



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

**COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES  
MULTIPORTADORA OFDM-IM Y OTSM  
EN LAS REDES DE ACCESO PON**

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

AUTOR: Jenifer Pamela Cuñez Tulcan.

TUTOR: Milton Napoleón Tipán Simbaña.

Quito-Ecuador  
2025

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

Yo, Jenifer Pamela Cuñez Tulcan con documento de identificación N° 1752599876; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizamos 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, 22 de julio del año 2025

Atentamente,



---

Jenifer Pamela Cuñez Tulcan

1752599876

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

Yo, Jenifer Pamela Cuñez Tulcan con documento de identificación N° 1752599876 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 somos los autores del Artículo Académico: “Comparación de las señales multiportadora OFDM-IM y OTSM en las redes de acceso PON”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 22 de julio del año 2025

Atentamente,



---

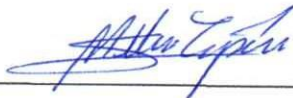
Jenifer Pamela Cuñez Tulcan  
1752599876

## 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: COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES MULTIPORTADORA OFDM-IM Y OTSM EN LAS REDES DE ACCESO PON, realizado por Jenifer Pamela Cuñez Tulcan con documento de identificación N° 1752599876 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, 22 de julio del año 2025

Atentamente,



---

Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña MSc.

1713583126

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis con todo mi cariño y gratitud a mi abuelo Esteban, que desde el cielo siempre ha sido mi guía y ejemplo de fortaleza y sabiduría. Su recuerdo y enseñanzas han iluminado mi camino, inspirándome a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mi hija, mi mayor alegría y motivación, gracias por llenar mi vida de amor y ser la razón por la que nunca dejo de luchar por un futuro mejor. Espero que este logro sea un ejemplo para ti y te impulse a perseguir siempre tus sueños con valentía y dedicación.

A mis padres, Henry y Nelly, les agradezco profundamente por su amor incondicional, por sus consejos sabios y por el apoyo constante que me han brindado. Sin ustedes, este sueño no habría sido posible. Su esfuerzo y sacrificio han sido el cimiento sobre el que he construido cada paso de esta travesía.

A mis hermanos, gracias por su apoyo invaluable y por ayudarme con mi hija en los momentos que más lo necesité. Su solidaridad y cariño han sido un pilar fundamental que me permitió avanzar con tranquilidad y confianza.

Jenifer Pamela Cuñez Tulcan

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a mis padres, Henry y Nelly, quienes han sido mi mayor inspiración y sostén durante todo este camino. Su amor incondicional, paciencia y sacrificio han sido la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la honestidad y la perseverancia, y por creer en mí cuando yo misma dudaba.

Su apoyo constante, tanto emocional como moral, ha sido fundamental para la realización de este sueño. A pesar de los retos y obstáculos, ustedes nunca dejaron de animarme y brindarme su confianza, permitiéndome crecer y aprender con tranquilidad. Este logro es tan suyo como mío, porque sin ustedes no habría sido posible.

A mis amigos y compañeros, gracias por su compañía sincera, por escucharme, animarme y hacerme reír cuando más lo necesitaba. Gracias por estar ahí, incluso en silencio, y por ser parte fundamental de este logro.

Jenifer Pamela Cuñez Tulcan

# COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES MULTIPORTADORA OFDM-IM Y OTSM EN LAS REDES DE ACCESO PON

## COMPARISON OF MULTI-CARRIER OFDM-IM AND OTSM SIGNALS IN PON ACCESS NETWORKS

Jenifer Cuñez, Milton N. Tipán<sup>2</sup> 

### Resumen

En este artículo se compara experimentalmente dos métodos de modulación multiportadora propuestos para 6G en una red PON. Los resultados muestran que OFDM-IM supera a OTSM en aproximadamente 13 dBm a un límite FEC de  $BER = 1 \times 10^{-3}$ , logrando una  $P_{RX} = -26$  dBm. Esto indica que OFDM-IM requiere menos potencia para alcanzar una calidad de señal equivalente a la de OTSM. Esta diferencia refleja una mayor eficiencia energética y una mejor sensibilidad del receptor, lo que resulta especialmente ventajoso en enlaces ópticos de largo alcance o con restricciones de potencia.

