



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**DESEMPEÑO DEL CÓDIGO RAPTOR EN LA
SEÑAL 6G OFDM-IM SOBRE REDES PON**

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

AUTOR: JOSUE ALEXANDER ESCOBAR CORNEJO

TUTOR: MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA

Quito - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo Josue Alexander Escobar Cornejo con documento de identificación N° 1752695575, 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, 13 de Febrero del año 2026

Atentamente,



Josue Alexander Escobar Cornejo

1752695575

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

Yo, **Josue Alexander Escobar Cornejo** con documento de identificación No. **1752695575**, 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: “Desempeño del código RAPTOR en la señal 6G OFDM-IM sobre redes 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, 13 de Febrero del año 2026

Atentamente,



Josue Alexander Escobar Cornejo

1752695575

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: **DESEMPEÑO DEL CÓDIGO RAPTOR EN LA SEÑAL 6G OFDM-IM SOBRE REDES PON**, realizado por **Josue Alexander Escobar Cornejo** con documento de identificación N° 1752695575, 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, 13 de Febrero del año 2026

Atentamente,



Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña MSc.
1713583126

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, con todo mi cariño, a mis padres, Vladimir y Marina, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser el pilar fundamental en cada etapa de mi vida.

A mis abuelitos, Oswaldo y Yolanda, por su infinito cariño, sus palabras de aliento en los momentos difíciles y por enseñarme con su ejemplo valores como la perseverancia y la fe que han sido esenciales en mi formación personal y profesional.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a mis padres, Vladimir y Marina, quienes han sido el pilar fundamental en cada etapa de este camino. Su amor incondicional, su paciencia infinita y cada uno de sus sacrificios han sido la motivación que me impulsó a seguir adelante, incluso en los momentos de mayor dificultad. Gracias por inculcarme valores como la responsabilidad, la honestidad y la constancia, y por confiar en mí aun cuando yo mismo llegué a dudar.

Su respaldo permanente, tanto emocional como moral, fue esencial para culminar esta meta. Frente a cada desafío, siempre encontré en ustedes palabras de aliento y una confianza que me dio seguridad para continuar y superarme. Este logro no me pertenece únicamente a mí; es también de ustedes, porque sin su apoyo incondicional nada de esto habría sido posible.

A mis compañeros Andrés, Anahí, Alexis, Anddy y Moori, por su compañerismo, apoyo mutuo y por cada momento compartido a lo largo de este proceso académico. Gracias por las ideas, las risas, el trabajo en equipo y por hacer que este camino haya sido más llevadero y Significativo.

DESEMPEÑO DEL CÓDIGO RAPTOR EN LA SEÑAL 6G OFDM-IM SOBRE REDES PON

PERFORMANCE OF RAPTOR CODING ON 6G OFDM-IM SIGNALS OVER PON NETWORKS

Josue Escobar, Milton N. Tipán³ 

Resumen

En este trabajo se evaluó experimentalmente el desempeño de la señal multiportadora OFDM-IM con y sin codificación raptor, sobre una red de acceso PON. Los resultados evidencian que la codificación raptor mejora en $0.4dB$ el desempeño del sistema especialmente en la región cercana al límite FEC para un $BER = 10^{-3}$, proporcionando un mayor margen de confiabilidad frente al esquema OFDM-IM sin codificación. Estos resultados destacan el potencial del mismo como una alternativa a ser usada para sistemas de comunicación convergente de próxima generación.

Palabras clave: Codificador Raptor, OFDM-IM, PON

Abstract

This work experimentally evaluated the performance of the OFDM-IM multicarrier signal with and without raptor coding over a PON access network. The results show that raptor coding improves system performance by $0.4dB$, especially in the region near the FEC limit for a $BER = 10^{-3}$, providing a greater margin of reliability compared to the OFDM-IM scheme without coding. These results highlight its potential as an alternative for use in next-generation converged communication systems.

Keywords: Raptor Code, OFDM-IM, PON

¹Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: jescobar3@est.ups.edu.ec

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

1. Introducción

Entre las técnicas de transmisión más relevantes para sistemas multiportadora, se ha propuesto a la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) debido a su robustez frente a la interferencia intersimbólica y su eficiencia en canales selectivos en frecuencia [3, 4]. No obstante, los esquemas OFDM convencionales presentan limitaciones relacionadas con la eficiencia espectral y el aprovechamiento de los grados de libertad disponibles en el dominio de la frecuencia, lo que ha motivado el desarrollo de técnicas de modulación avanzadas [5].

