



INAOE

Propuesta del uso de un
multicanalizador por división espacial
en un sistema de comunicación a fibra
óptica

Por

José Roberto Warnes Lora

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el
grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN EL ÁREA DE ELECTRÓNICA

En el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica**

Agosto de 2018

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por

Dr. Ignacio Enrique Zaldívar Huerta

Dr. Jorge Rodríguez Asomoza

© INAOE 2018

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes mencionando la fuente.



Resumen

Este trabajo de tesis presenta un desarrollo experimental para evaluar el comportamiento de un photonic lantern, el cual es un dispositivo óptico que permite multiplexar señales a través de modos de propagación (LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b}), este dispositivo se incorporó a un esquema de filtro fotónico de microondas, para obtener su respuesta en frecuencia y una vez obtenida su respuesta, se implementó un esquema para transmitir información digital a través del esquema propuesto.

En el capítulo 1, se presenta la situación actual de los sistemas de comunicaciones ópticas, se dan a conocer algunas técnicas de multiplexación óptica, por ejemplo; multiplexación por división en longitud de onda y multiplexación por división espacial, esta última es a la que le daremos más importancia, ya que el dispositivo óptico “photonic lantern” es pieza clave para realizar esta multiplexación. Además se enuncia la hipótesis, objetivos, objetivos particulares, justificaciones y la organización que llevará la tesis.

En el capítulo 2 se mostrará el marco teórico con respecto a las comunicaciones ópticas, se expondrá brevemente la teoría de fibra óptica así como los fenómenos asociados a ellas, se menciona la teoría electromagnética esto para explicar cómo se propagan las ondas electromagnéticas dentro de una fibra multimodo, siendo el mismo caso que para un photonic lantern con respecto a los modos de propagación en la sección de la fibra de pocos modos o multimodo. Por último se presenta la teoría de un filtro fotónico de microondas, se dan sus características y su respuesta en frecuencia.

El capítulo 3 se enfocará en la fabricación, teoría y aplicaciones de los photonic lanterns, primero se presenta el método de fabricación y como se propaga la luz a través de una fibra que ha pasado por el proceso de

reducción de la fibra. Posteriormente se expondrá el photonic lantern del tipo modo selectivo, se darán a conocer sus características principales y por último las aplicaciones que tienen estos dispositivos ópticos.

El capítulo 4 se centra en el arreglo experimental que se realizó para evaluar al photonic lantern; primero se obtuvo la respuesta en frecuencia de un filtro fotónico de microondas, una vez realizado este proceso, se colocó el photonic lantern en la arquitectura para obtener su respuesta en frecuencia de cada modo de propagación y se analizó cada una de ellas para posteriormente realizar la transmisión de señales digitales a través de los mejores modos de propagación del photonic lantern.

Por último, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo realizado, así como las publicaciones derivadas del trabajo de investigación y los trabajos a futuro que se pueden realizar en el área o con el mismo dispositivo óptico.

Summary

This thesis presents an experimental development to evaluate the behavior of a photonic lantern, which is an optical device that allows multiplexing signals through propagation modes (LP01, LP11a and LP11b), this device was incorporated into a microwave photonic filter scheme, to obtain its frequency response and once its response was obtained, a scheme was implemented to transmit digital information through the proposed scheme.

Chapter 1, the current situation of the optical communication systems is presented, some optical multiplexing techniques are disclosed, for example; wavelength division multiplexing and space division multiplexing, the latest is the one we will give more importance to, since the optical device "photonic lantern" is a key piece to perform this multiplexing. In addition, the hypothesis, objectives, particular objectives, justifications and the organization that will carry the thesis are stated.

Chapter 2 will show the theory of optical communications, briefly explain the theory of optical fiber as well as the phenomena associated with them, the electromagnetic theory is mentioned to explain how electromagnetic waves propagate within a fiber multimode, being the same case as for a photonic lantern with respect to the propagation modes in the section of few modes or multimode fiber. Finally, the theory of microwave photonic filter is presented, its characteristics and frequency response are given.

Chapter 3 will focus on the fabrication, theory and applications of photonic lanterns, first the manufacturing method is presented and how light propagates through a fiber that has gone through the process. Subsequently

the mode selective photonic lantern will be exposed, its main characteristics and finally the applications that these optical devices have.

Chapter 4 focuses on the experimental arrangement that was made to evaluate the photonic lantern; first the frequency response of a microwave photonic filter was obtained, once this process was done, the photonic lantern was placed in the architecture to obtain its frequency responses from each propagation mode and each was analyzed to later perform the transmission of digital signals through the best propagation modes of the photonic lantern.

Finally, chapter 5 presents the conclusions of the work carried out, as well as the publications derived from the research work and future work that can be done in the area or with the same optical device.

Agradecimientos

- Al **Dr. Ignacio Enrique Zaldívar Huerta** y **Dr. Jorge Rodríguez Asomoza** por su dedicación, paciencia, enseñanzas y aportes, para poder llevar a cabo este trabajo de tesis.
- A Toda **mi familia** por su apoyo incondicional.
- A **mi novia**, por siempre estar a mi lado.
- A **mis amigos**, por su ayuda y buen compañerismo.
- Al **INAOE** y **UDLAP** por permitirme realizar mi trabajo de tesis en sus instalaciones.
- A **CONACYT** por el apoyo económico que me fue otorgado durante mis estudios de maestría.

Dedicatoria

A mis padres:

Ramona L. y Roberto W.

A mis hermanos:

Deydra y Emmanuel

A mi novia:

Jessica

Índice general.

Resumen	i
Summary	iii
Agradecimientos	v
Dedicatoria	vii
Índice general	ix

Capítulo 1: Introducción general	13
1.1 Introducción	13
1.2 Estado del arte	18
1.3 Hipótesis	21
1.4 Objetivo	21
1.4.1 Objetivo particular	21
1.5 Justificación	22
1.6 Organización de la tesis	22

Capítulo 2: Marco teórico	24
2.1 Fibras Ópticas	24
2.2 Sistema de comunicación óptico	30
2.2.1 Introducción	30

2.2.2 Modulación directa	30
2.2.3 Modulación externa	31
2.2.4 Fuentes ópticas	32
2.2.4.1 Láser distributed feedback (DFB)	32
2.2.4.2 Láser Multimodo	32
2.3 Solución a la ecuación de onda	33
2.3.1 Ecuaciones de onda para fibra de índice escalonado	36
2.3.2 Modos linealmente polarizados	40
2.4 Filtro fotónico de microondas.....	42
2.4.1 Principio de operación.....	42
Capítulo 3: Photonic lantern	46
3.1 Introducción.....	46
3.2 Descripción general.....	47
3.3 Fabricación de un photonic lantern	48
3.3.1 Proceso de “Tapering” de fibra óptica.....	48
3.3.2 Propagación de la luz a través de un “tapering” en la fibra	48
3.4 Funcionamiento del photonic lantern.....	50
3.4.1 Principio de operación del modo selectivo.....	51
3.5 Aplicaciones del photonic lantern	54
3.5.1 Telecomunicaciones	54
Capítulo 4: Montaje experimental	56
4.1 Introducción.....	56
4.2 Respuesta en frecuencia del filtro fotónico de microondas.....	57
4.2.1 Simulación de un filtro fotónico de microondas	61
4.3 Filtro fotónico de microondas utilizando photonic lantern.....	62
4.3.1 Photonic lantern	63
4.3.2 Respuesta LP_{01}	64
4.3.3 Respuesta LP_{11a}	65

4.3.4 Respuesta LP _{11b}	66
4.3.5 Resultados	67
4.4 Transmisión de datos digitales a través del sistema propuesto.....	68
4.4.1 Transmitiendo señales digitales a través de LP _{11a}	69
4.4.2 Transmitiendo señales digitales a través de LP _{11b}	71
4.4.4 Conclusiones	71
Capítulo 5: Conclusiones.....	73
5.1 Conclusión	73
5.2 Publicaciones derivadas del trabajo de investigación.....	74
5.3 Trabajos a futuro	74

Capítulo 1: Introducción general

1.1 Introducción

Los sistemas de transmisión por fibra óptica forman parte de todos los tipos de transmisión de datos que hay en la actualidad, por ejemplo: para conexión entre dos continentes (redes de larga distancia), conexión entre países o ciudades (red de área amplia WAN), dentro de las ciudades (redes de área metropolitana MAN), en áreas universitarias o de negocios (redes de área local LAN) [1].

La figura 1.1 muestra un esquema donde se envía la información al usuario final directamente desde la terminal digital, la desventaja de este esquema es el costo extra en infraestructura usando una sola fibra óptica para cada usuario, es por ello que se da un énfasis a las técnicas de multiplexación, con esa tecnología se puede utilizar una sola fibra óptica para comunicar

desde la terminal digital hasta una unidad de red óptica, para ahorrar en infraestructura, como se muestra en la figura 1.2.

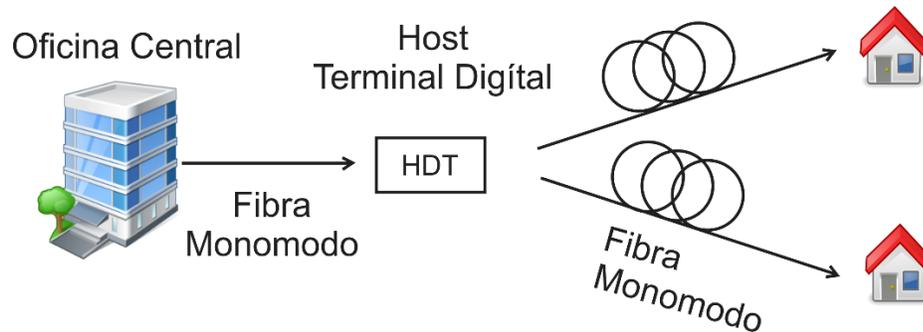


Figura 1.1: Esquema para transmitir información sin usar multiplexación.

La figura 1.2 muestra cómo la fibra óptica está cada vez más cerca del cliente (fibra hacia la x; FTTs, donde la x es una casa, negocio, antena etc.). Bajo el esquema de fibra hasta la casa, la fibra óptica llega directamente al usuario mediante multiplexación (multiplexación por división de longitud de onda WDM y multiplexación por división espacial SDM), las cuales se explicarán más adelante.

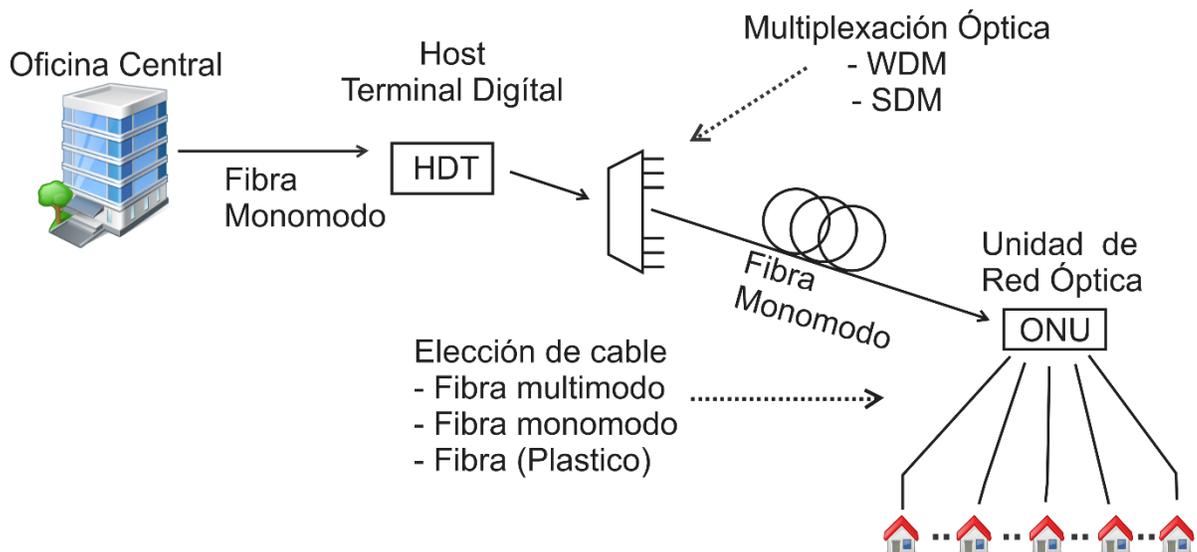


Figura 1.2: Esquema Fiber-to-the-home (fibra hasta la casa).

Las comunicaciones por fibra óptica son la columna vertebral para las telecomunicaciones [2] debido a que tienen una gran capacidad de transmitir de información, pero el rápido incremento de la demanda en la capacidad de transmisión de datos ha conseguido desarrollar alternativas para superar los límites en los sistemas de fibras monomodo [3].

La demanda en la capacidad de transmisión de datos en las pasadas dos décadas se ha satisfecho gracias a la multiplexación por división en longitud de onda (WDM Wavelength Division Multiplexing, por sus siglas en inglés) [4], la cual permite multiplexar N canales o señales en una sola fibra óptica, a cada una de estas señales se le asigna un cierto ancho de banda, mediante portadoras ópticas a diferentes longitudes de onda, las cuales provienen de varias fuentes diodo láser, como se aprecia en la figura 1.3.

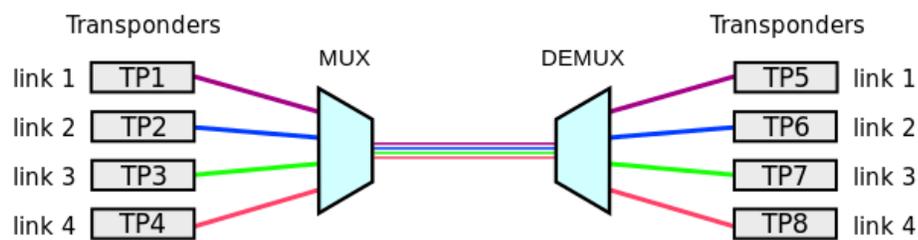


Figura 1.3: Multiplexación por división de longitud de onda [4].

Es imposible proveer un crecimiento en la capacidad de las comunicaciones por fibra óptica que este a la par de la demanda. En ese sentido, la figura 1.4 muestra la evolución de la capacidad de transmisión por fibra óptica. En particular, para la tecnología WDM esta presenta una capacidad de transmisión de aproximadamente de 10^{12} bits/s. Actualmente estos límites están a punto de ser sobrepasados.

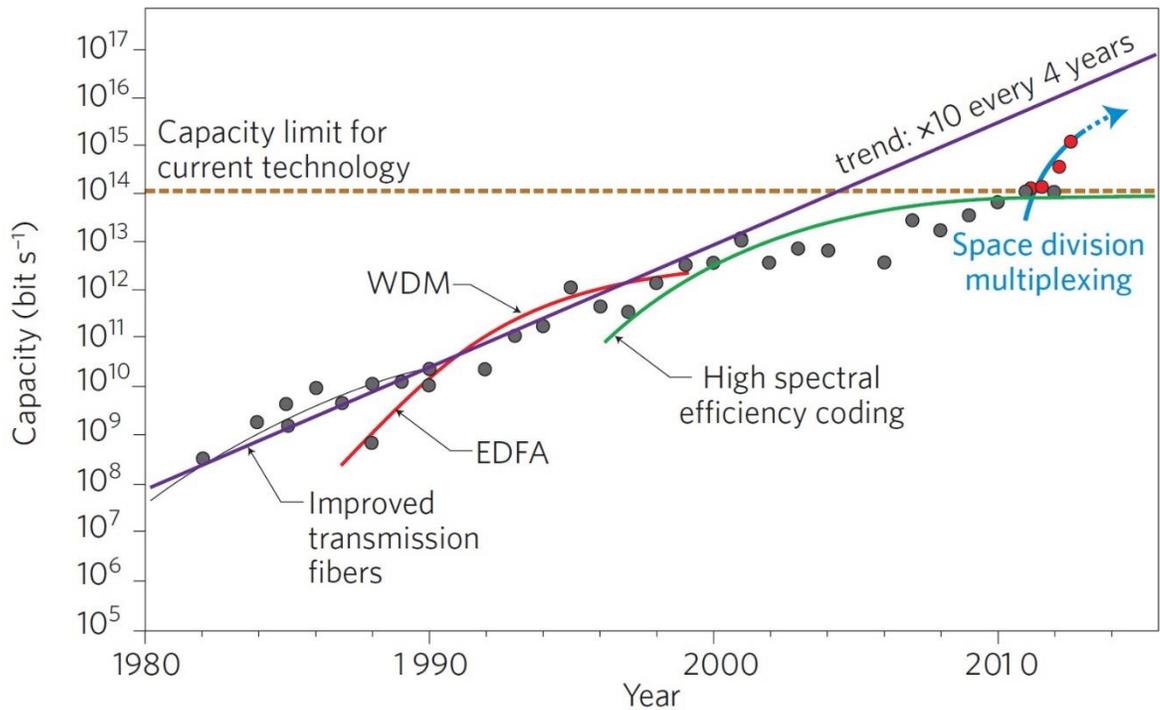


Figura 1.4: Evolución de la capacidad de transmisión por fibra óptica [4].