**Palabras clave:** OFDM-IM, OTSM, PON.

### Abstract

This paper experimentally compares two proposed multicarrier modulation methods for 6G in a PON network. The results show that OFDM-IM outperforms OTSM by approximately 13 dBm at an FEC limit of  $BER = 1 \times 10^{-3}$ , achieving a  $P_{RX} = -26$  dBm. This indicates that OFDM-IM requires less power to achieve equivalent signal quality to OTSM. This difference reflects higher energy efficiency and better receiver sensitivity, which is especially advantageous in long-range or power-constrained optical links.

**Keywords:** OFDM-IM, OTSM, PON.

---

<sup>1</sup>Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: jcunezt@est.ups.edu.ec

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

## 1. Introducción

Las Redes Ópticas Pasivas (Passive Optical Networks, PON) se han consolidado como una tecnología fundamental en las infraestructuras de telecomunicaciones modernas. Estas redes, basadas en el uso de fibra óptica, permiten ofrecer servicios de alta velocidad a un costo energético reducido, eliminando la necesidad de componentes activos intermedios [4]. En un entorno donde la conectividad y la transmisión de datos han experimentado un crecimiento exponencial, las PON representan una solución eficiente para atender las crecientes demandas de usuarios residenciales, comerciales e industriales [4]. Sin embargo, el crecimiento de aplicaciones sofisticadas como el Internet de las Cosas (Internet of Things, IoT), las redes inteligentes y la comunicación máquina a máquina (Machine to Machine, M2M) ha generado desafíos técnicos significativos para las PON. Dentro de estos desafíos sobresalen la necesidad de incrementar la eficiencia espectral, fortalecer la resistencia ante interferencias y asegurar una implementación adaptable y escalable [6].

Por ello, se propone la técnica de modulación Multiplexación por división de frecuencia ortogonal con modulación de índice (Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation, OFDM-IM) como una opción, debido a que es un sistema flexible en el campo de las comunicaciones inalámbricas por su eficiencia espectral (spectral efficiency, SE) y eficiencia energética (energy efficiency, EE), que son dos aspectos fundamentales que influyen en el diseño y la operación de los sistemas de transmisión [13]. Si bien OFDM-IM es una técnica bien establecida puesto que combina sus características de la modulación de índice y OFDM utilizado ampliamente en la transmisión de datos de manera inalámbrica, siendo superior al OFDM tradicional, además de tener un menor espectro y consumo energético en sistemas de comunicaciones inalámbrica, permite transmitir datos de manera eficiente al tiempo que aprovecha la ortogonalidad entre los subportadores y la modulación de índice para aumentar la capacidad espectral. Lo anterior, ha generado un gran interés en

su aplicación con una variedad de contextos, desde las redes de área local inalámbrica hasta comunicaciones de banda ancha y ópticas [10].

A pesar de sus ventajas, la implementación práctica de sistemas OFDM-IM enfrenta ciertos desafíos, siendo uno de los más significativos la presencia de relación de potencia pico a promedio (Peak to Average Power Ratio, PAPR). Estos aumentos de energía pueden causar una serie de inconvenientes no deseados en los sistemas PON, entre ellos, la distorsión no lineal en los amplificadores de potencia, la interferencia con otros sistemas y la disminución de la EE.

Las técnicas de modulación multiportadora han emergido como una herramienta crucial para maximizar el rendimiento de las PON. Entre estas técnicas, OFDM-IM y la Multiplexación por Secuencia de Tiempo Ortogonal (Orthogonal Time Sequence Multiplexing, OTSM) han llamado particularmente la atención debido a sus beneficios [8]. OFDM, es una evolución de la modulación OFDM-IM convencional, introduce un grado adicional de codificación al seleccionar dinámicamente subportadoras activas, logrando así una mayor eficiencia espectral y energética. Por otro lado, OTSM combina características de la multiplexación de secuencia y la multiplexación por división de tiempo, proporcionando una solución innovadora para ambientes de comunicación altamente dinámicos [9].

