



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**EFEECTO DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA  
MULTIMODO COMPENSADA SOBRE UNA SEÑAL OFDM**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
Título de Ingeniera Electrónica

AUTOR: Katerin Adriana Carrillo Lagla

TUTOR: Milton Napoleón Tipán Simbaña

Quito-Ecuador

2022

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Katerin Adriana Carrillo Lagla con documento de identificación N° 1003750419; manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 08 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Katerin Adriana Carrillo Lagla  
1003750419

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Katerin Adriana Carrillo Lagla con documento de identificación No. 1003750419, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Artículo Académico : “Efecto del perfil del índice de refracción de una fibra multimodo compensada sobre una señal OFDM”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Electrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Quito, 08 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Katerin Adriana Carrillo Lagla

1003750419

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Napoleón Tipán Simbaña con documento de identificación N° 1713583126, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EFECTO DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA MULTIMODO COMPENSADA SOBRE UNA SEÑAL OFDM, realizado por Katerin Adriana Carrillo Lagla con documento de identificación N° 1003750419, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 08 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña MSc.  
1713583126

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación está dedicado, en primer lugar, a mi madre Lelia Lagla quien ha sido siempre el motor que impulsa a cumplir mis sueños, pilar fundamental de mi vida, mi fuente de inspiración; gracias por su amor, paciencia, confianza y sobre todo su apoyo total para cumplir esta meta tan anhelada en mi vida profesional; sin su ayuda esto no hubiese sido posible, siempre he querido llenarla de orgullo y espero poder seguirlo haciendo.

A mi tutor el MSc. Milton Tipán Simbaña un agradecimiento muy especial y sincero por brindarme su tiempo, conocimiento, sabiduría, confianza y sobre todo paciencia para guiarme a lo largo de este proceso y ayudarme a culminar y cumplir este logro.

A mis amigos y compañeros que a lo largo de toda esta carrera universitaria forjamos una amistad maravillosa, llena de aventuras y nuevas experiencias, espero todos cumplamos nuestros sueños y metas y que esta amistad perdure infinitamente.

Katerin Adriana Carrillo Lagla



# EFEECTO DEL PERFIL DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA MULTIMODO COMPENSADA SOBRE UNA SEÑAL OFDM

## EFFECT OF THE REFRACTIVE INDEX PROFILE OF A COMPENSATED MULTIMODE FIBER ON AN OFDM SIGNAL

Katerin A. Carrillo <sup>1</sup>, Milton N. Tipán<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Electrónica (Mención en Telecomunicaciones) – Universidad Politécnica Salesiana Campus Sur, Quito, Ecuador

<sup>2</sup> Docente la Universidad Politécnica Salesiana, miembro del grupo de investigación en electrónica telemática y control GIETEC, campus Sur, Quito, Ecuador

kcarrillo1@est.ups.edu.ec  
mtipans@ups.edu.ec

**Resumen.** Los defectos de fabricación en el perfil del índice de refracción de una fibra óptica multimodo reduce significativamente su capacidad de transmisión incrementando el BER, más aún si se usan señales multiportadoras. En este artículo se presenta un análisis del efecto que tiene en conjunto el perfil de la fibra multimodo cuando es compensada mediante un filtro óptico de dos modos sobre una señal OFDM. Los resultados muestran un efecto favorable sobre la disminución del BER, aunque de manera errática.

**Palabras clave:** MMF, FMF, Filtro Modal, Índice de Refracción, OFDM

**Abstract.** Manufacturing defects in the refractive index profile of a multimode optical fiber significantly reduce its transmission capacity, increasing the BER, even more so if multicarrier signals are used. This article presents an analysis of the effect that the profile of the multimode fiber has when it is compensated by means of a two-mode optical filter on an OFDM signal. The results show a favorable effect on the decrease in BER, although in an erratic manner.