La modulación por índices aplicada a OFDM, conocida como OFDM-IM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation), surge como una alternativa prometedora para sistemas inalámbricos actuales, al permitir la transmisión de información adicional mediante la activación selectiva de subportadoras. En este esquema, los índices de las subportadoras activas constituyen una fuente adicional de información, lo que se traduce en mejoras de eficiencia espectral y energética sin requerir incrementos significativos de ancho de banda o potencia de transmisión [5, 6]. Estas características hacen de OFDM-IM una técnica atractiva para escenarios de alta densidad de usuarios y servicios heterogéneos, típicos de las redes 6G [2].

Sin embargo, la confiabilidad del enlace en sistemas OFDM-IM depende en gran medida de la capacidad del receptor para detectar correctamente tanto los símbolos transmitidos como el patrón de subportadoras activas, especialmente en condiciones de degradación del enlace [5, 7]. En este sentido, la incorporación de esquemas de codificación de canal resulta fundamental para mitigar los efectos del ruido y mejorar el desempeño del sistema.

Entre las alternativas existentes, los códigos tipo fountain, y en particular los códigos Raptor, destacan por su flexibilidad y adaptabilidad frente a variaciones del canal [8]. Los códigos Raptor permiten generar símbolos redundantes de manera dinámica hasta que el receptor logra recuperar la información original, sin necesidad de una tasa de codificación fija, lo que los convierte en una opción adecuada para entornos con condiciones de enlace variables [9].

En este trabajo se presenta un análisis experimental del desempeño del código Raptor aplicado a una señal 6G OFDM-IM transmitida sobre una red PON. Como se muestra en la Figura 1. Se comparan los escenarios con y sin codificación Raptor mediante la evaluación del BER en función de la potencia recibida, con el objetivo analizar el potencial de esta integración como solución viable para sistemas de comunicación para 6G convergentes.

2. Codificación Raptor

Los códigos Raptor pertenecen a la familia de los códigos tipo fountain, caracterizados por su capacidad de generar una cantidad potencialmente ilimitada de símbolos redundantes a partir de un bloque finito de información. A diferencia de los esquemas de codificación de tasa fija, en un código fountain el transmisor puede continuar produciendo símbolos codificados hasta que el receptor disponga de suficiente información para reconstruir el mensaje original, propiedad especialmente útil en enlaces con variaciones de calidad y pérdidas impredecibles [8]. Esta flexibilidad ha motivado su estudio en escenarios de próxima generación, donde coexisten servicios con requisitos heterogéneos de confiabilidad y latencia [2].

Un código Raptor puede describirse como la concatenación de un pre-codificador de alta tasa y un código LT (Luby Transform). El pre-codificador introduce una estructura adicional que facilita la recuperación completa del bloque, mientras que el código LT combina de manera pseudoaleatoria subconjuntos de símbolos intermedios para producir símbolos redundantes. En términos generales, si el bloque original contiene k (símbolos de información), el transmisor puede generar n (símbolos codificados) con $n \geq k$, donde el exceso de símbolos representa redundancia adaptativa [8].

La recuperación de la información en el receptor se realiza a partir de los símbolos recibidos, aplicando primero los bloques de sincronización, Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) y detección OFDM-IM, para posteriormente ejecutar el proceso de decodificación Raptor. Como se muestra en la Figura 2. La evaluación del desempeño se efectúa mediante la tasa de error de bit (BER), cuantificando el impacto de la codificación sobre la confiabilidad del enlace en función de la potencia recibida P_{RX} .

Para formalizar la noción de redundancia, se emplea la relación de expansión u *overhead* del código, definida como

$$\epsilon = \frac{n - k}{k}, \quad (1)$$

donde k es el número de símbolos de información y n el número de símbolos codificados utilizados en el proceso de recuperación [8]. En general, a mayor ϵ se incrementa la probabilidad de recuperación exitosa, aunque a costa de una reducción de la tasa efectiva. Este compromiso resulta relevante en enlaces orientados a 6G, donde se requiere balancear confiabilidad y eficiencia espectral según el servicio y las condiciones del canal [2, 4].