El presente trabajo se centra en realizar un análisis comparativo entre las técnicas OFDM-IM y OTSM en el marco de las PON. Mediante simulaciones en MATLAB y pruebas experimentales, se evalúa indicadores clave de desempeño como la Tasa de Error de Bits (BER). Estas métricas permiten cuantificar la capacidad de cada técnica para manejar los desafíos asociados con la transmisión de datos en PON avanzadas [10]. El propósito principal de este artículo es determinar qué técnica ofrece un óptimo balance entre eficiencia espectral, solidez y sencillez de aplicación, favoreciendo de esta manera el avance de soluciones ópticas innovadoras para las PON futuras [12].

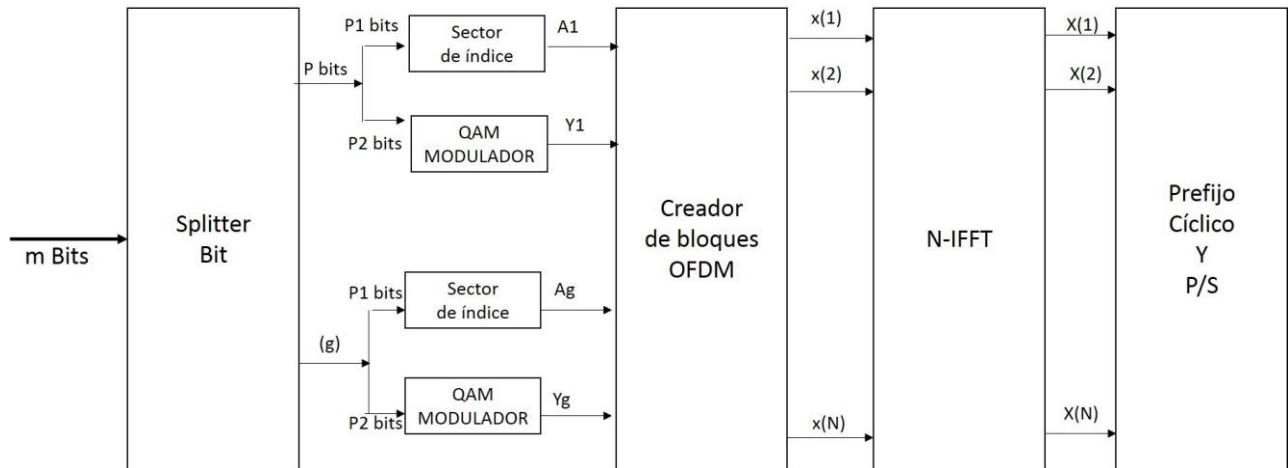


Figura 1. Diagrama de bloques del transmisor en un sistema OFDM-IM

## 2. Señales multiportadoras

### 2.1. OFDM-IM

En la Figura 1, se puede observar el diagrama de bloques en un sistema OFDM-IM. La señal multiportadora se genera mediante la división de un flujo de A bits en subgrupos de dimensión S bits. Estos bits se usan como índices para la modulación digital. Lo que proporciona una señal (A1) a (Ag) que indica los índices. 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 método ofrece una mayor adaptabilidad en el diseño del sistema y contribuye a disminuir de manera significativa el PAPR [9]. 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 como en la ecuación(1) [10]:

$$\binom{N}{K} = \frac{N!}{K!(N-K)!} \quad (1)$$

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 la Transformada rápida de Fourier inversa (Inverse fast Fourier transform, 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 [11].

### 2.2. OTSM

OTSM es un novedoso esquema de modulación de portadora única donde los símbolos de información se multiplexan en el dominio de la secuencia de retardo, donde la secuencia se define como el número de cruces por cero por intervalo de tiempo unitario. [1] [2].

