M2 se iguala a M1. Finalmente, la temperatura disminuye, y se verifica si esta es mayor o igual a cero. En el caso de la temperatura mayor que cero, el proceso va nuevamente al paso en el que se modifica un píxel aleatorio. Si es cero, el algoritmo se detiene y devuelve la máscara de fase optimizada.

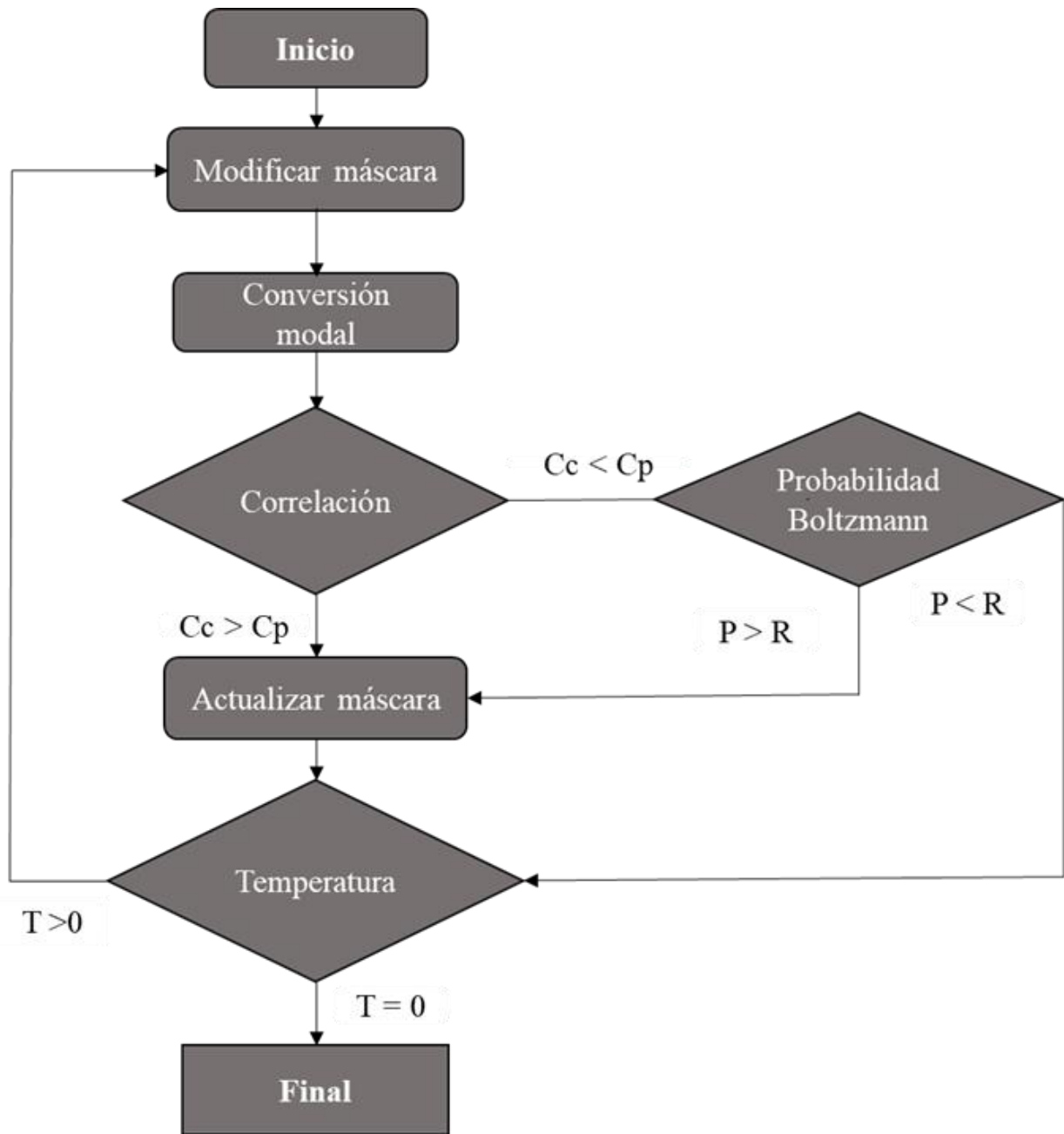


Figura 9. Diagrama del algoritmo SA para la optimización de las máscaras de fase. Donde C_c ; correlación actual, C_p ; correlación anterior, P ; probabilidad de boltzman y, R ; probabilidad aleatoria.

Resultados teóricos de la conversión modal con máscaras optimizadas

Los parámetros utilizados para la simulación se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Parámetros de la fibra simulada y del algoritmo

Algoritmo SA		Fibra óptica	
Temperatura Inicial	2.803	Diámetro del radio	$8 \mu m$
Reducción de temperatura	1.4015×10^{-3}	Índices de refracción núcleo	1.45
Número de iteraciones promedio	2000	Índices de refracción recubrimiento	1.44
Cantidad de pixeles modificados por iteración	0.24 %	Longitud de onda	$0.6328 \mu m$

En la Figura 10 y Figura 11, se muestran los resultados obtenidos con el algoritmo SA, donde se puede observar un aumento de la similitud entre el modo teórico y obtenido, para los casos en que inciden los modos LP_{01} y LP_{11} . Se puede observar que la forma de los modos obtenidos se aproximó a los modos deseados, en comparación con los resultados obtenidos con las máscaras sin optimizar.

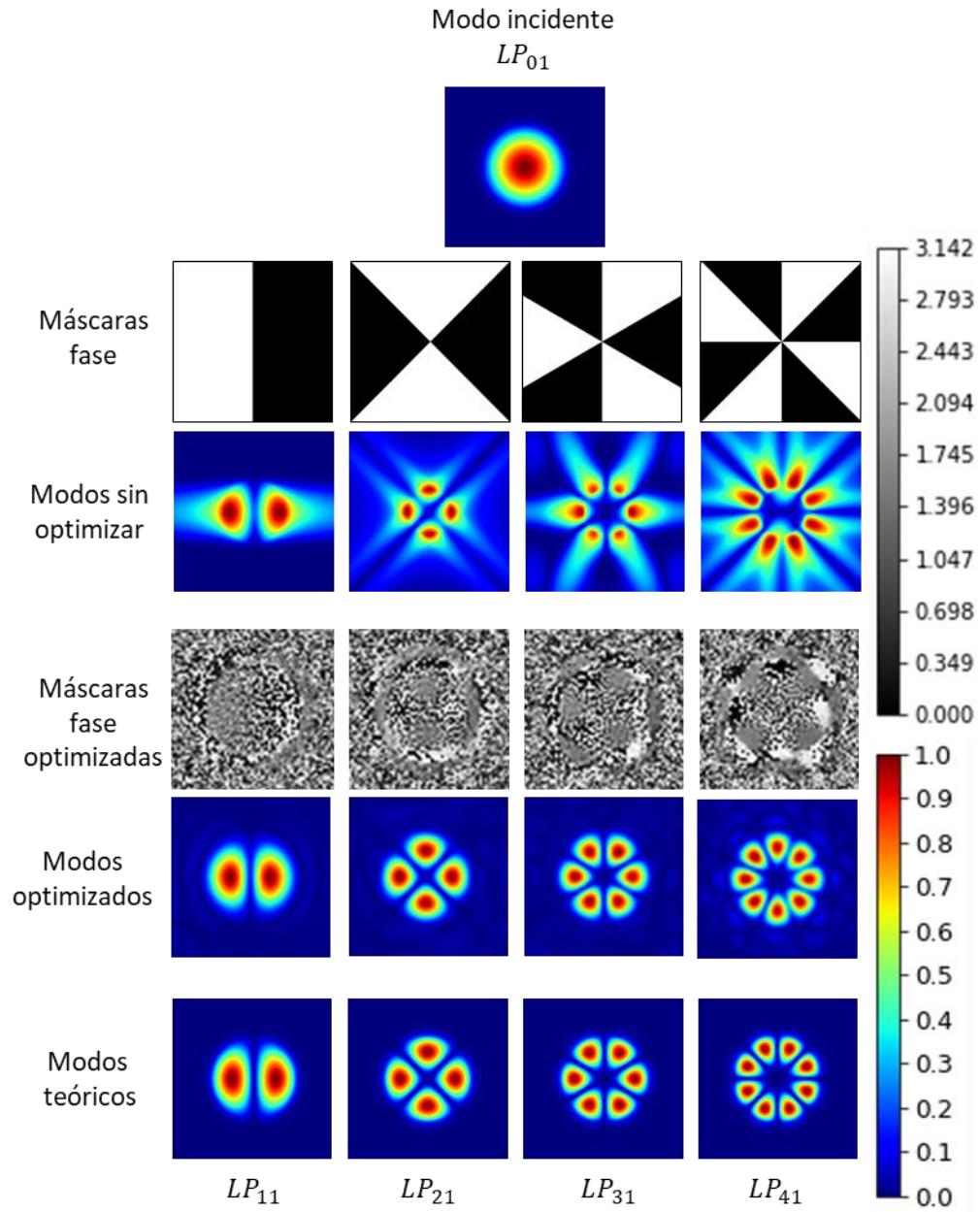


Figura 10. El modo LP_{01} es convertido agregando las máscaras de fase optimizadas y sin optimizar, y el resultado de su conversión muestra una similitud mucho más aproximada a los modos teóricos para el caso de los modos optimizados.

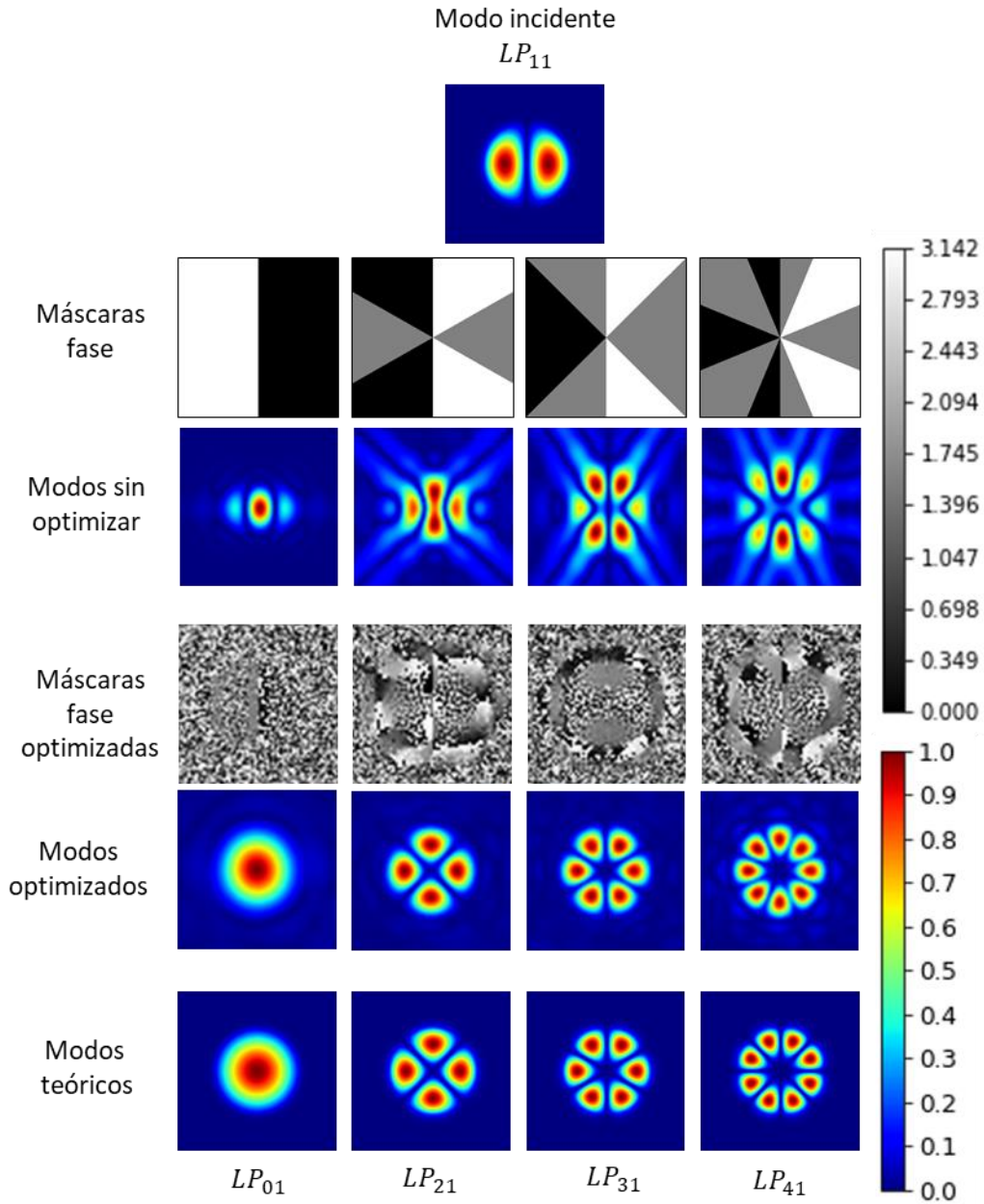


Figura 11. El modo LP_{11} es convertido agregando las máscaras de fase optimizadas y sin optimizar, y el resultado de su conversión muestra una similitud mucho más aproximada a los modos teóricos para el caso de los modos optimizados.

La Figura 12 presenta el histograma de correlación entre los modos obtenidos con máscaras sin optimizar y optimizadas en la Figura 10 y Figura 11 con los modos teóricos, estos valores se calcularon con la ecuación (10). Las barras rojas indican la correlación que alcanzó cada modo convertido con máscaras sin optimizar, las azules; con las optimizadas. El algoritmo implementado permitió obtener una correlación máxima del 0.99 y mínima del 0.9, mientras que sin la optimización el valor máximo de correlación fue del 0.79 y el mínimo de 0.44. La Figura 13 indica el porcentaje

en que aumento la correlación cada modo cuando se realizó la conversión modal usando las máscaras de fase optimizadas. Donde para el modo LP_{01} alcanzo a incrementar hasta un 71% y para el modo LP_{11} alcanzó un máximo del 61%.

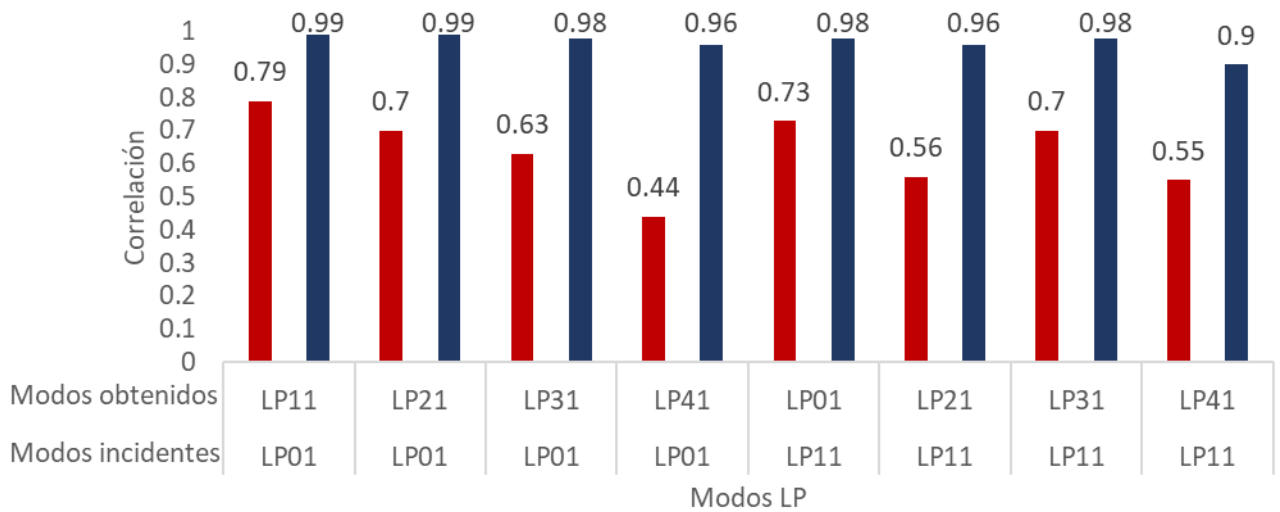


Figura 12. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos y los teóricos. Las barras rojas; modos obtenidos con máscaras sin optimizar, las barras azules; modos obtenidos con máscaras optimizadas. Eje vertical; correlación entre los modos, eje horizontal; modos LP, la primera fila indica el modo obtenido, la segunda indica el modo que incide.

