

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:
EFECTO DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA
MULTIMODO COMPENSADA SOBRE LA DISPERSIÓN MODAL**

**AUTOR:
DAVID ANDRÉS SUÁREZ MOLINA**

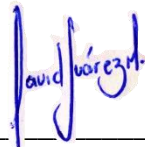
**TUTOR:
MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA**

Quito, agosto del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo DAVID ANDRÉS SUÁREZ MOLINA con documento/s de identificación N° 172224253-2, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: EFECTO DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA MULTIMODO COMPENSADA SOBRE LA DISPERSIÓN MODAL, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico con mención en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



David Andrés Suárez Molina
172224253-2

Fecha: Quito, agosto del 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, EFECTO DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA MULTIMODO COMPENSADA SOBRE LA DISPERSIÓN MODAL realizado por David Andrés Suárez Molina, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2021



Milton Napoleón Tipán Simbaña
171358312-6

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado, en primer lugar, a Dios por darme la perseverancia, conocimiento y su guía para hoy alcanzar esta tan anhelada meta. Hacerle saber que aún no es suficiente, que mi destino está mucho más arriba de lo actual y que espero me acompañe hasta el final. A mis padres, Liliana Molina Salazar y David Suárez Álvarez, por depositar su confianza en mí, creer en mí y, sobre todo, por su apoyo incondicional para hoy en día alcanzar mi título profesional. A mi hermana, que considero es mi compañera de vida, Angely Suárez Molina, por en ocasiones estar pendiente de que cumpla con mis obligaciones, de preguntarme si ya terminé mis deberes o si tan solo, ya comí. Porque créanme, son detalles que marcan la diferencia en cualquier estudiante. A todos mis amigos que la Universidad Politécnica Salesiana me permitió conocer, que el título, aunque mencione un solo estudiante, somos todos quienes queremos estar ahí y con trabajos grupales y desveladas eternas, hoy en día puedo decir que todos se encuentran en su etapa final al igual que mi persona. A mis docentes, por establecer un vínculo más allá de clases, por entender que tengo un apoyo en cualquier inquietud que tenga, por llenarnos la cabeza de conocimiento y que, al final del camino, no seremos su competencia, seremos colegas.

Gracias a todos, espero haber sido de ayuda si la vida me permitió cruzarme en su camino. Anhele no haber sido un alumno más, yo aspiro a mucho más y quiero dejar en claro que aquí no termina todo, se acaba una etapa, pero comienza otra. Siempre hay otra, hay nuevos retos que alcanzar, nuevos sueños que cumplir. Este logro ha sido y siempre será, por y para ustedes.

David Andrés Suárez Molina

EFECTO DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA MULTIMODO COMPENSADA SOBRE LA DISPERSIÓN MODAL

David A. Suárez¹, Milton N. Tipán²

Resumen

Este artículo reporta el efecto de las irregularidades del perfil del índice de refracción de una fibra multimodo según el modelo de Cambridge-81 sobre el retardo modal diferencial cuando se usa una compensación óptica mediante una fibra óptica de pocos modos, en un enlace de 400 m con longitudes de onda de operación de 850 nm y 1550 nm. Los resultados muestran que se forman tres grupos en cuanto al retardo modal diferencial, definidos por las irregularidades centrales, mientras que las irregularidades externas no afectan la compensación, aunque la longitud del filtro modal afecta de manera significativa a 1550 nm, consiguiendo un retardo máximo de 1.28 ns.

Palabras claves: MMF, FMF, Filtro Modal, Dispersión Modal, Retardo Modal Diferencial.

Abstract

This paper reports the effect of refractive index profile irregularities of a multimode fiber according to the Cambridge-81 model on the differential modal delay when using optical compensation using a few-mode optical fiber, on a 400 m link with operating wavelengths of 850 nm and 1550 nm. The results show that three groups are formed in terms of differential modal delay, defined by the central irregularities, while the outer irregularities do not affect the compensation, although the modal filter length affects significantly at 1550 nm, achieving a maximum delay of 1.28 ns.

Keywords: MMF, FMF, Modal Filter, Modal Dispersion, Differential Modal Delay.