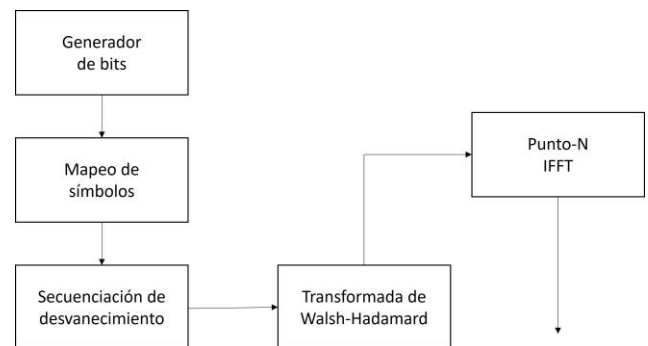


Figura 2. Diagrama de bloques de la de la simulación del transmisor OTSM

La Figura 2 representa el esquema de transmisión y recepción de un sistema OTSM, una técnica de modulación utilizada en comunicaciones inalámbricas avanzadas, como en redes 6G. En la ecuación(2), se puede observar el dominio del tiempo donde los símbolos de información se dividen en bloques y cada bloque se precodifica utilizando la transformada de Walsh-Hadamard (WHT) [1], [2].

$$\tilde{X} = X \cdot WN \quad (2)$$

Donde:

$WN$  es la matriz de Walsh-Hadamard de tamaño  $N$ .  $X$  es la matriz de datos de tamaño correspondiente.  $\tilde{X}$  es la matriz transformada antes de la transmisión.

Seguida de un entrelazado de filas y columnas de las muestras en el tiempo. En otras palabras, OTSM es una combinación de multiplexación de secuencia y multiplexación por división de tiempo. Cada columna de la matriz WHT representa una función de Walsh caracterizada por su secuencia única, es decir, el número de cambios de signo a lo largo de esa columna. Esto es similar al ordenamiento de los componentes de Fourier en número armónico creciente [1], [2]. Consideramos donde  $T \Delta f = 1$ , es decir, la señal OTSM se muestrea críticamente para cualquier forma de onda de conformación de pulso. La Figura 3 muestra el funcionamiento del transceptor OTSM, ecuación (3).

$$\mathbf{X} = [x_0, x_1, \dots, x_{M-1}] \quad (3)$$

En la matriz  $X$  de la ecuación (4) contiene las muestras de tiempo de retardo que se vectorizan para obtener las muestras del dominio del tiempo  $s$   $CNM \times 1$  que se transmitirán al canal físico.

$$s = \text{vec}(\tilde{\mathbf{X}}) \quad (4)$$

La operación del transmisor anterior se puede expresar en forma de matriz simple como en la ecuación(5):

$$s = P \cdot (I_M \otimes W_N) \cdot X \quad (5)$$

Donde  $P$  de la ecuación (6) es la matriz de intercalación fila columna. Esta permutación se conoce en la literatura como reordenamiento perfecto y tiene la siguiente propiedad: dadas las matrices cuadradas  $A$  y  $B$ .

$$A \otimes B = P \cdot (B \otimes A) \cdot P^T \quad (6)$$

Además, dado que  $P$  es una matriz de permutación,  $P^T = P$ . Utilizando la propiedad de mezcla perfecta en la ecuación (7), la operación del transmisor en el que se puede simplificar como:

$$s = (W_N \otimes I_M) \cdot (P \cdot x) \quad (7)$$

Las muestras del dominio del tiempo tienen forma de pulso, se convierten de digital a analógico y se transmiten al canal inalámbrico como  $s(t)$ . Receptor: En el receptor,  $r(t)$  tras la conversión analógica a digital y el muestreo, se invierten los pasos del transmisor para demodular las muestras recibidas en el dominio temporal. Sea  $CNM \times 1$  el vector en el dominio temporal

tras las operaciones de entrada de RF y el muestreo del ADC. Los símbolos de información recibida,  $y$ , se pliegan en la matriz  $Y$  por columnas como se muestra en la ecuación(8) :

