UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL PAPR MEDIANTE LA TÉCNICA DE ENVOLVENTE CONSTANTE PARA LA SEÑAL MULTIPORTADORA OFDM-IM EN REDES DE ACCSO PON

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Telecomunicaciones

AUTOR: Dennis Mauricio Lema Madril.

TUTOR: Milton Napoleón Tipán Simbaña.

Quito-Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Dennis Mauricio Lema Madril con documento de identificación N° 1751777465; manifiesto que:

Soy el autor 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, 10 de febrero del año 2025

Atentamente,

Dennis Mauricio Lema Madril
1751777465

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

Yo, Dennis Mauricio Lema Madril con documento de identificación N° 1751777465, 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 autor del Artículo Académico: "Evaluación de la reducción del PAPR mediante la técnica de envolvente constante para la señal multiportadora OFDM-IM en redes de acceso PON", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, 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, 10 de febrero del año 2025

Atentamente,

Dennis Mauricio Lema Madril
1751777465

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: EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL PAPR MEDIANTE LA TÉCNICA DE ENVOLVENTE CONSTANTE PARA LA SEÑAL MULTIPORTADORA OFDM-IM EN REDES DE ACCESO PON, realizado por Dennis Mauricio Lema Madril con documento de identificación N° 1751777465 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, 10 de febrero del año 2025

Atentamente,

Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña MSc.
1713583126

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a Dios por haberme brindado esa fuerza, sabiduría y perseverancia en este camino académico por fortalecer mi corazón, e iluminar mi mente y por brindarme la paz y el consuelo en los momentos más difíciles.

A mis padres Rodrigo Lema y Gladys Maricela por su esfuerzo y dedicación, por los innumerables sacrificios que han hecho para que pudiera alcanzar mis metas, su fe en mis capacidades me han dado la confianza necesaria para superar cada obstáculo y alcanzar este logro tan importante, este trabajo es el reflejo de su amor y dedicación, sin ustedes nada de esto hubiera sido posible.

A mi hermano Johnny Lema, gracias por tu constante apoyo, por estar siempre a mi lado en cada paso de este camino, tu amor y compañía han sido fundamentales para llegar hasta aquí, te quiero mucho.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi tutor, cuya guía y paciencia fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Su dedicación y compromiso no solo me ayudaron a superar cada obstáculo, sino que también me enseñaron el verdadero significado de la perseverancia y el aprendizaje. Su calidad humana y profesional dejaron una huella imborrable en mi formación.

A los Ingenieros, quienes con sus conocimientos, exigencia y vocación hicieron de cada semestre un reto apasionante. Gracias a ustedes descubrí mi pasión por las Telecomunicaciones y comprendí el impacto de esta profesión en el mundo. Más que maestros, ustedes han sido inspiración y un ejemplo de vida a seguir.

A mis amigos y compañeros de este camino universitario, gracias por cada momento compartido, por las risas, el apoyo incondicional y las experiencias que quedarán para siempre en mi corazón. Juntos enfrentamos retos, celebramos logros y construimos recuerdos inolvidables. Hoy al mirar atrás, sé que cada esfuerzo valió la pena, y me llena de orgullo saber que ahora iniciamos una nueva etapa como ingenieros.

EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL PAPR MEDIANTE LA TÉCNICA DE ENVOLVENTE CONSTANTE PARA LA SEÑAL MULTIPORTADORA OFDM-IM EN REDES DE ACCESO PON

EVALUATION OF PAPR REDUCTION USING CONSTANT ENVELOPE TECHNIQUE FOR OFDM-IM MULTICARRIER SIGNAL IN PON ACCESS NETWORKS

Dennis Lema, Milton N. Tipán[3]

Resumen

En este artículo se llevó a cabo la implementación de un transmisor y receptor OFDM-IM en una red PON, aplicando la técnica de envolvente constante para reducir el PAPR, mediante modulación de fase. Los resultados muestran que la señal presenta robustez ante la dispersión cromática y las nolinealidades de la fibra óptica, estos deben alcanzar los valores de $\beta = -21.27 \times 10^{-27} s^2/m$ y $\gamma = 1.21 \times 10^{-4} W^{-1} m^{-1}$ respectivamente, para obtener una transmisión libre de errores.