Ante este panorama, han surgido nuevas alternativas para aumentar la capacidad de bits por segundo que se pueden enviar a través de un sistema de comunicaciones ópticas. Tal es el caso de la multiplexación por división de espacio (SDM Space division multiplexing por sus siglas en inglés) [5], cabe mencionar que este concepto de incrementar la capacidad en las fibras ópticas es tan antiguo como las propias comunicaciones ópticas, el primer acercamiento a esta tecnología fue reportado en 1979 [6], sin embargo, actualmente SDM ha emergido como una solución atractiva para ser el nuevo soporte en el crecimiento del tráfico de datos [3]. Hoy en día, se han demostrado varios enfoques basados en nuevas fibras para sistemas SDM, por ejemplo, las fibras multinúcleo y/o modos como canales para envío de datos [3]. En la figura 1.5 se muestra un esquema SDM, en esta técnica cada canal está definida por distintos modos de propagación de la luz.

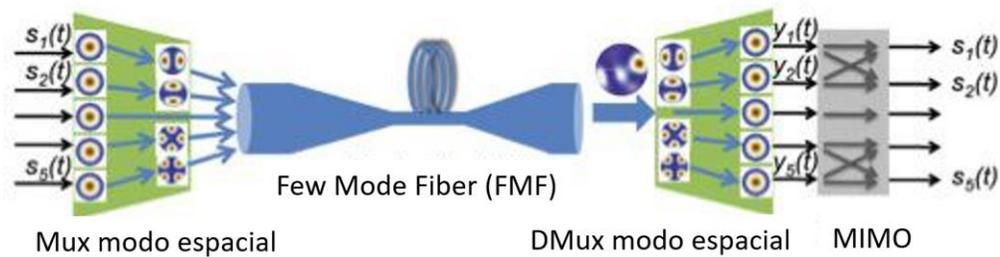


Figura 1.5: Esquema de multiplexación por división de espacio (SDM) [5].

Los multiplexores y demultiplexores de modo espacial son componentes fundamentales para redes de transmisión SDM de alta capacidad [2], en ese sentido, los “photonic lantern” son los dispositivos que permiten llevar a cabo esta tarea.

Un photonic lantern de modo selectivo es un dispositivo óptico de varias fibras monomodo como entrada y una fibra de pocos modos o multimodo como salida [7], cada fibra monomodo excita sólo un modo de propagación, en el caso de un dispositivo de tres a uno serían los modos LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b} . En la figura 1.6 se ilustra la estructura de un photonic lantern de modo selectivo.

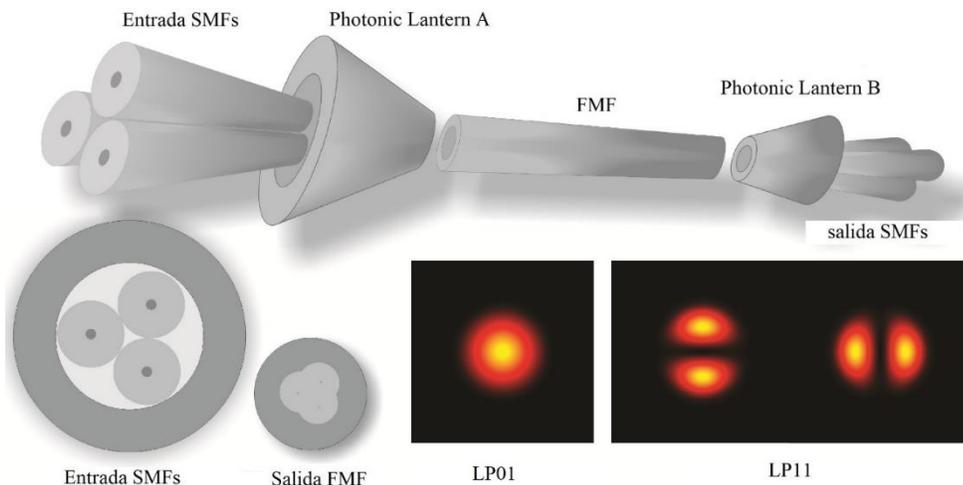


Figura 1.6: Photonic lantern de modo selectivo, entradas con fibra monomodo (SMF) y fibra de pocos modos (FMF) como salida del photonic lantern [13].

Actualmente, los photonic lantern son considerados como uno de los multiplexores de modo más versátiles, ya que se pueden escalar para admitir una gran cantidad de modos [6] y exhiben bajas pérdidas.

1.2 Estado del arte

En esta sección se presenta una revisión del estado del arte sobre los photonic lantern, analizando los más relevantes. Esto permitirá ver su importancia, desarrollo y aplicaciones. La tabla 1.1 muestra algunos trabajos realizados con este dispositivo, se clasificaron por orden cronológico, número de núcleos y distancia del enlace óptico.

Año	Referencia	Cantidad de núcleos/ modos espaciales	Tipo de fibra	Distancia (km)
2014	[8]	3	FMF	
2015	[9]	6	FMF	17
2017	[10]	6	MMF	53

Tabla 1.1: Trabajos relacionados con Photonic lantern.

El trabajo propuesto por Sergio G. Leon-Saval et al. [8], muestran un multiplexor espacial (photonic lantern) con pérdidas de transmisión inferiores a 0.3 dB. Las pérdidas de inserción total del multiplexor de modo selectivo cuando es acoplado a una fibra de pocos modos de índice graduado fueron menor a 2 dB.

El esquema presentado en el trabajo de R. Ryf et al. [9] de la figura 1.7, en el cual fue utilizado un photonic lantern seis a uno para realizar el multiplexado espacial. Se demostró la transmisión a una distancia de 17 km para multiplexación sobre seis modos espaciales con un solo canal de transmisión a una tasa de 720 Gbits/s.

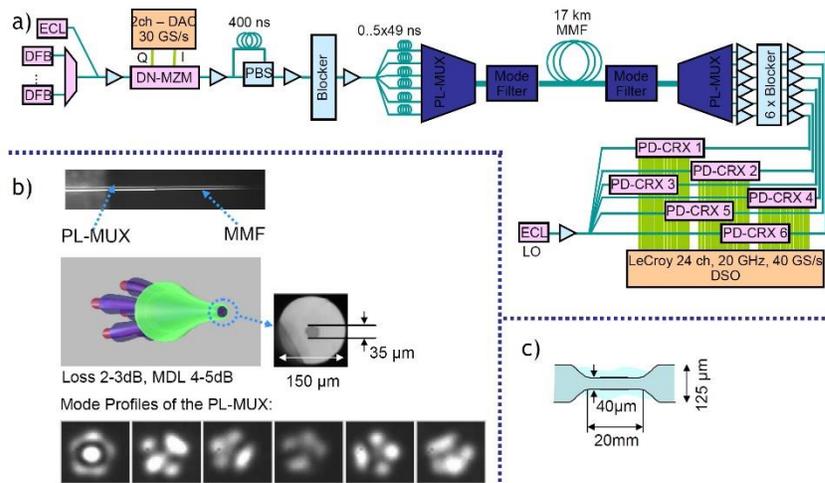


Figura 1.7: Esquema para 12x12 múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) por un esquema SDM.

Por último, en el trabajo de J.J. A. Weerdenburg et al. [10], se presenta el esquema de la figura 1.8, donde se utilizó un photonic lantern seis a uno para realizar la multiplexación espacial, este trabajo se enfocó en la modulación de posicionamiento de pulso para codificar los datos mediante la conmutación de canales espaciales.

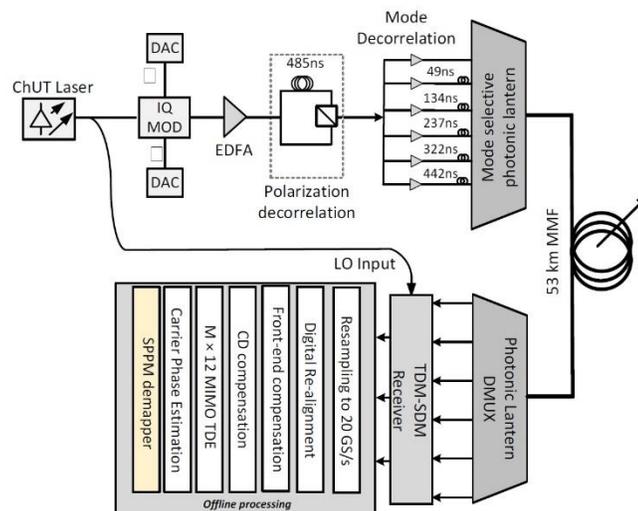


Figura 1.8: Esquema de 6 modos a través de 53 km de fibra multimodo.

En este trabajo de tesis se enfoca en un photonic lantern como multiplexor espacial, en particular los modos LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b} , ya que es un dispositivo del

tipo modo selectivo de tres a uno. Se utilizará una arquitectura de filtro fotónico de microondas como el propuesto en el trabajo [11], para realizar una transmisión de datos digitales a través del photonic lantern dentro de esta arquitectura como el esquema mostrado en la figura 1.9, la cual, pertenece al montaje experimental del trabajo de tesis. Cabe mencionar que actualmente existen estos dispositivos ópticos comercialmente [12], el dispositivo en particular utilizado en este trabajo de tesis fue fabricado en los laboratorios de la universidad central de florida, por esta razón se desea realizar la caracterización del mismo.

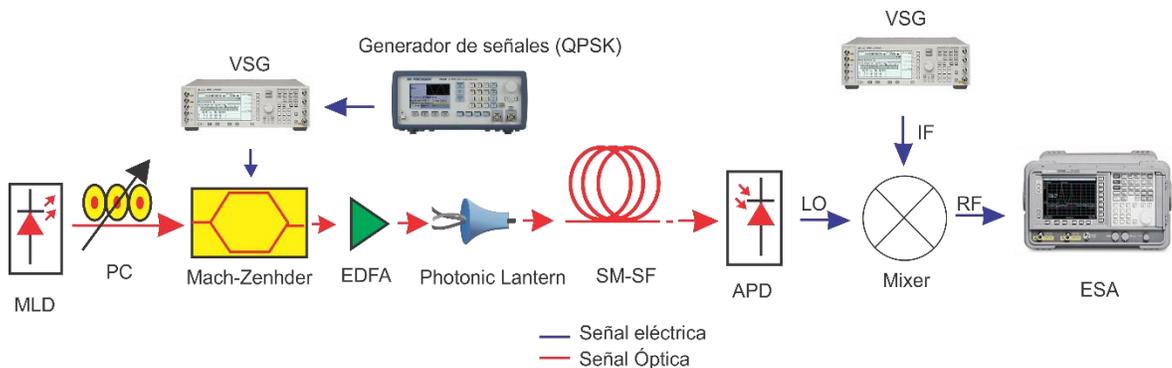


Figura 1.9: Montaje experimental (filtro fotónico de microondas con la incorporación de un photonic lantern).

La empresa Phoenix photonics cuenta con photonic lantern comerciales de los tipos seis a uno y del tipo tres a uno, con bajas pérdidas.

Parámetros	especificación
No. de fibras de entrada	3
Fibra de entrada	Corning SMF28
Conectores	Opcionales
Pérdidas por inserción	Menores a 4 dB
Pérdidas por dependencia modal	Menores a 2 dB
Pérdidas por dependencia de polarización	Menores a 0.5 dB
Rango de longitud de onda	1500 nm a 1620 nm

Tabla 1.2: Especificaciones photonic lantern comercial.

1.3 Hipótesis

¿Es posible la transmisión de señales ópticas utilizadas como portadoras de información a través de los modos de propagación LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b} en un photonic lantern no comercial?

1.4 Objetivo

El objetivo es realizar la evaluación del comportamiento de un photonic lantern del tipo modo selectivo tres a uno, usando los modos de propagación LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b} . Para tal fin, datos digitales en formato QPSK codificados en una portadora de microondas a 1.9 GHz será llevada a cabo. El dispositivo bajo prueba fue fabricado por el Dr. Jorge Rodríguez Asomoza en “The College of Optics and Photonics, The University of Central Florida” CREOL.

1.4.1 Objetivo particular

La evaluación del comportamiento del dispositivo es analizada mediante la incorporación del photonic lantern en una arquitectura de filtro fotónico de microondas. El uso de un filtro fotónico de microondas permite el filtrado de una señal la cual será utilizada como portadora eléctrica para la transmisión de datos digitales en formato Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK).

1.5 Justificación

Como se mencionó en la sección 1.1, hoy en día las comunicaciones por fibra óptica están llegando al límite de capacidad. Por lo tanto, se buscan alternativas para aumentar cada vez más la capacidad para transmitir información a través de una fibra óptica.

Este trabajo de tesis se enfoca en la utilización de un photonic lantern para transmitir señales ópticas a través de él, como primer acercamiento hacia el space división multiplexing.

1.6 Organización de la tesis

Esta tesis se organiza de la siguiente manera. En el capítulo 2 se presentará un marco teórico referente a las comunicaciones por fibra óptica en general. El capítulo 3 se enfocará en la fabricación y el funcionamiento de un photonic lantern, así como las aplicaciones que tiene. En el capítulo 4 se presenta el esquema experimental que se utilizó para realizar las pruebas al photonic lantern y por último en el capítulo 5 se mostrarán las conclusiones generales y los trabajos a futuro que pueden generarse.

Referencias:

- [1] A. Hornsteiner, "Fiber Optic Technology Trends in Data Transmission Digitalization of data advance the need for constant upgrading of data networks," pp. 20–24, 2017.
- [2] Guifang Li, Neng Bai, Ningbo Zhao and Cen Xia. "Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication", *Advances in Optics and Photonics* Vol. 6, Issue 4, pp. 413-487, 2014.
- [3] J. C. Alvarado Zacarias et al., "Experimental analysis of the modal evolution in photonic lanterns," *Opt. Fiber Commun. Conf.*, vol. 1, no. 1, p. Tu2J.7, 2017.
- [4] P. J. Winzer, "Optical networking beyond WDM," *IEEE Photonics J.*, vol. 4, no. 2, pp. 647–651, 2012.
- [5] 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.
- [6] S. Iano, T. Sato, S. Sentsui, T. Kuroha, and Y. Nishimura, "Multicore optical fiber", *Optical Fiber Communication Conference*, 1979.
- [7] T. A. Birks, I. Gris-Sánchez, S. Yerolatsitis, S. G. Leon-Saval, and R. R. Thomson, "The photonic lantern", *Advances in Optics and Photonics* Vol. 7, Issue 2, pp. 107-167, 2015.
- [8] S. G. Leon-Saval, N. K. Fontaine, J. R. Salazar-Gil, B. Ercan, R. Ryf, and J. Bland-Hawthorn, "Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing," *Opt. Express*, vol. 22, no. 1, p. 1036, 2014.
- [9] R. Ryf et al., "Mode-multiplexed transmission over conventional graded-index multimode fibers," *Opt. Express*, vol. 23, no. 1, p. 235, 2015.
- [10] J. J. A. Van Weerdenburg et al., "Spatial pulse position modulation for multi-mode transmission systems," *2017 Opt. Fiber Commun. Conf. Exhib. OFC 2017 - Proc.*, vol. 101011, pp. 6–8, 2017.
- [11] I. E. Zaldívar-Huerta et al., "Experimental transmission in a fiber radio scheme using a microwave photonic filter operating at 2.8 GHz". *Electronics Express*, Vol. 10, 2013.
- [12] www.phoenixphotonics.com/website/products/SDM_Photonic_Lantern.htm
- [13] Leon-Saval Sergio G, Fontaine Nicolas K, Salazar-Gil Joel R, Ercan Burcu Ryf and Roland Bland-Hawthorn Joss, "Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing" *Optics Express*, 2014.

Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Fibras Ópticas

La figura 2.1 muestra la estructura de una fibra óptica, la cual está formada por tres cilindros concéntricos de materiales dieléctricos, caracterizados cada uno de ellos por su índice de refracción. Siendo n_1 y n_2 el índice de refracción del núcleo y recubrimiento, respectivamente. En las fibras utilizadas en comunicaciones ópticas, el material del núcleo es óxido de silicio (SiO_2). A fin de garantizar el confinamiento de la luz dentro del núcleo, se debe satisfacer que: $n_2 < n_1$.

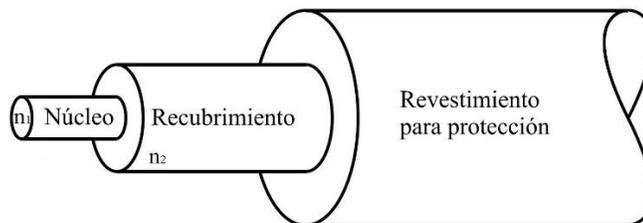


Figura 2.1: Estructura de una fibra óptica [1]

En una primera aproximación, las fibras ópticas se clasifican en multimodo y monomodo, siendo las dimensiones del núcleo entre 50-200 μm y 8-12 μm , respectivamente. En este trabajo se utilizará fibra óptica del tipo monomodo.

La propagación de la luz a lo largo del núcleo puede ser explicada mediante el uso de óptica geométrica o análisis electromagnético. Dado que el análisis electromagnético permite el estudio de la distribución de energía, éste se describe en la sección 2.3.