$$\tilde{Y} = \text{vec}^{-1}(\cdot) \quad (8)$$

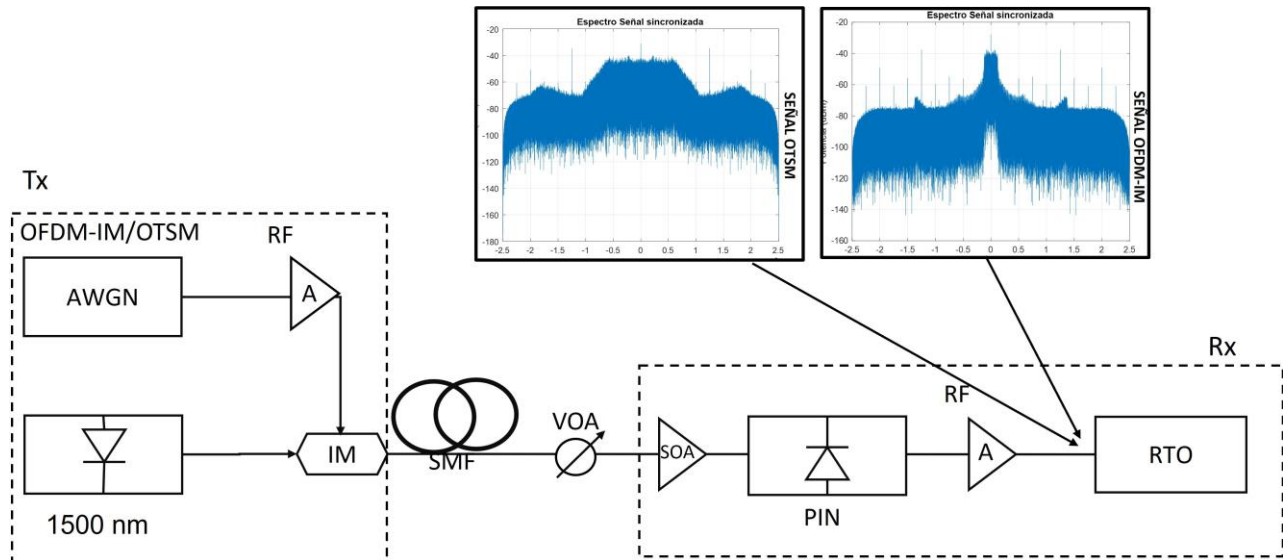
Los símbolos de información recibidos se obtienen tomando un WHT de punto  $N$  de las muestras de tiempo de retardo recibidas como se muestran en las ecuaciones(9),(10) :

$$Y = [Y_0, Y_1, \dots, Y_{M-1}] \quad (9)$$

$$T = \tilde{Y} \cdot W_N \quad (10)$$

### 3. Configuración de la simulación

Se diseñó un sistema de transmisión y recepción para evaluar las técnicas OFDM-IM y OTSM, empleando el software MATLAB® 2020b como entorno principal de simulación. Se generaron 7680 bits de información, cantidad suficiente para obtener resultados estadísticamente representativos en términos de tasa de error, además de ser un múltiplo conveniente del tamaño de bloque para evitar relleno adicional. Se utilizó modulación digital 4-QAM por su bajo nivel de complejidad y su robustez ante ruido, lo que permite enfocar el análisis en la eficiencia de las técnicas de multiplexación empleadas. El canal se modeló con desvanecimiento selectivo de cuatro trayectorias (taps), representando condiciones típicas de entornos urbanos donde la señal sufre múltiples reflexiones, generando interferencia intersimbólica (ISI). Para el procesamiento, se estableció un tamaño de bloque  $N=64$ , tanto para la transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) como para la transformada de Walsh-Hadamard (WHT), debido a que dicho valor es una potencia de dos, lo cual permite una implementación computacional eficiente y una buena resolución espectral. En particular, la WHT actúa como etapa de precodificación en esquemas como OTSM, distribuyendo la energía de los símbolos y reduciendo la relación pico a promedio (PAPR), lo que mejora la eficiencia del sistema. Finalmente, se incorporó un prefijo cíclico de longitud  $N_{4/16}$  muestras, valor que garantiza cubrir el retardo máximo del canal y, por lo tanto, mitigar eficazmente la ISI, al tiempo que mantiene un compromiso adecuado entre robustez frente al canal y eficiencia espectral.