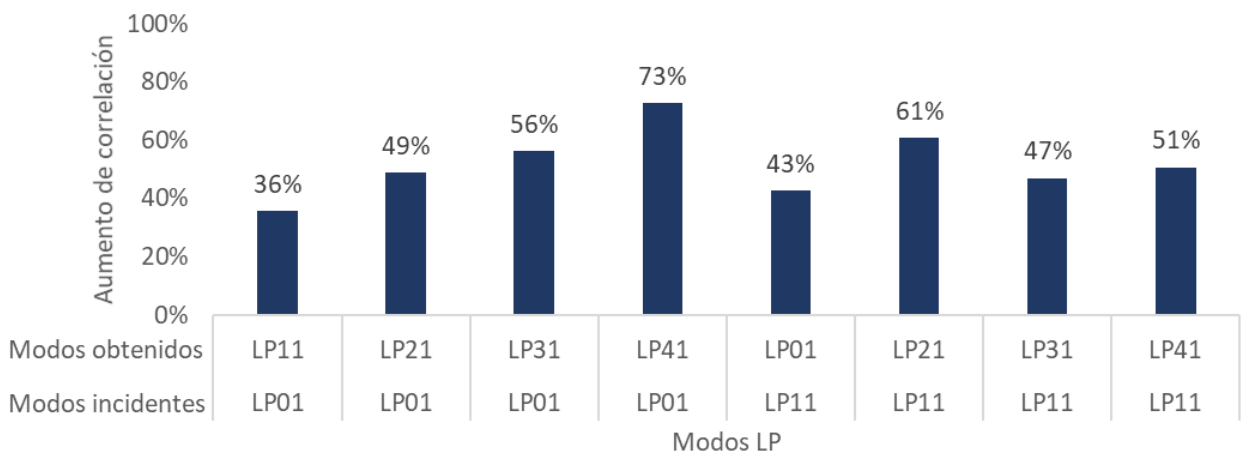


Figura 13. Histograma del porcentaje de correlación que aumentó cada modo convertido con las máscaras de fase optimizadas.

Las Figura 14 y Figura 15 muestran las matrices de correlación entre los modos obtenidos y teóricos. En la primera; incide el modo LP_{01} y en la segunda; el LP_{11} . Como es notable en ambas matrices la diagonal principal es la que posee una correlación por encima del 0.9. Mientras que los demás valores

se encuentran por debajo de 0.1. Estos resultados son de suma importancia ya que pueden reducir la probabilidad de que un receptor detecte un modo diferente al recibido.

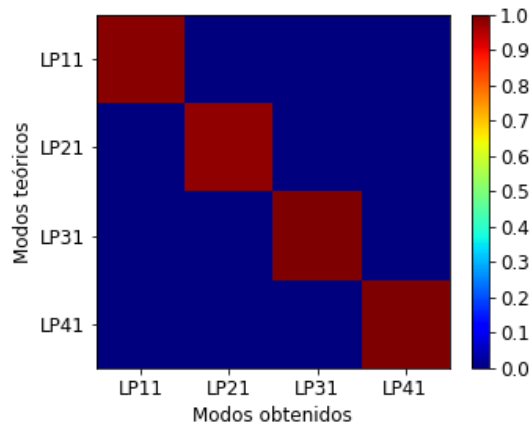


Figura 14. Matriz de correlación entre los modos obtenidos y los modos teóricos. Modo incidente LP_{01} .

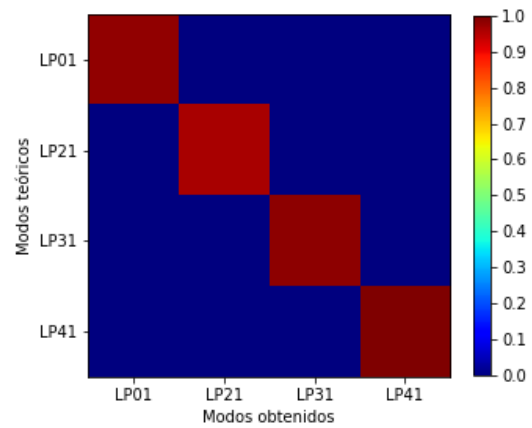


Figura 15. Matriz de correlación entre los modos obtenidos y los modos teóricos. Modo incidente LP_{11} .

Desarrollo experimental

Sintonización de modos LP en una fibra

Existen varias estrategias para sintonizar modos LP para que se propaguen a lo largo de una fibra óptica: redes de Bragg de periodo largo [104]–[106], Taper de fibra óptica [107], pérdidas por microcurvatura [108]–[110], sintonización por radio modal [111], entre otras. En este trabajo se usó la sintonización de radio modal, que es más fácil de implementar en laboratorio y tiene suficiente control como para asegurar estabilidad y repetitividad, comparado con el enrollamiento o sintonización por pérdidas por curvatura.

La sintonización de radio modal se puede explicar con la teoría general de las guías de ondas, la cual establece una ecuación que nos indica cuántos modos se pueden propagar dentro de la guía de acuerdo con la frecuencia de operación y las condiciones de frontera [47]. En caso de la guía de onda cilíndrica dieléctrica, de índice en escalón, se define con la frecuencia normalizada (V).

$$V = \frac{2\pi f a}{c} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (12)$$

Donde f ; es la frecuencia de la luz, a ; el radio del núcleo de la fibra; c ; la velocidad de la luz y, n_1 y n_2 ; el índice de refracción del núcleo y el recubrimiento de la fibra, respectivamente. Esta ecuación, relaciona el parámetro de la frecuencia de operación con los parámetros de las condiciones de frontera como la apertura numérica, que nos indica la relación de permitividades del núcleo y revestimiento, junto con el radio de la fibra.

Al elegir una fibra óptica y una frecuencia de operación (o longitud de onda del láser incidente), tendremos fijos todos los parámetros que nos indican las diferentes frecuencias de corte relacionadas con los modos que se podrán propagar dentro de la guía de onda [47]. Por tanto, al cambiar el ángulo del haz que incide a la fibra entre el rango de aceptación de la apertura numérica, se sintonizará un modo, pues la frecuencia de corte varía.

Para obtener una fibra de pocos modos y poder seleccionar fácilmente los modos a la entrada, se trabajó con una fibra óptica monomodo a una longitud de onda menor a la que fue diseñada. Sin embargo, la diferencia de la longitud de onda no puede ser muy grande, pues sintonizar un modo específico podría ser complejo si la fibra permite la propagación de muchos modos. En la Figura 16 se muestra cómo en una FMF, el modo deseado es obtenido de acuerdo con el ángulo en el que se incide al núcleo de la fibra.

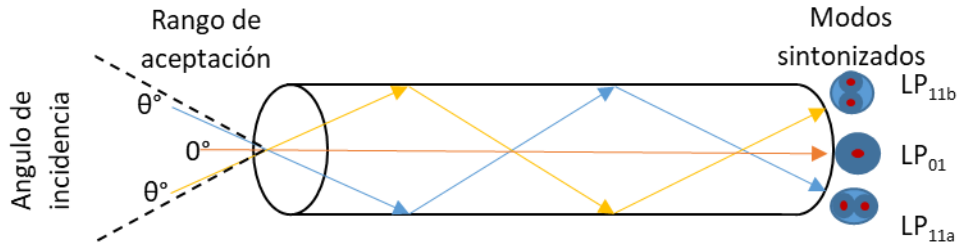


Figura 16. Sintonización de modos a través de la apertura numérica.

El montaje experimental para sintonizar los modos utilizó un láser THORLABS HNL 100L-HeNe, con una longitud de onda de 632.8 nm, un objetivo de microscopio Olympus PLN 20x, una base óptica de traslación THORLABS Nano Max-Ts para cambiar y controlar la posición relativa entre la entrada de la fibra y el haz que le incide, y una SMF. El montaje de sintonización de modos se muestra en la Figura 17, donde la luz emitida por el láser incide en el objetivo, el ángulo de incidencia puede ser cambiado con la base óptica modificando la posición en las coordenadas x, y , y z , de esta manera, se logran sintonizar individualmente los modos que se propagan dentro de la fibra.

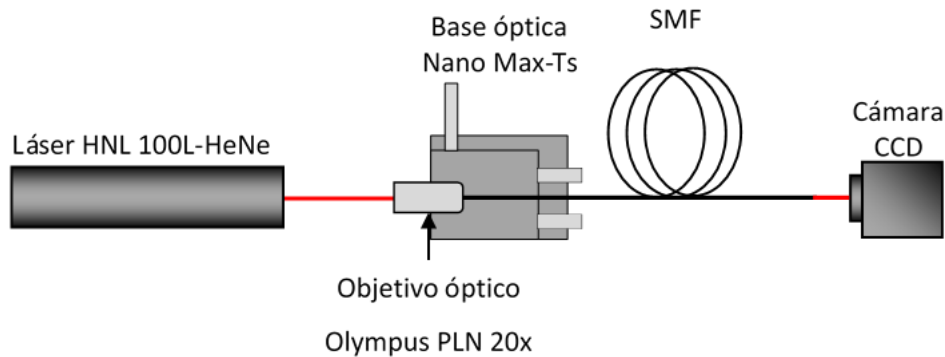


Figura 17. Montaje simulado de la sintonización de modos.

Conversión modal

La conversión de los modos se realizará utilizando un sistema $4f$ con un DMD ubicado en el plano focal común, o plano conjugado. La Figura 18 muestra el montaje simulado para realizar la transformación de modos, sumándose al montaje de la Figura 17, se reubicó la cámara CCD a la salida del nuevo experimento, y fueron adicionados los siguientes dispositivos para realizar la conversión: DMD, cuatro lentes ópticas, un espejo, y un filtro espacial.

En la Figura 18, luego de sintonizar el modo inicial, se usa la lente L1 para llevar el haz colimado y magnificado al DMD. En el DMD se despliega el holograma de Lee que contiene la fase necesaria para convertir el modo. La lente L2 toma la luz difractada en el DMD, para luego enfocarla en el plano del filtro espacial. Este filtro selecciona el primer orden de difracción, bloqueando físicamente los demás. Para hacer registro del modo convertido, se usan las lentes L3 y L4, confocales y con magnificación, para hacer formación de imagen en una cámara.

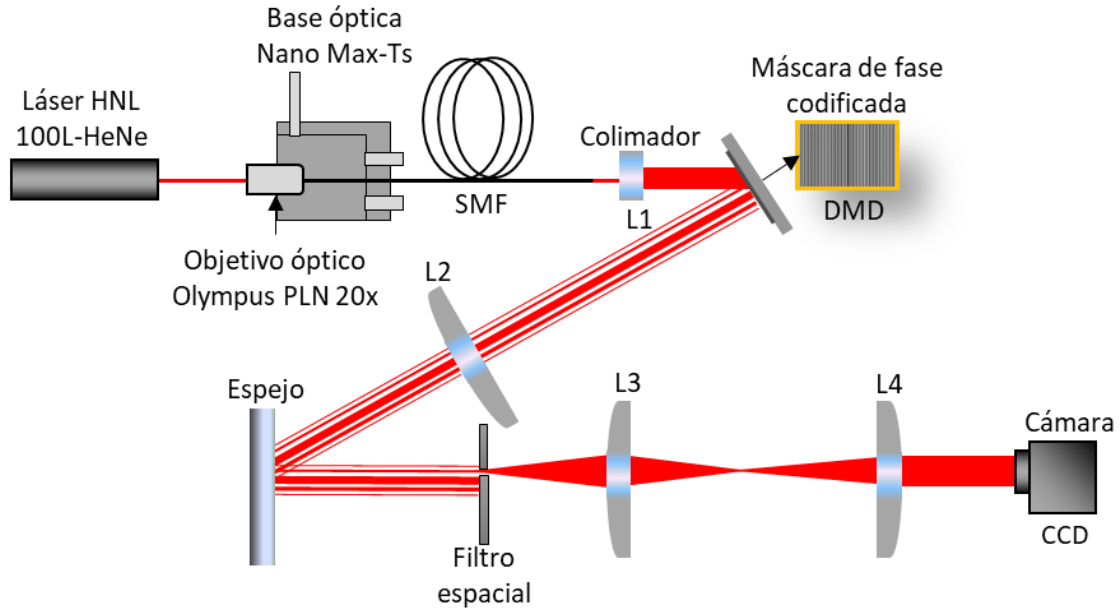


Figura 18. Montaje experimental de la conversión modal.

Resultados experimentales de la conversión modal

El montaje de sintonización modal construido permitió sintonizar los siguientes modos: LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b} . La Figura 19 muestra las imágenes reales de los modos sintonizados con el montaje de la Figura 17.

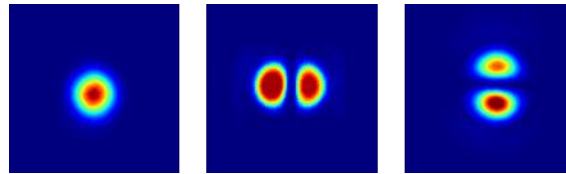


Figura 19. Modos obtenidos con la sintonización de radio modal.

Experimentalmente, se incidió en el DMD el modo fundamental, el primer modo de izquierda a derecha de la Figura 19. Con éste se obtuvieron dos modos de orden superior a través de la conversión: LP_{11} y LP_{21} , que se presentan en la Figura 20, donde se muestran las máscaras codificadas con Lee sin optimizar que se utilizaron para realizar la transformación de los modos. En la última fila de esta figura se ubican los modos teóricos que permiten ver las diferencias que existen entre los modos obtenidos con los de teórico.

En la Figura 21 se desplegaron en el DMD las máscaras de fase codificadas y optimizadas, obteniendo los modos LP_{11} y LP_{21} , pero en este caso más similares a los teóricos en comparados con los modos de la Figura 20.

La Figura 22 muestra el histograma donde se observa la correlación calculada con la ecuación (10) de los modos obtenidos en el laboratorio con los modos teóricos. Las barras de color rojo indican el valor de correlación de los modos obtenidos con máscaras sin optimizar; las de color azul, con

máscaras optimizadas. La correlación de los modos optimizados alcanzó un valor máximo de 0.93 para el modo LP_{11} , y un mínimo de 0.83 para el LP_{21} , mientras que para los modos que se obtuvieron con máscaras sin optimizar, se alcanzó un máximo de correlación del 0.74 para el modo LP_{21} , y un mínimo de 0.7 para el modo LP_{11} . El porcentaje en que aumento la correlación cuando se realizó la conversión modal con máscaras de fase optimizadas fue del 38% para el modo LP_{11} y 14% para el LP_{21} .