Básicamente existen dos fenómenos que limitan el rendimiento de las fibras ópticas: la atenuación y la dispersión cromática (presente sólo en fibras monomodo).

A medida que una onda luminosa se propaga dentro de una fibra óptica, ésta es atenuada como consecuencia de mecanismos intrínsecos y extrínsecos. Entre los primeros, se pueden mencionar: la absorción ultravioleta, la absorción infrarroja, la dispersión Rayleigh, y la dispersión Mie. Entre las extrínsecas están la absorción por impurezas y pérdidas por curvaturas [2]. El modelado de estos mecanismos se representa en la figura 2.2.

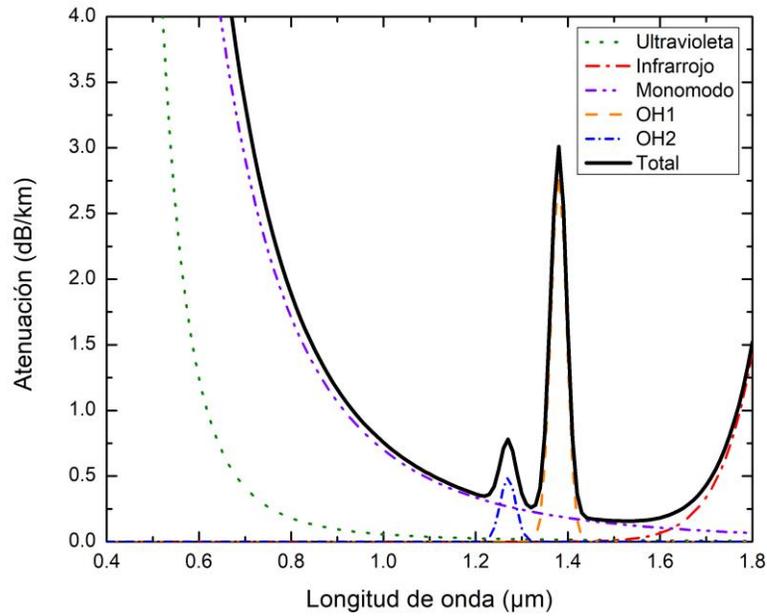


Figura 2.2: Curva de atenuación de la fibra óptica.

De la curva mostrada en la figura 2.2, es evidente que la menor atenuación se presenta alrededor de la longitud de onda de 1.5 μm . Siendo ésta la longitud de onda utilizada actualmente por los sistemas de comunicaciones ópticos. El conocimiento del valor de atenuación es importante, ya que al diseñar un sistema de comunicaciones a fibra óptica éste indica la distancia máxima que se puede tener entre el transmisor y receptor o repetidor en el sistema. La atenuación se mide en decibeles por kilómetro (dB/Km), y puede ser evaluada por medio de la relación [1]:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (2.1)$$

Siendo P_{in} y P_{out} la potencia óptica a la entrada y salida del sistema, respectivamente.

En lo que respecta al fenómeno de la dispersión cromática, este se debe a que el índice de refracción del material con el que está formado el núcleo (SiO_2) es función de la longitud de onda. Dicha dependencia puede modelarse mediante la ecuación de Sellmeier [1]

$$n = \left(\frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (4.67914826 \times 10^{-3})^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (1.35120631 \times 10^{-2})^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - (97.9340025)^2} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) se ilustra en la figura 2.3 donde se observa que efectivamente el índice de refracción esta en función de la longitud de onda.

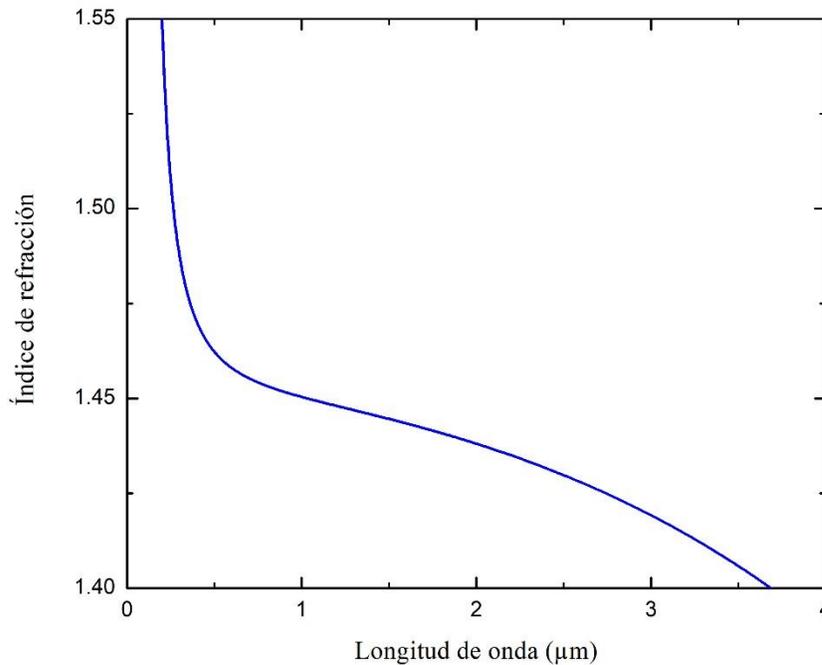


Figura 2.3: Evaluación de la ecuación de Sellmeier

Es evidente que, la variación del índice de refracción respecto a la longitud de onda y considerando que no existen fuentes ópticas monocromáticas, cualquier pulso de luz policromático, compuesto por diversas longitudes de onda, experimentarán velocidades diferentes. Por lo tanto, la velocidad de una envolvente de un pulso luminoso corresponde a la velocidad de grupo, y se define como: [1]:

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad (2.3)$$

Donde $\omega = \frac{2\pi}{\lambda}c$, frecuencia óptica angular, c es la velocidad de la luz, y $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}n(\lambda)$ es la constante de propagación.

El tiempo de propagación de grupo o tiempo utilizado por la envolvente para recorrer una longitud L , está definida como:

$$\tau_g = \frac{L}{v_g} = L \frac{d\beta}{d\omega} \quad (2.4)$$

Sustituyendo $d\beta$ y $d\omega$ en (2.5)

$$\tau_g = \frac{L}{c} \left[n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right] \quad (2.5)$$

El factor que esta entre corchetes de la ecuación (2.5) se define como índice de grupo: $N_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$.

El ensanchamiento del pulso corresponde a la variación del tiempo de grupo en función de la longitud de onda, y se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{d\tau_g}{d\lambda} = \frac{L}{c} \frac{dN_g}{d\lambda} = \frac{L}{c} \frac{d}{d\lambda} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (2.6)$$

Realizando la derivada con respecto a λ , se obtiene:

$$\frac{d\tau_g}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} L = DL \quad (2.7)$$

Este ensanchamiento es proporcional a la distancia de propagación L y depende de un factor D propio del material sobre el cual se efectúa la propagación. Se define a D como el factor de dispersión del material, el cual permite calcular el ensanchamiento temporal del pulso después de una propagación sobre una longitud L , este factor se expresa en $ps/(nm Km)$, y está dado por la siguiente ecuación:

$$D = -\frac{\lambda d^2 n}{c d\lambda^2} \quad (2.8)$$

La figura 2.4 muestra la evaluación de la ecuación (2.8) (línea roja), y representa la curva de dispersión para una fibra estándar, esto es, considerando que el núcleo está formado por SiO₂. En la misma gráfica, la línea azul corresponde a una fibra de dispersión corrida la cual se obtiene por medio de la ecuación (2.9).

$$D(\lambda) = \frac{\lambda S_0}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (2.9)$$

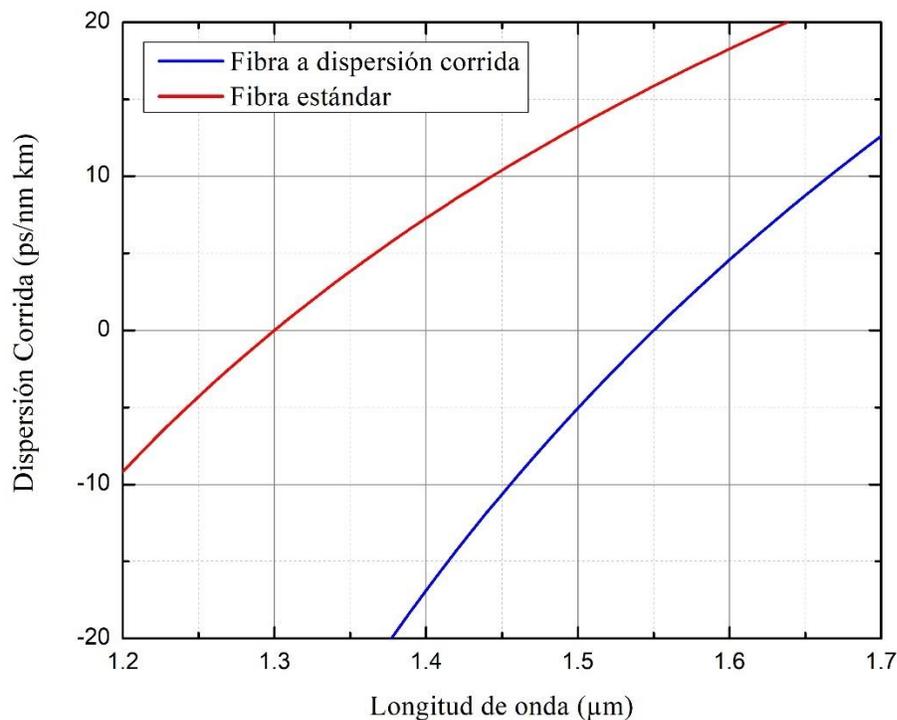


Figura 2.4: Curvas de dispersión para fibras ópticas.

La figura 2.5 ilustra los efectos que provocan la atenuación y la dispersión para pulsos ópticos viajando en la fibra, básicamente son: la pérdida de potencia y el ensanchamiento de los pulsos.

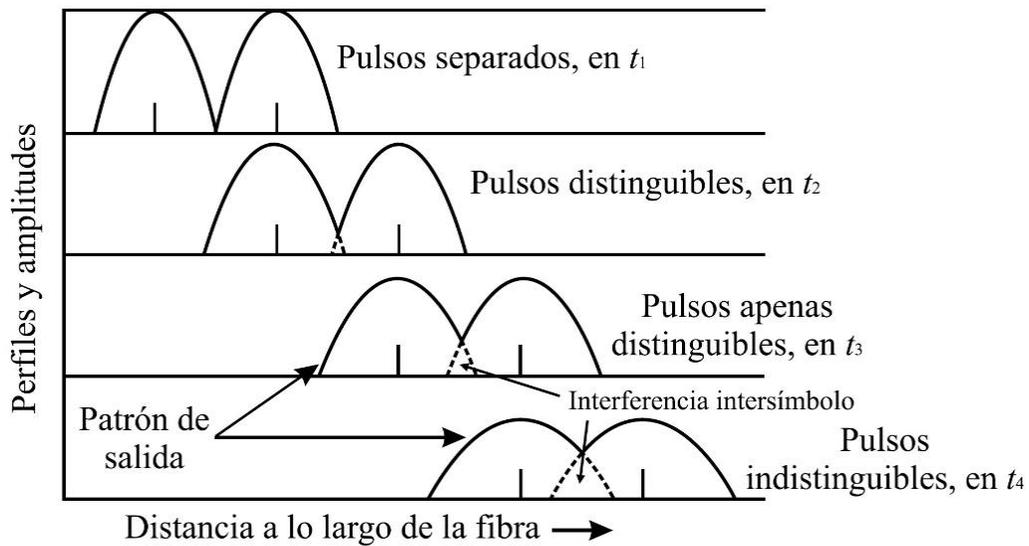


Figura 2.5: Atenuación y ensanchamiento de pulsos.

Como conclusión a esta sección, es claro que la elección de la longitud de onda utilizada en los sistemas de transmisión a fibra óptica permite seleccionar un valor mínimo de atenuación y eliminar el efecto de la dispersión.

2.2 Sistema de comunicación óptico

2.2.1 Introducción

La parte principal de un sistema de comunicación óptico es la técnica de modulación utilizada, es decir, el proceso de sobreponer información eléctrica en una señal luminosa. Existen dos técnicas de modulación óptica: la directa y la externa.

2.2.2 Modulación directa

La figura 2.6 muestra un esquema de modulación directa donde la señal eléctrica moduladora (análoga o digital) es aplicada mediante un controlador adecuado a la fuente óptica (LED o láser). La ventaja de esta técnica es su simplicidad y bajo costo, sin embargo, su mayor desventaja es que opera a frecuencias por debajo de 3 GHz [3].

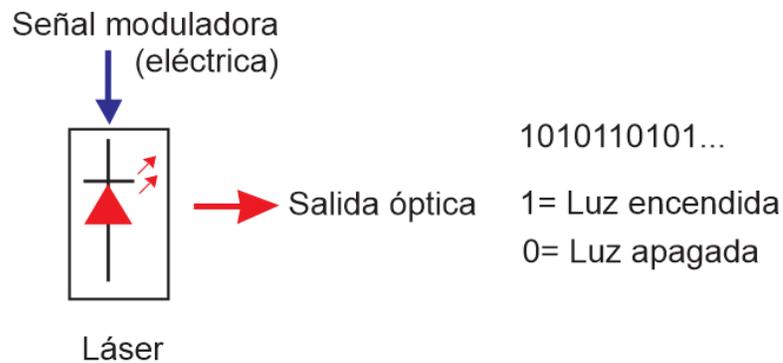


Figura 2.6: Esquema modulación directa.

2.2.3 Modulación externa

La figura 2.7 representa un diagrama a bloques de un sistema de comunicación a modulación externa. A diferencia del proceso anteriormente descrito, el proceso de emisión de luz y el de modulación se encuentran separados. En este esquema, sólo es necesario mantener la emisión de luz constante, ya que la modulación se llevará a cabo por medio de un modulador electro-óptico.

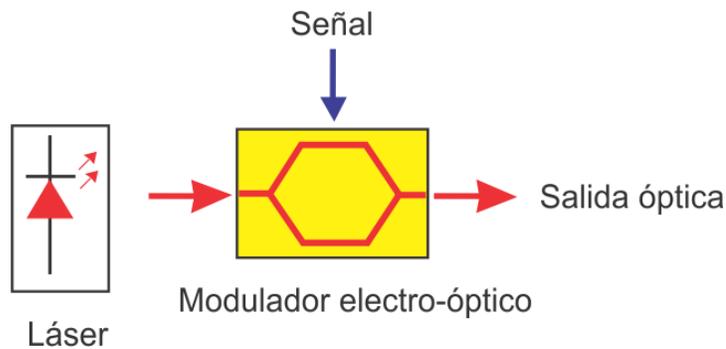


Figura 2.7: Esquema modulación externa [3]

El principio de funcionamiento de un modulador electro-óptico se basa en el efecto electro-óptico presente en materiales como el niobato de litio (LiNbO_3). Básicamente, están contruidos por guías ópticas difundidas (generalmente de Titanio). El LiNbO_3 , es elegido debido a que combina altos coeficientes electro-ópticos y una alta transparencia óptica para las longitudes de onda utilizadas en telecomunicaciones (1300 nm y 1550 nm) [4, 5, 6]. Uno de los

moduladores electro-ópticos más utilizados es el interferómetro del tipo Mach-Zehnder integrado, el cual permite velocidades de transferencia de datos de más de 10 Gbits/s y anchos de banda superiores a los 18 GHz [7].

2.2.4 Fuentes ópticas

Las principales fuentes luminosas utilizadas en comunicaciones ópticas son: los diodos emisores de luz (LED) [1] y los láseres semiconductores. Estos últimos son los utilizados en los sistemas de comunicación ópticos actuales.

Un diodo láser DFB's o quasi-cromáticos es lo más semejante a una fuente monocromática. Estos dispositivos pueden ser modulados directamente al variar la corriente de entrada al dispositivo, presentan una alta eficiencia y sus dimensiones las hacen compatibles con las fibras ópticas.

2.2.4.1 Láser distributed feedback (DFB)

Un láser DFB se caracteriza por su envolvente gaussiana y tener un ancho espectral reducido, la gráfica de la figura 2.9 muestra un espectro medido experimentalmente y presenta un ancho espectral de 0.1nm.

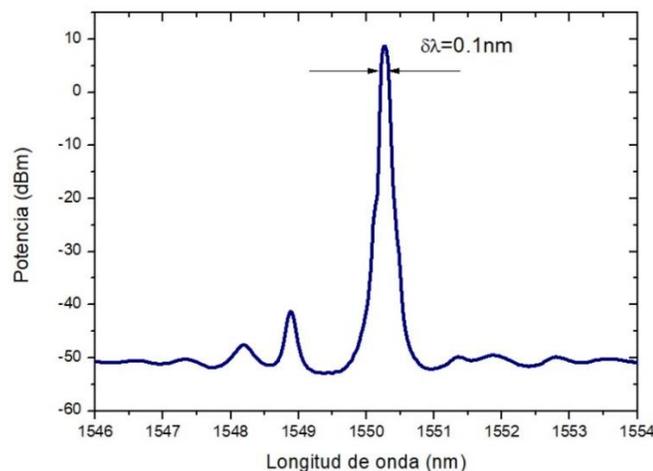


Figura 2.9: Espectro de una fuente DFB.