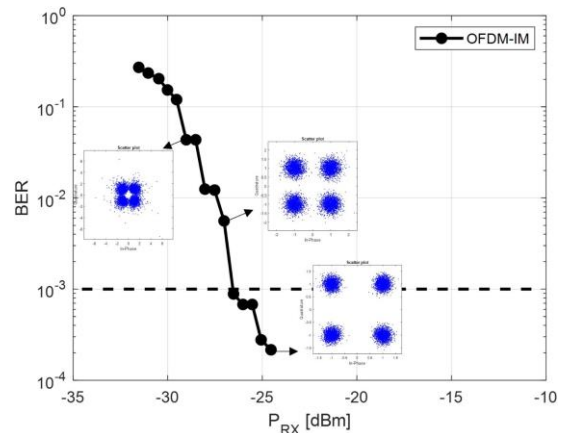


**Figura 3.** Arquitectura de red de acceso PON para 25Km.

Para OFDM-IM se generaron 32400 bits, distribuidos uniformemente, modulado con 4-QAM, divididos en 2 bits para los datos y bits de índice, las subportadoras activas se configuraron con  $k = 1$  y la señal generada en el dominio de la frecuencia fue transformada al dominio del tiempo mediante una iFFT de tamaño  $N = 128$  con prefijo cíclico igual al de OTSM. Luego, se implementó la parte experimental, donde la señal OFDM-IM y posterior emte OTSM fue cargada en un generador arbitrario de señales (AWG) a una frecuencia de muestreo de  $F_s = 1.25$  GSa/s, modulada en intensidad con un láser de cavidad externa (ECL) operando a 1550 nm y una potencia de transmisión de 8 dBm. La señal fue transmitida a través de una fibra óptica monomodo (SMF) ITU-T G-652D de 25Km con una constante de atenuación de aproximadamente 0.2 dB/km y una dispersión cromática (CD) de 16.7 ps/(nm cdotkm), la carga de usuarios a la red fue simulada mediante un atenuador óptico variable (VOA) con 10 dB. Entonces, la señal óptica fue amplificada mediante un amplificador semiconductor óptico (SOA) con una potencia de recepción óptima de -15 dB para compensar pérdidas de la SMF y convertida al dominio eléctrico mediante un fotodiodo PIN de responsividad  $R = 0.8 \frac{A}{W}$ , la cual fue amplificada en 29dB, por un amplificador de radio frecuencia (RF) y recobrada mediante un osciloscopio en tiempo real (RTO). Finalmente, fue procesada en MATLAB para recuperar la información transmitida, midiendo la tasa de error de bits (BER), que facilitó la cuantificación del rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de transmisión.

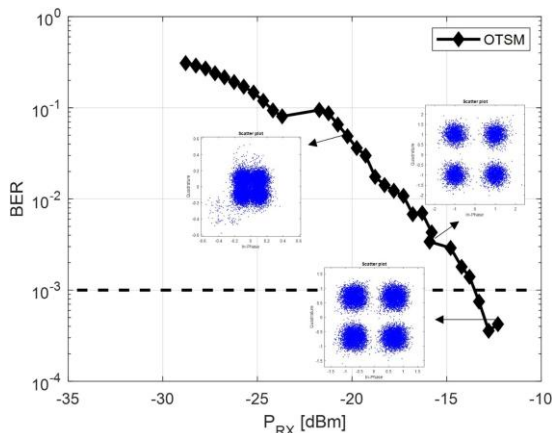
#### 4. Resultados y Análisis

En primer lugar, una señal OFDM-IM fue transmitida sobre un enlace PON de 25Km de fibra óptica monomodo (SMF), con modulación en intensidad y detección directa. Un atenuador variable permitió una variación de potencia de recepción desde  $-31$  dBm hasta  $-24$  dBm, los resultados se muestran en la Figura 4. Una potencia de recepción  $P_{RX} = -26$  dBm es alcanzada a un  $BER = 1 \times 10^{-3}$  que es el límite FEC tomado como referencia. La degradación del sistema a potencias más bajas se debe a la caída en la relación señal-ruido (SNR), afectada por el ruido térmico, de disparo y la sensibilidad del fotodetector. Las figuras de constelaciones insertadas evidencian esta degradación, mostrando mayor dispersión conforme disminuye la potencia recibida.