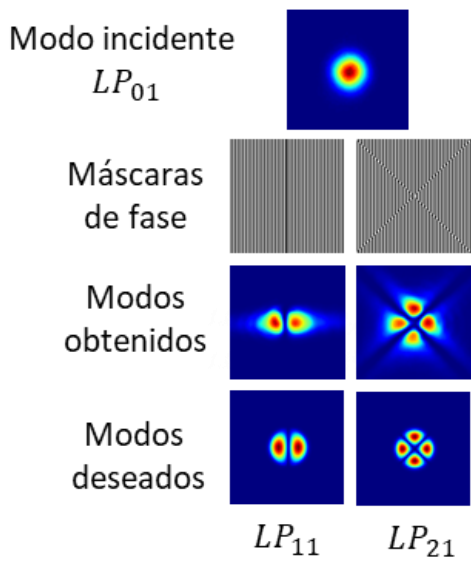


Figura 20. Conversión modal usando máscaras sin optimizar. Los modos obtenidos son imágenes reales obtenidas en el montaje experimental.

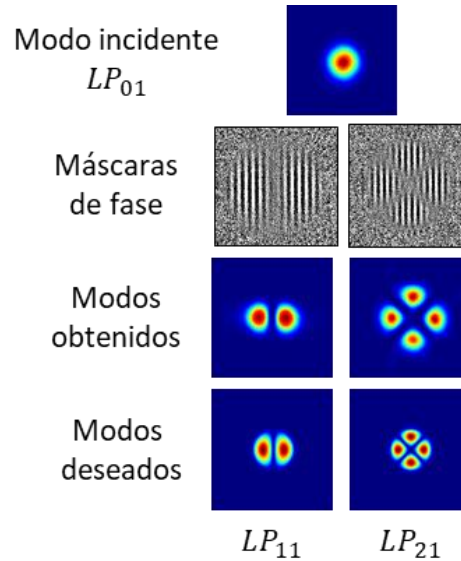


Figura 21. Conversión modal usando máscaras optimizadas. Los modos obtenidos son imágenes reales obtenidas en el montaje experimental.

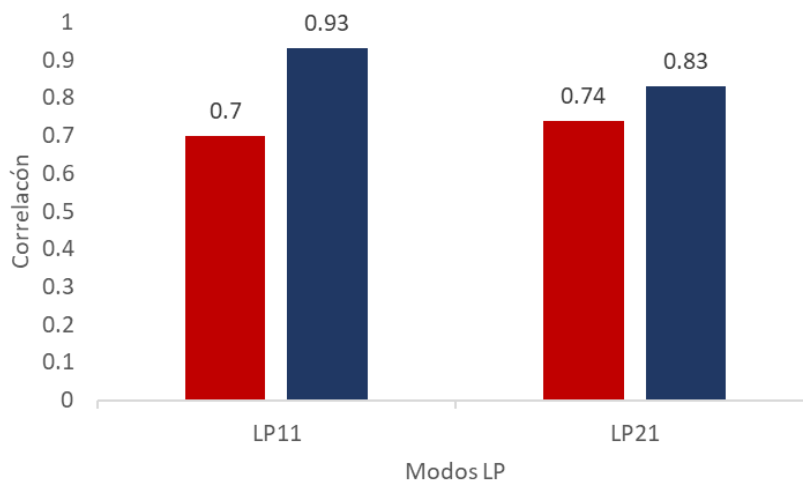


Figura 22. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos experimentalmente y los teóricos. las barras rojas; modos obtenidos con máscaras sin optimizar, Las barras azules; modos obtenidos con máscaras optimizadas. Eje vertical; correlación entre los modos, eje horizontal; modos LP.

La matriz de correlación de la Figura 23 muestra una comparación de los modos experimentales que se obtuvieron en el laboratorio con algunos modos LP utilizando la función espacial de frecuencia. Las dos primeras columnas corresponden a los modos que se calcularon con máscaras sin optimizar y las dos últimas con optimizadas. A pesar de que se observan valores por debajo de 0.26 para el caso

de los modos no optimizados, la diferencia mínima que se encontró entre los modos LP_{11} y LP_{21} con todos los demás fue de 0.25, mientras que en los optimizados todas las diferencias estuvieron por encima de 0.32, a pesar de que se presentaron valores con hasta un 0.5 de correlación, esto indica que siguen siendo menos probable que se detecte un falso positivo en el receptor si los modos son calculados con máscaras optimizadas.

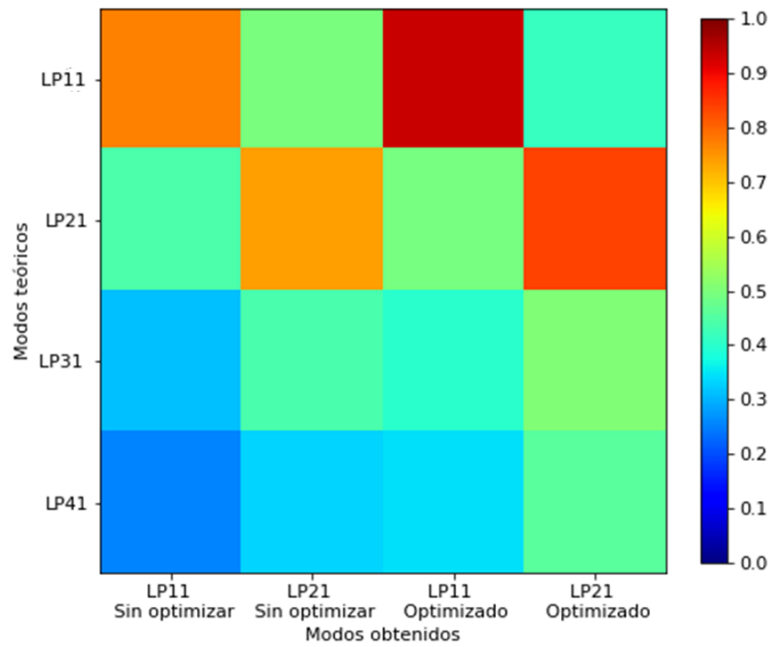


Figura 23. Matriz de correlación de los modos LP_{11} y LP_{21} optimizados y sin optimizar con respecto a otros modos.

Multiplexación y demultiplexación modal

Multiplexación de modos usando un DMD

Para realizar esta multiplexación, es necesario generar varios modos de propagación separados espacialmente. Para esto, se crean hologramas para cada modo, según la ecuación (6), donde cada holograma tiene una portadora espacial diferente, y luego se superponen. De esta forma, después del filtro espacial se obtiene un conjunto de modos de propagación separados. Al aplicar este método, con hologramas calculados a partir de la ecuación (6), es posible generar conjuntos arbitrarios de modos ópticos de propagación, con distribuciones espaciales controladas. En la Figura 24 se muestra el proceso de generación de los hologramas con la técnica de Lee para la multiplexación o demultiplexación usando un DMD; obsérvese que se utilizaron las máscaras no optimizadas para convertir el modo fundamental en los modos LP_{11} , LP_{21} , LP_{31} y LP_{41} .

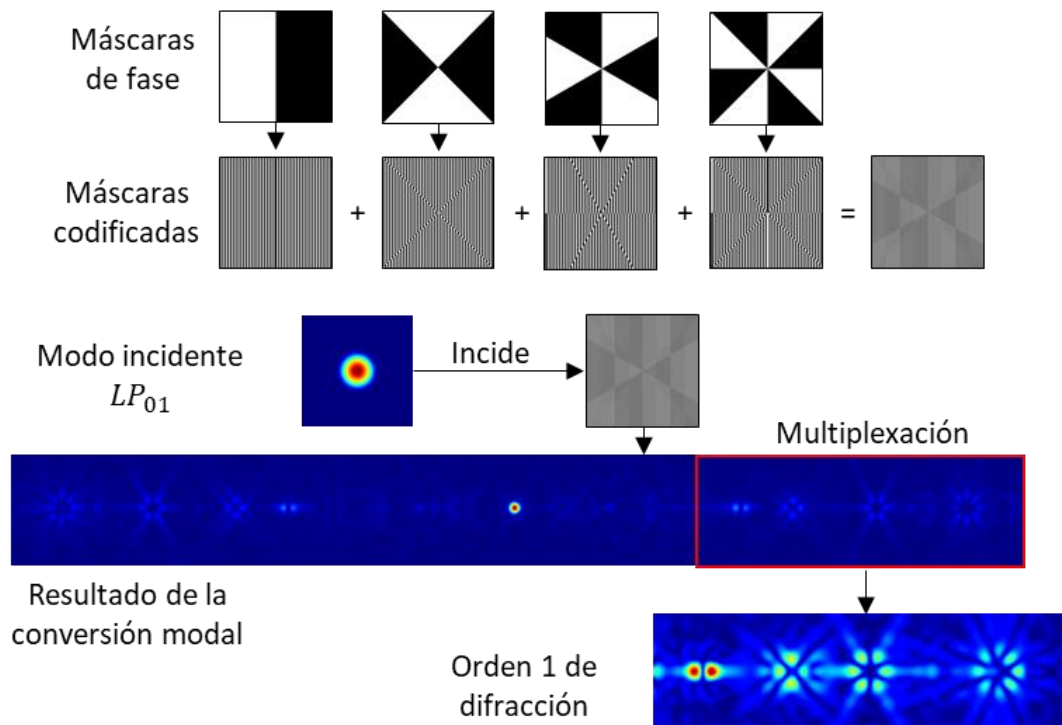


Figura 24. Proceso de construcción de una máscara de fase para realizar MDM con varios modos separados espacialmente. Las máscaras implementadas no están optimizadas.

La construcción del multiplexor simulado trabaja con el mismo concepto de la conversión modal explicado en la Figura 18. Sin embargo, en este caso cada modo tiene una separación diferente del orden cero de difracción.

En la Figura 24 se puede ver que, al realizarse la conversión en espacio libre, existen diferencias notables en la distribución de energía de los modos generados con los modos teóricos que se quieren obtener, incluyendo un esparcimiento de energía alrededor de las zonas de los lóbulos de los modos. Esto es debido a que se realizó la conversión del modo fundamental usando solamente la diferencia de fase que existe entre el modo fundamental y los diferentes modos deseados, pero en espacio libre.

De este modo, se realiza una optimización de las diferentes fases de conversión para lograr la mayor fidelidad posible con los modos teóricos.

En la Figura 25 se presenta nuevamente el proceso de multiplexación con las máscaras optimizadas, donde se aprecia una mayor similitud con los teóricos y la energía se encuentra mayoritariamente concentrada en los lóbulos modales.

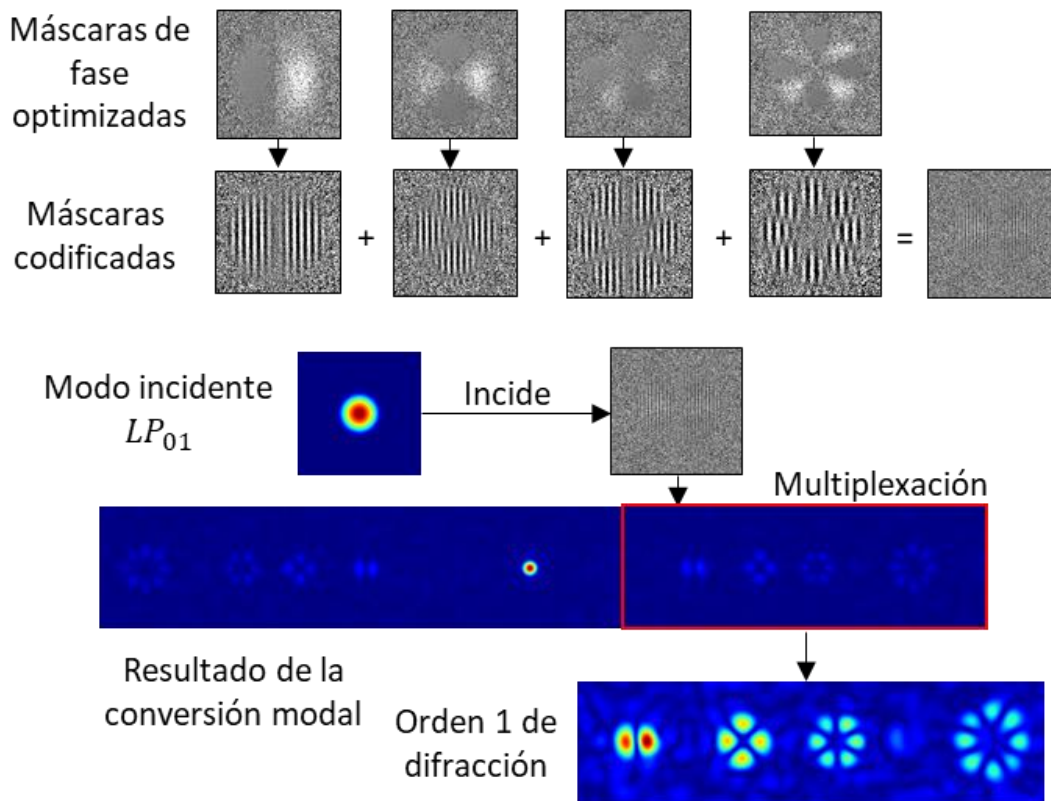


Figura 25. Proceso de construcción de máscaras de fase para realizar MDM utilizando máscaras optimizadas y codificadas con hologramas de Lee desplegadas en un DMD.

El histograma de la Figura 26 muestra la correlación entre los modos teóricos y los modos obtenidos en el proceso de multiplexación (Figura 24 y Figura 25). Las barras rojas corresponden a los obtenidos con máscaras sin optimizar y las azules con máscaras optimizadas. En el caso de las primeras; la correlación osciló entre 0.39 y 0.5, en las segundas; entre 0.85 y 0.88. La Figura 27 presenta el porcentaje de correlación que incremento cada modo obtenido de la multiplexación con el holograma de fase con portadoras espaciales deferentes, el valor mínimo aumentado fue del 49% y el máximo del 61%.

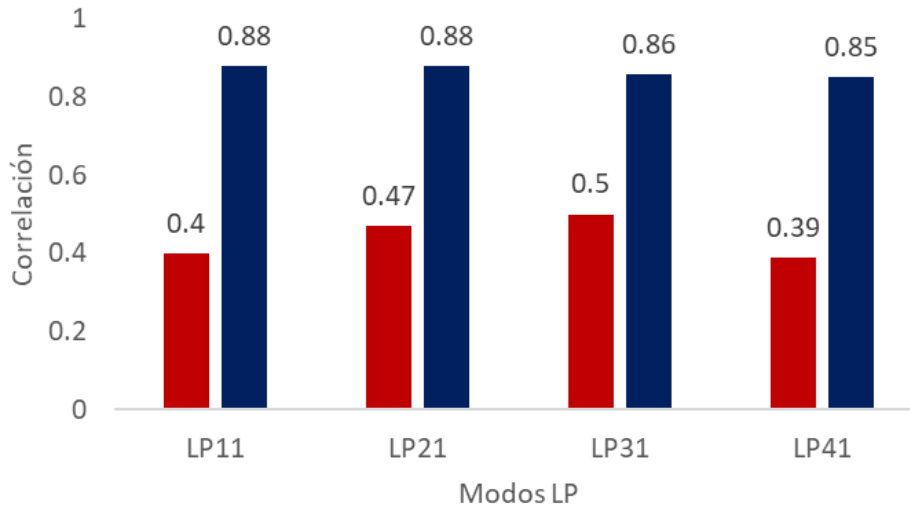


Figura 26. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos en la multiplexación. Las barras rojas; modos obtenidos con máscaras sin optimizar, las barras azules; modos obtenidos con máscaras optimizadas. Eje vertical; correlación entre los modos, eje horizontal; modos LP.