**Keywords:** MMF, FMF, Modal Filter, Refractive Index, OFDM.

### 1 Introducción

La demanda de altas velocidades de datos en las redes de área local (Local Area Network, LAN) está aumentando, lo que conlleva a explorar la transmisión de señales multiportadoras como la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) a través de fibra óptica, particularmente con

fibra multimodo (Multimode Fiber, MMF). De hecho, esta fibra se caracteriza por un núcleo de gran diámetro que garantiza una fácil instalación y bajo coste. MMF se considera un medio eficaz ya que permite una transmisión superior a 10 GB/s. Desafortunadamente, la fibra multimodo presenta una dispersión intermodal que puede afectar drásticamente el rendimiento del sistema. Para combatir esta desventaja, se ha implementado técnicas eléctricas y ópticas, así como receptores especiales, filtros ópticos y filtros eléctricos [1].

Las fibras multimodo están hechas de un solo núcleo de diámetro suficientemente grande para soportar más de un modo espacial. El número de modos espaciales guiados en un MMF crece rápidamente con el diámetro del núcleo y puede llegar a cientos para un MMF ideal. Los modos espaciales se superponen espacialmente y la transmisión se puede realizar utilizando multiplexación espacial y demultiplexación de cada modo individual utilizando filtros espaciales o modales [2].

Últimamente, ha existido un gran interés en las técnicas de transmisión de fibra multimodo de alta velocidad. Sin embargo, debido al retardo modal diferencial (Differential Mode Delay, DMD) inherente a MMF, es difícil aumentar la velocidad de transmisión del enlace MMF incluso a 10 Gb/s. Para resolver este problema, se han realizado muchos intentos para minimizar el número de modos excitados y consecuentemente el DMD, uno de ellos es optimizar la condición de lanzamiento en el sistema de transmisión MMF logrando velocidades más altas [3].

Por lo tanto, el objetivo de los fabricantes de fibras es obtener un perfil de índice de refracción lo más cercano posible al perfil de índice parabólico que en teoría es el ideal, el cual proporciona mayor ancho de banda. No obstante, varios defectos del perfil de índice de refracción de la fibra debido a su fabricación como defectos centrales (puntas y caídas), desviación del parámetro de ley de potencia  $\alpha$ , defectos de la interfaz del núcleo / revestimiento, protuberancias, entre otros. Estos defectos pueden reducir significativamente el ancho de banda y por lo tanto degradar su rendimiento. El enfoque del modelo de Cambridge considera un conjunto de 81 defectos de índice de refracción de la MMF, los cuales son representativos de la base de fibras multimodo instaladas [4].

En este artículo se estudia el efecto que tendrá el filtro modal cuando sea usado para compensar el DMD sobre la señal OFDM para los diferentes perfiles de índice de refracción, esto permitirá obtener puntos de trabajo apropiado de la red óptica para su mejor desempeño.

El resto del artículo se presenta de la siguiente manera. En la segunda sección, se enfoca en la arquitectura y configuración del sistema mediante la co-simulación del software Matlab R2012b y el software de simulación de sistemas ópticos OptSim 5.4.1, así como se describe el diseño de los perfiles de índice de refracción dados por el modelo de Cambridge-81. La tercera sección, contiene los resultados de las simulaciones realizadas con cada uno de los 81 perfiles sobre la señal OFDM con y sin compensación para diferentes distancias y con una longitud de onda de 850 nm. Finalmente, en la cuarta sección, se presentan las principales conclusiones derivadas de la investigación realizada, así como recomendaciones para posibles trabajos futuros.

## 2 Diseño y configuración del sistema

### 2.1 Señal OFDM

Una señal OFDM fue generada con 24528 bits que fueron transmitidos y codificados mediante 4-QAM, la señal OFDM fue implementada usando una transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) de 256 puntos, generada de manera hermítica, sin prefijo cíclico, con 128 bits pseudoaleatorios con PRBS de polinomio generador  $x^7 + x^6 + 1$  para sincronización y un ancho de banda de 3 GHz. La señal en tiempo y frecuencia es mostrada en la Fig. 1.