Palabras clave: OFDM-IM, PAPR, PON, PM.

Abstract

In this paper, the implementation of an OFDM-IM transmitter and receiver in a PON network, applying the constant envelope technique to reduce the PAPR, by means of phase modulation. The results show a high sensitivity to chromatic dispersion and nolinearities of the optical fiber, these must reach the values of $\beta = -21.27 \times 10^{-27} s^2/m$ y $\gamma = 1.21 \times 10^{-4} W^{-1} m^{-1}$ respectively, to obtain an error-free transmission.

Keywords: OFDM-IM, PAPR, PON PM,

[1]Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: dlemam2@est.ups.edu.ec
[2]Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mtipans@ups.edu.ec

1. Introducción

En la actualidad, las redes de comunicaciones enfrentan una creciente demanda de capacidad, velocidad y eficiencia energética, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas como las redes de sexta generación (6G). Estas redes prometen velocidades de transmisión de datos del orden de terabits por segundo, latencia ultra baja y una conectividad masiva para satisfacer las necesidades de la era digital. Sin embargo, las redes 6G también presentan retos técnicos y operativos significativos, especialmente en lo que respecta a la transmisión de señales de alta eficiencia en términos de potencia y espectro. Uno de los principales desafíos es la relación de potencia de pico a promedio (Peak-to Average Power Ratio, PAPR), que afecta directamente la eficiencia energética y la calidad de las señales en sistemas con Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) [1] [2].

El problema del PAPR es especialmente relevante en las redes de acceso óptico pasivo (Passive Optical Network, PON), que constituyen una infraestructura clave para la implementación de 6G. En estas redes, la transmisión de señales ópticas requiere un manejo eficiente de la potencia para garantizar la estabilidad del sistema y minimizar distorsiones en el láser transmisor. Las fluctuaciones de potencia causadas por un PAPR elevado pueden degradar significativamente el desempeño de la red, aumentando la interferencia, la distorsión no lineal y el consumo energético. Por lo tanto, es crucial desarrollar técnicas avanzadas para la reducción del PAPR que permitan superar estas limitaciones [3].

Una de las modulaciones multiportadoras propuesta para 6G es la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal con Modulación de Índice (Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation, ODFM-IM) la cual combina la modulación OFDM convencional con un esquema de indexación de portadoras, permitiendo la transmisión de información tanto en los símbolos modulados como en la selección de portadoras activas. Este enfoque no solo reduce el PAPR, sino que también mejora la eficiencia espectral y la robustez frente a interferencias. Sin embargo, esta también sufre de PAPR, por lo que varias técnicas son propuestas por la comunidad de investigadores para su reducción.

La técnica de envolvente constante (Constan Envelope, CE), es una de las propuestas para reducir el PAPR que puede ser implementada mediante una modulación de fase (Phase Modulation, PM) o de frecuencia (Frequency Modulation, FM). En la Multiplexación por División en Frecuencia Ortogonal con Modulación de Fase e Índice (Phase Modulated Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation, PM-OFDM-IM) se aprovecha la indexación de portadoras y la modulación de fase para garantizar que la magnitud de la señal transmitida permanezca constante, minimizando así las fluctuaciones de potencia y maximizando la eficiencia del sistema. Ambas técnicas se integran de manera eficiente en redes PON al minimizar las fluctuaciones de potencia óptica y mejorar la tolerancia a las distorsiones no lineales del canal óptico [4], [5].

La implementación de OFDM-IM y PM-OFDM-IM en redes PON presenta múltiples beneficios, no solo optimizan el desempeño del sistema en términos de PAPR, sino que también permiten una mejor integración con arquitecturas avanzadas como las redes ópticas pasivas de nueva generación versión 2 (Next-Generation Passive Optical Network 2, NG-PON2), fundamentales para el despliegue de 6G. Además, al garantizar una transmisión más estable y eficiente, estas técnicas facilitan la coexistencia de múltiples servicios y usuarios en una misma infraestructura de red, aumentando la densidad de conexiones y reduciendo el costo por usuario, por lo cual a comparación entre OFDM-IM y PM-OFDM-IM en términos de reducción del PAPR, eficiencia espectral y desempeño en redes PON resulta esencial para identificar la mejor opción en diferentes escenarios de implementación [6], [7], [8].