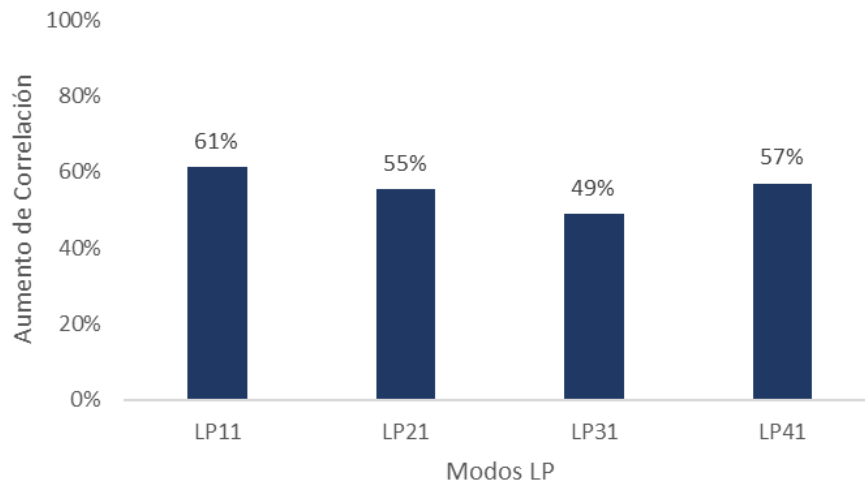


Figura 27. Histograma del porcentaje de correlación que aumentó cada modo convertido con el holograma de fase optimizado.

Aprovechando los grados de libertad de la luz se puede hacer una combinación entre algunas técnicas de multiplexación. En la Figura 28 se muestra una multiplexación utilizando las técnicas PDM y MDM, En la parte superior se tiene la multiplexación utilizando máscaras de fase sin optimizar, y en la inferior, usando las optimizadas. Se puede observar en el primero hay un mayor esparcimiento de energía por fuera de los modos, junto con diferencias morfológicas con respecto a los teóricos. En el

segundo caso, hay una mayor similitud entre los modos obtenidos y los modos deseados, y la energía se encuentra más concentrada en los modos generados y no a sus alrededores.

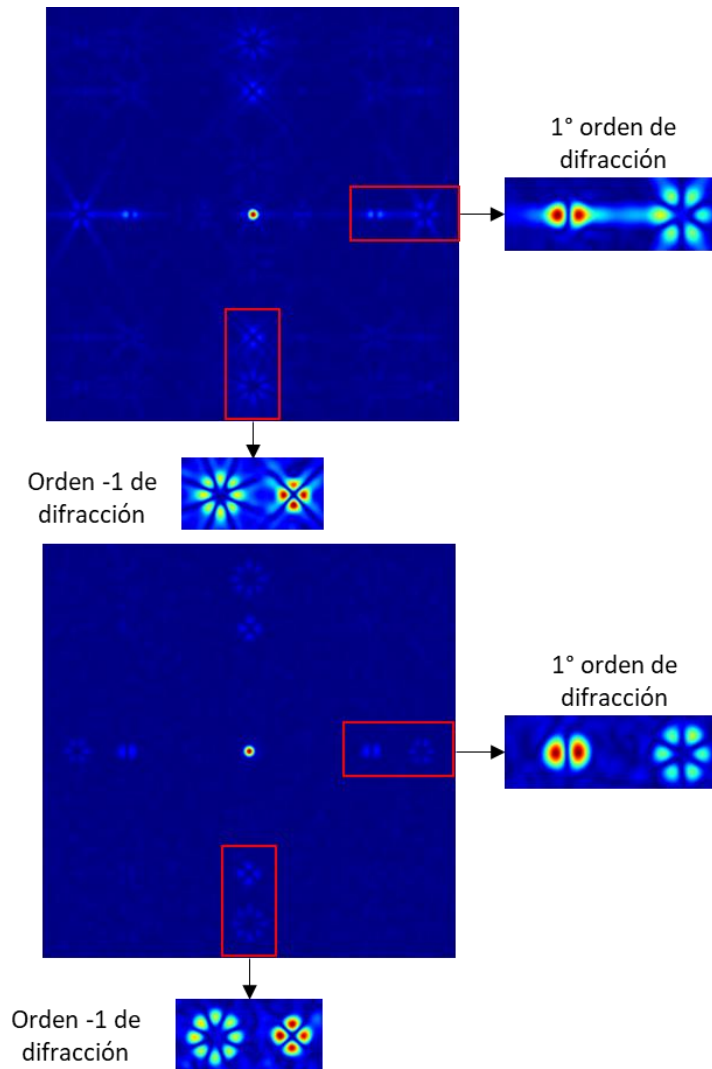


Figura 28. Combinación de las multiplexaciones PMD y MDM. En la parte superior, multiplexación con máscaras sin optimizar; y en la inferior, optimizadas.

En la

Figura 29 se presenta el histograma de la correlación entre los modos teóricos y los modos obtenidos en el proceso de MDM-PDM (Figura 28). Las barras rojas corresponden a aquellos obtenidos con máscaras sin optimizar y las azules con máscaras optimizadas. En la primera, la correlación empezó en 0.41 para el modo LP_{41} y alcanzó 0.72 para el modo LP_{11} , en el segundo, el valor mínimo fue de 0.87 y el máximo de 0.94. La Figura 30 muestra el porcentaje que aumentó la correlación cuando se utilizaron máscaras optimizadas en la conversión modal, donde el menor aumento fue de 38% y el mayor de 59%.

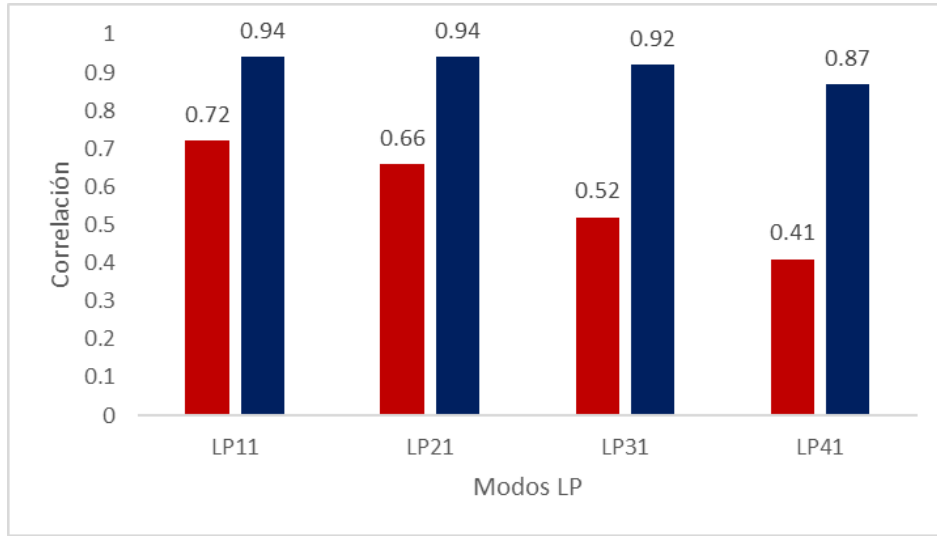


Figura 29. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos en la MDM-PDM. Las barras rojas; modos obtenidos con máscaras sin optimizar, las barras azules; modos obtenidos con máscaras optimizadas. Eje vertical; correlación entre los modos, eje horizontal; modos LP.

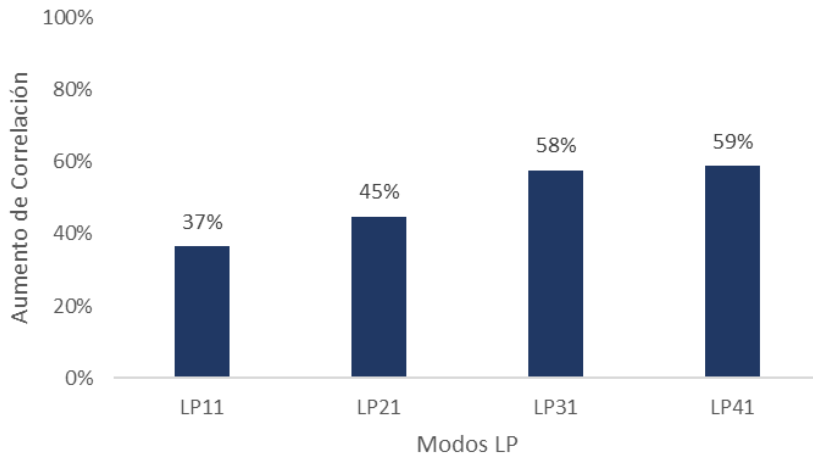


Figura 30. Histograma del porcentaje de correlación que aumentó cada modo convertido con el holograma de fase optimizado.

Demultiplexación de modos usando un DMD

El proceso de demultiplexación, en este caso, consiste en convertir modos de orden superior al modo fundamental. En este proceso es muy importante lograr modos fundamentales lo más cercano posible al teórico para que puedan ser acoplados en fibras monomodo. Además, en la demultiplexación se debe asegurar convertir selectivamente a un modo particular, evitando la diafonía. Se construyó la simulación de la demultiplexación suponiendo la existencia de DMGD entre los modos que viajan por el canal de la fibra, de tal manera que cada modo podrá llegar a su receptor sin causar interferencia en los demás. Para separar espacialmente los modos se diseñó una máscara similar a la de la multiplexación. En la Figura 31 se describe el proceso de la demultiplexación. En primer lugar, se

tienen las máscaras de fase que pueden convertir de un orden superior al fundamental. Cada una de estas fases incluyen una portadora espacial diferente para permitir la separación luego de la conversión. Se generan los hologramas de Lee para cada fase, y luego se superponen todos los hologramas.

Al incidir un modo de orden superior sobre el DMD, este es convertido al modo fundamental por una de las fases en el holograma, y según su portadora tendrá una ubicación única en el rango de espacio especificado. las fases restantes convierten al modo en aberraciones que no serán legibles o identificadas en el sistema receptor.

En el proceso de demultiplexación solo el modo fundamental posee una alta intensidad en el centro, permitiendo que supere un umbral especificado. Al ubicar varias fibras separadas espacialmente, solo ingresara a una de estas el modo LP_{01} .

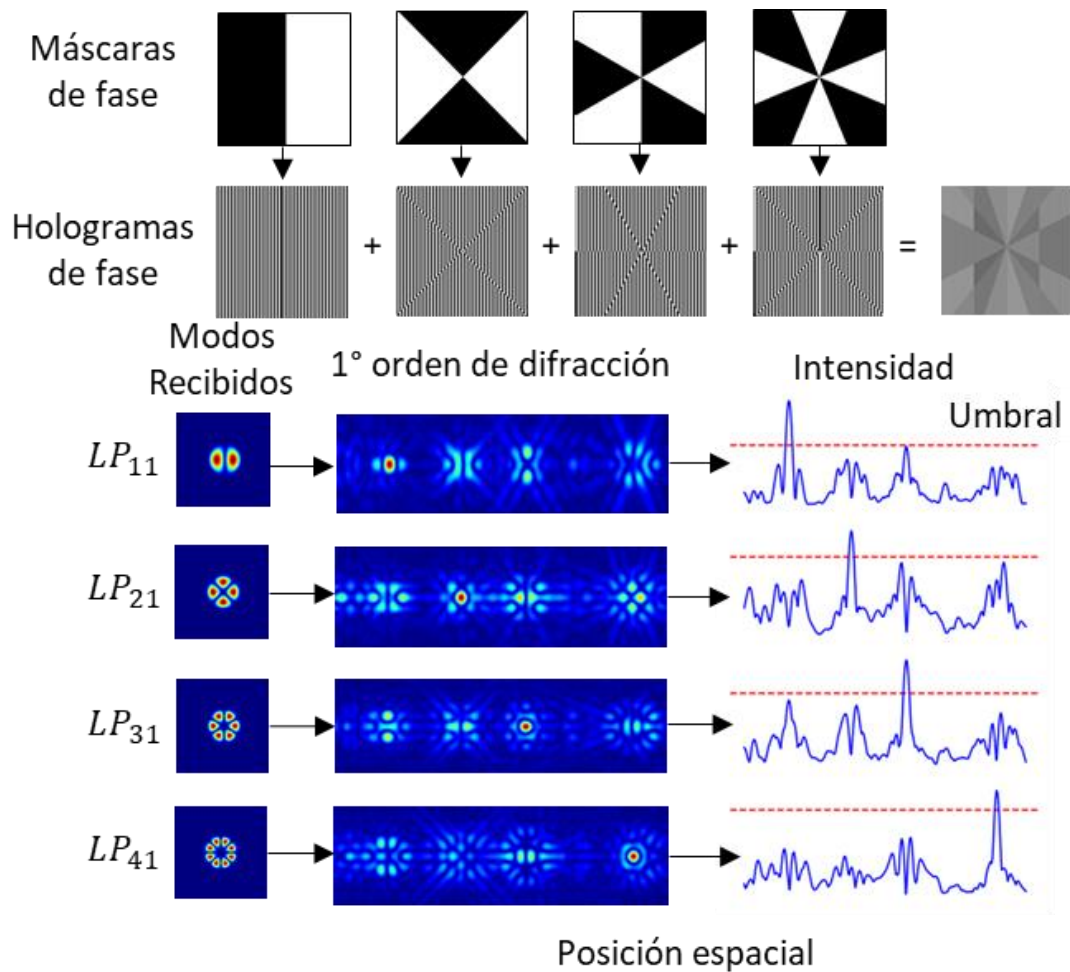


Figura 31 Proceso de demultiplexación de un DMD. Primer paso, diseño de hologramas de fase con múltiples portadoras. Segundo paso, conversión de los modos incidentes en el modo fundamental. Tercer paso, umbral de intensidad.

El demultiplexor de la Figura 32 se construyó con máscaras de fase optimizadas. Realizando una comparación con la Figura 31 donde ambas simulaciones fueron calculadas en las mismas condiciones, se obtiene en este caso que las aberraciones en el primer orden de difracción se redujeron, causando que el pico de intensidad del modo fundamental sobresaliera más, esto permite que llegue una mayor potencia al receptor correspondiente y que no se presenten errores en de interpretación en el receptor.