2.2.4.2 Láser Multimodo

Un láser multimodo se caracteriza por tener varios modos o longitudes de onda con una separación intermodal de unos cuantos nanómetros y todos

estos modos tienen un envolvente tipo gaussiana como la gráfica mostrada en la figura 2.10, ésta tiene un ancho espectral de 8.3nm.

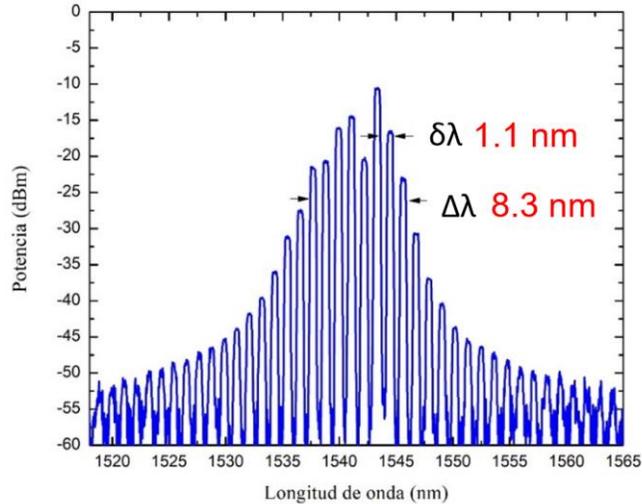


Figura 2.10: Espectro de una fuente multimodo.

2.3 Solución a la ecuación de onda

El análisis de una guía de onda óptica es posible mediante las ecuaciones de Maxwell, las cuales relacionan el campo magnético y el campo eléctrico. Asumiendo un material dieléctrico isotrópico lineal, que no tiene corrientes ni cargas libres como es el caso de SiO₂, las ecuaciones de Maxwell son las siguientes:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.13)$$

El parámetro ϵ es la permitividad (o constante dieléctrica) y μ es la permeabilidad del medio, \vec{E} y \vec{H} son los vectores de intensidad de campo

eléctrico y magnético respectivamente, \vec{D} y \vec{B} son la densidad de flujo eléctrico y magnético respectivamente. Donde $D = \epsilon E$ y $B = \mu H$.

Aplicando el rotacional a (2.10) y (2.11), sustituyendo apropiadamente las otras ecuaciones y usando identidades vectoriales, se obtienen las ecuaciones de onda para el campo eléctrico y magnético:

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

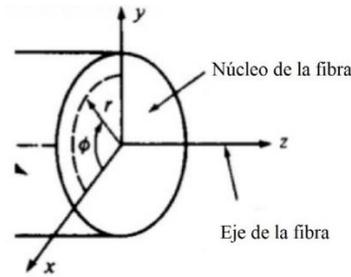


Figura 2.11: Sistema de coordenadas cilíndricas usado para el análisis de la propagación de ondas electromagnéticas dentro de una fibra óptica [1].

Considerando la propagación a lo largo de la fibra, en un sistema de coordenadas cilíndricas $\{r, \phi, z\}$, en la dirección z , como se muestra en la figura 2.11, los campos pueden ser escritos como:

$$\vec{E} = \vec{E}_0(r, \phi) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.16)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0(r, \phi) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.17)$$

Donde el parámetro β es la componente z del vector de propagación y será determinada por las condiciones de frontera del campo electromagnético en la interfaz núcleo-revestimiento.

Substituyendo (2.16) y (2.17) en (2.10) y (2.11), y después de manipulaciones algebraicas, es posible expresar las componentes del campo transversal $(H_{r,\phi}, E_{r,\phi})$ en función de las componentes longitudinales (E_z, H_z) , es decir:

$$E_r = -\frac{j}{q^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\mu\omega}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \quad (2.18)$$

$$E_\phi = -\frac{j}{q^2} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \mu\omega \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) \quad (2.19)$$

$$H_r = -\frac{j}{q^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{\epsilon\omega}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right) \quad (2.20)$$

$$H_\phi = -\frac{j}{q^2} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \epsilon\omega \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) \quad (2.21)$$

Donde $q^2 = \omega^2 \epsilon \mu - \beta^2 = \kappa^2 - \beta^2$

Substituyendo (2.20) y (2.21) en (2.22) [1].

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r H_\phi) - \frac{\partial H_r}{\partial \phi} \right] = j \epsilon \omega E_z \quad (2.22)$$

Obtenemos la ecuación de onda en coordenadas cilíndricas, para las componentes de campo longitudinal.

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + q^2 E_z = 0 \quad (2.23)$$

Y substituyendo (2.18) y (2.19) en (2.24) [1].

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r E_\phi) - \frac{\partial E_r}{\partial \phi} \right] = -j \epsilon \omega H_z \quad (2.24)$$

Obtenemos:

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + q^2 H_z = 0 \quad (2.25)$$

Cuando $E_z = 0$ es el modo transversal eléctrico (TE), $H_z = 0$ es el modo transversal magnético (TM) y $E_z \neq H_z \neq 0$ es el modo híbrido (E o EH, si $H_z > E_z$ o $E_z > H_z$ respectivamente)

2.3.1 Ecuaciones de onda para fibra de índice escalonado

Para encontrar los modos guiados en una fibra de índice escalonado, es necesario considerar la ecuación (2.25), aplicando el método de separación de variables, asumiendo su solución de la forma:

$$E_z = AF_1(r)F_2(\phi)F_3(z)F_4(t) \quad (2.26)$$

Como es conocida la dependencia en z y t , la ecuación anterior puede escribirse como:

$$F_3(z)F_4(t) = e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.27)$$

En la variable azimutal ϕ , el campo debe ser periódico en enteros de 2π ; por lo tanto, se puede considerar una función de la forma:

$$F_2(\phi) = e^{j\nu\phi} \quad (2.28)$$

Donde ν debe ser entero, positivo o negativo.

Substituyendo (2.27) y (2.28) en (2.26), se obtiene la ecuación de onda para E_z , dada por (2.23):

$$\frac{\partial^2 F_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial F_1}{\partial r} + \left(q^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) F_1 = 0 \quad (2.29)$$

La ecuación anterior corresponde a la ecuación diferencial para las funciones de Bessel. La solución viene de considerar las dos regiones de la fibra (dentro y fuera del núcleo), para la configuración de una fibra de índice escalonado se considera un núcleo homogéneo de índice de refracción n_1 y de radio a , el cual es rodeado por un recubrimiento infinito de índice de refracción n_2 .

Para $r < a$: los modos guiados deben permanecer finitos cuando $r \rightarrow 0$, y decaer a cero mediante $r \rightarrow \infty$, por lo tanto, las soluciones de (2.29) son las funciones de Bessel del primer tipo, de orden ν , esto es: $J_\nu(ur)$. Aquí, $u^2 = k_1^2 - \beta^2$, con $k_1 = 2\pi n_1/\lambda$. Las expresiones de E_z y H_z dentro del núcleo son las siguientes:

$$E_z(r < a) = AJ_\nu(ur)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.30)$$

$$H_z(r < a) = BJ_\nu(ur)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.31)$$

Donde A y B son constantes arbitrarias.

Para $r > a$: los modos guiados deben decaer a cero para $r \rightarrow \infty$. Así, la solución para la ecuación (2.30) son las funciones de Bessel modificadas del segundo tipo: $K_\nu(wr)$, aquí $w^2 = \beta^2 - k_2^2$ con $k_2 = 2\pi n_2/\lambda_0$. Las expresiones de E_z y H_z fuera del núcleo son las siguientes:

$$E_z(r > a) = CK_\nu(wr)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.32)$$

$$H_z(r > a) = DK_\nu(wr)e^{j\nu\phi}e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.33)$$

Donde C y D son constantes arbitrarias.

Para las condiciones de corte, fuera del núcleo, la función $K_\nu(wr) \rightarrow e^{-wr}$, cuando $wr \rightarrow \infty$. Puesto que $K_\nu(wr) \rightarrow 0$, cuando $r \rightarrow \infty$, entonces $w > 0$. Esto implica que $\beta \geq k_2$. La segunda condición para β se deduce del comportamiento de $J_\nu(ur)$ dentro del núcleo, el parámetro u debe ser real para que F_1 también lo sea. Esto implica que $k_1 \geq \beta$.

Así, el rango para la constante de propagación es:

$$n_2 k_0 = k_2 \leq \beta \leq k_1 = n_1 k_0$$

Donde $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ es la constante de propagación en el espacio libre.

Las soluciones de β deben ser determinadas a partir de las condiciones de contorno, estas requieren las componentes tangenciales E_z , E_ϕ , H_z y H_ϕ , a uno y otro lado de la interfaz, se igualen, respectivamente, en $r = a$. Esto lleva a un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas (los coeficientes A, B, C y D), cuya solución existirá si el determinante de estos coeficientes es nulo:

$$\left(\frac{J'_\nu(ur)}{uJ_\nu(ur)} + \frac{K'_\nu(wr)}{wK_\nu(wr)} \right) \left(k_1^2 \frac{J'_\nu(ur)}{uJ_\nu(ur)} + k_2^2 \frac{K'_\nu(wr)}{wK_\nu(wr)} \right) = \left(\frac{\beta\nu}{a} \right)^2 \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2} \right)^2 \quad (2.34)$$

La ecuación (2.34) puede ser resuelta numéricamente para la constante de propagación β . Dado el componente oscilatorio de las funciones de Bessel de tipo $J_\nu(ur)$, habrá múltiples soluciones (m raíces de (2.34)) para cada valor entero de ν . Estas soluciones serán designadas por $\beta_{\nu m}$ y cada una de ellas corresponderá a un posible modo de propagación de campo óptico:

En general, para modos en fibras: $\begin{cases} HE_{\nu m} \text{ para } H_z > E_z \\ EH_{\nu m} \text{ para } E_z > H_z \end{cases}$

Caso especial: $\nu = 0 \rightarrow \begin{cases} HE_{0m} \rightarrow TE_{0m} \text{ para } E_z = 0 \\ EH_{0m} \rightarrow TM_{0m} \text{ para } H_z = 0 \end{cases}$

Un parámetro importante relacionado con la condición de corte es la frecuencia normalizada V (también llamada parámetro-V o número-V), y se define por la siguiente ecuación:

$$V^2 = (u^2 + w^2)a^2 = \left(\frac{2\pi a}{\lambda_0} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2)$$

$$V = k_0 a \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} a n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.35)$$

El cual es número adimensional y determina cuantos modos puede soportar una fibra óptica. El número de modos que puede existir en la fibra como función del parámetro V puede ser convenientemente representado en términos de la constante de propagación normalizada b, definida como:

$$b = \frac{a^2 w^2}{V^2} = \frac{\left(\frac{\beta}{k}\right)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.36)$$

En la figura 2.12 se observa una gráfica de b en función de V , para unos cuantos modos de menor orden. Se aprecia que los modos son cortados cuando $\frac{\beta}{k} = n_2$.

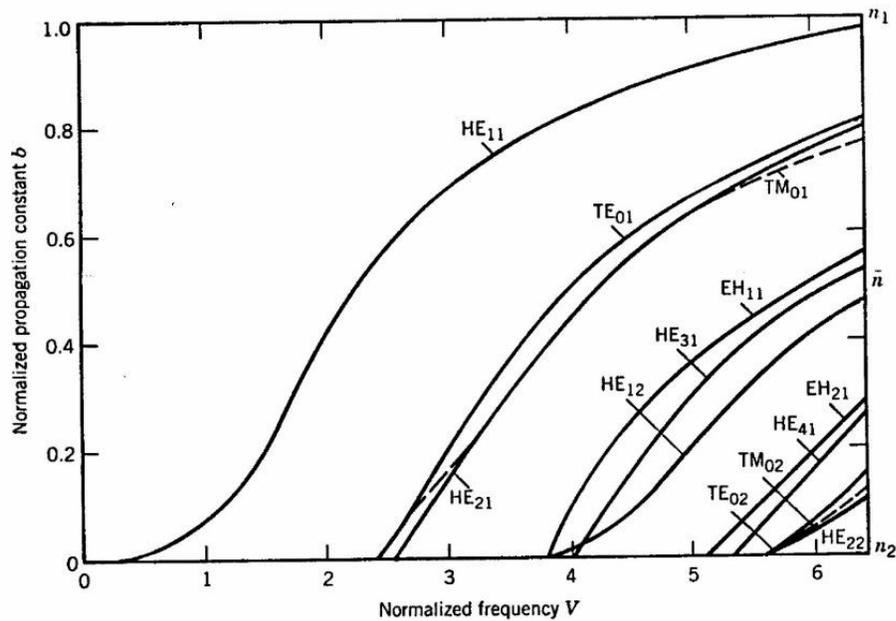


Figura 2.12: Constante de propagación normalizada en función del parámetro V para algunos modos de orden menor [1].

El parámetro V también puede ser relacionado con el número de modos M en una fibra multimodo cuando M es grande, usando aproximación de teoría de rayos. Un rayo a la entrada de la fibra será aceptado si este incide dentro del ángulo definido por la apertura numérica de la fibra; esto es:

$$NA = \text{sen}\theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.37)$$

Para valores de NA prácticos, $\text{sen}\theta$ es pequeño, de manera que $\text{sen}\theta \approx \theta$, así, el ángulo de aceptación para la fibra sería:

$$\Omega = \pi\theta^2 = \pi(n_1^2 - n_2^2) \quad (2.38)$$

Por otra parte, el número de modos por unidad de ángulo sólido emergido de una radiación electromagnética de longitud de onda λ , desde una fuente láser o guía de onda óptica, viene dado por $\frac{2A}{\lambda^2}$, donde A es el área del modo entrante o saliente. El área, en este caso, es la sección transversal del núcleo: πa^2 . El factor 2 viene del hecho de considerar que la onda plana puede tener dos orientaciones de polarización. Por lo tanto, el número de modos totales M que entra a la fibra está dada por:

$$M \cong \frac{2A}{\lambda^2} \Omega = \frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2} (n_1^2 - n_2^2) = \frac{V^2}{2} \quad (2.39)$$

2.3.2 Modos linealmente polarizados

Basados en el principio de la fibra de índice escalonado, la cual indica que la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y del revestimiento es muy pequeña; la cual es, $\Delta \ll 1$. Esta es la base para la aproximación de la guía de fibra débilmente guiada.

En esta aproximación el patrón del campo electromagnético y la constante de propagación de los modos par $HE_{v+1,m}$ y $EH_{v-1,m}$ son muy pequeñas. Esto es al igual para los tres modos TE_{0m} , TM_{0m} , y HE_{2m} . En la figura 1.13 se puede observar con $(v, m) = (0,1)$ y $(2,1)$ para los modos agrupados $\{EH11\}$, $\{TE01, TM01, HE21\}$, $\{HE31, EH11\}$, $\{HE12\}$, $\{HE41, EH21\}$, y $\{TE02, TM02, HE22\}$.

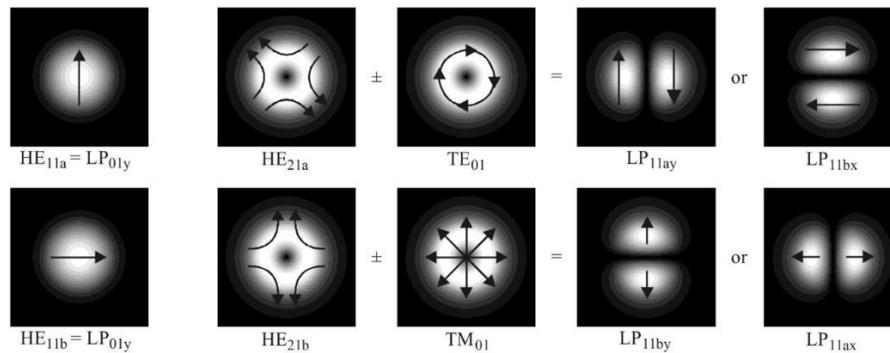


Figura 2.14: Composición de dos modos LP_{11} de modos exactos y su campo transversal eléctrico y distribución de intensidad [8].

2.4 Filtro fotónico de microondas

Un filtro fotónico de microondas (MPF), es un subsistema fotónico que realiza operaciones similares a un filtro eléctrico de microondas. La principal diferencia entre uno y otro es que el primero hace uso de señales ópticas, mientras que el segundo opera con señales de Radio Frecuencia (RF). Las principales ventajas de un MPF son: bajas pérdidas, gran ancho de banda, e inmunidad a interferencia electromagnética [11].

2.4.1 Principio de operación

La figura 2.15 muestra un esquema particular de un MFP, básicamente consta de una fuente óptica multimodo (MLD), un modulador de intensidad Mach-Zehnder, un enlace de fibra óptica (SM-SF) (caracterizada por su factor de dispersión (D) y longitud L) y un fotodetector del tipo APD que permite recuperar la señal óptica. Vector Signal Analyzer (VGS) aporta la señal eléctrica moduladora [9].