¹ Estudiante de Ingeniería Electrónica (Mención en Telecomunicaciones) – Universidad Politécnica Salesiana Campus Sur.

² Docente la Universidad Politécnica Salesiana, miembro del grupo de investigación en electrónica telemática y control GIETEC, campus Sur.

I. INTRODUCCIÓN

El incremento de datos debido a la virtualización de servidores, la computación en la nube y sistemas en tiempo real hacen que los usuarios requieran redes a velocidades de 40 Gb/s, lo cual eventualmente ha incrementado la capacidad de las redes de comunicaciones, así como el almacenamiento de la información en grandes centros de datos [1]. Para esto, la fibra monomodo (Single Mode Fiber, SMF) está siendo usada en aplicaciones de largas distancias, gracias a su característica que permite la transmisión de un solo modo LP_{01} o también llamado modo fundamental [2].

Por otro lado, en redes de corto alcance se hace uso de fibra óptica multimodo (Multimode Fiber, MMF), debido a su elevada apertura numérica y al gran diámetro del núcleo, lo cual ofrece un acoplamiento eficaz tanto de fuentes de luz, como de empalmes y conectores existentes entre las fibras y equipos. Siendo excelente para redes de área local (Local Area Network, LAN) y de centro de datos por su gran capacidad de transmisión [3].

Sin embargo, uno de los problemas más apremiantes de la MMF es la dispersión modal que causa el retardo de los diferentes modos que se transmiten en la fibra, ocasionando que el pulso de salida de la fibra óptica se ensanche y produzca interferencia intersímbolo (intersymbol interference, ISI), de tal manera que su capacidad de transmisión disminuye con la distancia [4]. Por lo tanto, cualquier método eficaz para compensar esta dispersión es importante para mantener los niveles de errores bajos. Entre estas técnicas que minimizan el problema han sido propuestas los métodos eléctricos y los ópticos, los primeros usan filtros FIR en sistemas DSP y los segundos usan lentes o fibras compensadoras [5].

Con el propósito de compensar la fibra MMF se propone el uso de la fibra óptica de pocos modos (Few Mode Fiber, FMF), la cual tiene propiedades de atenuación similar a la SMF pero que puede transmitir varios modos al mismo tiempo permitiendo incrementar la capacidad del sistema [6]. Además, nos centramos en el estudio de las fibras dadas por el modelo de Cambridge-81, que se consideran representativas de todas las fibras MMF instaladas [7]. Finalmente, en este artículo, se investiga el efecto del índice de refracción de las fibras del modelo de Cambridge-81 compensadas mediante una fibra óptica de pocos modos de índice paso (Step Index Few Mode Fiber, SI-FMF) sobre la dispersión modal.

En la segunda parte, se presenta la configuración del sistema de simulación realizada en OptSim 5.4, así como el diseño de los perfiles de índice de refracción dados por el modelo de Cambridge realizados en Matlab R2018a.

En la tercera parte, se presentan los resultados de la simulación del retardo modal diferencial con y sin compensación para diferentes distancias y desplazamientos de lanzamiento para cada uno de los perfiles de índice de refracción.

Finalmente, se presentan las conclusiones producto de la investigación realizada, así como posibles trabajos futuros.

II. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

Creación de los perfiles de la MMF

El perfil del índice de refracción tiene un gran impacto en la transmisión de información por medio de una MMF, por esa razón se debe considerar los 4 posibles defectos de este que pueden aparecer al momento de su fabricación como el defecto de borde, defecto de centro, α interno y α externo, como se observa en la Fig. 1.

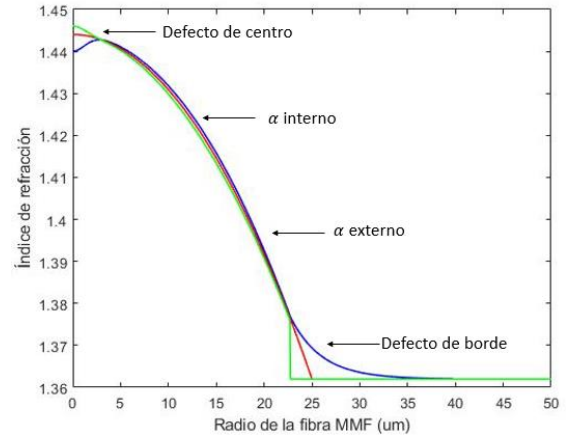


Fig. 1. Defectos del índice de refracción de la MMF.