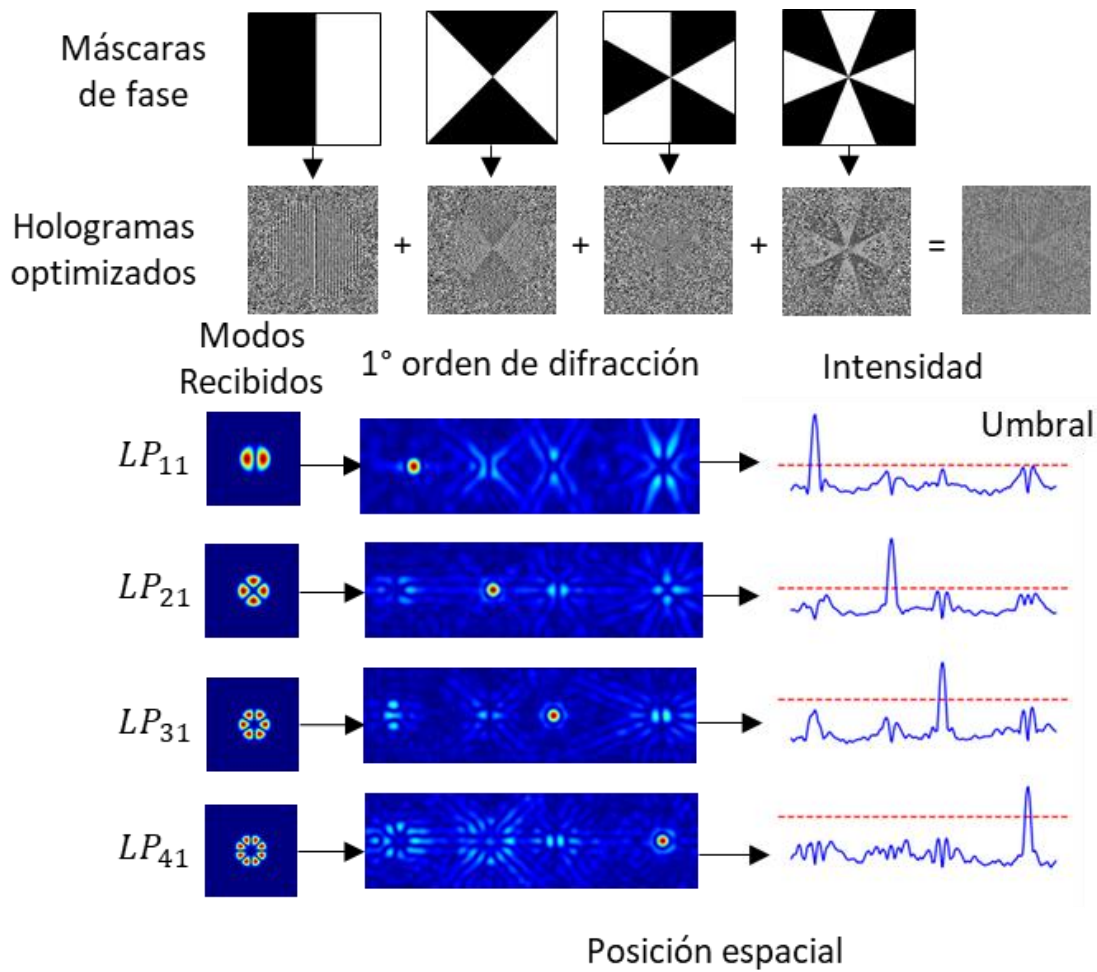


Figura 32. Proceso de demultiplexación de un DMD. Primer paso, diseño de hologramas de fase con múltiples portadoras optimizada. Segundo paso, conversión de los modos incidentes en el modo fundamental. Tercer paso, umbral de intensidad.

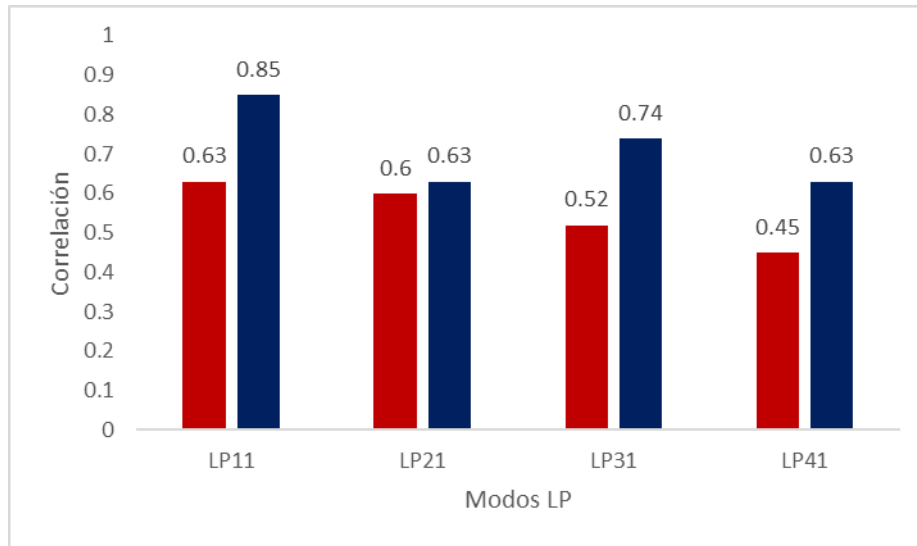


Figura 33. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos en la demultiplexación. Las barras rojas; modos obtenidos con máscaras sin optimizar, las barras azules; modos obtenidos con máscaras optimizadas. Eje vertical; correlación del modo fundamental con el obtenido, eje horizontal; modos LP.

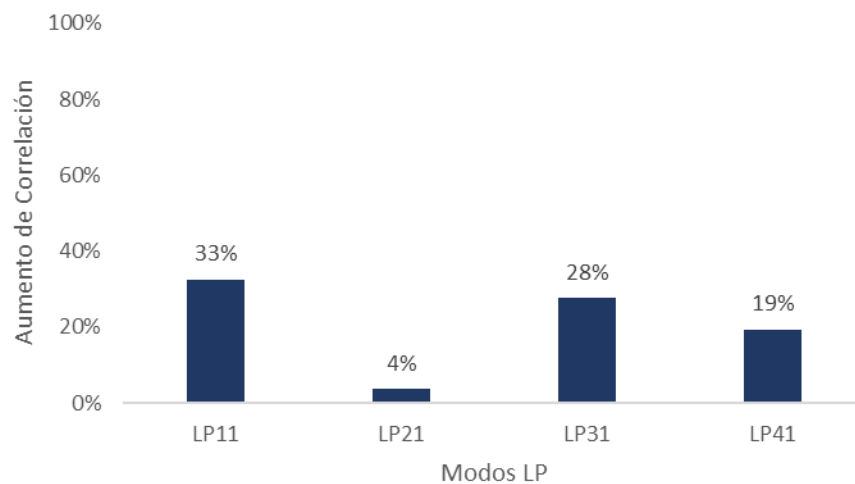


Figura 34. Histograma del porcentaje de correlación que aumentó cada modo convertido con el holograma de fase optimizado.

En la Figura 33 se presenta el histograma de correlación de cada modo fundamental obtenido en las Figura 31 y Figura 32 con respecto al teórico. Las barras rojas corresponden a los obtenidos con máscaras sin optimizar y las azules optimizadas. En las primeras; la correlación mínima fue de 0.45 para el modo de orden superior y con un máximo de 0.63 para el modo de menor orden que llega al receptor. En las segundas; el mínimo comenzó desde 0.63, terminando en un máximo de 0.85,

correspondiente a los mismos órdenes. La Figura 34 muestra el porcentaje que aumento de correlación los modos que fueron convertidos con máscaras de fase optimizadas, donde se logró obtener un incremento mínimo del 4% y máximo del 33%.

En la Figura 35 se muestra la matriz de correlación de los modos que llegan al receptor, el eje vertical corresponde al modo fundamental teórico y el horizontal a los modos recibidos, una vez llega un modo, este pasa por el proceso de conversión modal usando un DMD con un hologramas con diferentes portadoras generando como resultado varios modos que apuntaran separadamente a cada uno de los receptores. Se logra identificar que el modo con mayor intensidad (Figura 32) y correlación (Figura 33) a los modos teóricos es el LP_{01} , los demás modos poseen una correlación por debajo 0.55. Con esto se puede asegurar que hay un incremento en la probabilidad de que el receptor estará recibiendo el modo fundamental.

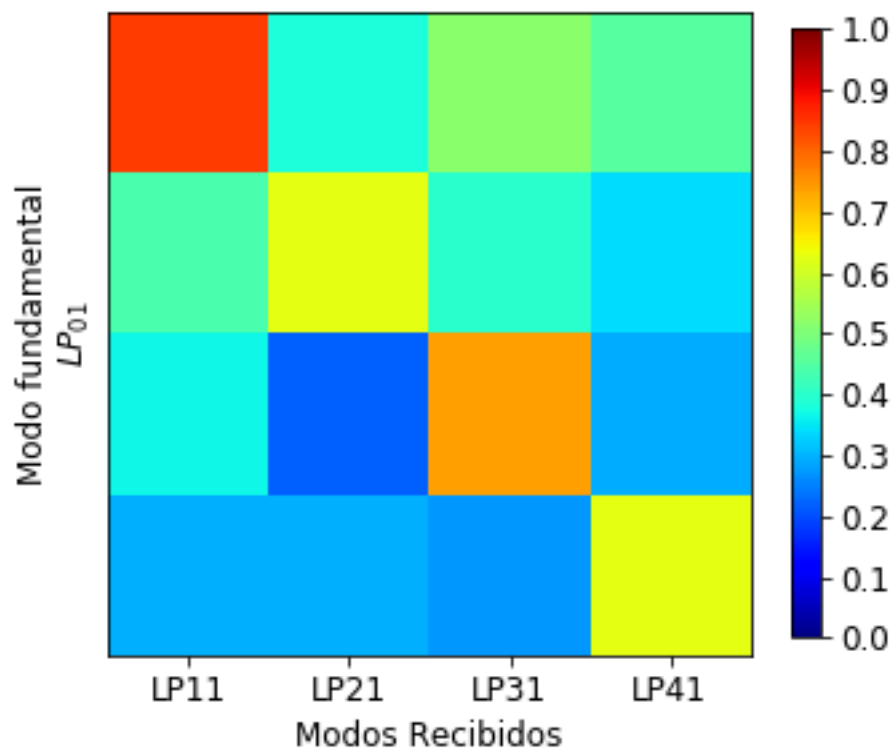


Figura 35. Matriz de correlación de la demultiplexación, el eje vertical corresponde al modo fundamental teórico y el horizontal a los modos recibidos después de convertidos.

Resultados experimentales de la multiplexación

En relación con la Figura 36 se observa la MDM a través de la superposición de dos máscaras de fase codificadas con hologramas de Lee, pero solo una optimizada. Nótese que el modo del lado izquierdo,

que no está optimizado, posee aberraciones que afectan al modo adyacente, ocasionándole pérdida de similitud con los modos teóricos y suma de intensidad en uno de sus lóbulos, causando que los demás lóbulos se vean atenuados, lo que podría confundir al receptor.

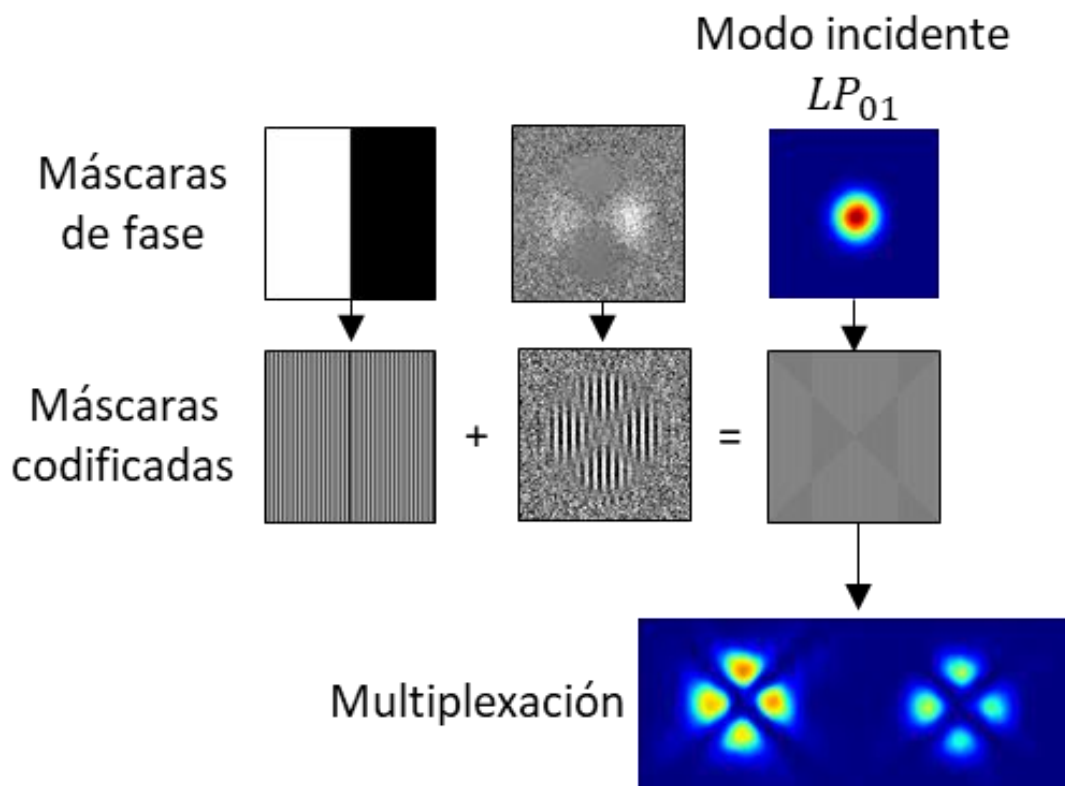


Figura 36. Multiplexación a través de la superposición de una máscara sin optimizar y con una optimizada. Ambas máscaras se codifican con Lee. El modo incidente es el LP_{01}

La Figura 37 se evidencia nuevamente la técnica de MDM, pero en este caso ambas máscaras están codificadas y optimizadas, además de poseer el mismo periodo (igual distancia espacial) que las máscaras de la Figura 36. Es notable que existe una mayor simetría en la forma de los modos optimizados, las aberraciones fueron atenuadas y no se presentaron afectaciones entre los modos los cuales mantuvieron una intensidad constante.

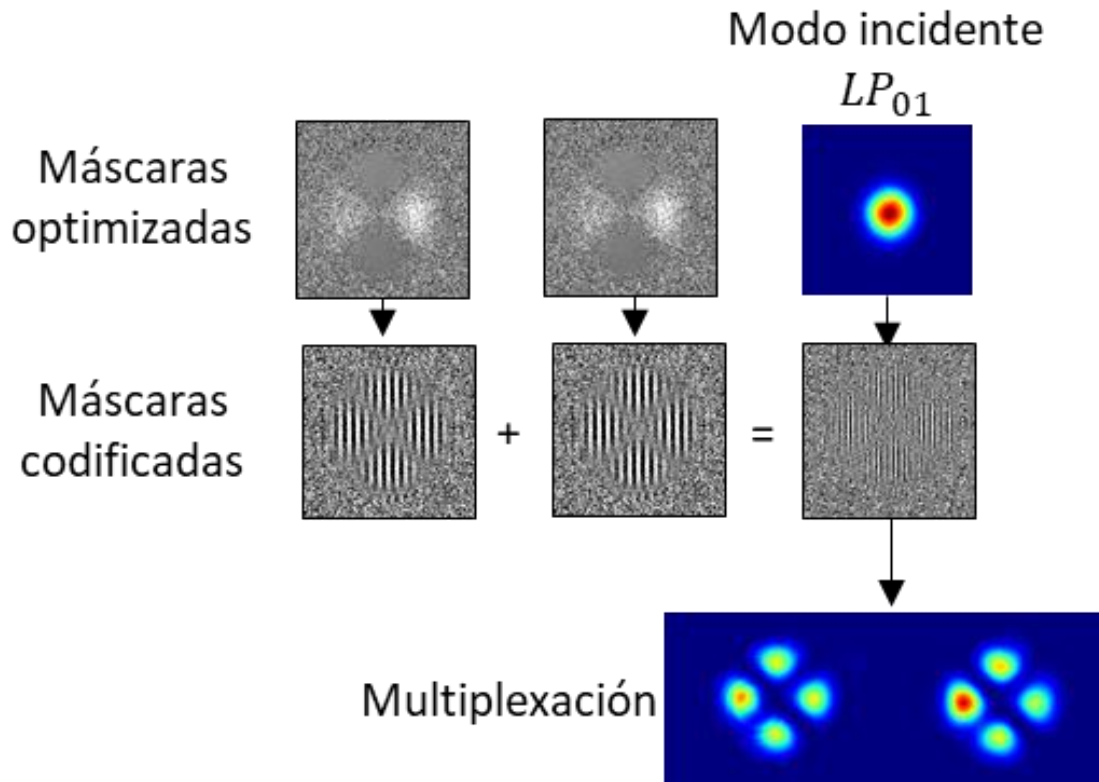


Figura 37. Multiplexación a través de la superposición de máscaras optimizadas y codificadas con Lee. El modo incidente es el LP_{01}

Los resultados obtenidos demuestran que se puede realizar multiplexación con las máscaras compartidas a través de un DMD. La Figura 38 muestra el histograma de los modos obtenidos en el montaje experimental, las barras rojas representan la correlación entre los modos obtenidos con los teóricos de la Figura 37, mientras las azules corresponden a los de la Figura 36. En este ejercicio ambos experimentos estuvieron sometidos a las mismas condiciones y es evidente que al segundo modo obtenido en la primera multiplexación (correlación de 0.7), fue afectado fuertemente por las aberraciones del modo calculado con máscaras sin optimizar, comparando con las barras azules, la diferencia fue del 20%, cuando deberían tener la misma correlación en el caso del modo del modo ubicado a la izquierda, y para el modo de la derecha, el aumento fue del 25%. La multiplexación realizada con las máscaras optimizadas demostró mantener una estabilidad mayor entre los modos evitando ser perjudicadas por las aberraciones, dado que éstas fueron mitigadas casi en su totalidad.