En este artículo se evalua la aplicación de la técnica de modulación en fase en señales multiportadoras OFDM-IM como método para reducir el PAPR en una red PON. El contenido se organiza de la siguiente manera: en la sección 2, se exponen los fundamentos teóricos de PAPR, OFDM-IM y PM. La sección 3, describe la configuración utilizada para las simulaciones y experimentación, mientras que en la sección 4, se presentan los resultados obtenidos y su respectivo análisis. Por último, la sección 5, incluye las conclusiones finales.

2. Revisión teórica

2.1. PAPR

La PAPR es un parámetro crítico en sistemas de comunicaciones multicarrier, como OFDM. Se define como la relación entre la potencia máxima instantánea de una señal y su potencia promedio. Matemáticamente la PAPR puede expresarse como se muestra en la ecuación (1).

$$PAPR = \frac{\max |x(t)|^2}{E|x(t)|^2} \tag{1}$$

Donde $|x(t)|$, es la señal transmitida, $\max|\cdot|$ es la operación máxima y $E|\cdot|$ representa la esperanza matemática [9].

En sistemas OFDM, la señal generada es la suma de múltiples subportadoras moduladas, lo que provoca que las amplitudes instantáneas varíen significativamente debido a la superposición constructiva o de-

structiva de las ondas portadoras. Estas fluctuaciones generan un alto PAPR, lo que resulta problemático para los amplificadores de potencia, ya que pueden operar fuera de su rango lineal, generando distorsión y degradación de la calidad de la señal transmitida [10].

Un PAPR elevado no solo afecta la eficiencia de los amplificadores de potencia, sino que también incrementa los requisitos de rango dinámico de los conversores analógico-digitales y digital-analógicos. Esto, a su vez, eleva el costo y la complejidad de los equipos. En redes de acceso PON un alto PAPR puede afectar el rendimiento de los transmisores ópticos al provocar fluctuaciones en la intensidad de la luz emitida, reduciendo la calidad del enlace óptico [11].

2.2. OFDM-IM

Es una técnica innovadora que introduce un grado adicional de codificación mediante la selección de subportadoras activas. En este esquema, en lugar de transmitir datos en todas las subportadoras disponibles solo un subconjunto de ellas está activo en cada símbolo, mientras que la selección de las subportadoras activas codifica información adicional. Este enfoque permite una mayor flexibilidad en el diseño del sistema y ayuda a reducir significativamente el PAPR [12].

La cantidad de información transmitida en OFDM-IM se divide en dos partes: los bits de datos transmitidos en las subportadoras activas y los bits adicionales que codifican la selección de estas subportadoras. El número de combinaciones posibles de selección se calcula utilizando el coeficiente binomial, ecuación (2).

$$\binom{N}{k} = \frac{N!}{k!(N-k)!} \tag{2}$$

Donde N es el número de subportadoras y k es número de subportadoras activas [13].

Es una técnica avanzada de comunicación multicarrier que mejora la eficiencia espectral y energética en comparación con el OFDM convencional. En OFDM-IM, las subportadoras disponibles se dividen en grupos y solo un subconjunto de subportadoras activas transmite datos, mientras que las combinaciones posibles de subportadoras activas se utilizan para codificar información adicional. Las subportadoras activas se modulan digitalmente, y la señal resultante se procesa mediante IFFT y la adición de un prefijo cíclico. En el receptor, se identifica el patrón de subportadoras activas y se decodifica tanto la información indexada como los datos transmitidos [14].