Además, cada defecto tiene tres diferentes valores, así el defecto de centro que se modela como una forma Gaussiana con un ancho de $3 \mu\text{m}$ y amplitudes de $+0.002$ y $-0.004 \mu\text{m}$ para los defectos de punta y depresión respectivamente, como se observa en la tabla 1:

TABLA I
VALORES PARA CADA DEFECTO DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE MMF

Defecto	Valor	Fig. 1
Defecto de Borde	Repentino	Verde
	Ninguno	Rojo
	Exponencial	Azul
Defecto de Centro	Punta (+0.002)	Verde
	Ninguno	Rojo
	Depresión (-0.004)	Azul
Alpha interno y externo	1.89	Verde
	1.97	Rojo
	2.05	Azul

Por lo cual, se generó en Matlab®, los 81 posibles perfiles producto de las combinaciones de los cuatro defectos anteriores con los tres valores descritos y con los índices de refracción indicados en la tabla 2 [8], [9].

TABLA II
ÍNDICE DE REFRACCIÓN PARA DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA DE LA MMF

Índice de refracción	Longitud de onda de operación	
	850 nm	1550 nm
Núcleo	1.482	1.44402
Revestimiento	1.4525	1.3620

Configuración del sistema

Un transmisor basado en pulsos y lanzamiento restrictivo fue empleado para medir el retardo modal diferencial (Differential Mode Delay, DMD) basado en el estándar IEC60793-49:2018. De modo que, se disparó un pulso gaussiano de 50 ps de ancho con un desplazamiento de 1 μm entre cada disparo a lo largo de todo el radio de la MMF que posee un diámetro de 50 μm , a través de una longitud de 400 m que va a dar un total de 26 disparos; a su vez, se variaron los perfiles del índice de refracción según el modelo de Cambridge 81 a longitudes de onda de operación de 850 nm y 1550 nm.

Para observar el efecto que tiene un filtro modal basado en fibra óptica de pocos modos, se diseñó una fibra de dos modos (LP01 y LP11) con un perfil de índice de refracción paso como filtro modal. Entonces, se eligió la frecuencia normalizada $V=3.5$, según el diagrama b vs V de la constante de propagación normalizada que deja pasar los modos antes indicados [10], el n_{co} con un valor de 1.482 para 850 nm y 1.44402 para 1550 nm y su radio a de 7 μm , obteniéndose el valor del índice de refracción del revestimiento de $n_{cl} = 1.4805$ y $n_{cl} = 1.4387$ para una longitud de onda de 850 nm y 1550 nm respectivamente según la conocida Ecuación 1 [11].

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (1)$$

Siendo:

- V : frecuencia normalizada
- n_{co} : índice de refracción del núcleo
- n_{cl} : índice de refracción del borde
- a : radio de la fibra
- λ : longitud de onda de operación

Esta fibra de dos modos (Two Mode Fiber, TMF) fue colocada al final de la MMF, así como bloques de instrumento de medida como analizadores de tiempo, espectro de frecuencia y analizadores de modo. Esta configuración fue realizada en OptSim, como se indica la Fig. 2.

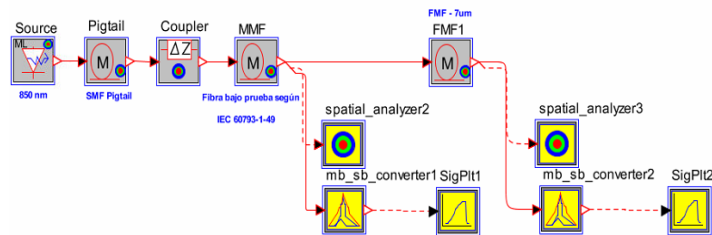


Fig. 2. Esquema de configuración del experimento.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sin Filtro Modal

En primer lugar, se obtuvo el DMD usando la herramienta propia de OptSim que permite ir generando el diagrama según los disparos del láser en cada desplazamiento del radio de la fibra MMF, este lanzamiento restrictivo fue hecho con desplazamientos de 1 μm , para cada una de los 81 perfiles del

modelo de Cambridge y para las dos longitudes de onda consideradas en el estudio, un ejemplo de estas es mostrado en la Fig. 3, para un perfil de la fibra con un α interno de 1.89, α externo de 2.05, un defecto de centro en punta y un defecto de borde repentino.