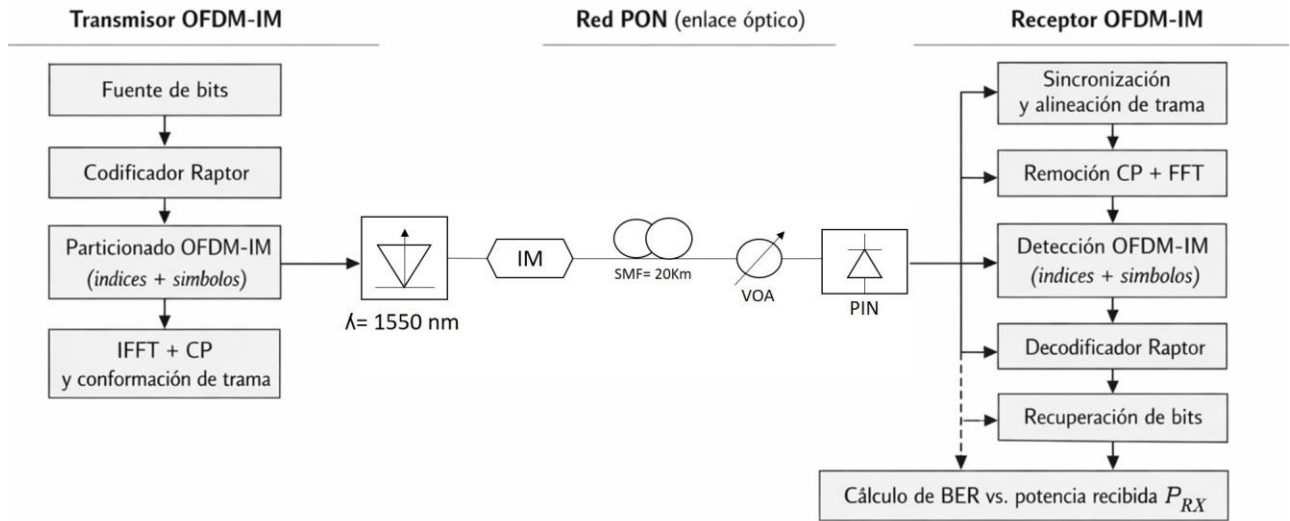


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema OFDM-IM con codificación RAPTOR sobre una red PON.

3. OFDM-IM

La modulación por índices aplicada a sistemas OFDM, conocida como OFDM-IM, es una técnica de transmisión multiportadora que permite transportar información adicional mediante la activación selectiva de subportadoras dentro de cada bloque OFDM. A diferencia del esquema OFDM convencional, donde todas las subportadoras se encuentran activas, en OFDM-IM solo un subconjunto de ellas transmite información, mientras que el resto permanece inactivo [5].

En OFDM-IM, el flujo de bits de entrada se divide en subbloques independientes. En cada subbloque, una parte de los bits se asigna a la selección del patrón de subportadoras activas, mientras que los bits restantes se emplean para la modulación de los símbolos transmitidos sobre dichas subportadoras. De esta manera, la información se transmite tanto a través de los símbolos como de los índices de las subportadoras activas, lo que permite mejorar la eficiencia espectral sin requerir un aumento del ancho de banda [5, 6].

Desde el punto de vista matemático, si un subbloque OFDM-IM está compuesto por N subportadoras y se activan K de ellas, el número de bits transmitidos por subbloque puede expresarse como

$$b = \log_2 \binom{N}{K} + K \log_2(M), \quad (2)$$

donde el primer término corresponde a los bits transportados mediante los índices de las subportadoras activas y el segundo término representa los bits asociados a los símbolos transmitidos sobre dichas subportadoras,

siendo M el orden de la constelación utilizada [5].

Una vez seleccionadas las subportadoras activas y asignados los símbolos correspondientes, el vector resultante en el dominio de la frecuencia se transforma al dominio del tiempo mediante la transformada rápida inversa de Fourier (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT). Posteriormente, se añade un prefijo cíclico con el fin de mitigar los efectos de la interferencia intersimbólica y facilitar la ecualización en el receptor. Esta estructura permite mantener las ventajas fundamentales de OFDM, como la ortogonalidad entre subportadoras y la simplicidad de ecualización [3].