**Figura 4.** Señal OFDM-IM transmitida a 25Km en una red de acceso PON.

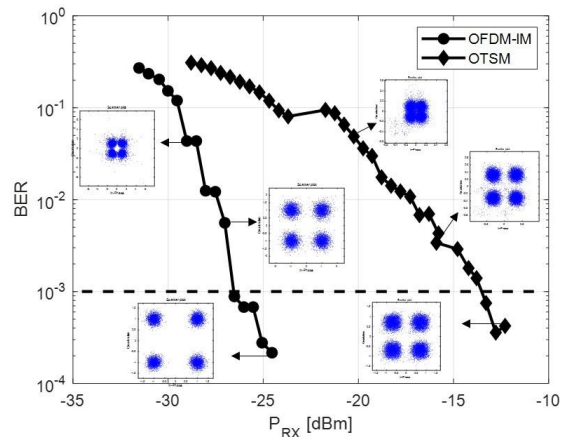
En segundo lugar, la señal OTSM fue transmitida en la red PON a medida que disminuye la potencia óptica recibida, como se observa en la Figura 5, se debe principalmente a los efectos acumulativos del ruido óptico y la no linealidad de los dispositivos fotónicos en la red PON. Al alcanzar una potencia de recepción de  $P_{RX} = -13$ , el sistema se sitúa en el límite FEC, es decir, el umbral a partir del cual la tasa de errores de bit (BER) puede ser corregida eficazmente por el sistema de codificación sin errores residuales significativos. Por debajo de ese umbral, el nivel de señal es demasiado bajo en comparación con el nivel de ruido, lo que conduce a errores de decodificación en el receptor. Esta degradación también puede estar relacionada con el ruido de ASE (Amplified Spontaneous Emission) proveniente de amplificadores ópticos, pérdida de inserción, dispersión cromática o fluctuaciones térmicas que afectan la sensibilidad del fotodetector. Las figuras insertas ilustran cómo la calidad de la señal (Diagrama de constelación) se deteriora progresivamente a medida que disminuye la potencia óptica, evidenciando que la transmisión OTSM es sensible al umbral mínimo de potencia en la recepción requerido para una decodificación fiable.



**Figura 5.** (BER)Señal OTSM

Finalmente, se presenta una comparación de las dos modulaciones multiportadoras en la Figura 6, donde se observa una mejora de aproximadamente 13 dB en la señal OFDM-IM respecto a OTSM. Esta diferencia evidencia una mayor eficiencia energética del esquema OFDM-IM, atribuible a su estrategia de modulación por índices, que selecciona un subconjunto optimizado de subportadoras activas, reduciendo interferencias y mejorando la robustez frente a distorsiones. En contraste, OTSM utiliza multiplexación temporal ortogonal, que aunque es menos compleja de implementar, presenta una menor eficiencia energética. Los diagramas de constelación incluidos muestran cómo, a potencias bajas de  $-31$  dBm, ambas señales presentan alta

distorsión, mientras que a mayores potencias, como  $-25$  dBm para OFDM-IM y  $-17$  dBm para OTSM, los puntos se agrupan claramente, indicando una mejor calidad de señal y una reducción significativa en la tasa de error de bits (BER). Esta mejora se explica por una mayor relación señal-ruido (SNR) en condiciones de alta potencia de recepción. Aunque ni OFDM-IM ni OTSM forman parte del estándar GPON, sus características y desempeño sugieren que podrían integrarse en sistemas ópticos pasivos similares, siempre que se garantice la compatibilidad con los parámetros físicos y protocolos definidos en dicho estándar.