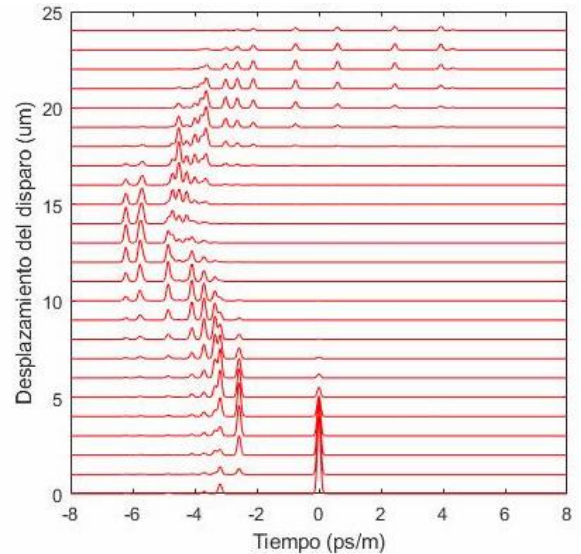


Fig. 3. DMD de la fibra #25 a 850 nm, sin filtro modal.

El DMD para esta fibra es considerable, reduciendo el producto distancia ancho de banda de la MMF y aumentando la tasa de errores (Bit Error Rate, BER), producto de los más de 100 modos transmitidos por la fibra. Luego, se midió el ancho del pulso y el ensanchamiento del retardo tomado como referencia el modo LP01 para cada uno de los lanzamientos, como se observa en la Fig. 4 para la misma fibra.

En esta fibra se observó que tanto el ancho del pulso y el ensanchamiento del retardo fueron cero, siendo estos los más bajos, similares y aproximadamente constantes entre 0 μm y 10 μm , siendo óptimo trabajar lo más próximo al centro para futuras correcciones. Este comportamiento fue observado para todos los perfiles del modelo de Cambridge y para la longitud de onda de operación de 1550 nm.

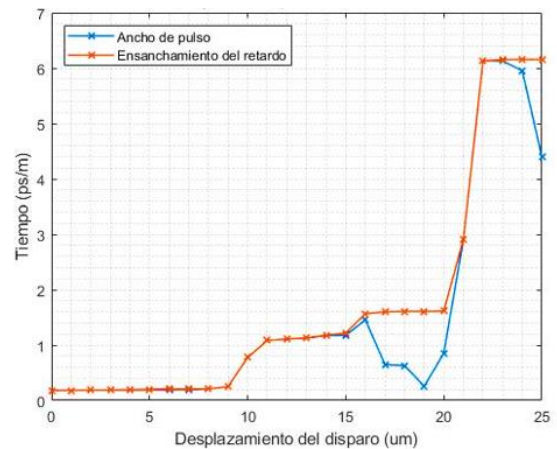


Fig. 4. Retardo y ancho del pulso vs disparo del láser para fibra #25 a 850 nm.

Con filtro modal

Con los resultados obtenidos respecto al ensanchamiento del retardo de la MMF, se procedió a colocar la FMF al final de la fibra óptica para compensarla, su efecto fue evaluado de igual forma, pero el lanzamiento fue restringido a $4 \mu\text{m}$, debido al comportamiento del DMD en la MMF, al radio de la FMF y al hecho de que el alineamiento entre los conectores y la fibra no es ideal. En la Fig. 5 (a), se observa el pulso obtenido a la salida de la fibra MMF #25 que posee un defecto de centro en punto y un defecto de borde abrupto o repentino, mientras que en la Fig. 5 (b) se observa el efecto del filtro modal, donde quedan eliminados aquellos retardos que no corresponden a los dos modos permitidos (LP01 y LP11) mejorando de manera significativa el DMD en este lanzamiento.