En el receptor, el proceso inverso incluye la eliminación del prefijo cíclico, la aplicación de la FFT y la detección conjunta de los símbolos transmitidos y del patrón de subportadoras activas. La detección OFDM-IM puede realizarse mediante algoritmos de máxima verosimilitud u otros esquemas de baja complejidad, dependiendo de los requerimientos del sistema [5,7]. No obstante, la detección correcta del patrón de índices se vuelve más desafiante en condiciones de degradación del enlace, lo que motiva la incorporación de técnicas de codificación de canal.

4. Configuración del experimento

La configuración experimental se implementó mediante MATLAB R2025b. La señal transmitida fue generada a partir de secuencias binarias aleatorias de 30720 bits, las cuales fueron mapeadas empleando el esquema OFDM-IM. En este esquema, de un total de $N=64$ subportadoras, se activó un subconjunto

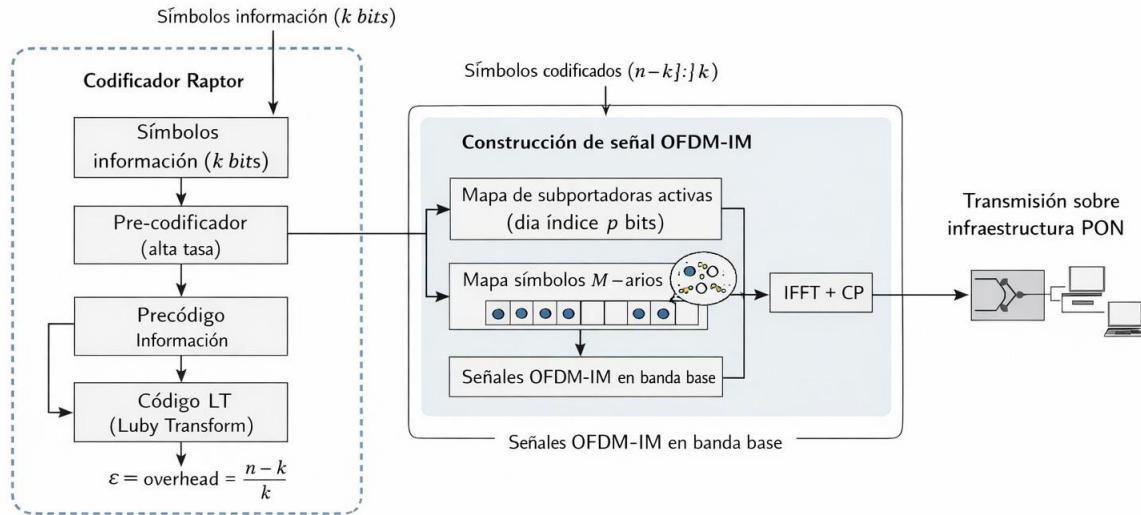


Figura 2. Esquema de la integración del codificador Raptor con la señal OFDM-IM y su transmisión sobre una red PON.

de $K=4$ subportadoras por símbolo OFDM, mientras que los símbolos de datos fueron modulados mediante 4-QAM. Posteriormente, los símbolos fueron transformados al dominio temporal mediante una IFFT de 64 puntos, añadiéndose un prefijo cíclico (CP) de longitud $N_{cp}=16$ muestras, con el fin de mitigar los efectos de interferencia intersimbólica.

La señal OFDM-IM generada fue modelada dentro de una arquitectura de red óptica pasiva (PON), considerando un transmisor óptico compuesto por un láser, seguido de un modulador de intensidad (IM). La propagación de la señal se realizó a través de un enlace de fibra monomodo (SMF) de 20km, incorporando un atenuador óptico variable (VOA) para controlar la P_{RX} . En el receptor óptico se empleó un fotodiodo PIN con responsividad de 0.8 A/W , seguido de un proceso de detección y conversión opto-eléctrica. Adicionalmente, se consideró un canal AWGN para modelar el ruido del sistema, y la señal recibida fue analizada mediante un osciloscopio en tiempo real (RTO) para su posterior procesamiento digital.