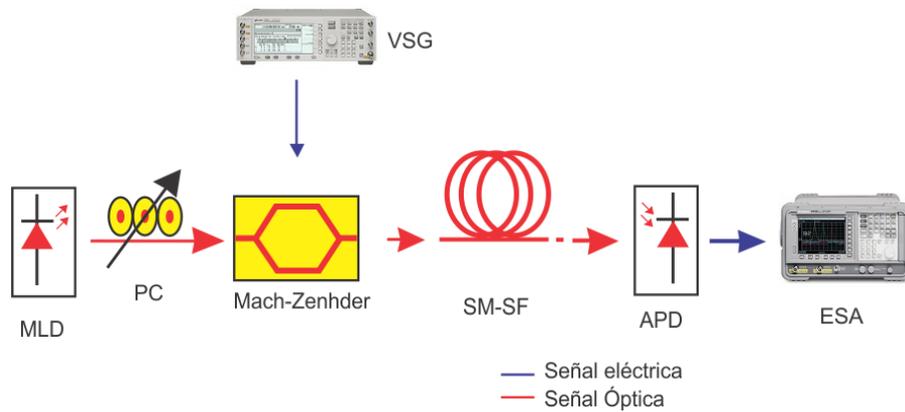


Figura 2.15: Diagrama a bloques del esquema de un MPF [11].

En la figura 2.16 se muestra la respuesta en frecuencia del esquema mostrado en la figura 2.15, la cual está regida por la ecuación 2.40 [10].

$$f_n = \frac{n}{DL\delta\lambda} \quad (2.40)$$

Donde D es la dispersión cromática de la fibra, L es la longitud del enlace de fibra óptica, y $\delta\lambda$ es la separación intermodal del láser multimodo.

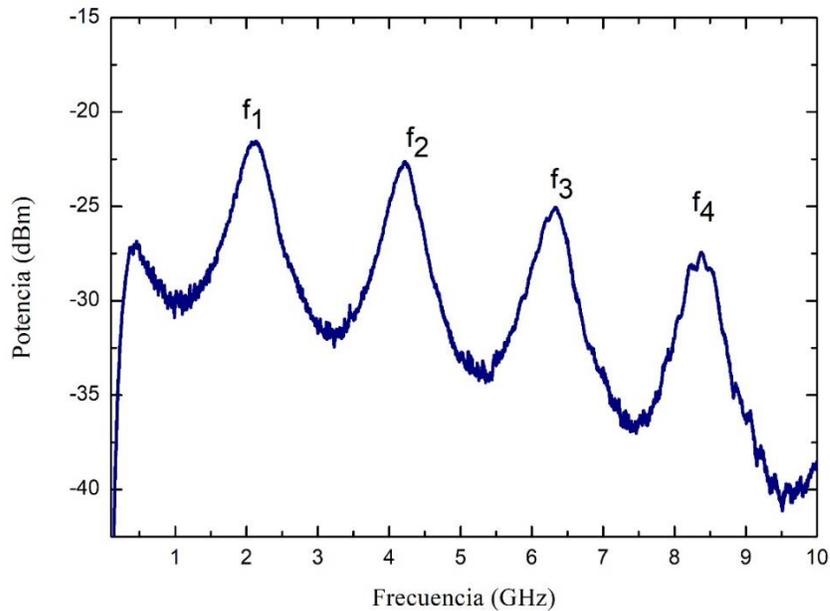


Figura 2.16: Respuesta en frecuencia del filtro fotónico de microondas.

En la gráfica anterior se muestra la respuesta en frecuencia del filtro fotónico de microondas, este se caracteriza por tener cuatro señales del tipo pasa banda con una frecuencia central y un ancho de banda definido.

Referencias:

- [1] G. Keiser, "Optical fiber communications", McGraw-Hill, Singapore, 1991, pp. 26-44, 87-107, 130-176.
- [2] José Capmany, "Fundamentos de Comunicaciones ópticas", SINTESIS, 1998.
- [3] R. Papannareddy, "Introduction to lightwave communication systems", Artech House, 1997, pp. 5-8, 56.
- [4] E. L. Wooten, K. M. Kissa, A. Yin-Yan, E. J. Murphy, D. A. Lafaw, P. F. Hallemeier, D. Maack, D. V. Attanasio, D. J. Fritz, G. J. McBrien, D. Bossi, "A Review of Lithium Niobate Modulators for Fiber-Optic Communications Systems", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 1, January/February 2000, pp. 69-82.
- [5] L. Desmarais, "Applied Electro-Optics", Prentice Hall, New Jersey, 1998
- [6] E. L. Wooten, K. M. Kissa, A. Yin-Yan, E. J. Murphy, D. A. Lafaw, P. F. Hallemeier, D. Maack, D. V. Attanasio, D. J. Fritz, G. J. McBrien, D. Bossi, "A Review of Lithium Niobate Modulators for Fiber-Optic Communications Systems", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 1, January/February 2000, pp. 69-82.
- [7] D. Delacourt, "Integrated optics on lithium niobate", Advances in Integrated Optics, S. Martellucci, A. N. Chester, and M. Bertolotti, Eds., New York: Plenum, 1994, pp. 79-93.
- [8] Von Hoyningen-Huene, Johannes Ryf, Roland Winzer, Peter, "LCoS-based mode shaper for few-mode fiber", Optics Express, 2013, pp. 4.
- [9] José Capmany, "A tutorial on microwave photonic filter", Journal of lightwave technology, Vol. 24, 2006, pp 1.
- [10] I. E. Zaldívar-Huerta, A. García-Juárez, P. Hernández-Nava, J. Rodríguez Asomoza, "Experimental transmission in a fiber radio scheme using a microwave photonic filter operating at 2.8 GHz". IECE Electronics Express, Vol. 10, pp. 1-10, (2013).
- [11] I.E. Zaldívar-Huerta, A.García-Juárez, D.F.Pérez-Montaña, P.Hernández-Nava, A.Vera-Marquina, "Proposal and performance evaluation of a filter-to-the-antenna system for video distribution operating in the S-band", Optics and laser technology, 2015.

Capítulo 3: Photonic lantern

3.1 Introducción

El capítulo anterior se enfocó en explicar la teoría general de comunicaciones ópticas, este capítulo se centra en la teoría que explica el comportamiento del photonic lantern.

Primero se explicará el proceso de fabricación del photonic lantern, posteriormente, se verá la propagación de luz a través de una fibra óptica que ha pasado por el proceso de “tapering” explicándolo brevemente. Después, se darán a conocer las características de un photonic lantern del tipo modo selectivo y por último las aplicaciones más importantes.

3.2 Descripción general

Un photonic lantern (PL) es un dispositivo óptico de bajas pérdidas que permite conectar una fibra óptica multimodo o de pocos modos a varias fibras con núcleos monomodo [2,3]. La figura 3.1 muestra el esquema de un PL que ha sido fabricado por medio de la reducción gradual de un conjunto de N fibras monomodo separadas [3]. Un extremo del PL es de núcleo multimodo relativamente grande, y el otro es un arreglo de varios núcleos monomodo relativamente pequeños. En la zona central, llamada región de transición, la guía de onda cambia de manera gradual de multimodo a monomodo o vice versa. Si la región de transición es lo suficientemente gradual las pérdidas ópticas serán bajas, nótese que cualquiera de los extremos puede actuar como entrada o salida, por lo que el dispositivo es bidireccional.

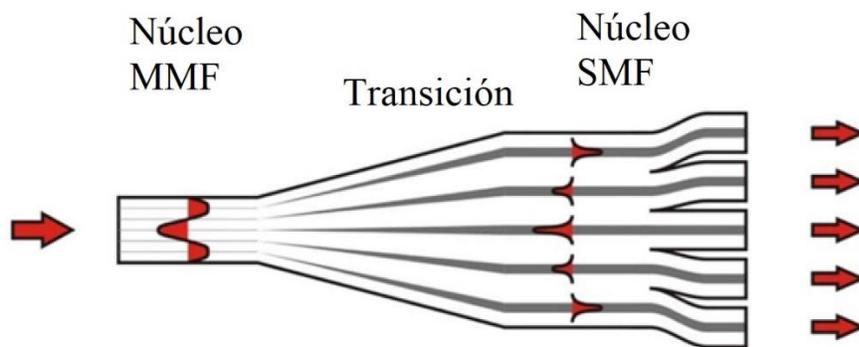


Figura 3.1: Diagrama esquemático de un PL [1].

El PL no requiere de una correspondencia uno a uno entre los núcleos monomodo y los modos del núcleo multimodo. En general, la luz de un núcleo (o modo) en la entrada se distribuye a la mayoría o en todos los núcleos (o modos) a la salida. Debido a la estructura del PL este encuentra aplicaciones en la conversión de sistemas monomodo a multimodo y vice versa. Algunos ejemplos de aplicaciones de estos dispositivos se dan en: la instrumentación astronómica y en telecomunicaciones ópticas, donde los canales individuales de información entregados por la fibra monomodo

necesitan ser multiplexados a través de combinaciones ortogonales de modos en una fibra multimodo o de pocos modos.

3.3 Fabricación de un photonic lantern

En esta sección se explica a grandes rasgos como se fabrica este dispositivo óptico. Al proceso de fabricación se le llama “tapering” y se dará una breve explicación sobre la propagación de la luz a través de una fibra que ha pasado a través de este proceso.

3.3.1 Proceso de “Tapering” de fibra óptica

Por “Tapering” en un fibra se refiere al calentamiento y estiramiento constante de una o varias fibras para una longitud corta [3]. En la figura 3.2 se muestra el proceso de “tapering” para una sola fibra. La fuente de calor ablanda el vidrio lo suficiente para que la fibra se estire, formando de esta manera la región “waist”. Para el caso de fibras fabricadas en base de SiO_2 , la temperatura a la cual se realiza el “tapering” es de aproximadamente 1700°C .

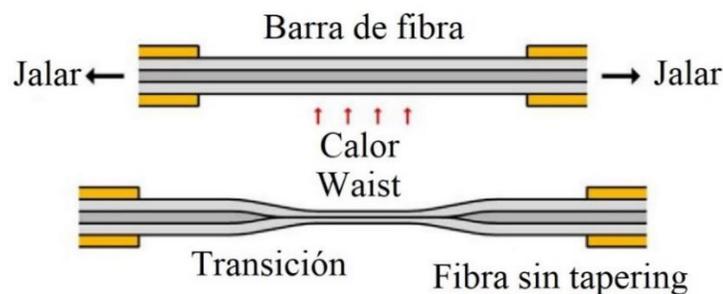


Figura 3.2: Proceso de “tapering” y estiramiento sobre una fibra óptica [1].

3.3.2 Propagación de la luz a través de un “tapering” en la fibra

A manera de ejemplo, se considera una fibra monomodo típica diseñada para aplicaciones en telecomunicaciones, esta tiene un núcleo con diámetro de $9\ \mu\text{m}$ y revestimiento de $125\ \mu\text{m}$, además de una apertura numérica (NA) de 0.11. Si a esta fibra se le inyecta un haz de luz con $1550\ \text{nm}$ de longitud de onda en el modo fundamental dentro y alrededor del núcleo, como se

aprecia en la figura 3.3. Por lo tanto, podemos suponer que el “tapering simplemente reduce el diámetro de la fibra como se muestra en la figura 3.3.

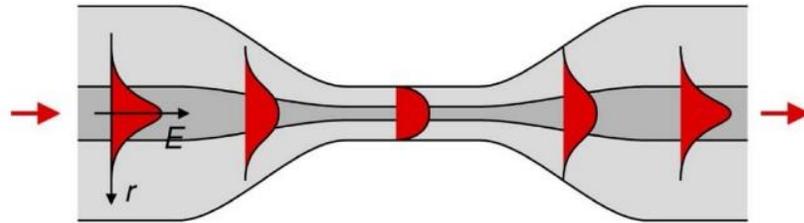


Figura 3.3: Diagrama esquemático de la propagación de la luz a través de una fibra bajo el proceso de “tapering” [1].

El “tapering” de la fibra descrita anteriormente tiene una reducción de aproximadamente 4:1, por lo tanto, el diámetro del núcleo de la fibra es ahora de 2 μm o menos, lo cual es demasiado pequeño para guiar la luz efectivamente a 1550 nm. Por lo tanto, el modo fundamental se guía como un modo de revestimiento, mediante la guía de onda en el límite exterior entre el revestimiento y el aire que lo rodea.

En el caso de tener varias fibras monomodo cuando se va a realizar el proceso de “tapering”, si los núcleos de las fibras son idénticos y están desacoplados, sus modos individuales están degenerados (es decir, comparten la misma constante de propagación) y, por lo tanto, pueden agregarse de manera arbitraria para formar modos, sin embargo, en algún punto de la transición, los núcleos se han reducido en tamaño y separación lo suficiente para que se produzca un acoplamiento direccional apreciable entre ellos. Este sistema tiene modos normales llamados supermodos, cada uno de los cuales es una combinación de los modos individuales con amplitud y fases definidas. Para N núcleos monomodo, también hay N supermodos. Por lo tanto, podemos expresar la luz de entrada (por ejemplo, en una sola de las fibras separadas) como una suma de supermodos, y después estudiar la propagación de los supermodos a través de la estructura como se aprecia en la figura 3.4.

Finalmente la guía de onda en la sección de transición llamada “waist” es la base fundamental del dispositivo, ya que es ahí donde los modos de propagación se confinan y se obtienen los modos (LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b}) para el caso de un photonic lantern de tres a uno.

3.4 Funcionamiento del photonic lantern

La propagación de la luz a través de un PL se asemeja mucho al de varias fibras juntas. La luz en un modo dado del núcleo multimodo excita la luz por separado en los núcleos monomodo con una distribución en amplitud y fase, según está determinado por n supermodos en esta parte de la transición donde el núcleo monomodo están lo suficientemente separados para ser distintos pero lo suficientemente cerca para estar débilmente acoplados [4], la figura 3.4 (a). En dirección de derecha a izquierda, la luz en un núcleo monomodo excita la luz en varios modos del núcleo multimodo, como lo determina la superposición de supermodos que suman para dar luz solo en ese núcleo monomodo, Figura 3.4 (b).

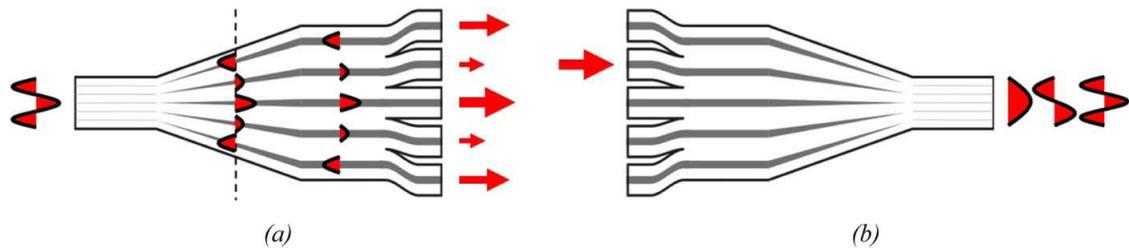


Figura 3.4: Diagramas esquemáticos de la propagación de la luz a través de un PL (a) desde un modo del núcleo multimodo al arreglo de núcleos monomodo y (b) desde un núcleo monomodo al núcleo multimodo [1].

Como se mencionó anteriormente, un PL es un dispositivo con N fibras monomodo y realiza el multiplexado a través de los N modos de la fibra de pocos modos y viceversa. Un PL puede ser de modo selectivo o no, esta sección se enfocará en el modo selectivo ya que es útil para mitigar los efectos dependientes del modo, por ejemplo; el retardo de grupo diferencial (DGD differential grupe delay) y la pérdida por dependencia de modo (MDL

mode dependent loss) o la ganancia. En la figura 3.5 se muestra un esquema de un sistema SDM donde dos PL actúan como multiplexor y demultiplexor óptico.

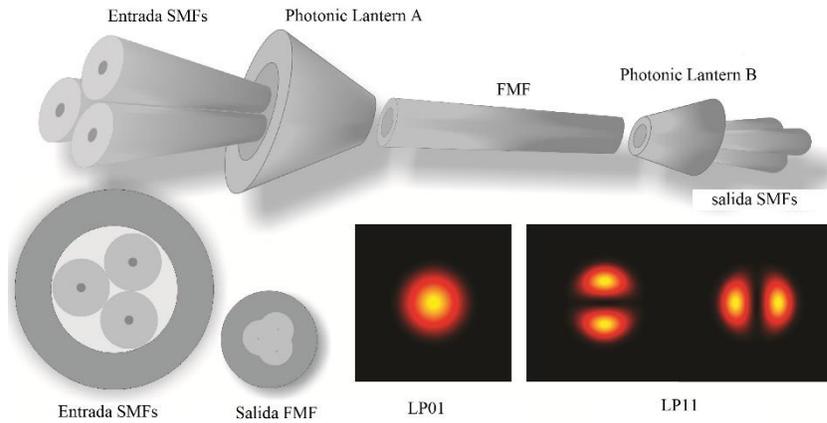


Figura 3.5: Esquema de un PL con 3 modos de propagación [5].