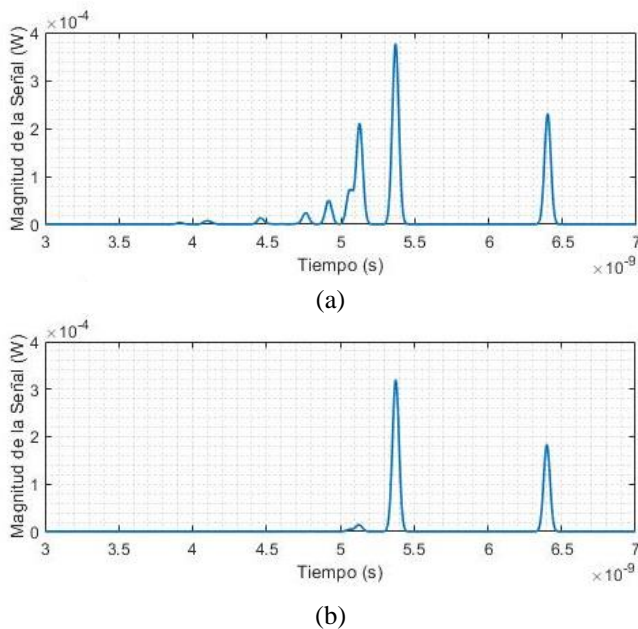


Fig. 5. Pulso para la fibra #25, a 850 nm, (a) salida de la MMF y (b) con longitud del filtro de 10 m.

Debido a que la longitud de una fibra compensadora incide en el DMD total, se varió la longitud de ésta y se eligió 10 m, 50 m y 100 m, ya que son valores adecuados comparados con la longitud de la MMF, permitiendo un rango adecuado de comparación. Obteniendo un retardo entre los modos LP01 y LP11 de máximo 1.03 ns en la longitud de onda de operación de 850 nm y 1.28 ns en la longitud de onda de operación de 1550 nm de todos los perfiles del índice de refracción del modelo de Cambridge como se muestra en la Fig. 6. De manera análoga, se observó un patrón de tres grupos a los que los denominamos como gA, gB y gC, con DMD similar y que se repiten 9 veces, cada una con tres perfiles de índice de refracción diferentes, estos coinciden con el defecto de centro que una fibra puede tener, así las fibras que pertenecen al gA tienen defecto de centro en punta, los del grupo gB tienen defecto de centro hundido y gC no poseen defecto de centro.

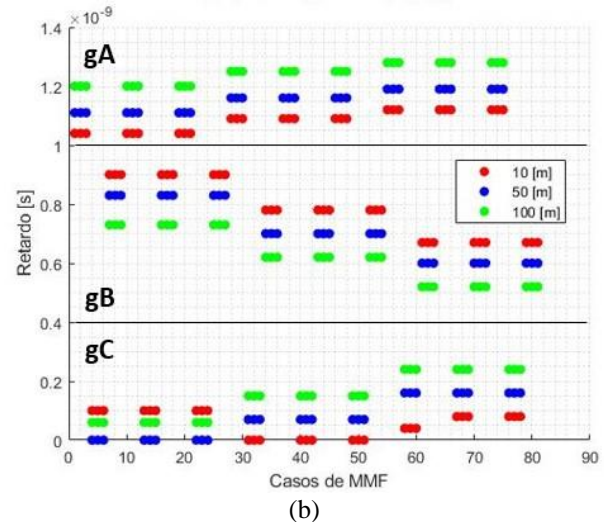
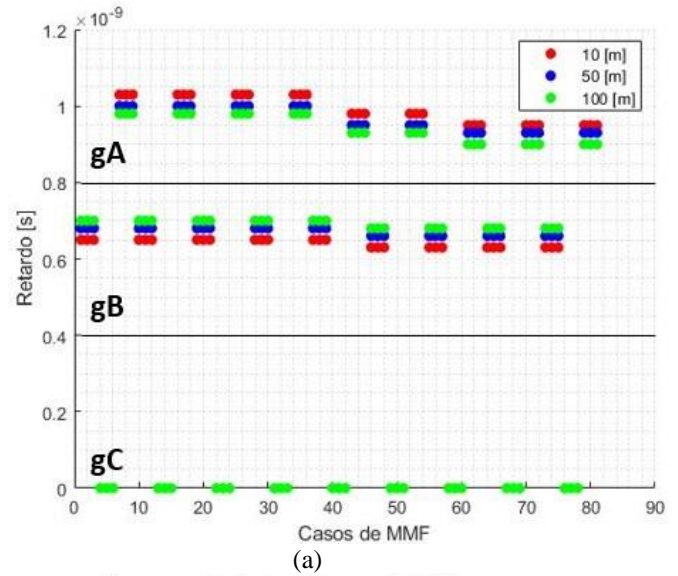