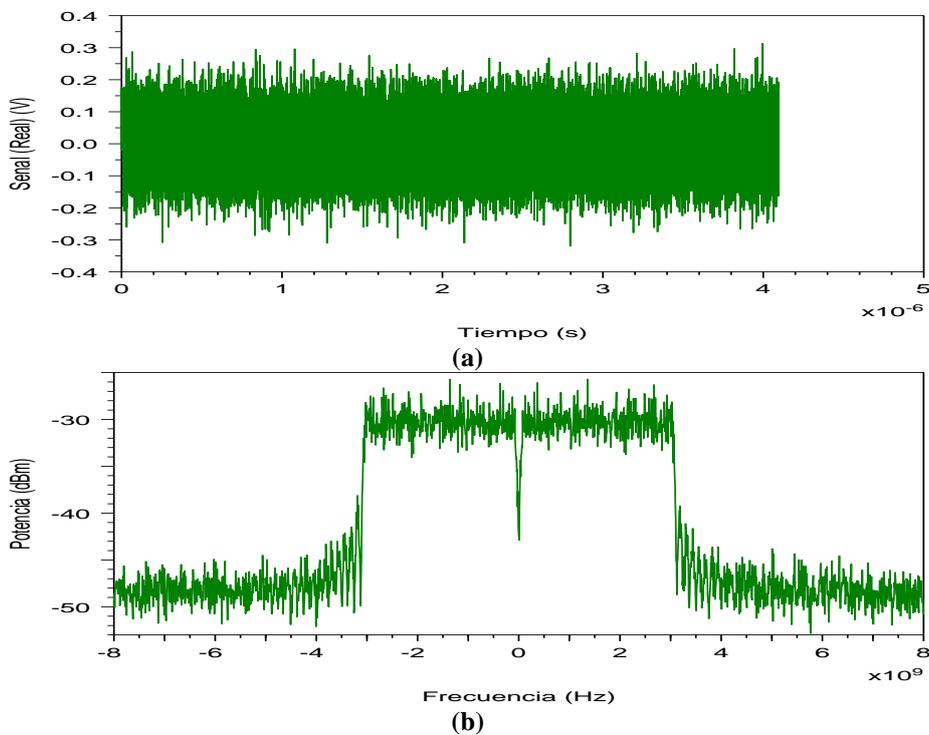


Fig. 1. Señal OFDM (a) en tiempo (b) Espectro

### 2.2 Modelo Cambridge 81

El enfoque del modelo de Cambridge es considerar un conjunto de defectos de índice de refracción de perfil de la fibra óptica multimodo predeterminados que se cree que son representativos de la base instalada de fibras de grado (Fiber Distributed Data Interface, FDDI) multimodo y calcular las características de la fibra para esos diferentes perfiles de índice distorsionados [4].

El modelo estadístico de Cambridge-81 fue implementado mediante la herramienta de Matlab, de lo cual para el diseño de los 81 perfiles se consideraron cuatro posibles

defectos de fabricación estos son: defectos centrales (puntas y caídas), desviación del parámetro de ley de potencia  $\alpha$  ( $\alpha$  interno y  $\alpha$  externo) y defectos de borde. La Fig. 2. muestra el perfil del índice con estas diferentes distorsiones.