3.4.1 Principio de operación del modo selectivo

Un PL se construye colocando múltiples fibras monomodo dentro de un tubo protector de bajo índice de refracción y posteriormente se realiza el “tapering” adiabáticamente [6]. Toda la estructura pasa por el proceso de “tapering” hasta que los núcleos de las fibras monomodo casi hayan desaparecido, el revestimiento de las fibras monomodo se convierte en el nuevo núcleo multimodo, y el tubo protector de bajo índice se convierte en el revestimiento de la fibra multimodo.

Para fabricar un PL que pueda acoplar modos individuales mientras se inyecta luz a través de las fibras monomodo independientes se requieren dos factores:

- 1) Romper la degeneración entre los modos a través de toda la transición del PL.
- 2) Asegurar que las constantes de propagación no se crucen o interactúen entre sí durante la transición para evitar el acoplamiento de modo.

Al fabricar un PL con los núcleos de las fibras monomodo diferentes, dará lugar a diferentes constantes de propagación de los modos iniciales. Esto separará los modos degenerados iniciales de los modos centrales no acoplados, proporcionando un rango de modos de propagación no degenerados al comienzo de la transición. El orden y la diferencia de las constantes de propagación de los modos guiados iniciales en los núcleos desacoplados de las fibras monomodo determinarán las propiedades de multiplexación modal final del PL. Una transición adiabática desde las fibras monomodo al extremo multimodo asegurara, que la luz en el núcleo de entrada de la n-ésima constante de propagación máxima excite solo al modo de salida de la n-ésima mayor constante de propagación en el extremo de la fibra multimodo, y vice versa. Esto debe funcionar en todas las longitudes de onda para las cuales esta transición es adiabática en el PL.

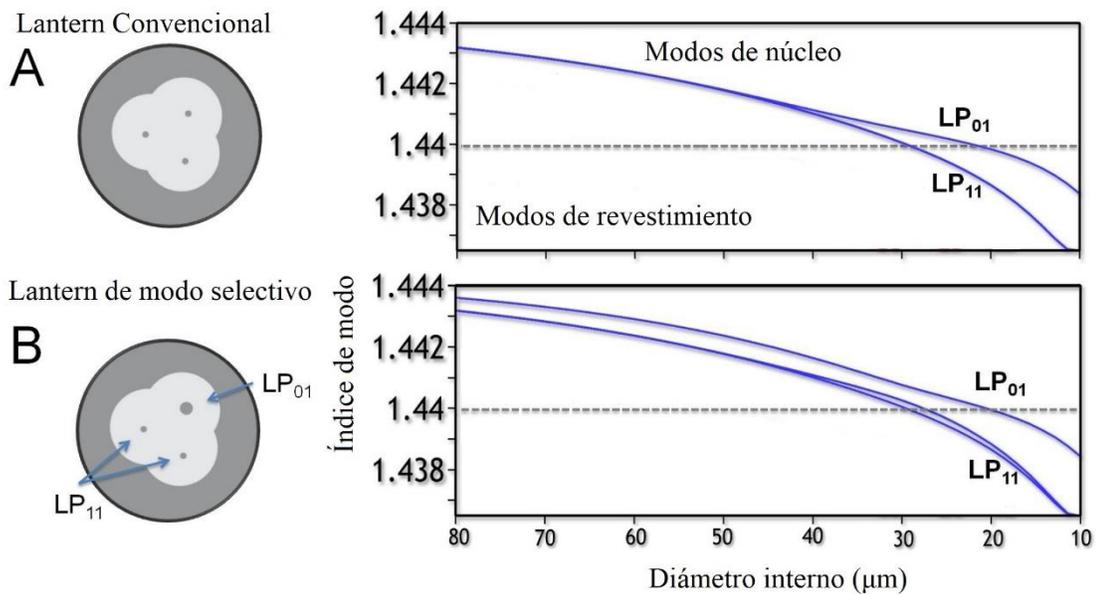


Figura 3.6: Análisis modal (a) un PL convencional de tres fibras monomodo, y (b) un PL de tres fibras monomodo de modo selectivo [5].

La figura 3.6 (a) muestra el análisis modal para un PL con tres fibras monomodo idénticas, pero esta sección sólo se enfoca en el photonic lantern de modo selectivo, el cual se describe a continuación.

Un PL de modo selectivo solo necesita multiplexar combinaciones codificadas ortogonales de modos dentro del mismo grupo de modos. Por ejemplo, un PL de tres fibras solo necesitaría distinguir entre dos grupos de modos, LP_{01} y LP_{11} . Por lo tanto, al tener diferencia entre constantes de propagación la distinción debe aplicarse a solo una de las fibras iniciales. En el caso de un PL de tres fibras monomodo tendrá dos grupos, por lo tanto, la que excitará el grupo del modo LP_{01} en la salida debería ser el que tenga mayor constante de propagación, por lo tanto, un núcleo más grande. La figura 3.6 (b) muestra el análisis de un PL de modo selectivo. Los parámetros utilizados en el trabajo [5] son los siguientes: la diferencia entre el índice de refracción del núcleo y el revestimiento es bajo (es decir, apertura numérica (NA) de la fibra multimodo final) $NA = 0,1$; Núcleos de la fibra monomodo, diámetro de $1 \times 14.4 \mu\text{m}$ y diámetros de núcleo de $2 \times 12 \mu\text{m}$ con $NA = 0.12$ para los tres núcleos. En la entrada, un modo espacial está confinado completamente dentro del núcleo más grande, y los dos modos espaciales degenerados están confinados dentro de los núcleos idénticos más pequeños. A medida que disminuye el diámetro interno, los 2 modos degenerados se convierten en los modos LP_{11} en el extremo de la fibra de pocos modos del PL, y el modo central de mayor diámetro se convierte en el modo LP_{01} . En el “tapering” adiabático, la diferencia en el índice efectivo inhibe el acoplamiento entre los diferentes grupos. La diferencia en la evolución de acoplamiento de modo entre el PL convencional y el modo selectivo se muestran en la figura 3.6 (a y b).

El PL de modo selectivo es escalable para fibras de pocos modos, ya que admiten más de tres modos, los modos en las fibras de pocos modos se pueden agrupar en grupos casi degenerados (por ejemplo, $2 \times LP_{01}$, $4 \times LP_{11}$, $4 \times LP_{21}$, $2 \times LP_{02}$). Los modos que comprenden estos grupos se acoplan fuertemente en la fibra de pocos modos y no necesitan

demultiplexores individualmente en un sistema SDM; esto simplifica aún más la realización de dispositivos de conteo de modos más grandes.

3.5 Aplicaciones del photonic lantern

El propósito de un PL es proporcionar una interfaz de baja pérdida entre guías de onda multimodo y varias guías de onda monomodo. Es el más adecuado para situaciones en las que el control sobre la distribución de la luz entre la salida y grados de libertad (modos de un núcleo multimodo, o núcleos en una matriz de núcleos monomodo) no es importante. Los PL tienen varias aplicaciones en las que se necesita una interfaz de este tipo.

3.5.1 Telecomunicaciones

Recientemente, los PL del tipo modo selectivo se han estado utilizando como multiplexores y demultiplexores para sistemas SDM de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Un sistema MIMO consiste en un multiplexor para acoplar T canales con M modos de fibra, un M demultiplexor para acoplar un arreglo de R receptores, como se muestra en la figura 3.7.

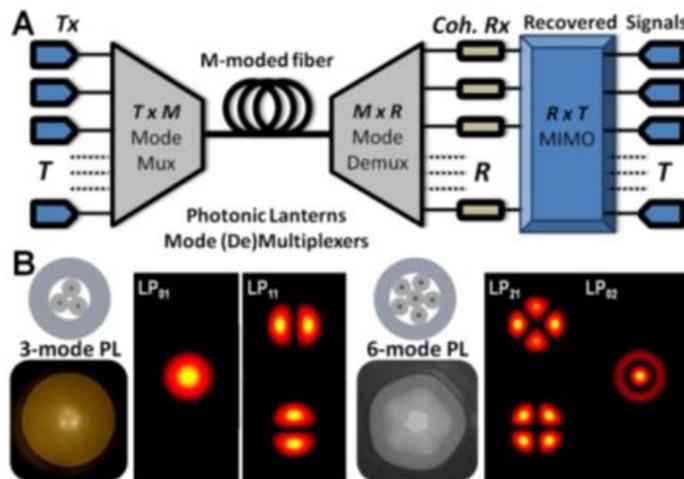


Figura 3.7: (A) SDM coherente con procesamiento MIMO electrónico ($T \leq M \leq R$). (B) Multiplexores de modo de PL de 3 y 6 fases para acoplamiento SDM de baja pérdida [7].

Referencias:

- [1] T. A. Birks, I. Gris-Sánchez, S. Yerolatsitis, S. G. Leon-Saval, and R. R. Thomson, “The photonic lantern”, *Advances in Optics and Photonics*, 2014.
- [2] S. G. Leon-Saval, T. A. Birks, J. Bland-Hawthorn, and M. Englund, “Single-mode performance in multimode fibre devices,” in *Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, California (2005)*, paper PDP25.
- [3] T. A. Birks, S. G. Leon-Saval, J. Bland-Hawthorn, and M. Englund, “Adiabaticity in multicore fibre transitions,” in *ACOFT Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modelling, Sydney, Australia (2005)*, p. 19.
- [4] S. G. Leon-Saval, T. A. Birks, J. Bland-Hawthorn, and M. Englund, “Multimode fiber devices with single-mode performance,” *Opt. Lett.* 30, 2545–2547 (2005).
- [5] Leon-Saval Sergio G, Fontaine Nicolas K, Salazar-Gil Joel R, Ercan Burcu Ryf and Roland Bland-Hawthorn Joss, “Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing” *Optics Express*, 2014.
- [6] D. Noordegraaf, P. M. Skovgaard, M. D. Nielsen, and J. Bland-Hawthorn, “Efficient multi-mode to single-mode coupling in a photonic lantern,” *Opt. Express* 17(3), 1988–1994 (2009).
- [7] Sergio G. Leon-Saval, Alexander Argyros and Joss Bland-Hawthorn, “Photonic lantern”, *Advanced Photonics*, 2015.

Capítulo 4: Montaje experimental

4.1 Introducción

Este capítulo tiene por objetivo presentar el esquema experimental utilizado para realizar las pruebas pertinentes al photonic lantern. Primeramente, se comenzará con un esquema de comunicación óptica a modulación externa con características que permitan utilizarlo como un filtro fotónico de microondas. Posteriormente se presentará el mismo esquema, pero utilizando un photonic lantern y se realizarán comparaciones entre la

respuesta en frecuencia del sistema con la respuesta obtenida utilizando el photonic lantern. En la última sección de este capítulo, se utilizará esta última arquitectura para transmitir información digital a través del esquema completo.

4.2 Respuesta en frecuencia del filtro fotónico de microondas

Primero se caracterizó la fuente láser multimodo (modelo 040820-03), se realizó un barrido de corriente hasta 40 mA, posteriormente se seleccionó la parte lineal del láser para poder fijar un punto de operación óptimo. En la figura 4.1 se ilustra la gráfica corriente potencia del láser, y la corriente de operación se fijó a 28 mA.

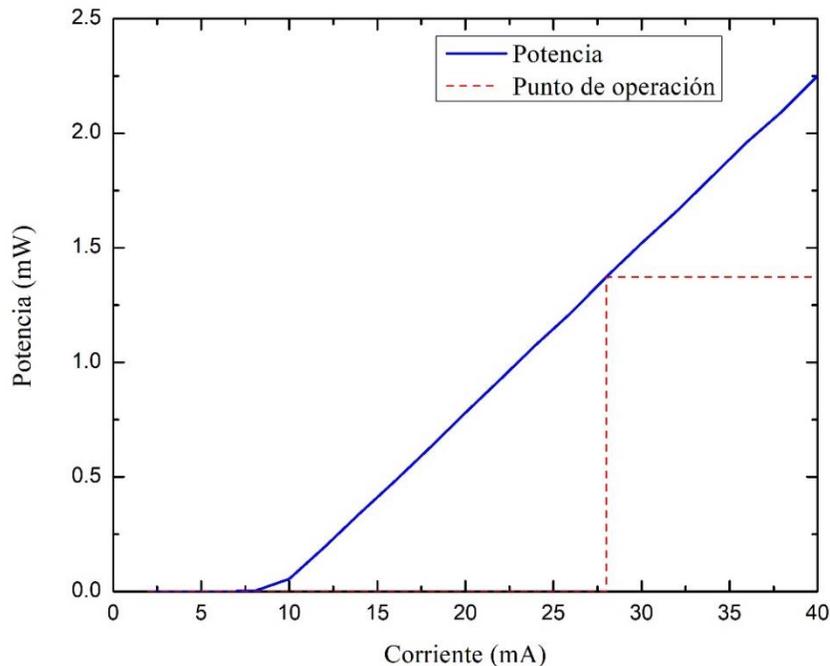


Figura 4.1: Punto de operación de láser multimodo a 28 mA.

Posteriormente se midió el espectro óptico de la fuente láser multimodo en el equipo analizador de espectros ópticos (figura 4.2), con una longitud de onda central de 1544 nm y se realizó la medición del ancho espectral de la fuente ($\Delta\lambda$) y la separación intermodal ($\delta\lambda$) las cuales fueron de 8.3 nm y 1.1 nm respectivamente.

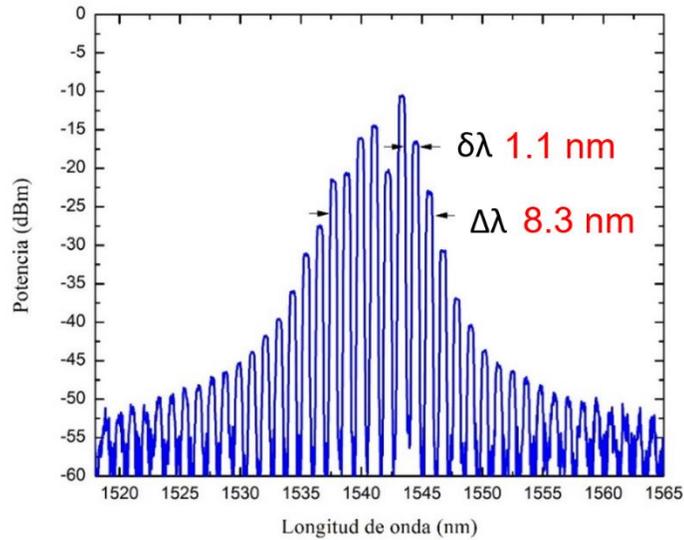


Figura 4.2: Espectro óptico de la fuente multimodo a 28 mA.

El esquema del filtro fotónico de microondas se muestra en la figura 4.3, compuesto por una fuente láser multimodo (MLD), un control de polarización (PC), un modulador de intensidad del tipo Mach-Zehnder (con un Voltaje (v_{π}) de 5.6V y un ancho de banda de 0.1GHz a 20 GHz), un generador de señales vectoriales (VSG) (con un ancho de banda de 2.5MHz a 4GHz), un carrete de fibra óptica monomodo estándar (single mode standard fiber SM-SF por sus siglas en inglés) de 28.3 km, un fotodetector del tipo APD (fotodetector avalancha) (con una responsividad (A/W) de 0.8 – 0.97 y un ancho de banda de 30KHz a 13GHz) y un analizador de espectros eléctricos (ESA) (con un ancho de banda de 9KHz a 26.5GHz).

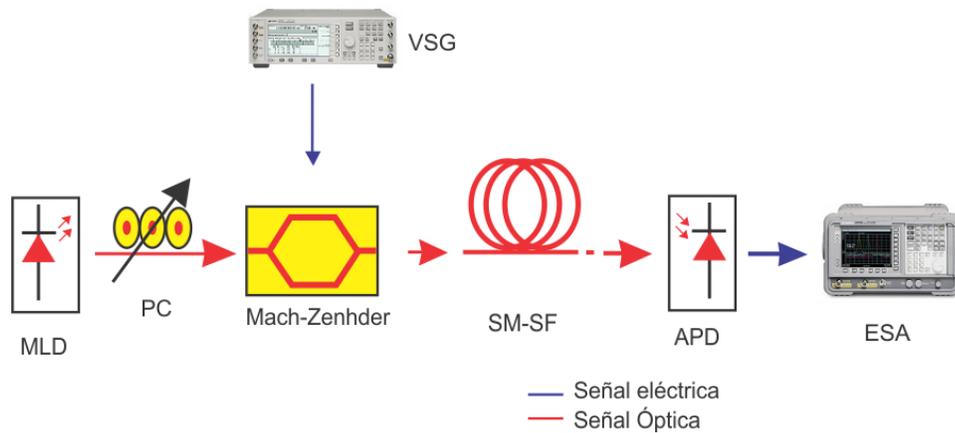


Figura 4.3: Esquema filtro fotónico de microondas.

Teniendo el esquema anterior, un láser multimodo con una longitud de onda central a 1544 nm y una fibra óptica estándar (como se mostró en la sección 2.1.2), la dispersión será diferente de cero. Con esto se obtiene la respuesta en frecuencia como se muestra en la figura 4.4, regida por la ecuación 2.40 [1].

$$f_n = \frac{n}{DL\delta\lambda} \quad (2.40)$$

Donde D es la dispersión cromática (15.81 ps/nm*km), L es la longitud del enlace (28.3km de fibra óptica) y $\delta\lambda = 1.1$ nm. Dando como resultado una primera frecuencia central a 1.92GHz.