Fig. 6. DMD vs 81 perfiles de MMF para 850nm (a) y 1550nm (b) con filtro modal.

Para la Fig. 6 (a) que se trabajó con una longitud de onda de operación de 850 nm, el grupo gA es el que mayor retardo tiene de los tres grupos, teniendo una variación desde 1.03 ns en los primeros 40 perfiles de índice de refracción y de 0.95 ns en los restantes; el grupo gB tiene un retardo casi constante de aproximadamente 0.65 ns y gC no tiene retardo, logrando una compensación total para estos perfiles, esto último puede explicarse debido a que el perfil no tiene defecto central y por lo tanto es ideal, ya que los otros defectos del perfil no son relevantes por el diámetro del filtro modal.

En cuanto a la distancia del filtro modal, está es proporcional al retardo para el grupo gB, inversamente proporcional para el grupo gA y no tiene efecto en el grupo gC. Esto se debe a las distancias cortas del filtro modal y a que esta fibra está optimizada para 850 nm.

Mientras que, para la Fig. 6 (b) que corresponde al caso de 1550 nm, el grupo gA tiene mayor retardo con un valor

máximo que varía entre 1.28 ns para los 30 últimos perfiles del índice de refracción y de 1.2 ns para los 21 primeros perfiles. En el grupo gB el máximo retardo es de 0.9 ns para los perfiles del 7 a 27 hasta 0.67 ns para los últimos 21 perfiles, para una distancia de 10 m. Para el grupo gC se tiene el máximo retardo de 0.24 ns para los perfiles desde 58 hasta el 78 para una longitud de 100 m y un mínimo de 0.1 ns para los perfiles desde el 4 hasta el 24 para una longitud de 10 m.

En cuanto a la distancia, su comportamiento es contrario a los vistos para la longitud de onda de operación de 850 nm para los grupos gA y gB, sin embargo, hay una diferencia en cuanto al grupo gC ya que el retardo depende de la longitud y el tipo de perfil de la fibra MMF y solo se compensa idealmente para una distancia de 50 m para los primeros 30 perfiles, esto se observa en la Fig. 7. Desde el perfil #31, el retardo es menor si se trabaja con un filtro modal de longitud 10 m. Lo anterior se debe a que la fibra no está optimizada para trabajar a esta longitud de onda y por lo tanto su retardo es mayor.

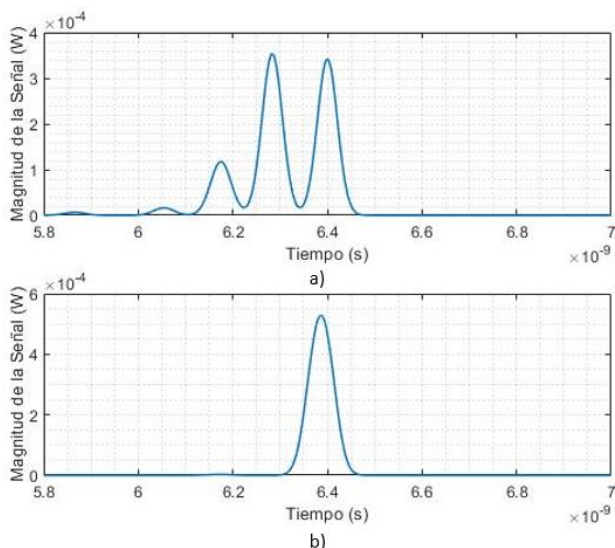


Fig. 7. Fibra #14, correspondiente al gC con una longitud de operación de 1550 nm, filtro compensador a 50 m.
a) Sin filtro modal. b) Con filtro modal