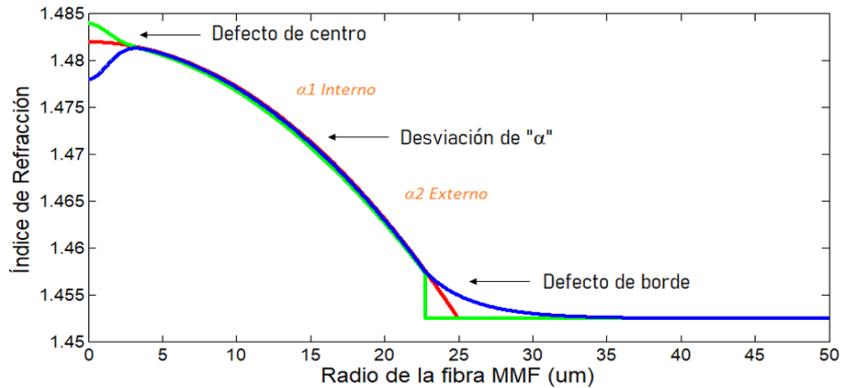


Fig. 2. . Índice de refracción - Defectos de fibra.

Todas las combinaciones posibles de estos 4 defectos con 3 valores diferentes para cada uno da como resultado  $3^4 = 81$  perfiles de índice de fibra [4].

### 2.3 Filtro Modal FMF

El tener pocos modos propagándose en la fibra óptica permite tener un mejor desempeño en la transmisión, así la FMF tiene pocos modos guiados bien definidos entre 2 y 12, en la Fig. 3. se presenta el esquema de una fibra óptica en la cual se propagan dos modos, en la Fig. se representa el modo fundamental LP01 (a) y el modo degenerado LP11 (b) [5].

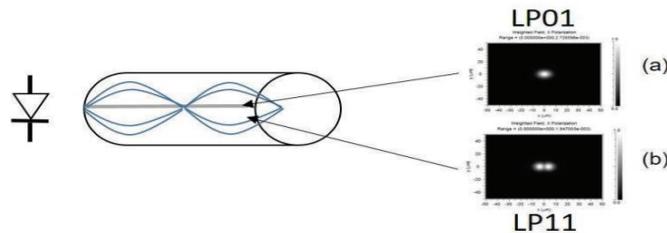


Fig. 3. Propagación de dos modos (a) LP01 (b) LP11 [5].

Para observar el efecto que tiene un filtro modal basado en fibra óptica de pocos modos, se diseñó una fibra de dos modos (Two Mode Fiber, TMF) de índice paso, cuyas soluciones matemáticas son los modos LP01 y LP11 al aplicar las ecuaciones de Maxwell. Para ello se eligió una frecuencia normalizada  $V = 3.5$ , valor que permite propagar solo estos dos modos por la FMF a la longitud de onda  $\lambda = 850nm$ ; el radio y el índice de refracción del núcleo elegidos fueron  $a=7\mu m$ ,  $n_{co}=1.482$  respectivamente.

Entonces, basados en la ecuación 1 y 2 los valores del índice de refracción del revestimiento y la diferencia normalizada fueron obtenidos obteniéndose  $n_{cl}=1.4805$   $\Delta=0.1012\%$ .

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

$$\Delta = \frac{n_{co} - n_{cl}}{n_{co}} \times 100 \quad (2)$$

Siendo:

$V$ : Frecuencia normalizada

$n_{co}$ : Índice de refracción del núcleo

$n_{cl}$ : Índice de refracción del borde

$a$ : Radio de la fibra

$\lambda$ : Longitud de onda de operación

$\Delta$ : Diferencia normalizada de índices de refracción

Con esto parámetros de diseño se procedió a generar los 81 posibles perfiles de índices de refracción.

## 2.4 Configuración de la simulación

El esquema de transmisión del sistema se implementó en co-simulación entre el software Matlab y el software Optsim RSoft, el cual fue configurado en base a las especificaciones proporcionadas en el estándar IEEE 802.3ae. Para este diseño se consideró un enlace 10GBASE-SR con una Fuente láser de longitud de onda corta a 850 nm, una MMF de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro de núcleo y 500 MHz.km de ancho de banda [6].