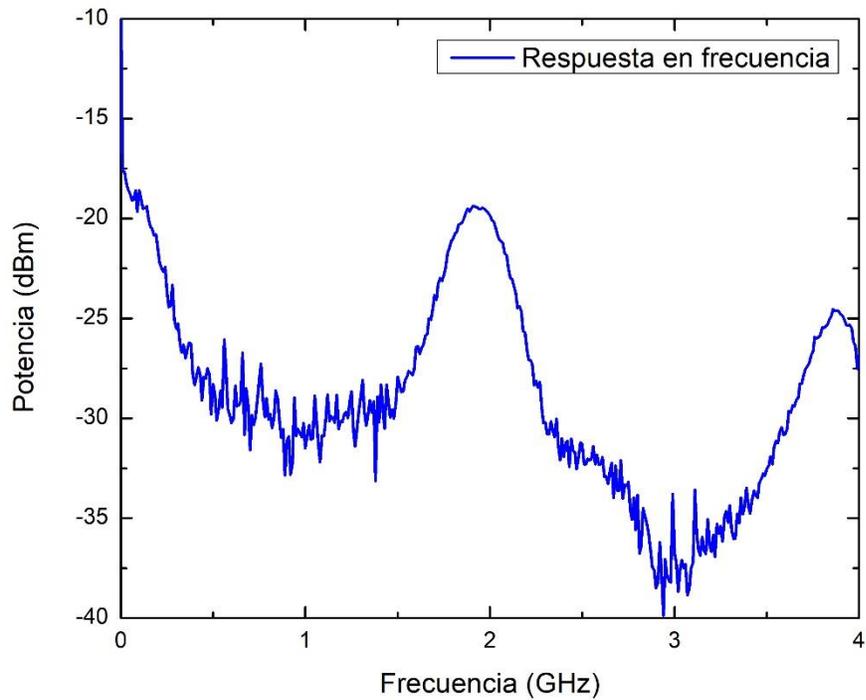


Figura 4.4: Respuesta en frecuencia del sistema experimental.

En la figura 4.4 se muestra la respuesta en frecuencia del esquema mostrado en la figura 4.3. Como se puede observar, la respuesta en frecuencia representa el efecto de filtro fotónico de microondas, el cual se caracteriza por tener una sección pasa banda con una frecuencia central, en este caso en particular es de 370MHz de ancho de banda y la frecuencia central está en 1.93GHz. Además de tener una relación señal a ruido de 11 dB.

	Respuesta Frecuencia (experimental)
Primera frecuencia central	1.93 GHz
Ancho de banda filtro pasa bandas	370 MHz
SNR	11 dB

Tabla 4.1: Resultados para la respuesta en frecuencia experimental.

4.2.1 Simulación de un filtro fotónico de microondas

Se realizó la simulación del esquema mostrado en la figura 4.1 en Matlab, utilizando los mismos parámetros que en el esquema experimental y dando como resultado la figura 4.5.

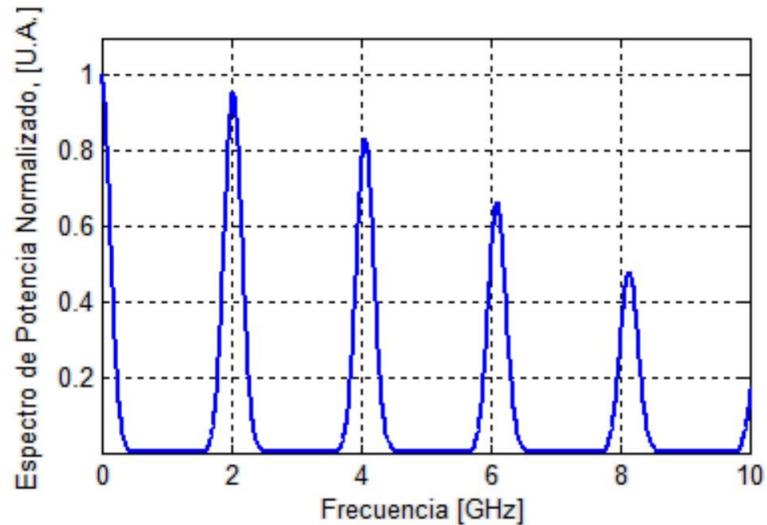


Figura 4.5: Respuesta en frecuencia de un sistema de comunicación a modulación externa, con las características para ser un filtro fotónico de microondas.

De la misma manera que la respuesta en frecuencia experimental, la gráfica de la figura 4.5 presenta cuatro secciones pasa banda con sus frecuencias centrales, la primera frecuencia central se encuentra en 2.03GHz.

Para obtener el ancho de banda se utiliza la ecuación (4.2) [1].

$$\Delta f_p = \frac{4\sqrt{Ln(2)}}{\pi DL\Delta\lambda} \quad (4.2)$$

Donde $\Delta\lambda$ es el ancho espectral de la fuente, en este caso en particular su valor es de 8.3 nm.

Realizando los cálculos se obtienen los siguientes valores para los filtros.

- Ancho de banda de la señal pasa banda

$$\Delta f_{lp} = \frac{4\sqrt{\ln(2)}}{\pi DL\Delta\lambda}$$

$$\Delta f_{lp} = \frac{(4) (\sqrt{\ln(2)})}{(\pi) \left(15.81 \frac{ps}{Km nm}\right) (28.3 Km)(5.7nm)} = 286 MHz$$

El error que existe entre las frecuencias centrales (experimental y teoría) es del 5.41%, esto se debe a la variación en los valores de dispersión cromática, distancia del enlace, o la separación intermodal del espectro óptico del láser.

	Respuesta en frecuencia (Teórica)
Primera frecuencia central	2.033 GHz
Ancho de banda filtro pasa bandas	286 MHz

Tabla 4.2: Resultado para la respuesta teórica

4.3 Filtro fotónico de microondas utilizando photonic lantern

En esta sección se realizará las pruebas al photonic lantern, esta consiste en utilizar el PL dentro de una arquitectura de comunicación óptica a modulación externa como la mostrada anteriormente. Posteriormente se hará una comparación entre la respuesta en frecuencia del sistema y utilizando cada uno de los modos del photonic lantern (LP₀₁, LP_{11a} y LP_{11b}).

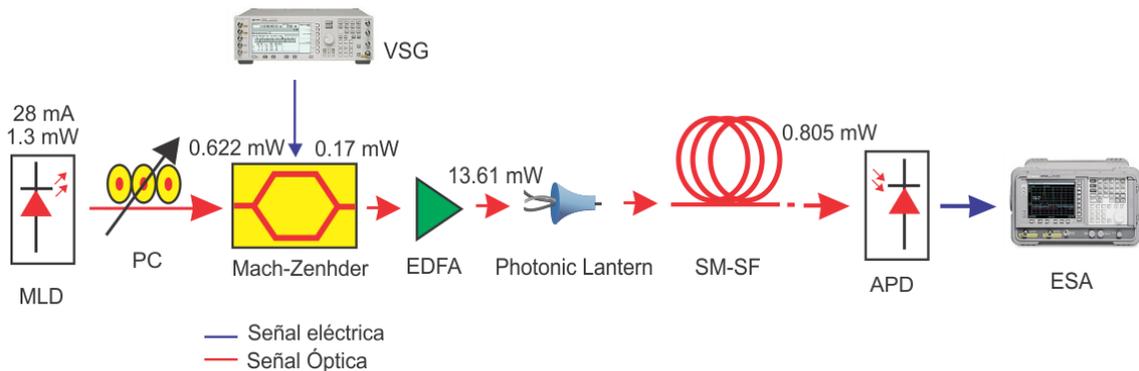


Figura 4.6: MPF usando PL

El esquema de la figura 4.6, muestra el diagrama experimental que se utilizó para realizar primero las pruebas del filtrado fotónico de microondas utilizando el PL. Debido a que a la salida del PL no cuenta con conector, se hizo un arreglo fibra-aire-fibra, por esta razón se utilizó un amplificador óptico (EDFA), para aumentar los 0.17mW que se tienen a la salida del Mach-Zehnder y así poder tener los 13.61mW a la salida del PL para mitigar las pérdidas de potencia a la salida del PL.

4.3.1 Photonic lantern

El photonic lantern utilizado se muestra en la figura 4.7, este PL cuenta con tres fibras monomodo como entrada y se tiene como salida una fibra de pocos modos.

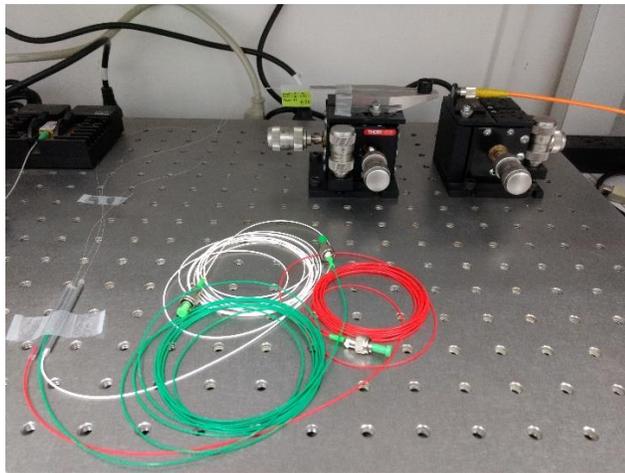


Figura 4.7: Photonic lantern de evaluación.

Como se mencionó anteriormente, se usó una mesa óptica para hacer el arreglo fibra-aire-fibra a la salida del PL y a la entrada del carrete de 28.3 km de fibra óptica (como se observa en la figura 4.7).

La figura 4.8 muestra los modos de propagación LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b} obtenidos cuando se inyecta luz a través de cada fibra monomodo del photonic lantern y es observada mediante una tarjeta de detección de infrarrojo. En la figura 4.8 a) es el modo fundamental LP_{01} , b) es el modo LP_{11a} y c) es el modo LP_{11b} .



a) LP_{01}

b) LP_{11a}

c) LP_{11b}

Figura 4.8: Modos obtenidos al final de la fibra de pocos modos del PL.

En la figura 4.9 se muestra el montaje experimental en el laboratorio, el cual previamente fue descrito.

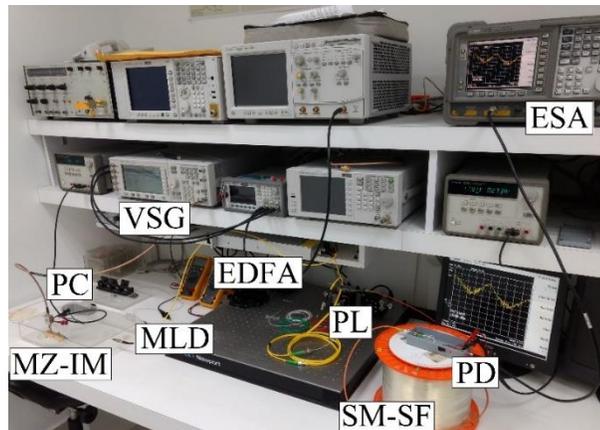


Figura 4.9: Montaje experimental.

4.3.2 Respuesta LP_{01}

Utilizando el esquema de la figura 4.6, y manejando solo el modo fundamental, se obtuvo la respuesta en frecuencia mostrada a continuación.

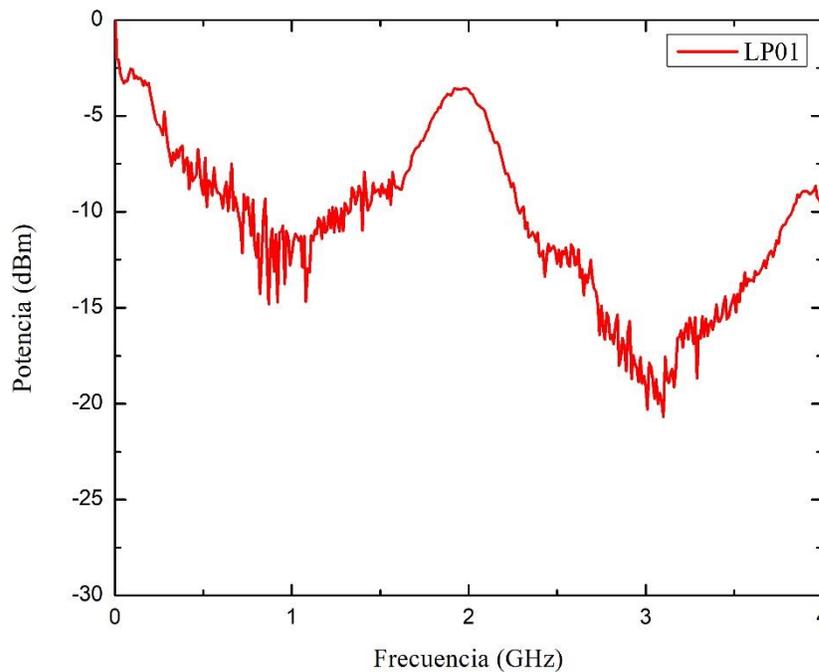


Figura 4.10: Respuesta del MFP utilizando el modo fundamental LP₀₁

Como se muestra en la gráfica de la figura 4.10, se obtuvo la respuesta en frecuencia utilizando el PL, de igual manera que en la figura 4.4, el filtro fotónico de microondas se caracteriza por tener una sección pasa banda centrado a una frecuencia. En este caso, utilizando el modo fundamental del PL (LP₀₁) se obtuvo a 1.92GHz con un ancho de banda de 450MHz y una relación señal a ruido de 5.3 dB.

	Photonic Lantern (LP ₀₁)
Primera frecuencia central	1.92 GHz
Ancho de banda filtro pasa bandas	450 MHz
SNR	5.299

Tabla 4.3: Resultado utilizando LP₀₁

4.3.3 Respuesta LP_{11a}

Se repito la misma prueba que en la sección 4.3.2 pero esta vez utilizando el modo LP_{11a}, la respuesta en frecuencia obtenida de esta manera se observa en la gráfica 4.11, se obtiene la respuesta en frecuencia del filtro fotónico de

microondas, esta tiene una sección pasa banda y una frecuencia central de 1.93GHz con un ancho de banda de 350MHz, con una potencia máxima de aproximadamente -2.5 dBm, un SNR medido experimentalmente de aproximadamente 13.3 dB.

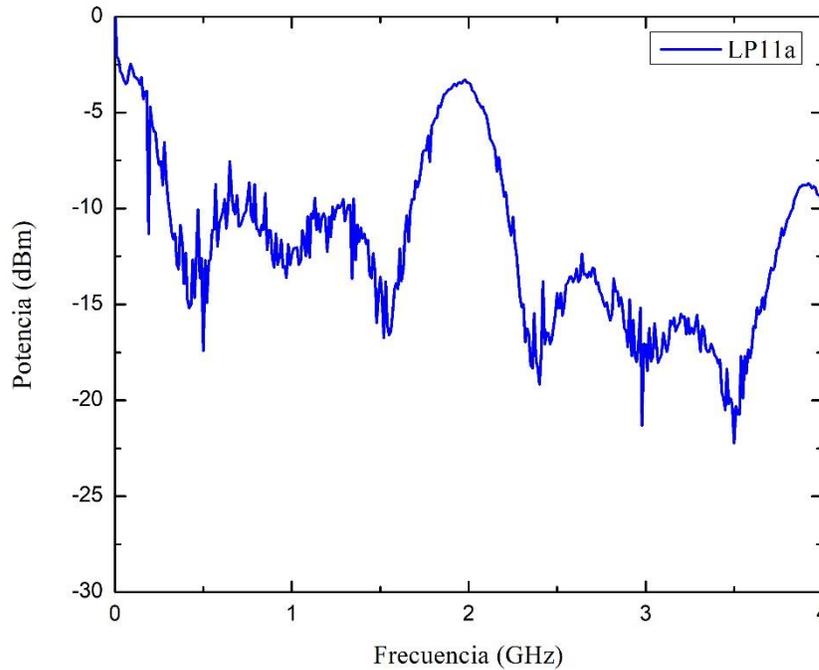


Figura 4.11: Respuesta del MPF utilizando el modo LP_{11a}

	Photonic Lantern (LP _{11a})
Primera frecuencia central	1.93 GHz
Ancho de banda filtro pasa bandas	350 MHz
SNR	13.315

Tabla 4.4: Resultado utilizando LP11a

4.3.4 Respuesta LP_{11b}

De igual manera utilizando el esquema de la figura 4.6, y utilizando solo el modo LP_{11b} se obtuvo la respuesta en frecuencia de la figura 4.12, esta tiene una sección pasa banda y una frecuencia central de 1.93GHz, con una

potencia máxima de aproximadamente -7 dBm, el SNR medido experimentalmente es de aproximadamente 13.3 dB.