2.3. Modulación de fase

Es una técnica de modulación de envolvente constante en la que la información se codifica en la fase de la portadora, mientras que su amplitud se mantiene constante. En la ecuación (3) se muestra la expresión matemática de la señal modulada.

$$x(t) = A \cdot \cos(2\pi f_c t + \beta \cdot s(t)) \tag{3}$$

Donde, A es la amplitud de la portadora, f_c es la frecuencia, β es el índice de modulación y $s(t)$ la fase modulada. La modulación de fase continua asegura que las transiciones de fase sean suaves, lo que reduce las emisiones fuera de banda y mejora la eficiencia espectral [15].

Una combinación interesante es PM-OFDM-IM, que integra la modulación de fase con OFDM-IM, logrando una señal de envolvente constante y reduciendo el PAPR. Este esquema es particularmente útil para sistemas de próxima generación, como las redes 6G implementadas en infraestructura PON, donde se priorizan la estabilidad del enlace y la eficiencia energética [16].

3. Configuración de la simulación

Se diseñó un transmisor y receptor OFDM-IM en el software Matlab®2020b, aplicando la técnica de envolvente constante mediante Modulación PM para reducir el PAPR. Inicialmente, se implementó el sistema OFDM-IM, se generaron 32400 bits siguiendo una distribución uniforme con cada símbolo codificado utilizando 4 bits: dos destinados a la modulación en 4-QAM y dos para los bits de índice, con $k = 1$. Las subportadoras generadas en el dominio de la frecuencia se transformaron al dominio del tiempo mediante una iFFT de orden $N = 128$. Una vez validado el sistema en Matlab, se procedió a su implementación experimental en una red PON de 25 km como muestra en la Figura 1, donde la señal fue cargada en el generador arbitrario de ondas (Arbitrary Wave Generator, AWG), amplificada e ingresada al modulador de intensidad para ser transportada en la portadora óptica generada por un láser de cavidad externa (External Cavity Laser, ECL) a $1550nm$, todo esto en la etapa del transmisor. En la etapa del canal óptico, la señal fue transmitida a través de una fibra óptica de $25km$ y atenuada mediante un atenuador óptico variable (Variable Optical Atenuator, VOA) para simular los usuarios conectados a la red. En la etapa del receptor, la señal fue amplificada por un amplificador semiconductor óptico (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) y recibida por un fotodiodo PIN, el cual transformó la señal de óptica a eléctrica. Posteriormente, la señal fue amplificada y capturada mediante el osciloscopio en tiempo real (Real Time Osciloscope, RTO). Después, la señal fue recuperada mediante el RTO y pos-procesada en Matlab para recuperar los bits transmitidos y medir su tasa de error de bits (Bit Error Rate, BER).

Posteriormente, se integró la técnica de envolvente constante a la señal OFDM-IM, ajustando los parámetros $A = 1$, $\beta = 0.1$ y $f_c = 400$ MHz. Una transmisión

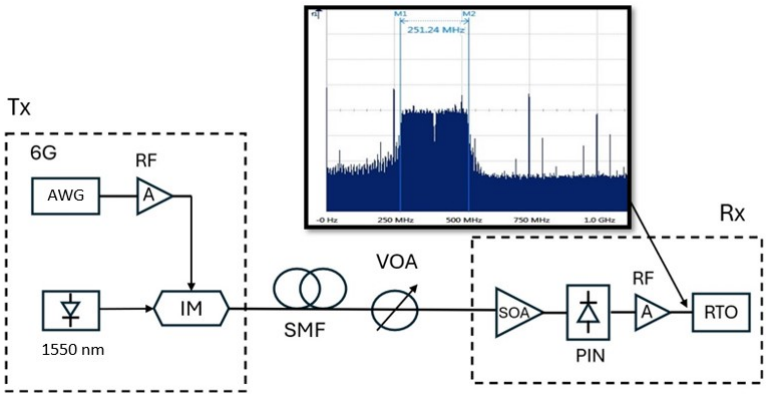

Figura 1. Diagrama de configuración de red de acceso PON de 25km.

directa sin los componentes ópticos fue realizada (Back to Back, B2B) para garantizar su transmisión adecuada en el sistema, logrando una demodulación libre de errores. Entonces, se procedió a transmitir la señal en la portadora óptica mediante los dispositivos ópticos y fibra óptica de la red PON. Sin embargo, la señal no pudo ser demodulada adecuadamente, por lo que se realizó un análsis en simulación para verificar su comportamiento en una fibra óptica tanto con componente lineal y no lineal modelada con la ecuación no lineal de Schrödinger.