**Figura 6.** Comparacion de la señal OFDM-IM vs OTSM

## 5. Conclusiones

Una comparación entre las señales multiportadoras propuestas para 6G, OFDM-IM y OTSM, es realizada en una red PON experimental. Los resultados experimentales demuestran que OFDM-IM logra una potencia de recepción  $P_{RX} = -26$  dBm a un  $BER = 1 \times 10^{-3}$  y OTSM de  $P_{RX} = -13$  dBm, con lo cual supera a OTSM en aproximadamente 13 dB en condiciones reales de transmisión en una red PON en 25 km de SMF. Por lo anterior, la señal OFDM-IM sería la señal multiportadora a utilizar en sistemas PON de nueva generación.

## Referencias

- [1] HF Harmuth, "Aplicaciones de las funciones de Walsh en las comunicaciones", IEEE Spectrum, vol.6, no.11, págs.82-91, noviembre de 1969.
- [2] DS Stoffer, "Análisis de Walsh-Fourier y sus aplicaciones estadísticas", J.American Statistical Association, vol.86, n.º 414, págs. 461-479. 1991. doi:10.2307/2290595

- [3] R.Wang, Introducción a las transformadas ortogonales: con aplicaciones en el procesamiento y análisis de datos, Cambridge University Press, 2012, cap.8, págs.379-411. doi:10.1017/CBO9781139015158.010 [4] P. Raviteja, K.T Phan, Yi Hong y E.Viterbo, "Cancelación de interferencias y detección iterativa para modulación ortogonal de tiempo-frecuencia-espacio", IEEE Trans. Wireless Commun., vol.17, n.º 10, págs.6501-6515, octubre de 2018
- [4] Vasquez Bonilla, F.J. (2020). Análisis del comportamiento de la señal OFDM al pasar por un canal óptico con receptor no coherente en redes PON. Escuela Politécnica Nacional. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20750>.
- [5] R.Hadani, S.Rakib, M.Tsatsanis, A.Monk, A.J.Goldsmith, A.F. Molisch y R. Calderbank, "Modulación espacial de frecuencia de tiempo ortogonal", en Proc. Comunicaciones inalámbricas IEEE. Netw. Conf. (WCNC), San Francisco, CA, EE.UU., marzo de 2017.
- [6] Jama Gómez, A.S. (2017). Dimensionamiento óptimo de redes PON con oficinas centrales redundantes. Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14040>.
- [7] (S/f). Gob.ec. Recuperado el 30 de marzo de 2025, de [https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2021/05/20210218\\_Impacto-de-5G-en-Industrias-Ecuador-Rev-F-1.pdf](https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2021/05/20210218_Impacto-de-5G-en-Industrias-Ecuador-Rev-F-1.pdf)
- [8] Arévalo, G. V., Berenice, A. T., Tipán, M. N. (2024). Convergence Test of LTE and OFDM-IM in Optical Access Networks. En Proceedings - 2024 24th International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON 2024. IEEE. Recuperado de <https://pure.ups.edu.ec/es/publications/convergence-test-of-lte-and-ofdm-im-in-optical-access-networks>
- [9] Basar, E. (2017). "OFDM-IM: An Emerging Multi-Carrier Modulation Scheme." IEEE Wireless Communications, pp 78-85.
- [10] Li, X., et al. (2021). "Performance Analysis of OFDM-IM in 6G Networks." Journal of Communication Systems, pp 120-130.
- [11] Akyildiz, I.F., et al. (2020). "Terahertz Band: Next Frontier for Wireless Communications." Frontiers in Communications and Networking.
- [12] OFDM for Next-Generation Optical Access Networks" — tutorial invitado en IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Cvijetic (2012), donde se analizan los principios, ventajas, retos y requisitos prácticos de OFDM para redes de acceso óptico
- [13] S.Dang, J.Zhou, B.Shihada y M.-S.Alouini, "Toward Spectral and Energy Efficient 5G Networks Using Relayed OFDM With Index Modulation," Frontiers in Communications and Networks, vol.2, 26 Mar. 2021.