En el receptor digital, la señal fue convertida nuevamente al dominio de la frecuencia mediante una FFT de 64 puntos, seguida del proceso de detección de subportadoras activas y demodulación 4-QAM, permitiendo la recuperación de los símbolos transmitidos y la reconstrucción de la secuencia binaria original.

El desempeño del sistema fue evaluado variando la P_{RX} y calculando el BER para cada condición, obteniéndose finalmente la curva BER versus P_{RX} , la cual permite analizar el impacto del esquema OFDM-IM dentro de una red PON bajo diferentes niveles de potencia recibida.

Los parámetros del sistema se seleccionaron buscando un equilibrio entre complejidad y representa-

tividad de un enlace PON. Se adoptó $N = 64$ por tratarse de un tamaño estándar que permite una implementación eficiente mediante FFT. En el esquema OFDM-IM se eligió $K = 4$ para balancear eficiencia espectral y robustez frente al ruido. Se empleó modulación 4-QAM por su mayor tolerancia a degradaciones del canal óptico, permitiendo aislar el impacto de la codificación Raptor. El prefijo cíclico $N_{cp} = 16$ (25% de la IFFT) se definió para mitigar interferencia por dispersión en el modelo de fibra considerado. Finalmente, se modeló un enlace SMF de 20 km por corresponder a una distancia típica en redes de acceso PON.

5. Resultados y análisis

La señal OFDM-IM fue transmitida primero sin codificación y luego con codificación por el enlace PON. La Figura 3 muestra la señal OFDM-IM capturada, en ella se observa una elevada variación de la envolvente de la señal, así como la presencia de picos de amplitud pronunciados, características propias de sistemas multiportadora basados en OFDM. También, se observa que no hay recortes en la señal sintoma de que el voltaje de alimentación DC del modulador en intensidad es el correcto.

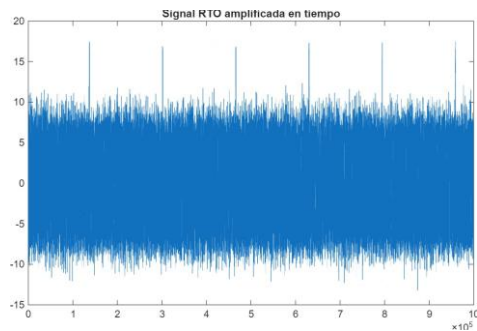


Figura 3. Señal OFDM-IM capturada experimentalmente en el receptor

El desempeño del sistema se evaluó mediante la comparación del BER en función de la potencia óptica recibida P_{RX} , lo que permite analizar el comportamiento del enlace bajo distintas condiciones de operación. La Figura 4, muestra el desempeño de la señal OFDM-IM con codificación, se observa que para una potencia óptica de $-17.4dBm$ se alcanza el límite FEC para un $BER = 10^{-3}$. Además, se observa en los diagramas de constelaciones insertados en la figura el efecto del ruido, las no linealidades de los dispositivos ópticos y de la SMF.

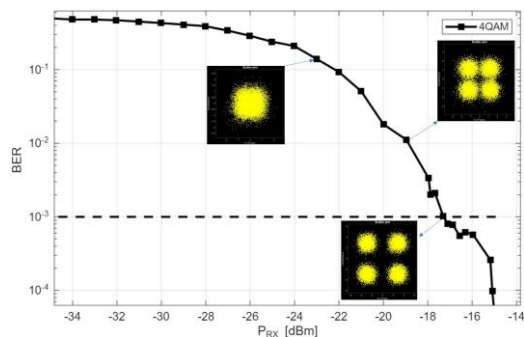


Figura 4. Curva BER en función de la potencia recibida P_{RX} para un sistema OFDM-IM con codificación Raptor.

La Figura 5, presenta la comparación del desempeño del sistema OFDM-IM con y sin codificación Raptor. Esta representación permite identificar la región de operación donde la codificación introduce una mejora apreciable en la confiabilidad del enlace.