El esquema consta de tres bloques que son: transmisor (Tx), receptor (Rx) y Canal Óptico, como se muestra en la Fig. 4. El primero, está conformado por un generador de secuencias binarias pseudo-aleatorias (Pseudo Binary Random Sequence, PBRS), después se conecta un generador de señal eléctrica y luego se conecta a un módulo de Matlab el cual genera la señal OFDM. El segundo, tiene el canal óptico el cual consta de dos módulos que son: la MMF y el filtro modal FMF, además se incluye acopladores que simulan las conexiones.

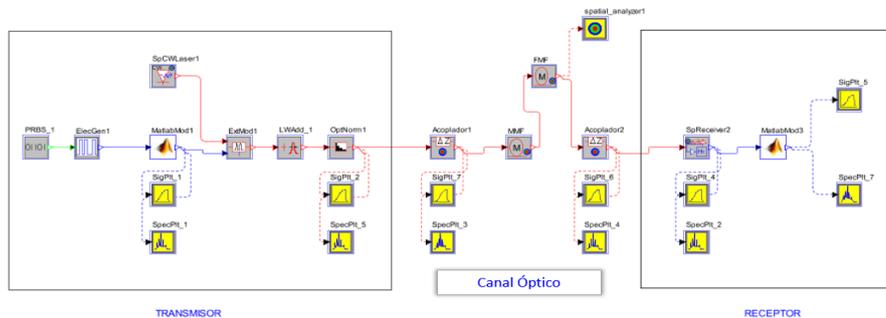


Fig. 4. Esquema de configuración del sistema.

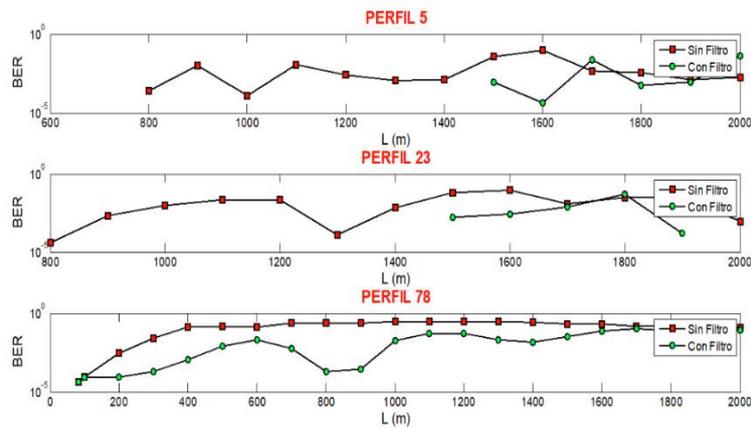
El tercero, está formado por un módulo receptor y un módulo Matlab en el cual mediante un script se ecualiza y demodula la señal OFDM, además permite calcular los errores por conteo (Bit Error Rate, BER).

Adicionalmente, en todo el sistema se añaden bloques de instrumentos de medida como analizadores de tiempo y espectro de frecuencia, para evaluar el estado de la señal transmitida.