IV. CONCLUSIÓN

En esta investigación sobre el efecto del perfil del índice de refracción del modelo de Cambridge 81 sobre el retardo modal diferencial en una fibra MMF compensada con una fibra FMF de dos modos LP01 y LP11, se determinó que el filtro modal crea grupos definidos por tipo de irregularidad existente en el perfil del índice de refracción, logrando compensar exitosamente las fibras que no tienen irregularidades en el centro del núcleo de la fibra. Además, la longitud de filtro modal no influye en mayor medida a la 850 nm y tiene un efecto mayor a 1550 nm, siendo sus efectos contrarios en las fibras con irregularidades centrales del

índice de refracción, logrando un retardo máximo de 1.03 ns y 1.28 ns para 850 nm y 1550 nm respectivamente, siendo la longitud de 10 m óptima para compensar o trabajar en un filtro modal. En consecuencia, el uso de fibra de pocos modos permite compensar la dispersión de la fibra multimodo y a su vez incrementar la capacidad ya que se puede usar multiplexación por división de modo, para tal efecto se prevé estudios para fibras compensadoras de más modos.

REFERENCIAS

- [1] M. J. Li, "MMF for high data rate and short length applications," *Opt. Fiber Commun. Conf. OFC 2014*, no. March 2014, pp. 5–8, 2014, doi: 10.1364/ofc.2014.m3f.1.
- [2] M. J. Li and D. A. Nolan, "Optical transmission fiber design evolution," *J. Light. Technol.*, vol. 26, no. 9, pp. 1079–1092, 2008, doi: 10.1109/JLT.2008.922150.
- [3] V. S. C. Teichmann, A. N. Barreto, and D. A. A. Mello, "Analysis of multimode fiber impulse response simulation models," *SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. Proc.*, no. October, pp. 728–732, 2011, doi: 10.1109/IMOC.2011.6169376.
- [4] M. B. Shemirani, J. P. Wilde, and J. M. Kahn, "Adaptive compensation of multimode fiber dispersion by control of launched amplitude, phase, and polarization," *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 18, pp. 2627–2639, 2010, doi: 10.1109/JLT.2010.2058092.
- [5] T. Cseh and T. Berceci, "Efficient compensation methods for modal dispersion in radio over multimode fiber links," *2014 20th Int. Conf. Microwaves, Radar Wirel. Commun. MIKON 2014*, pp. 2–4, 2014, doi: 10.1109/MIKON.2014.6899953.
- [6] F. Yaman, N. Bai, B. Zhu, T. Wang, and G. Li, "Long distance transmission in few-mode fibers," *Opt. Express*, vol. 18, no. 12, p. 13250, 2010, doi: 10.1364/oe.18.013250.
- [7] R. D. Group and E. Boulevard, *OptSim Application Notes and Examples OptSim*. 2013.
- [8] H. Apriyanto *et al.*, "A multimode fiber refractive index sensor," *Proc. IEEE Sensors*, pp. 5–7, 2017, doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808490.
- [9] Y.-C. Lu, H. Wong, D. Tonietto, D.-J. Zang, S.-P. Zhai, and L. Li, "Full-vector multi-mode fiber modeling for short reach serdes links of 112Gbps and beyond," *Opt. Express*, vol. 24, no. 14, p. 16132, 2016, doi: 10.1364/oe.24.016132.
- [10] J. Arnaud and C. Froehly, "Pulse Propagation in Optical Fibers.," pp. 17–25, 1983, doi: 10.1007/978-94-009-6875-2_1.
- [11] D. Abadía and J. Fábrega, "Diseño e Implementación de un módulo para simular Fibras de pocos Modos," 2017.