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z}+\frac{\alpha}{2}A(z,t)+i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2}=i\gamma|A(z,t)|^2A(z,t) \quad (4)$$

Donde: A(z, t)es la amplitud del campo eléctrico dependiente de la distancia z y el tiempo t, α es el coeficiente de atenuación de la fibra en dB/km^{-1}, y describe las pérdidas ópticas, β_2 es el coeficiente de dispersión de segundo orden s^2/km, relacionado con la dispersión cromática, γ es el coeficiente de no linealidad $W^{-1}m^{-1}$, describe efectos no lineales como la modulación de fase autoinducida y $|A(z,t)|^2$ es la potencia del campo eléctrico, representa la interacción no lineal en el medio. La simulación fue realizada con una longitud de la fibra óptica de $25Km$, $\alpha = 0.2dBkm^{-1}$, $\beta_2 = -2.17\times10^{-23}s^2/m$ y $\gamma = 1.31\times10^{-3}W^{-1}km^{-1}$, valores que cumplen el estándar ITU-G652.

Finalmente, el análisis mostró que la señal PM-OFDM-IM, es muy sensible a la dispersión cromática y a las no linealidades de la fibra óptica por lo cual su experimentación no se realizó debido a la falta de fibra óptica con las características mostradas del análisis.

4. Resultados y análisis

En primer lugar, se transmitió la señal OFDM-IM en la red PON. La Figura 2 muestra la señal en tiempo y su espectro recibido, en la transmisión B2B.

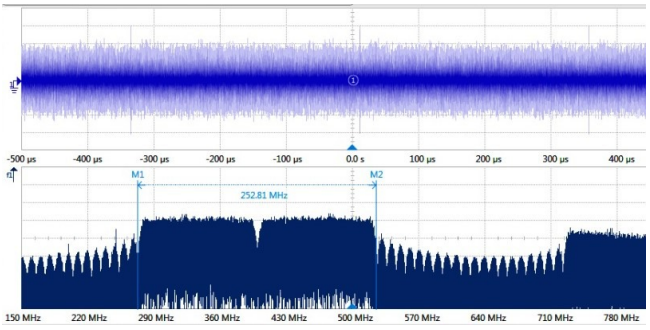

Figura 2. Señal OFDM-IM en tiempo (arriba) y su espectro (abajo) en el sistema B2B.

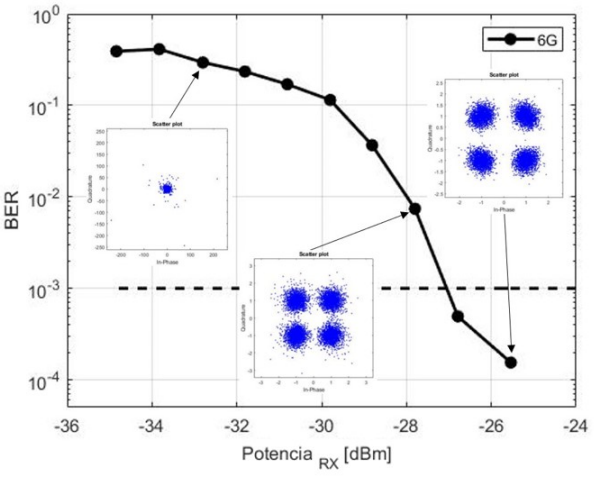

Figura 3. BER versus potencia óptica Rx (Prx) para la señal OFDM-IM después de 25km de fibra óptica monomodo con modulación 4-QAM y 128 puntos de entrada en la FFT.

En segundo lugar, la señal se transmitió por 25 Km de fibra óptica, obteniéndose una potencia recibida de -27.5dBm para un $BER = 1 \times 10^{-3}$, la cual, se suficiente para utilizar técnicas de corrección de errores hacia adelante (FEC, Forward Error Correction), como se muestra en la Figura 3. Los diagramas de constelaciones insertados en la figura muestran el desempeño del sistema frente al ruido. Lo anterior, indica que OFDM-IM puede trabajar en una red PON.