### 3 Resultados y discusión

#### 3.1 Sistema con y sin filtro modal para el modelo Cambridge 81

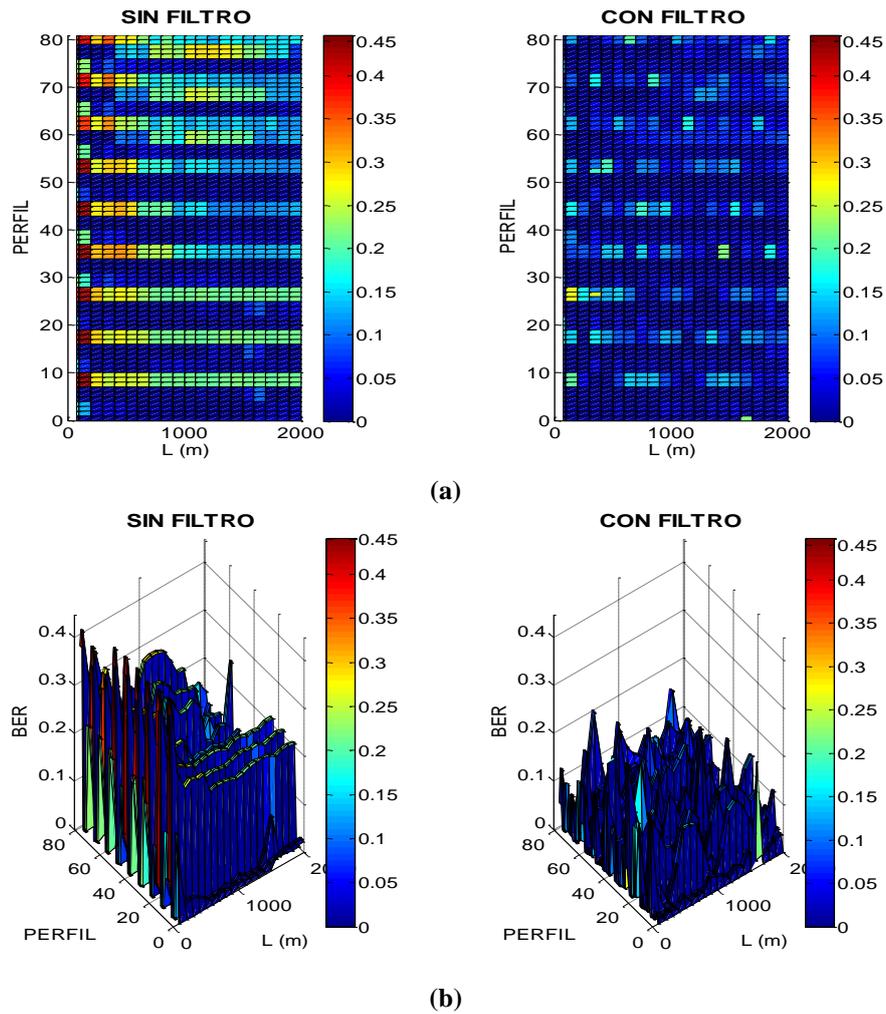
Para determinar el comportamiento que tiene el filtro FMF sobre la transmisión de la señal OFDM, se simuló el sistema con y sin filtro para los 81 perfiles generados del modelo de Cambridge, para distancias de enlace desde 82 m a 2000 m y con una longitud de onda de 850 nm. En la Fig. 5. se muestran los resultados de la simulación de 3 perfiles el 5, 23 y 7, considerados los que más impacto tuvieron en la variación del BER y donde se puede destacar el funcionamiento del filtro, el BER se reduce a ciertas distancias en mayor o menor grado, obteniéndose hasta en algunos perfiles hasta 0 errores como en el perfil 23 para distancias menores a 1500 m.



**Fig. 5.** BER vs L para los perfiles 5, 23 y 78

De lo anterior, se advierte que se tiene un sistema que varía de forma estadística por lo que se generan mapas de calor para apreciar mejor el comportamiento del mismo. La Fig. 6a. muestra el comportamiento del BER para los distintos perfiles y distintas distancias, se aprecia que a medida que incrementa la distancia el filtro actúa de mejor manera ya que existen menos errores lo que se evidencia con el color azul. Incluso a distancias menores a 100 m se observa una mejora considerable pasando de un BER alto (color rojo) a un BER bajo (color azul). Sin embargo, se observa que para ciertos