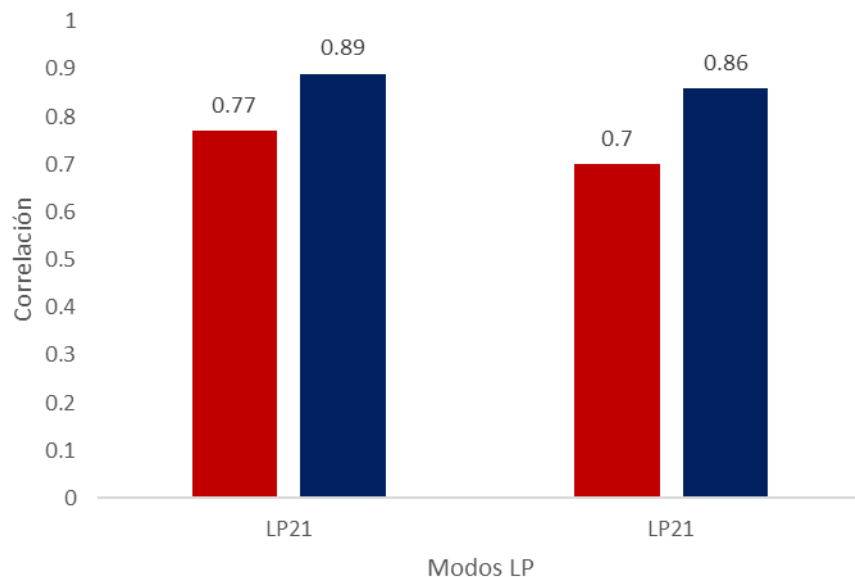


Figura 38. Histograma de la correlación entre los modos obtenidos en la multiplexación experimental usando un SLM-DMD. las barras rojas representan la correlación entre los modos obtenidos con los modos teóricos de la Figura 36, mientras las barras azules son las de la Figura 37. Eje vertical; correlación entre los modos, eje horizontal; modos LP.

Sistema completo para multiplexar y demultiplexar modos usando la conversión modal

Se realiza la simulación de un sistema de comunicaciones para la multiplexación y demultiplexación de modos implementando la conversión modal a través de un DMD. Nótese en la Figura 39 se muestra las tres etapas que componen el sistema de comunicación.

La primera etapa comienza con la Multiplexación, la simulación de esta técnica comienza con un láser que genera un haz de luz hacia un colimador óptico que permita expandirlo para que incida sobre una mayor cantidad de área y de manera uniforme en el DMD, convirtiendo el modo incidente en varios modos LP de diferente orden usando una máscara de multiplexación. Cada modo obtenido será un canal de comunicaciones óptico independiente. Posteriormente, con un filtro espacial se filtran todos los órdenes de difracción excepto el orden -1 o 1 , estos son los que contienen los modos requeridos. Finalmente, el haz se acoplará a una FMF que soportará todos los modos generados.

Continuando con la segunda etapa, Canal óptico, en este trabajo se asumió una FMF ideal que tenga la capacidad de transmitir los modos obtenidos en la etapa de multiplexación (LP_{11} , LP_{21} , LP_{31} y LP_{41}), en este caso, se toma provecho del fenómeno DMGD, en consecuencia, debe existir una distancia adecuada entre los modos, es decir, no podría ser un DMGD grande ya que sería difícil compensar la distancia y tampoco pequeño con razón a la diafonía modal. De esta forma los modos viajarán en el interior del canal hasta salir a través de un objetivo óptico al espacio libre y continuar con en la segunda etapa.

Finalmente, la tercera etapa, Demultiplexación, este último está constituido por un colimador que realiza la misma función del primer proceso, un DMD con una máscara compartida que convierte cada modo que incide en el fundamental, de forma que cada modo obtenido tenga una separación espacial específica. Una vez difractado el haz en el DMD se separan los órdenes de difracción mediante una lente y a través de un filtro espacial se selecciona cualquiera de los dos órdenes de difracción más cercanos al orden cero, para que finalmente por medio de un filtro Pasa Altas el modo incida únicamente en el receptor correspondiente y no genere interferencia en los demás.

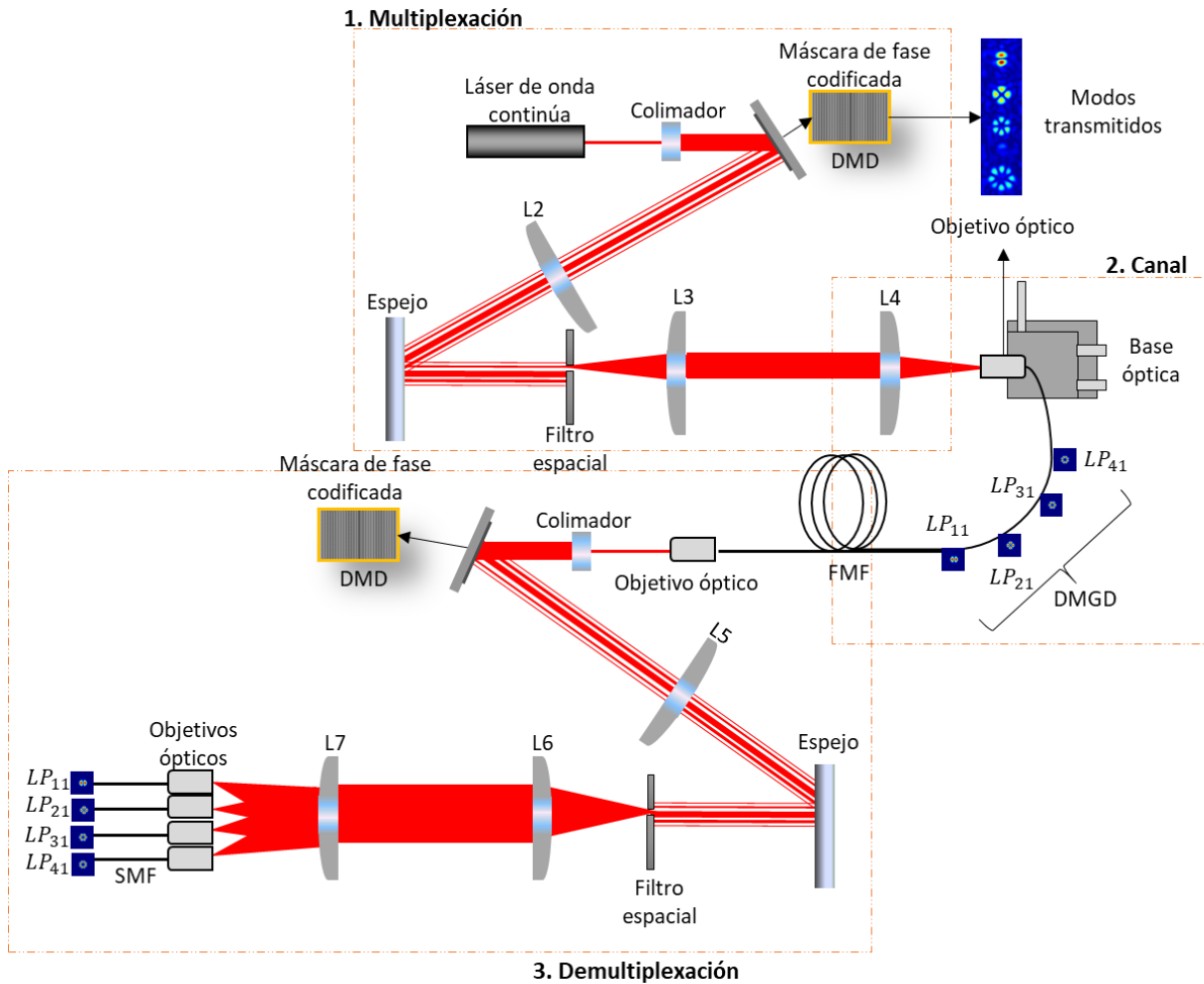


Figura 39. Montaje simulado de un sistema de multiplexación y demultiplexación basado en la conversión modal compuesta por tres etapas: 1. Multiplexación, 2. Canal y 3. Demultiplexación.

Conversión modal en una red de telecomunicaciones

Una propuesta general para agregar la técnica MDM en una red de telecomunicaciones se describe inicialmente en la Figura 40, donde se supone una red con topología de anillo compuesta de varios nodos en donde se presta el servicio de conexión a varios clientes. Las fibras que conectan los nodos son FMF y por cada una de estas viajarán tres modos a los que se les multiplexó varias longitudes de onda a través de la técnica WDM.

En la Figura 41 se describe que elementos conforman cada nodo, empezando por 2 módulos de multiplexación modal para las salidas y 2 de demultiplexación modal para las entradas, 12

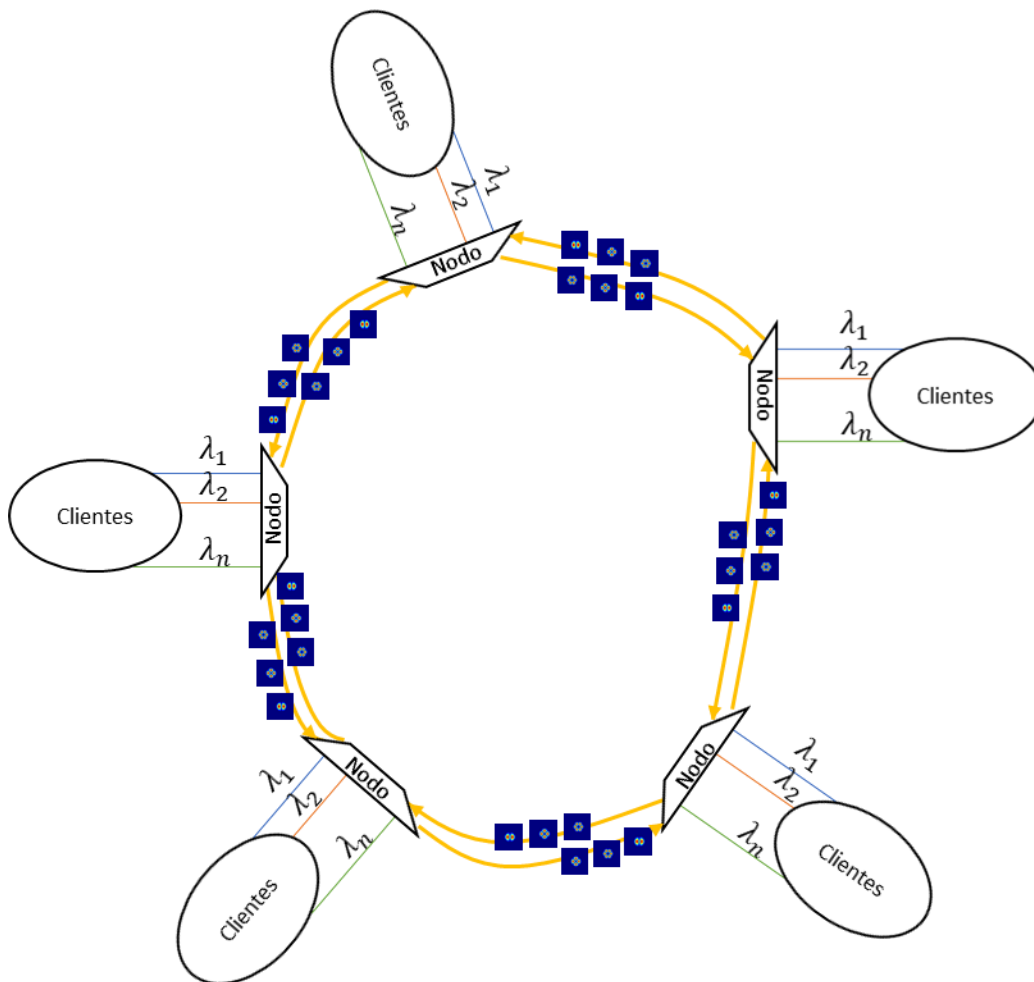


Figura 40. Topología de red en anillo compuesta por fibras de pocos modos entre los nodos y fibra monomodal entre los nodos y los clientes.

módulos de WDM que realizan la multiplexación y demultiplexación de los modos, y varios transmisiones y receptores, que recibirán y enviarán la información de los clientes. Las fibras que conectan los elementos al interior del nodo son fibras monomodo.

La función que realiza cada nodo se describe a continuación: en la entrada del nodo estarán llegando varios modos de orden superior al fundamental separados espacialmente, estos son demultiplexados y convertidos al modo fundamental para luego ser enviados al correspondiente modulo WDM, que se encargará dinámicamente de separar cada longitud de onda y de manera selectiva extraer, insertar o dejar pasar cada una de estas (cada una posee información diferente), de manera que lleguen a un cliente o sigan su camino. La salida de los nodos tiene la tarea de tomar varios canales que llegan a través de módulos WDM para multiplexarlos en uno de los modos que viajaran por la fibra de pocos

modos. De esta forma se mantienen conectados múltiples clientes en una red óptica basada en un sistema combinado de MDM y WDM.

Los nodos propuestos son similares a los ROADMs (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) con la diferencia de que a las entradas se demultiplexara espacialmente y en las salidas se multiplexara también en el dominio espacial. Esta adición permitirá que cada nodo pueda conectar más clientes permitiendo un aumento en el aprovechamiento de los canales.