En tercer lugar, se procedió a transmitir la señal PM-OFDM-IM en B2B, la cual se muestra en la Figura 4, esta se demoduló sin errores. Aunque, al incluir la fibra óptica esta no pudo ser demodulada con errores menores a $BER = 4 \times 10^{-1}$.

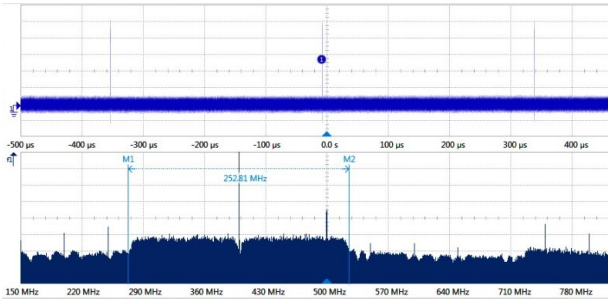

Figura 4. Señal PM-OFDM-IM en tiempo (arriba) y su espectro (abajo) en el sistema B2B.

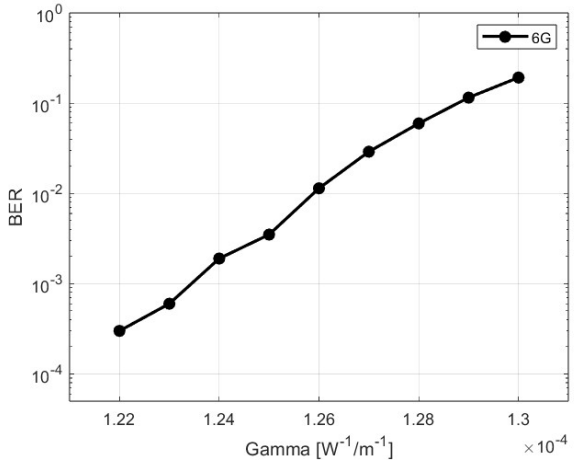

Figura 5. BER versus Gamma para la señal PM-OFDM-IM con una distancia de 25km y valores de dispersión diferentes.

Finalmente, se realizó un análsis para determinar la causa del alto degradamiento de la señal PM-OFDM-IM, mediante la simulación del enlace de fibra óptica en Matlab. Para determinar un valor adecuado se procedió a variar el valor de la dispersión manteniendo la distancia de $25km$, hasta obtener un valor cercano $BER = 1 \times 10^{-4}$, hallando el valor de $\beta = -21.27 \times 10^{-27} s^2/m$. Luego, se varió el valor de las nolinealidades hasta obtener un sistema libre de errores, logrando conseguir el valor de $\gamma = 1.21 \times 10^{-4} W^{-1} m^{-1}$, la Figura 5 muestra el proceso obtención de este valor.

Se observa que a medida que crecen las nolinealidades los errores aumentan, esto debido a que su efecto está directamente relacionado con el cambio de fase de la portadora óptica y afecta directamente a la fase de la señal multiportadora.

Lo próximo, fue obtener el desempeño de la señal mediante la evaluación del BER al variar la atenuación para simular carga de diferentes usuarios. Los resultados se muestran en la Figura 6.

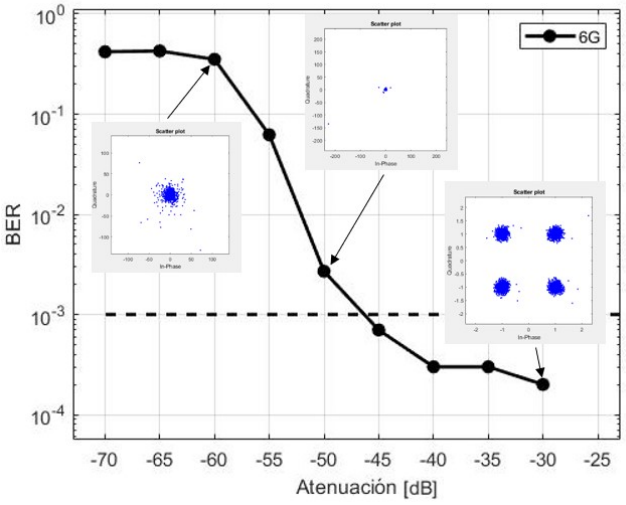

Figura 6. BER versus Atenuación para la señal PM-OFDM-IM después de 25km de fibra óptica monomodo con modulación 4-QAM y 128 puntos de entrada en la FFT.