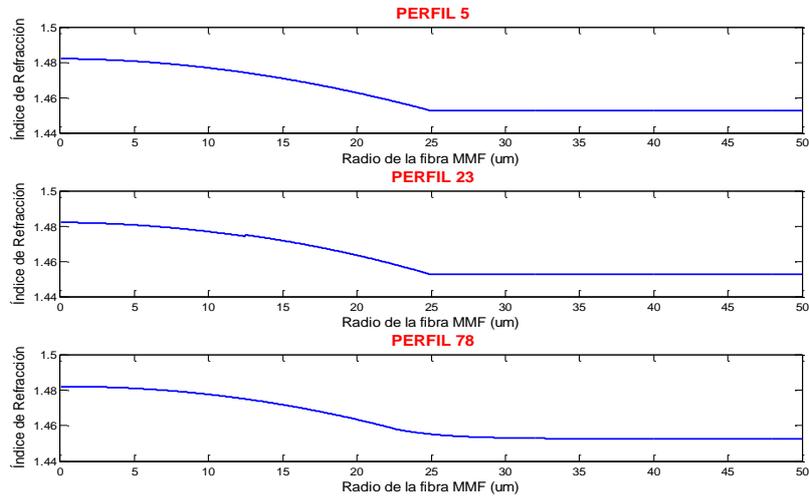
perfiles como el 50 el filtro no tiene efecto significativo, por lo que se requiere una prueba más adecuada para indicar si el filtro tiene efecto sobre la señal OFDM, más aún cuando en la Fig. 6b. se aprecia una reducción significativa del BER, pero de manera errática. La naturaleza estocástica de propagación de la fibra MMF y FMF y el intercambio de energía de los modos a ciertas distancias y en los acoplamientos hace que exista mucha variabilidad en el valor del BER.



**Fig. 6.** Caracterización del BER para los 81 perfiles de índice de refracción: (a) mapa de calor 2D, (b) distribución 3D.

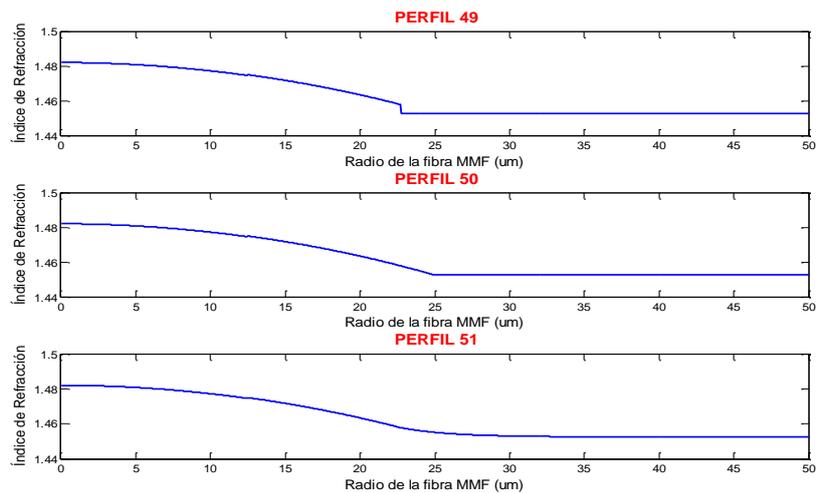
En la Fig. 7. Se observan los perfiles para la MMF del modelo de Cambridge, los cuales son representativos para el análisis de la variabilidad del BER, esto explica por

qué tienen pequeños defectos centrales y una ligera variación en el parámetro de curvatura  $\alpha$ .



**Fig. 7.** Perfiles 5, 23 y 78 del índice de refracción de la MMF

Por otro lado, se puede apreciar que para algunos perfiles como 49, 50 y 51, en todas las distancias establecidas con y sin filtro se tiene un BER cercano a cero, lo cual indica que para estos perfiles el efecto es mínimo o no hay efecto en la compensación modal, en la Fig. 8. se muestran los perfiles de índice de refracción de la MMF. Este comportamiento se da, ya que estos perfiles no tienen defectos centrales de fabricación que es donde se conecta la fibra óptica MMF y el filtro FMF.