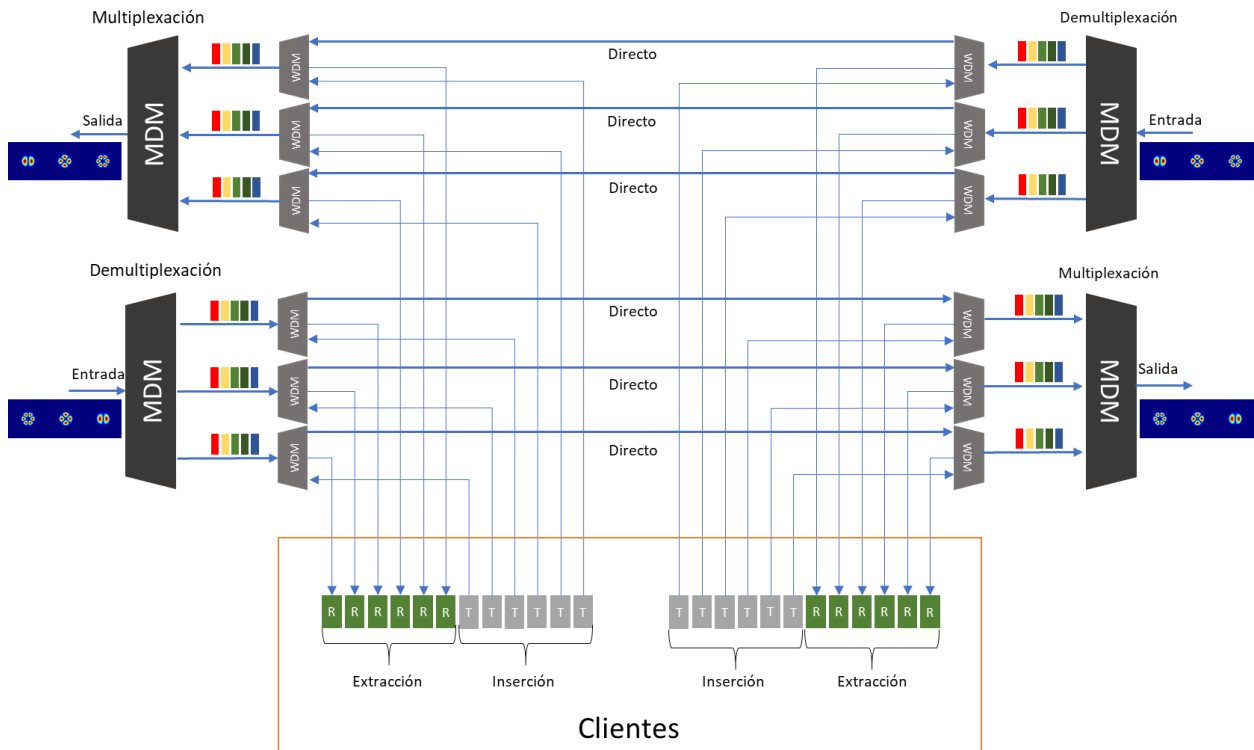


Figura 41. Elementos que componen el nodo de una red de telecomunicaciones de topología en anillo que utiliza las técnicas MDM y WDM.

Conclusiones y trabajo a futuro

Se aplicó un algoritmo de recocido simulado para optimizar las máscaras de fase que se implementaron para convertir los modos con un DMD simulado y experimental. Este algoritmo permitió generar en el espacio libre modos altamente similares a aquellos que viajan dentro de una fibra de pocos modos. En el montaje simulado; el valor de correlación inició en 0.44, y alcanzó 0.99 (Figura 12), en el montaje experimental, inició con 0.7, y alcanzó 0.93 (Figura 22). Este método es efectivo para disminuir las diferencias que se presentan por las condiciones de frontera entre los medios guiados y el espacio libre, y es necesario para lograr el acople eficiente de los modos a FMF y SMF.

Los resultados muestran que un conversor basado en DMD se puede implementar en sistemas de multiplexación y demultiplexación para técnicas como MDM, debido a que permite tener un control dinámico de la conversión de los modos, igualmente posibilita la separación de varios de estos con un mismo holograma que posee múltiples portadoras asignadas a la codificación binaria de Lee. Obtener modos similares a los guiados también puede incrementar la eficiencia de acople desde el espacio libre a la fibra óptica, y disminuye la diafonía modal (figuras Figura 36 y Figura 37). Adicional, se demuestra mediante simulación la combinación de la técnica PDM con la MDM, donde a través de comparaciones cuantitativas se obtuvo una mejoría en los obtenidos con las máscaras optimizadas.

Aunque existen limitaciones en la difracción de una máscara de fase, las altas correlaciones conseguidas mostraron que la aproximación es adecuada. Cada máscara necesitó ser optimizada una sola vez para cada modo, lo que ofrece ventajas a la técnica MDM con motivo a que se puede tener un numeroso banco de máscaras de fases que pueden ser reutilizadas al momento realizar la multiplexación o demultiplexación en estos sistemas.

No se ha encontrado en el estado del arte otro trabajo donde se implemente el DMD como conversor modal. Con este trabajo se comprueba que este dispositivo es apto para la conversión de los modos, proceso previo utilizado por la técnica de Multiplexación por División de Modos.

Como trabajo a futuro se podría agregar información a los modos convertidos y medir la relación señal a ruido (SNR) a la salida del sistema, logrando determinar la estabilidad de la comunicación cuando se transmiten modos convertidos usando máscaras sin optimizar y optimizadas. También, la construcción experimental de un sistema de multiplexación y demultiplexación de modos, que luego nos permita incrementar la capacidad de información en el canal y que, a su salida esta continúe siendo legible, para este caso también se usaría la SNR. Logrando estas propuestas, se tendrían las bases para comenzar a integrar esta nueva tecnología a las redes de transporte actuales de manera que permita superar las tasas de bit que se envían por un canal de telecomunicaciones óptico.

Una parte de la componente experimental no se pudo desarrollar debido a circunstancias de fuerza mayor de carácter administrativo, y la actual crisis sanitaria. Sin embargo, el modelamiento numérico que se hizo de los fenómenos da una idea de lo que se conseguiría experimentalmente ya que estos se hicieron a través de la transformadas de Fourier y ecuaciones conocidas, por lo tanto, los resultados obtenidos constituyen la base del trabajo a futuro de este trabajo de grado.

Referencias

- [1] R. J. Essiambre and R. W. Tkach, "Capacity trends and limits of optical communication networks," in *Proceedings of the IEEE*, 2012.
- [2] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition.*, vol. 6. 2002.
- [3] P. J. Winzer, "High-spectral-efficiency optical modulation formats," *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 24, pp. 3824–3835, 2012.
- [4] D. J. Richardson, J. M. Fini, and L. E. Nelson, "Space-division multiplexing in optical fibres," *Nat. Photonics*, vol. 7, no. 5, pp. 354–362, 2013.
- [5] J. Carpenter and T. D. Wilkinson, "Holographic mode generation for mode division multiplexing," *Opt. InfoBase Conf. Pap.*, pp. 9–11, 2012.
- [6] S. Li and J. Wang, "Simultaneous demultiplexing and steering of multiple orbital angular momentum modes," *Sci. Rep.*, vol. 5, pp. 1–8, 2015.
- [7] C. H. Yeh, B. S. Guo, C. S. Gu, C. W. Chow, and W. P. Lin, "Use of Same WDM Channels in Fiber Network for Bidirectional Free Space Optical Communication with Rayleigh Backscattering Interference Alleviation," *IEEE Access*, vol. 7, no. V1c, pp. 169571–169576, 2019.
- [8] P. J. Winzer, "Making spatial multiplexing a reality," *Nature Photonics*. 2014.
- [9] A. Bogoni *et al.*, "OTDM-based optical communications networks at 160 Gbit/s and beyond," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–12, 2007.
- [10] K. Emura *et al.*, "Characteristics of optical duobinary signals in terabit/s capacity, high-spectral efficiency WDM systems," *J. Light. Technol.*, vol. 16, no. 5, pp. 788–797, 2002.
- [11] B. Carl and S. Brook, "WDM optical fiber communication system with improve dispersion compensation," *Geothermics*, vol. 14, no. 4, pp. 595–599, 1985.
- [12] F. J. Primus, M. D. Goldenberg, and S. Hills, "Dual Window WDM Optical Fiber Communication," *United States Pat.*, vol. 33, no. 19, pp. 710–711, 1991.
- [13] M. S. Kao and J. Wu, "Signal Light Amplification by Stimulated Raman Scattering in an N-Channel WDM Optical Fiber Communication System," *J. Light. Technol.*, vol. 7, no. 9, pp. 1290–1299, 1989.
- [14] P. J. Winzer, "Optical networking beyond WDM," *IEEE Photonics J.*, vol. 4, no. 2, pp. 647–651, 2012.
- [15] A. R. Dhaini, C. M. Assi, M. Maier, and A. Shami, "Dynamic wavelength and bandwidth allocation in hybrid TDM/WDM EPON networks," *J. Light. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 277–286, 2007.
- [16] L. G. Kazovsky *et al.*, "SUCCESS: A Next-Generation Hybrid WDM/TDM Optical Access Network Architecture," *J. Light. Technol.*, vol. 22, no. 11, pp. 2557–2569, 2004.
- [17] L. W. Luo *et al.*, "WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip," *Nat. Commun.*, vol. 5, pp. 1–7, 2014.

- [18] H. T. Mouftah and P.-H. Ho, *Optical Networks: Architecture and Survivability*, 2003rd ed. Ontario, Canada.
- [19] E. Yetginer, Z. Liu, and G. N. Rouskas, "Fast Exact ILP Decompositions for Ring RWA," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 7, p. 577, 2011.
- [20] B. Jaumard, C. Meyer, B. Thiongane, and X. Yu, "ILP formulations and optimal solutions for the RWA problem," *IEEE Glob. Telecommun. Conf. 2004. GLOBECOM '04.*, vol. 3, pp. 1918–1924, 2005.
- [21] R. M. Krishnaswamy and K. N. Sivarajan, "Algorithms for routing and wavelength assignment based on solutions of LP-relaxations - IEEE Communications Letters - 2001.pdf," vol. 5, no. 10, pp. 435–437, 2001.
- [22] H. Chen and A. M. J. Koonen, "Spatial Division Multiplexing," Springer International Publishing, Ed. 2017, pp. 1–48.
- [23] Y. Miyamoto and R. Kawamura, "Space division multiplexing optical transmission technology to support the evolution of high-capacity optical transport networks," *NTT Tech. Rev.*, vol. 15, no. 6, 2017.
- [24] A. D. Ellis, M. E. McCarthy, M. A. Z. Al Khateeb, M. Sorokina, and N. J. Doran, "Performance limits in optical communications due to fiber nonlinearity," *Adv. Opt. Photonics*, vol. 9, no. 3, p. 429, 2017.
- [25] Y. Weng, E. Ip, Z. Pan, and T. Wang, "Advanced spatial-division multiplexed measurement systems propositions-from telecommunication to sensing applications: A review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 9, 2016.
- [26] H. Chen *et al.*, "Employing prism-based three-spot mode couplers for high capacity MDM/WDM transmission," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 25, no. 24, pp. 2474–2477, 2013.
- [27] M. Lan *et al.*, "An arbitrary mode converter with high precision for mode division multiplexing in optical fibers," *J. Mod. Opt.*, vol. 62, no. 5, pp. 348–352, 2015.
- [28] S. Shwartz, M. Golub, and S. Ruschin, "Diffractive optical elements for mode-division multiplexing of temporal signals with the aid of Laguerre–Gaussian modes," *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 12, p. 2659, 2013.
- [29] W. Mohammed, M. Pitchuman, A. Mehta, and E. G. Johnson, "Selective excitation of the LP11 mode in step index fiber using a phase mask," *Opt. Eng.*, vol. 45, no. 7, p. 074602, 2006.
- [30] A. Tulikumwenayo, "Construction of multi-mode fiber modes using phase masks," *Thesis*, 2014.
- [31] Y. S. Lee, K. S. Lim, M. R. Islam, M. H. Lai, and H. Ahmad, "Dynamic LP01-LP11 Mode Conversion by a Tilted Binary Phase Plate," *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 16, pp. 3597–3603, 2017.
- [32] Y. Gao, J. Sun, G. Chen, and C. Sima, "Demonstration of simultaneous mode conversion and demultiplexing for mode and wavelength division multiplexing systems based on tilted few-mode fiber Bragg gratings," *Opt. Express*, vol. 23, no. 8, p. 9959, 2015.

- [33] X. Zhao *et al.*, “Mode converter based on the long-period fiber gratings written in the six-mode fiber,” *ICOON 2017 - 16th Int. Conf. Opt. Commun. Networks*, vol. 2017-Janua, no. March, pp. 1–3, 2017.
- [34] S. Li, X. Hu, J. Wang, C. Du, and Q. Mo, “Controllable all-fiber orbital angular momentum mode converter,” *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 18, p. 4376, 2015.
- [35] D. Garcia-Rodriguez, J. L. Corral, and R. Llorente, “Mode Conversion for Mode Division Multiplexing at 850 nm in Standard SMF,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 29, no. 11, pp. 929–932, 2017.
- [36] G. M. Fernandes, N. J. Muga, and A. N. Pinto, “Tunable mode conversion using acoustic waves in optical microwires,” *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 19, pp. 3257–3265, 2014.
- [37] M. Salsi *et al.*, “Mode-Division Multiplexing of 2 100 Gb / s Channels Using an LCOS-Based Spatial Modulator,” *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 618–623, 2012.
- [38] J. von Hoyningen-Huene, R. Ryf, and P. Winzer, “LCoS-based mode shaper for few-mode fiber,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 15, p. 18097, 2013.
- [39] V. G. Chigrinov, V. M. Kozenkov, H. S. Kwok, and L. Vicari, “Optical Applications of Liquid Crystals,” p. 201, 2003.
- [40] P. Chen *et al.*, “Arbitrary and reconfigurable optical vortex generation: a high-efficiency technique using director-varying liquid crystal fork gratings,” *Photonics Res.*, vol. 3, no. 4, p. 133, 2015.
- [41] P. Aswendt, “Hologram reconstruction using a digital micromirror device,” *Opt. Eng.*, vol. 40, no. 6, p. 926, 2001.
- [42] K. J. Kearney and Z. Ninkov, “<title>Characterization of a digital micromirror device for use as an optical mask in imaging and spectroscopy</title>,” *Spat. Light Modul.*, vol. 3292, pp. 81–92, 1998.
- [43] Y. X. Ren, R. De Lu, and L. Gong, “Tailoring light with a digital micromirror device,” *Ann. Phys.*, vol. 527, no. 7–8, pp. 447–470, 2015.
- [44] X. Hu *et al.*, “Dynamic shaping of orbital-angular-momentum beams for information encoding,” *Opt. Express*, vol. 26, no. 2, p. 1796, 2018.
- [45] S. A. Khan and N. A. Riza, “Demonstration of the MEMS digital micromirror device-based broadband reconfigurable optical add-drop filter for dense wavelength-division-multiplexing systems,” *J. Light. Technol.*, vol. 25, no. 2, pp. 520–526, 2007.
- [46] W.-H. Lee, “High efficiency multiple beam gratings,” *Appl. Opt.*, vol. 18, no. 13, p. 2152, 1979.
- [47] S. Kumar and J. Deen, *Fiber Optic Communications*. 2014.
- [48] D. Gloge, “Weakly Guiding Fibers,” *Appl. Opt.*, vol. 10, no. 10, p. 2252, 1971.
- [49] Y. Hugh D., F. Roger A., and F. A. Lewis, “Física Universitaria Vol. 2 con física moderna,” vol. 2, p. 708, 2009.