Los resultados muestran que a valores altos de atenuación la señal tiene un buen desempeño. Es así que, para un $BER = 1 \times 10^{-3}$, se requiere una atenuación de 46 dB, lo que confirma el hecho de que la amplitud no afecta en gran medida a la señal multiportadora, al contrario es afectada por el cambio en su fase ya que es una señal modulada en PM.

5. Conclusiones

La evaluación en una red PON de la señal OFDM-IM con reducción del PAPR mediante la técnica de envolvente constante basado en la modulación de fase es realizada. Los resultados muestran que la señal OFDM-IM sin reducción del PAPR logra un potencia recibida de -27.5 dBm para un $BER = 1 \times 10^{-3}$ y con la aplicación de la técnica de reducción del PAPR, debido a la degradación no se logra obtener un $BER > 4 \times 10^{-1}$ en los 25 Km del enlace de la

fibra óptica. Para evitar la degradación de la señal debido a la dispersión y a las nolinealidades los valores deben reducirse a $\beta = -21.27 \times 10^{-27} s^2/m$ y $\gamma = 1.21 \times 10^{-4} W^{-1} m^{-1}$ respectivamente. Por lo tanto, la señal OFDM-IM puede trabajar en una red G-PON, aunque si se aplica la técnica de envolvente constante para reducir el PAPR se requiere fabricar una fibra óptica especial. Sin embargo, lo más viable es generar técnicas robustas para la recuperación de la fase de la señal multiportadora, un trabajo futuro a realizar.

Referencias

[1] Rappaport, T. S., et al. (2019). "Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges." IEEE Access.

[2] Tellado, J. (2000). "Peak-to-Average Power Reduction for Multicarrier Modulation." Springer Series in Communications Technology.

[3] Han, S., et al. (2021). "Challenges and Key Technologies in 6G Wireless Networks." IEEE Communications Magazine.

[4] Li, Y., Stuber, G. L. (2006). "Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications." Springer

[5] Basar, E. (2016). "Index Modulation Techniques for 5G Wireless Networks." IEEE Communications Magazine.

[6] Agrawal, G. P. (2019). "Fiber-Optic Communication Systems." Wiley-Interscience.

[7] He, Z., Jiang, H. (2019). "PON Architectures for Future 6G Optical Access." Journal of Optical Networking.

[8] Zhang, Z., et al. (2019). "6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies." IEEE Vehicular Technology Magazine, pp 28-41.

[9] Rappaport, T. S., et al. (2020). "Wireless Communications: Principles and Practice." Prentice Hall, pp 230-245.

[10] Armstrong, J. (2002). "Peak-to-Average Power Reduction for OFDM by Repeated Clipping and Frequency Domain Filtering." Electronics Letter14.s, pp 123-128.

[11] Chowdhury, M. H., et al. (2019). "Challenges in Optical Wireless Communications for 6G Networks." Optical Communications Journal, pp 40-50.

[12] Basar, E. (2017). "OFDM-IM: An Emerging Multi-Carrier Modulation Scheme." IEEE Wireless Communications, pp 78-85.

[13] Li, X., et al. (2021). "Performance Analysis of OFDM-IM in 6G Networks." Journal of Communication Systems, pp 120-130.

[14] Akyildiz, I. F., et al. (2020). "Terahertz Band: Next Frontier for Wireless Communications." Frontiers in Communications and Networking.

[15] Sklar, B. (2001). Digital Communications: Fundamentals and Applications. Prentice Hall. pp 140-150.

[16] Mao, S., et al. (2022). "6G Networks: Key Technologies and Challenges." IEEE Internet of Things Journal. pp 75-85.