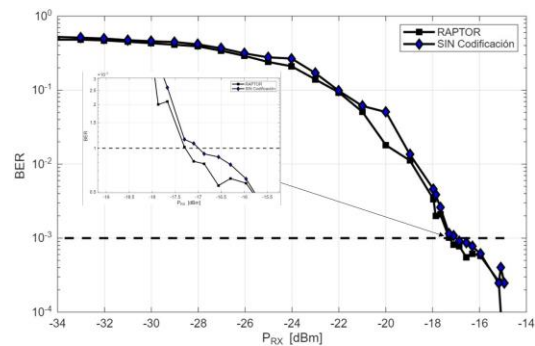


Figura 5. BER en función de la potencia recibida P_{RX} para el sistema OFDM-IM con y sin codificación Raptor.

Al comparar ambos escenarios, se observa que el sistema OFDM-IM sin y con codificación Raptor superan el límite FEC. En esta zona, la codificación Raptor permite desplazar el punto de operación del sistema hacia menores valores de potencia recibida este es aproximadamente $-17.4dBm$ desde $-17dBm$, proporcionando un margen adicional de confiabilidad de $0.4dB$ frente al esquema sin codificación, como se observa en la figura insertada.

En el régimen de alta potencia recibida, ambos esquemas presentan valores reducidos de BER, por lo que la diferencia entre ellos resulta menos significativa. Por el contrario, en condiciones de muy baja potencia, las curvas tienden a converger debido a la dominancia del ruido y a la degradación global del enlace, escenario en el cual la redundancia introducida por la codificación resulta insuficiente para contrarrestar completamente los errores del canal.

Los resultados evidencian que la incorporación de codificación Raptor aporta beneficios principalmente en la región de transición del sistema, donde pequeñas mejoras en la tasa de error de bit se traducen en un incremento relevante de la robustez del enlace. Este comportamiento resulta especialmente atractivo para la transmisión de señales 6G OFDM-IM sobre infraestructuras PON, donde se requiere operar cerca del límite de confiabilidad manteniendo restricciones de potencia y eficiencia espectral.

La mejora de $0.4 dB$ se atribuye a la redundancia adaptativa introducida por el código Raptor, la cual incrementa la probabilidad de recuperación correcta de los índices y símbolos en OFDM-IM. En la región cercana al límite FEC, pequeñas variaciones de potencia producen cambios significativos en el BER, por lo que la codificación desplaza la curva hacia menores valores de P_{RX} , evidenciando una ganancia de codificación. En altas potencias, la diferencia se reduce debido a que el sistema opera en un régimen de error residual mínimo.

6. Conclusiones

Se evaluó el desempeño de la transmisión de la señal OFDM-IM operando con y sin codificación Raptor sobre una infraestructura PON. Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de codificación Raptor mejora la confiabilidad del enlace principalmente en la región de transición, la ganancia de codificación es de 0.4 dB proporcionando un margen adicional de robustez frente al esquema OFDM-IM sin codificación. Los resultados confirman que la combinación de OFDM-IM con codificación Raptor constituye una alternativa viable para mejorar la transmisión en sistemas de comunicación 6G sobre redes PON, manteniendo un compromiso adecuado entre confiabilidad y eficiencia espectral. Como trabajo posterior, se propone extender el análisis a canales con desvanecimiento selectivo y estudiar esquemas adaptativos de redundancia que permitan optimizar el desempeño del sistema bajo condiciones dinámicas de enlace.

Referencias

- [1] ITU-R, "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond," *ITU-R Recommendation M.2160*, Geneva, Switzerland, 2023.
- [2] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 4, pp. 2–8, Apr. 2019.
- [3] R. van Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Boston, MA, USA: Artech House, 2000.
- [4] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [5] E. Basar, U. Aygolu, E. Panayirci, and H. V. Poor, "Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 22, pp. 5536–5549, Nov. 2013.
- [6] T. Eren and A. Akan, "Null subcarrier index modulation in OFDM systems for 6G and beyond," *Sensors*, vol. 21, no. 21, Art. no. 7263, 2021.
- [7] Y. Xu, G. Mao, and J. Zhang, "Spatial modulation in orthogonal frequency division multiplexing systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 10, pp. 4315–4328, Oct. 2017.
- [8] A. Shokrollahi, "Raptor codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2551–2567, Jun. 2006.
- [9] S. Lin and D. J. Costello, *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2004.