- [50] M. Mirhosseini, O. S. Magaña-Loaiza, C. Chen, B. Rodenburg, M. Malik, and R. W. Boyd, "Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum," *Opt. Express*, vol. 21, no. 25, p. 30204, 2013.
- [51] J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics," *Opt. Eng.*, vol. 35, no. 5, p. 1513, 1996.
- [52] X. Shang, L. Gao, and M. Lan, "Model for mode control in mode-division multiplexing system," no. Iccsae 2015, pp. 344–347, 2016.
- [53] M. Morant, J. Pérez, and R. Llorente, "Polarization division multiplexing of OFDM radio-over-fiber signals in passive optical networks," *Adv. Opt. Technol.*, no. February, pp. 20–22, 2014.
- [54] P. M. Hill, R. Olshansky, and W. K. Burns, "Optical Polarization Division Multiplexing at 4 Gb/s," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 4, no. 5, pp. 500–502, 1992.
- [55] M. I. Hayee, M. C. Cardakli, A. B. Sahin, and A. E. Willner, "Doubling of bandwidth utilization using two orthogonal polarizations and power unbalancing in a polarization-division-multiplexing scheme," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 13, no. 8, pp. 881–883, 2001.
- [56] X. Liu, X. Wei, J. Ying, and D. A. Fishman, "Scalable dispersion management for hybrid 10-Gb/s and 40-Gb/s DWDM transmissions with high nonlinear tolerance," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, no. 9, pp. 1980–1982, 2005.
- [57] M. D. Nooruzzaman, Y. Harada, O. Koyama, and Y. Katsuyama, "Proposal of stackable ROADM for wavelength transparent IP-over-CWDM networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E91-B, no. 10, pp. 3330–3333, 2008.
- [58] G. Bosco, V. Curri, A. Carena, P. Poggiolini, and F. Forghieri, "On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers," *J. Light. Technol.*, vol. 29, no. 1, pp. 53–61, 2011.
- [59] X. Li *et al.*, "Compensation of quadrature imbalance in an optical coherent OQPSK receiver in presence of frequency offset," *Front. Optoelectron. China*, vol. 4, no. 3, pp. 288–291, 2011.
- [60] S. Shi, Q. Ren, D. Li, and X. Gu, "Phase division multiplexing in AWGN channel based on Duffing oscillator," *2016 2nd IEEE Int. Conf. Comput. Commun. ICC 2016 - Proc.*, no. 2, pp. 1623–1627, 2017.
- [61] C. C. Wei, K. Z. Chen, L. W. Chen, C. Y. Lin, W. J. Huang, and J. Chen, "High-Capacity Carrierless Amplitude and Phase Modulation for WDM Long-Reach PON Featuring High Loss Budget," *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 1075–1082, 2017.
- [62] S. W. Seo, K. Bergman, and P. R. Prucnal, "Transparent optical networks with time-division multiplexing," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 14, no. 5, pp. 1039–1051, 1996.
- [63] R. S. Tucker, G. Eisenstein, and S. K. Korotky, "Optical time-division multiplexing for very high-bit-rate systems.," p. 76, 1988.
- [64] R.-J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini, and B. Goebel, "Capacity Limits of Optical Fiber Networks PART 1: DIGITIZATION, CAPACITY, AND CONSTELLATIONS," *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 662–701, 2010.

- [65] A. Grover, A. Sheetal, and V. Dhasarathan, "Performance analysis of mode division multiplexing based free space optics system incorporating on-off keying and polarization shift keying under dynamic environmental conditions," *Wirel. Networks*, vol. 26, no. 5, pp. 3439–3449, 2020.
- [66] S. Berdagué and P. Facq, "Mode division multiplexing in optical fibers," *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 11, p. 1950, 1982.
- [67] G. M. Saridis, D. Alexandropoulos, G. Zervas, and D. Simeonidou, "Survey and evaluation of space division multiplexing: From technologies to optical networks," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2136–2156, 2015.
- [68] R. G. H. Van Uden *et al.*, "Ultra-high-density spatial division multiplexing with a few-mode multicore fibre," *Nat. Photonics*, vol. 8, no. 11, pp. 865–870, 2014.
- [69] H. Kubota and T. Morioka, "Few-mode optical fiber for mode-division multiplexing," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 490–494, 2011.
- [70] K. I. Kitayama and N. P. Diamantopoulos, "Few-Mode Optical Fibers: Original Motivation and Recent Progress," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 8, pp. 163–169, 2017.
- [71] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes," *Phys. Rev. A*, vol. 45, no. 11, pp. 8185–8189, 1992.
- [72] J. Zhang, F. Li, J. Li, Y. Feng, and Z. Li, "120 Gbit/s 2×2 Vector-Modes-Division-Multiplexing DD-OFDM-32QAM Free-Space Transmission," *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 6, pp. 1–8, 2016.
- [73] A. Li, A. Al Amin, X. Chen, and W. Shieh, "Reception of Mode and Polarization Multiplexed 107-Gb/s CO-OFDM Signal over a Two-Mode Fiber," p. PDPB8, 2013.
- [74] J. Carpenter, B. C. Thomsen, and T. D. Wilkinson, "Degenerate Mode-Group Division Multiplexing," vol. 30, no. 24, pp. 3946–3952, 2012.
- [75] R. Ryf *et al.*, "Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing," *Opt. Fiber Commun. Conf. Fiber Opt. Eng. Conf. 2011*, p. PDPB10, 2011.
- [76] C. P. Tsekrekos and D. Syvridis, "Symmetric few-mode fiber couplers as the key component for broadband mode multiplexing," *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 14, pp. 2461–2467, 2014.
- [77] A. Trichili *et al.*, "Optical communication beyond orbital angular momentum OPEN," 2016.
- [78] J. Wang *et al.*, "Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing," *Nat. Photonics*, vol. 6, no. 7, pp. 488–496, 2012.
- [79] D. Ge *et al.*, "A 6-LP-mode ultralow-modal-crosstalk double-ring-core FMF for weakly-coupled MDM transmission," *Opt. Commun.*, vol. 451, no. June, pp. 97–103, 2019.
- [80] M. Nakazawa, M. Yoshida, and T. Hirooka, "Measurement of mode coupling distribution along a few-mode fiber using a synchronous multi-channel OTDR," *Conf. Opt. Fiber Commun. Tech. Dig. Ser.*, vol. 22, no. 25, pp. 454–456, 2014.

- [81] S. Luke *et al.*, *Essentials of Metaheuristics*. 2012.
- [82] Y. Chen, L. A. Rusch, and W. Shi, “Integrated Circularly Polarized OAM Generator and Multiplexer for Fiber Transmission,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 54, no. 2, 2018.
- [83] R. W. Gerchberg and W. S. O., “A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Pictures,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 35, pp. 237–246, 1972.
- [84] R. Di Leonardo and S. Bianchi, “Hologram transmission through multi-mode optical fibers,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 1, p. 247, 2011.
- [85] L. De Sio *et al.*, “Beam shaping diffractive wave plates [Invited],” *Appl. Opt.*, vol. 57, no. 1, p. A118, 2018.
- [86] C. Maurer, S. Khan, S. Fassel, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte, “Depth of field multiplexing in microscopy,” *Opt. Express*, vol. 18, no. 3, p. 3023, 2010.
- [87] A. G. Asuero, A. Sayago, and A. G. González, “The correlation coefficient: An overview,” *Crit. Rev. Anal. Chem.*, vol. 36, no. 1, pp. 41–59, 2006.
- [88] J. Lee Rodgers and W. Alan Nice Wander, “Thirteen ways to look at the correlation coefficient,” *Am. Stat.*, vol. 42, no. 1, pp. 59–66, 1988.
- [89] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, “Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 44, no. 4, pp. 253–263, 2017.
- [90] A. Kaur, L. Kaur, and S. Gupta, “Image Recognition using Coefficient of Correlation and Structural SIMilarity Index in Uncontrolled Environment,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 59, no. 5, pp. 32–39, 2013.
- [91] M. Al Najjar, M. Ghantous, and M. Bayoumi, *Image registration*, vol. 114. 2014.
- [92] K. Chaurasia and N. Sharma, “Performance Evaluation and Comparison of Different Noise, Apply on PNG Image Format Used in Deconvolution Wiener Filter (FFT) Algorithm,” *Evol. Trends Eng. Technol.*, vol. 4, pp. 8–14, 2015.
- [93] J. Carpenter, “Graphics processing unit–accelerated holography by simulated annealing,” *Opt. Eng.*, vol. 49, no. 9, p. 095801, 2010.
- [94] M. Van Heel and M. Schatz, “Fourier shell correlation threshold criteria,” *J. Struct. Biol.*, vol. 151, no. 3, pp. 250–262, 2005.
- [95] Z. Hong, S. Fu, D. Yu, M. Tang, and D. Liu, “All-Fiber Tunable LP11 Mode Rotator With 360° Range,” *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 5, 2016.
- [96] M. Van Heel, “Similarity measures between images,” *Ultramicroscopy*, vol. 21, no. 1, pp. 95–100, 1987.
- [97] A. C. Rencher, *Methods of Multivariate Analysis Second Edition*. .
- [98] A. M. Neto *et al.*, “Image Processing Using Pearson ’ s Correlation Coefficient : Applications on Autonomous Robotics To cite this version : Image Processing Using Pearson ’ s Correlation Coefficient : Applications on Autonomous Robotics,” 2013.
- [99] A. D. M. Neto, “Pearson’s Correlation Coefficient: A More Realistic Threshold for

Applications on Autonomous Robotics,” *Comput. Technol. Appl.*, vol. 5, pp. 69–72, 2014.

- [100] L. Fang, H. Zuo, L. Pang, Z. Yang, X. Zhang, and J. Zhu, “Image reconstruction through thin scattering media by simulated annealing algorithm,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 106, no. February, pp. 105–110, 2018.
- [101] A. Strehl, J. Ghosh, and R. Mooney, “Impact of Similarity Measures on Web-page Clustering,” 2000.
- [102] Z. Liu and R. Laganière, “Phase congruence measurement for image similarity assessment,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 28, no. 1, pp. 166–172, 2007.
- [103] R. Brüning, D. Flamm, L. Lukas, J. Lenz, and M. Duparré, “Determination of the physical fiber modes,” *Next-Generation Opt. Commun. Components, Sub-Systems, Syst. IV*, vol. 9389, p. 93890O, 2015.
- [104] Q. Xiang, L.-J. Chang, and M.-Y. Chen, “Design and optimization of mode converter based on long period fiber grating,” *Opt. Commun. Opt. Fiber Sensors, Opt. Memories Big Data Storage*, vol. 10158, p. 101580H, 2016.
- [105] J. Lee, C. Lee, K. T. Kim, and J. Park, “Fabrication and Mode Coupling of Long-Period Fiber Grating by Winding a Wire Around an Optical Fiber Fixed to a Cylindrical Metal Rod,” 2013.
- [106] B. Sun *et al.*, “Transverse mode switchable fiber laser through wavelength tuning,” *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 5, p. 667, 2013.
- [107] R. Garcia-Fernandez *et al.*, “Optical nanofibers and spectroscopy,” *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 105, no. 1, pp. 3–15, 2011.
- [108] D. Marcuse, “Curvature loss formula for optical fibers,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 66, no. 3, p. 216, 1976.
- [109] W. A. Gambling, H. Matsumura, and C. M. Ragdale, “Curvature and microbending losses in single-mode optical fibres,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 11, no. 1, pp. 43–59, 1979.
- [110] D. Marcuse, “Field deformation and loss caused by curvature of optical fibers,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 66, no. 4, p. 311, 1976.
- [111] R. Neri Vela, *Lineas de Transmision*. 2004.

Salvedad

Después de leer el presente trabajo de maestría, es preciso realizar algunas aclaraciones.

Durante el desarrollo de la tesis se manifestaron situaciones de carácter administrativo y de emergencia sanitaria que impidieron finalizarla tal y como se tenía previsto.

Esta investigación inició con la profesora Maria Isabel Álvarez Castaño como directora. Nos propusimos realizar un Acuerdo Interinstitucional con el Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) con el objetivo de beneficiarnos de sus laboratorios, los cuales están dotados con todos los dispositivos necesarios para ejecutar la parte experimental de la tesis. Para esto se contaría con la ayuda como codirector del profesor Nelson Alonso Correa Rojas, perteneciente a dicho Instituto. Cabe anotar que la Universidad de Antioquia (U de A) no cuenta con los dispositivos requeridos en sus laboratorios.

Entregada la propuesta de tesis al Comité de posgrados - Asuntos estudiantiles, el día 15 de noviembre del año 2018 se inicia con el proceso para efectuar el Convenio entre las instituciones. El 25 de febrero de 2019 fue aprobada la propuesta de maestría.

Se resalta que el día 12 de mayo de 2019, la U de A decide terminar el contrato de la directora del trabajo de maestría, la profesora María Isabel Álvarez. Al quedar sin asesor principal, el 30 de mayo de 2019 se redactó una solicitud al Comité de posgrados - Asuntos estudiantiles con el fin de requerir garantías. El día 13 de junio del mismo año la Universidad responde y finalmente se asigna como nuevo director al profesor Juan Felipe Botero Vega.

En un inicio, ambas instituciones desconocían cómo debía elaborarse el Convenio. Es así que se construyó un documento para celebrar el Acuerdo. En primer término, fue revisado por el Área Jurídica de la U de A, revisión que tardaría más de dos meses en llevarse a cabo; posteriormente fue remitido al ITM al Área de Internacionalización, donde se tomaron aproximadamente 12 meses en dar respuesta, principalmente por dos situaciones, 1. desconocían el procedimiento para desarrollar el Acuerdo, y 2. las elecciones del año 2019 con la ley de garantías.

Por tales motivos, fue necesario solicitar una prórroga para el primer periodo del año 2020, la cual fue aprobada; no obstante, y como ya se mencionó, con ocasión de las demoras, en los primeros meses del año no fue posible avanzar con la parte experimental. Aunado a lo anterior, con la Resolución 385 de 12 de marzo de 2020 el Gobierno Nacional declaró la emergencia sanitaria por causa del coronavirus COVID - 19, derivándose de ella múltiples medidas, entre ellas el aislamiento preventivo y el cierre de establecimientos, universidades, instituciones educativas y demás.

A la postre, en el mes de mayo del año en curso el ITM devuelve el documento con sus respectivos comentarios, lo que permite continuar el proceso con la U de A. Empero, a la fecha no ha habido contestación por parte de esta última.

Se decide entonces finalizar el presente trabajo de grado agregando un componente de multiplexación y demultiplexación, parte experimental - parte simulado. La parte experimental se logró gracias a la ayuda extraoficial de los profesores Maria Isabel Álvarez y Nelson Alonso Correa, con quienes me siento profundamente agradecido.

Publicación

Como requisito de grado se presentó este trabajo en el XVI Encuentro Nacional de Óptica y VII Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus aplicaciones (XVI ENO-VII CANCOA 2019), donde participé con calidad de expositor, y se publicó en la revista Institute of Physics Science (IOPScience). El siguiente es el resumen del artículo.

Optimization of phase masks using simulated annealing algorithm for mode conversion

R D Gallego-Ruiz^{1,2}, M I Álvarez-Castaño¹, J A Herrera-Ramírez², and N A Correa²

¹ Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

² Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia

E-mail: roobert.gallego@udea.edu.co

Abstract. The simulated annealing algorithm was applied for optimizing binary phase masks used in the conversion of optical modes through spatial light modulation in free space. The method changes the phase distribution to be displayed on a spatial light modulator, in such a way maximizes the correlation between the converted mode and the theoretical mode. The method allowed the optimal conversion of the linearly polarized modes through a diffractive process. The analysis of the correlations between obtained and theoretical modes showed the effectiveness of the method and its capability to generate optical modes similar to those in an optical fiber. The optimized phase masks could be applied in a dynamic and arbitrary mode converter.

doi:10.1088/1742-6596/1547/1/012007

URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1547/1/012007/pdf>

Desarrollo de un Sistema de Acople de Modos a una Fibra de Pocos Modos para la
Multiplexación por División Modal Usando un Modulador Espacial de Luz de
Microespejos

Roobert David Gallego Ruiz

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones

Asesores (a):

Nelson Alonso Correa Rojas – Magíster en Ciencias – Física

Juan Felipe Botero Vega – Doctor en Telemática

María Isabel Álvarez Castaño - Magíster en Ciencias – Física

Línea de Investigación:

Comunicaciones Ópticas

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación de Telecomunicaciones Aplicadas - GITA

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2021.