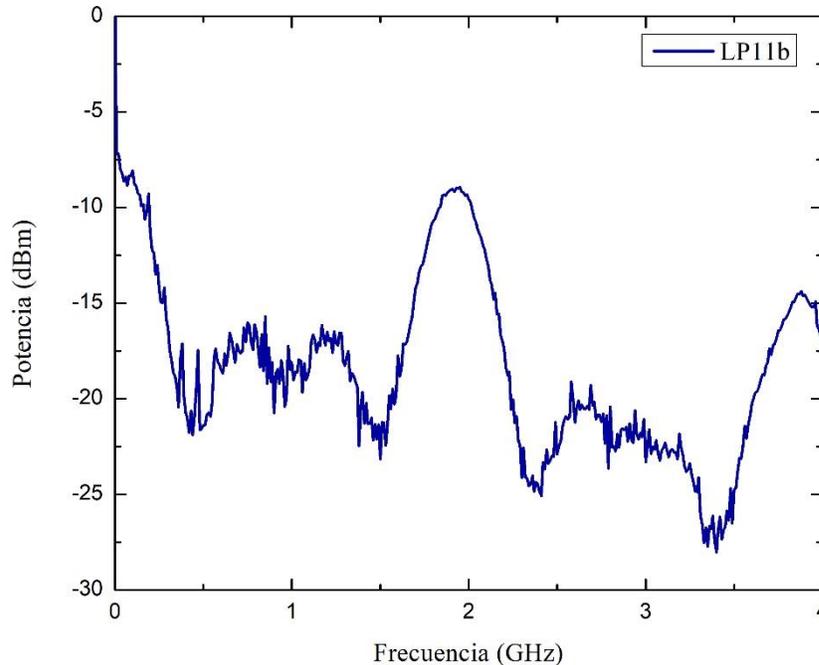


Figura 4.12: Respuesta del MPF utilizando el modo LP_{11b}

	Photonic Lantern (LP _{11b})
Primera frecuencia central	1.91 GHz
Ancho de banda filtro pasa bandas	330 MHz
SNR	13.377

Tabla 4.5: Resultado utilizando LP_{11b}.

4.3.5 Resultados

Como se aprecia en la gráfica 4.13, donde están las cuatro respuestas en frecuencia (la respuesta en frecuencia del sistema, respuesta con LP₀₁, respuesta con LP_{11a} y respuesta LP_{11b}) podemos concluir que es posible obtener el filtro fotónico de microondas, con sus respectivas secciones pasa banda y sus frecuencias centrales con cada uno de los modos del PL que se utilizó en el experimento, de los tres modos de propagación utilizados los dos mejores para transmitir información digital son los LP_{11a} y LP_{11b} debido a que

cuentan con un mejor SNR, en cambio el peor sería el modo LP_{01} por tener un bajo SNR. Por lo tanto, podemos concluir que para enviar información exitosamente se deben utilizar los modos del grupo LP_{11} .

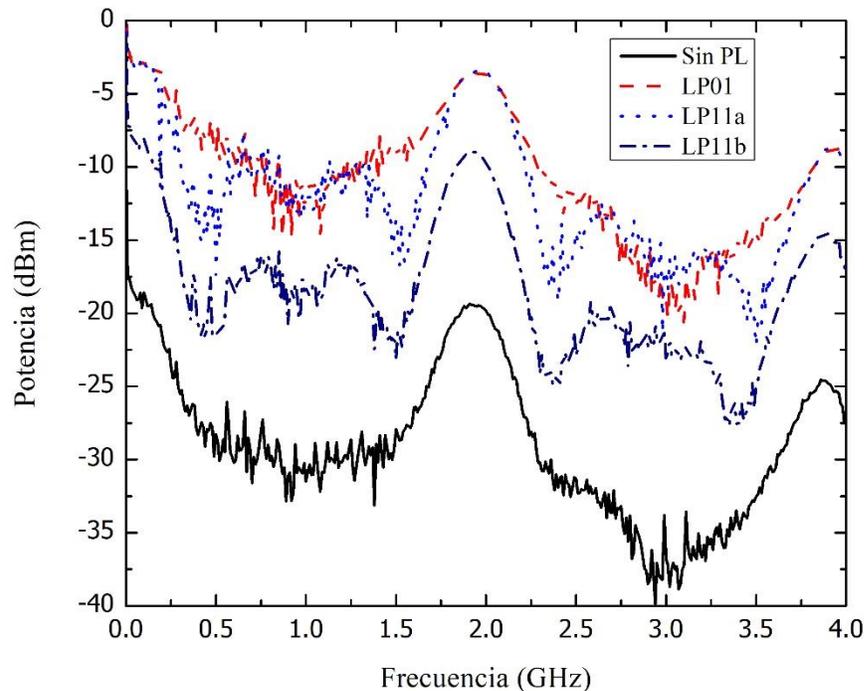


Figura 4.13: Respuesta del MPF comparando la respuesta natural con los tres modos del PL

4.4 Transmisión de datos digitales a través del sistema propuesto.

Una vez obtenido el filtro fotónico de microondas utilizando el PL, se propuso enviar datos digitales a través del sistema completo. Se utilizó un generador de ondas, el cual puede modular señales I/Q (modulación por cuadratura) al VSG ya que el equipo cuenta con entrada I/Q.

La señal enviada como información digital son señales de Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK), el equipo puede enviar datos en el rango de 0 a 160MSa/s, el esquema utilizando para realizar estas pruebas se presenta en la figura 4.14.

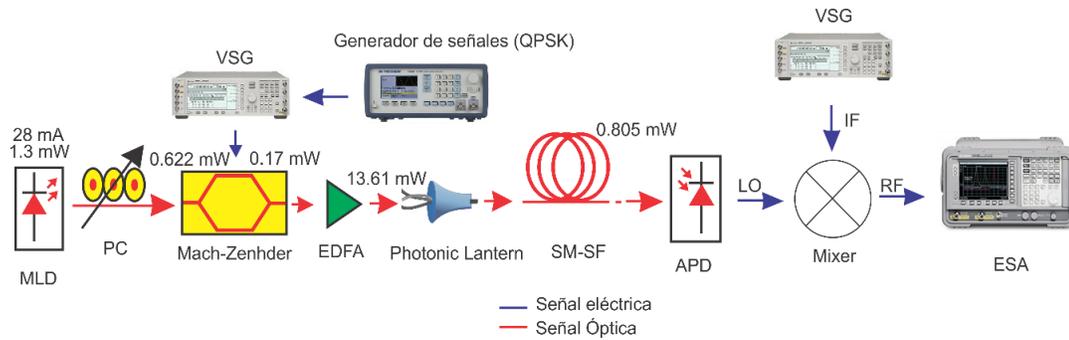


Figura 4.14: Esquema utilizado para enviar datos digitales a través de todo el sistema.

El esquema de la figura 4.14 es muy similar al presentado en la figura 4.4, solo que a esta vez se agregó el generador de señales, se moduló directamente y se conectó a través de modulación I/Q al VSG, se colocó un mezclador a la salida del APD, las salidas del mezclador van conectadas de la siguiente manera, la salida IF al segundo VGS, la salida LO al APD y la salida RF se conectó a la entrada del ESA.

El primer VSG se estableció a una frecuencia de 1.9GHz, al cual se le conecto vía modulación I/Q un generador de señales, se utilizó una señal QPSK a 110MSa/s, debido a la resolución del analizador de espectros eléctricos se propuso utilizar una frecuencia de 1.89GHz para el segundo VSG, por lo tanto nuestra respuesta en frecuencia estaría centrada en 10MHz.

4.4.1 Transmitiendo señales digitales a través de LP_{11a}

Utilizando el modo de propagación LP_{11a} del PL, se obtiene el espectro eléctrico de la figura 4.15, donde se observa que está centrada a 10MHz (debido a la resta entre ambos generadores de señales vectoriales “VSG”). En la figura 4.16 se aprecia el espectro eléctrico pero sin estar enviando información alguna, de esta manera podemos confirmar que si estamos enviando información a través del sistema utilizando el PL como multiplexor óptico.

A medida que aumentamos la tasa de transmisión de datos digitales, que va desde el rango de 0 a 160MSa/s (el límite del generador de señales), se va ensanchando el espectro eléctrico.

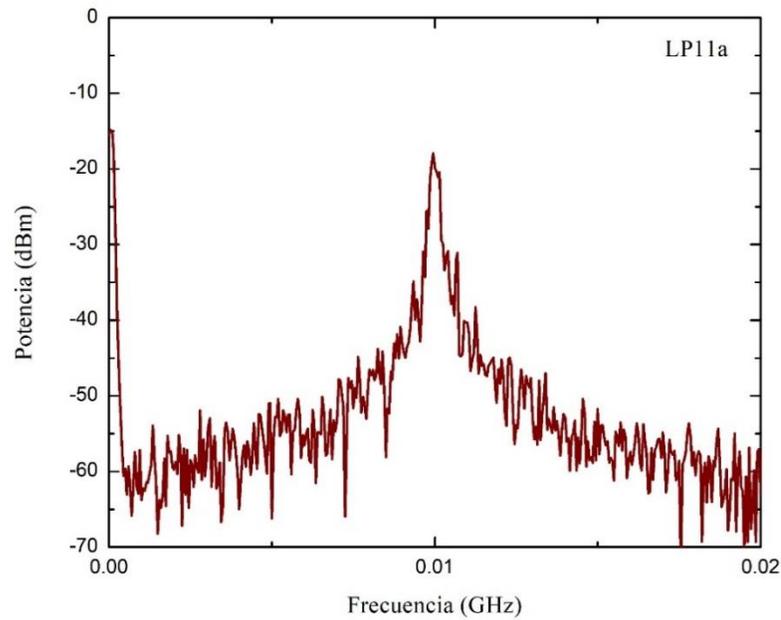


Figura 4.15: Transmisión de datos QPSK a través de LP_{11a}.

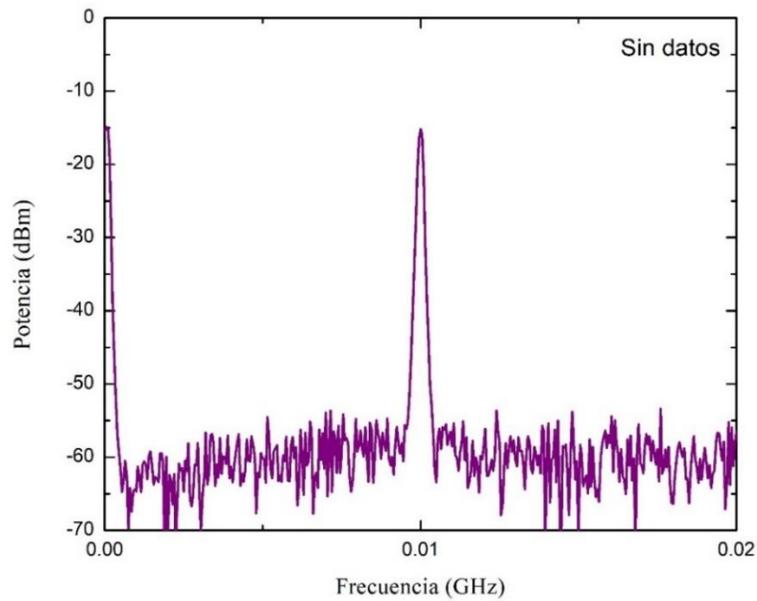


Figura 4.16: Espectro eléctrico sin enviar datos a través del sistema.

4.4.2 Transmitiendo señales digitales a través de LP_{11b}

Usando el modo de propagación LP_{11b} del PL, se obtuvo el espectro eléctrico mostrado en la gráfica 4.17, esta se encuentra centrada en 10MHz como en el caso anterior.

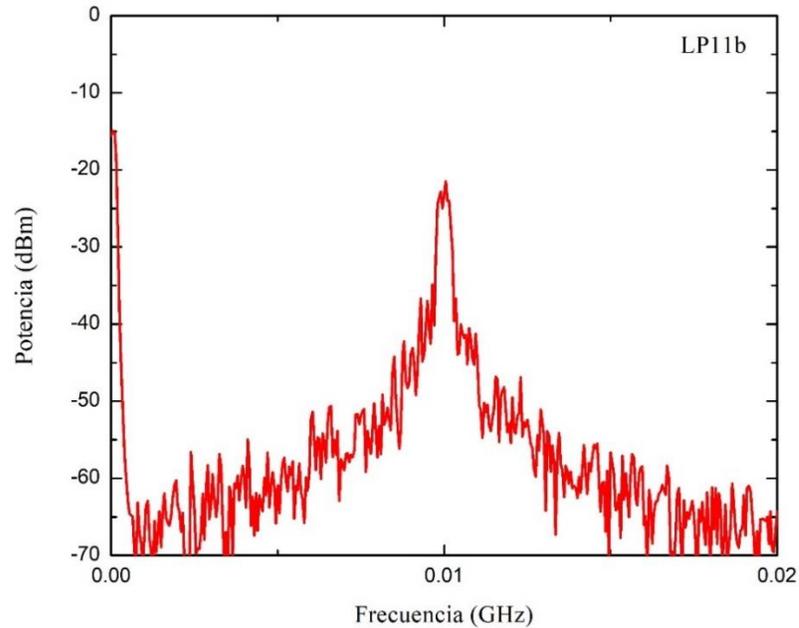


Figura 4.17: Transmisión de datos QPSK a través de LP_{11b}.

4.4.4 Conclusiones

Como se pudo observar en las gráficas 4.15 y 4.17, son los dos modos LP_{11a} y LP_{11b} los cuales fueron lo que obtuvieron un mejor SNR, la baja potencia en el espectro eléctrico obtenido para ambas transmisiones se debió al arreglo fibra-aire-fibra o a las pérdidas por conectores, sin embargo, podemos concluir como exitosa la transmisión de datos digitales a través de un filtro fotónico de microondas utilizando multiplexación espacial con la ayuda del photonic lantern.

Referencias:

- [1] I. E. Zaldívar-Huerta et al., "Experimental transmission in a fiber radio scheme using a microwave photonic filter operating at 2.8 GHz". *Electronics Express*, Vol. 10, 2013, 1-1

Capítulo 5: Conclusiones

5.1 Conclusión

Este trabajo de tesis se encuentra ubicado en el área de comunicaciones ópticas, específicamente en el campo de la optoelectrónica, ya que se trabaja tanto en el dominio óptico como el eléctrico. El primer objetivo de este trabajo fue utilizar el dispositivo óptico “Photonic Lantern” dentro de una arquitectura de filtro fotónico de microondas, previamente se obtuvieron resultados experimentales de la respuesta en frecuencia del efecto de filtro fotónico de microondas, esto para tener una manera de comparar resultados. Una vez colocado el Photonic lantern en la arquitectura del filtro fotónico de microondas, se prosiguió a utilizar cada una de las fibras monomodo del dispositivo, las cuales son modos de propagación (LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b}) debido a que el dispositivo es tres a uno. Los resultados obtenidos en esta primera parte se compararon con la respuesta en frecuencia del efecto de

filtro fotónico de microondas, obteniendo las ventanas de comunicación a una frecuencia central de 1.92GHz. Para el modo LP_{01} se obtuvo un ancho de banda de 450MHz y un SNR de 5.3 dB, el modo LP_{11a} un ancho de banda de 350MHz y un SNR de 13.3 dB y por último para el modo LP_{11b} un ancho de banda de 330MHz y un SNR de 13.3 dB. Por lo tanto, podemos afirmar que los mejores modos para enviar información a través de ellos son los del grupo LP_{11} (LP_{11a} y LP_{11b}).

El segundo paso del experimento fue transmitir señales digitales a través de todo el esquema experimental utilizando el photonic lantern, con cada uno de los modos LP_{11a} y LP_{11b} del dispositivo óptico, a continuación se hizo pasar la información digital previamente modulada en el VSG. Se realizó uno por uno y el espectro eléctrico fue visualizado en el ESA, comprobando experimentalmente que si se logró recuperar la señal transmitida a través de todo el sistema.

Como conclusión general, el mejor modo para transmitir información análoga o digital por el photonic lantern fue el LP_{11b} por tener una mejor relación señal a ruido (SNR) que el resto de modos, como segunda opción y muy apegada a la primera está el modo LP_{11a} el cual cuenta con un SNR muy similar al del modo LP_{11b} y por último el modo LP_{01} sería la menos adecuada para mandar información.

5.2 Publicaciones derivadas del trabajo de investigación

J. R. Warnes-Lora, I. E. Zaldívar-Huerta, J. Rodríguez-Asomoza, R. Amezcua-Correa, J. E. Antonio-López, A. García-Juárez, "Performance Evaluation of a Photonic Lantern by Transmitting Microwave Signals", *Photonics North 2018*, Montreal, Canadá, 5-7 jun, 2018

5.3 Trabajos a futuro

Debido a que siempre se está en búsqueda de aumentar la capacidad de transferencia de datos en telecomunicaciones ópticas en general, el explorar aún más el campo de aplicaciones del Photonic lantern es algo que se está

llevando a cabo en la actualidad. Como trabajos a futuro para este dispositivo pueden ser las siguientes:

- Completar el esquema SDM y aplicar la arquitectura de un filtro fotónico de microondas para obtener los filtros pasa banda a través del sistema completo.
- Utilizar un PL de más modos de propagación.
- Realizar las mediciones de BER (bit error rate) a la salida del sistema.