**Fig. 8.** Perfiles para los cuales se tiene un efecto del filtro mínimo

### 3.2 Efecto del filtro sobre la señal OFDM para el modelo Cambridge 81

Debido a la variabilidad del BER, se procedió a realizar una prueba T de Student para determinar si el efecto del filtro es significativo. Para lo cual se determinó una distancia de 1100 m en la que el BER varia significativamente para los 81 perfiles, planteando las siguientes hipótesis para la prueba:

- $H_0: \mu_{BER} \leq 0$
- $H_1: \mu_{BER} > 0$

Donde  $H_0$  es la hipótesis nula,  $H_1$  es la hipótesis alternativa y  $\mu_{BER}$  es el promedio de las diferencias del BER con y sin filtro.

La prueba se realizó en Excel mediante la herramienta análisis de datos, cuyos resultados se muestran en la Tabla 1, donde el estadístico de prueba t es 6.395 es mayor que el valor crítico 1.663 para una cola, por lo que se descarta la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, la Fig. 9. muestra gráficamente el resultado de la prueba.

**Tabla 1.** Prueba T para 81 perfiles de Cambridge a una distancia de 1100m

	<i>Sin Filtro</i>	<i>Con Filtro</i>
Media	0,09264076	0,0354766
Varianza	0,00918289	0,0014619
Observaciones	82	82
Coefficiente de correlación de Pearson	0,55863044	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	81	
Estadístico t	6,39543588	
$P(T \leq t)$ una cola	4,8184E-09	
Valor crítico de t (una cola)	1,66388391	
$P(T \leq t)$ dos colas	9,6368E-09	
Valor crítico de t (dos colas)	1,98968632	



**Fig. 9.** Representación de la prueba T

Según los resultados de la Tabla 1, al realizar la prueba T se determinó que existe una diferencia significativa en las medidas tomadas del BER con y sin el filtro. Lo que implica, que hay suficiente evidencia estadística para afirmar que, al aplicar el filtro, este actúa de manera positiva al reducir significativamente el BER de la señal OFDM en el enlace de fibra multimodo.

## 4 Conclusiones

Se ha analizado el efecto del perfil del índice de refracción de una MMF compensada mediante un filtro modal de índice paso, realizado con un FMF de dos modos, donde se ha observado un comportamiento errático en la reducción del BER de la señal OFDM, aunque en ciertos perfiles que no tienen defectos de fabricación central está disminución es pequeña o nula. Por lo anterior, una prueba T Student ha sido realizada obteniéndose suficiente evidencia estadística para afirmar que el perfil del índice de refracción de la MMF en conjunto con el del filtro modal desempeña una mejora significativa en el enlace óptico en sistemas multiportadoras. Un análisis del efecto del perfil del filtro modal podría mejorar aún más el desempeño del sistema.

## Referencias

- [1] M. Kasmi, M. Sofien, F. Bahloul y I. Dayoub, «Performances of an Optical OFDM-DMT System over Multimode Optical Fiber,» pp. 2161-2164, 2018.
- [2] R. J. Essiambre y R. W. Tkach, «Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks,» 2012.
- [3] D. H. Sim, Y. Takushima y Y. C. Chung, «High-Speed MMF Transmission by using Mode-Field Matched Center-Launching Technique,» 2009.
- [4] G. R y B. E, «OptSim Application Notes and Examples OptSim,» *Optical Solutions Group 400 Executive Boulevard, Suite 100 Ossining, NY 10562*, vol. 2, n° 9149232169, pp. 561-572, 2013.
- [5] M. Tipán, Estudio comparativo del desempeño OFDM-MIMO y FOFDM-MIMO en fibra óptica de pocos modos con bajo DMGD, 2016.
- [6] Optical Solutions Group, OptSim Application Notes and Examples, 2013, pp. 402 - 406.
- [7] D. Abadía y J. Fábrega, «Diseño e Implementación de un módulo para simular Fibras de pocos Modos,» 2017.
- [8] B. L. Campos, J. Géne y D. Artigas, Investigación sobre spatial-division multiplexing (SDM) en comunicaciones por fibra óptica, 2016.