



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

**CONVERGENCIA DE LTE Y OTSM EN REDES DE ACCESO PON**

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

AUTOR: Felipe Arturo Shiguango Pilapaxi

TUTOR: Milton Napoleón Tipán Simbaña

Quito-Ecuador

2025

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

Yo, Felipe Arturo Shiguango Pilapaxi con documento de identificación N° 2100915525;  
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, 22 de julio del año 2025

Atentamente,



---

Felipe Arturo Shiguango Pilapaxi

2100915525

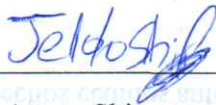
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Felipe Arturo Shiguango Pilapaxi con documento de identificación N° 2100915525, 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 el autor del Artículo Académico: “ Convergencia De Lte Y Otsm 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, 22 de julio del año 2025

Atentamente,



**Felipe Arturo Shiguango Pilapaxi**

**2100915525**

## 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: CONVERGENCIA DE LTE Y OTSM EN REDES DE ACCESO PON , realizado por Felipe Arturo Shiguango Pilapaxi con documento de identificación N° 2100915525 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

Este trabajo está dedicado a Dios, quien me ha brindado sabiduría, fuerza y perseverancia para nunca abandonar mi sueño. Gracias a Su guía, he podido superar los desafíos y nunca rendirme a lo largo de este camino académico. En momentos difíciles, Su presencia siempre estuvo conmigo, dándome el impulso necesario para seguir adelante.

A mis padres, Felipe Shiguango Cerda y María Hilda Pilapaxi, por su amor incondicional, esfuerzo y dedicación. A pesar de las adversidades que hemos enfrentado, ellos nunca dejaron de creer en mí ni en mis sueños. Gracias por su apoyo constante, por empujarme a no rendirme, y por ser mi mayor fuente de fortaleza. Este logro no solo es mío, sino también de ellos, quienes han estado a mi lado en cada paso de este recorrido.

A mis compañeros y amigos, quienes también fueron parte de este proceso. Gracias por su apoyo inquebrantable, por su confianza en mí, y por acompañarme a lo largo de este camino. A pesar de los obstáculos, siempre estuvieron allí para brindarme su ayuda y aliento. Este logro también es gracias a ellos, que nunca dejaron de creer en mí.

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi tutor, Milton Tipán, por su constante apoyo, paciencia y compromiso durante este proceso. A pesar de las dificultades, siempre estuvo dispuesto a orientarme, explicarme con claridad y brindarme ánimo. Su guía no solo fue académica, sino también personal, enseñándome a ser auténtico y a crecer como persona. Su ejemplo y dedicación dejaron una huella profunda en mi formación. Gracias por confiar en mí incluso en los momentos más complejos.

Agradezco profundamente a los ingenieros del área de telecomunicaciones y a los docentes de otras materias, quienes nunca me permitieron rendirme. Aunque enfrenté momentos de bajo rendimiento, siempre me ofrecieron una oportunidad, me exigieron y me impulsaron a superarme. Sus enseñanzas y retos fueron clave para mi formación técnica y humana. También me mostraron la importancia del trabajo en equipo y el compromiso. Su apoyo y comprensión fueron fundamentales en este camino.

A mis compañeros y amigos, gracias por acompañarme, por su apoyo incondicional y por compartir conmigo tantos momentos valiosos. Con ellos enfrentamos retos, superamos exámenes difíciles y logramos objetivos que parecían imposibles. Su ayuda fue crucial en los estudios y también en los momentos de desánimo. Las experiencias vividas juntos son recuerdos que atesoraré siempre. Este logro también les pertenece, por haber estado a mi lado en todo momento.

A una persona muy especial, a Taoni gracias por tu presencia constante, por cuidarme, animarme y apoyarme en cada etapa. Aunque no hubo ayuda económica, tu apoyo emocional fue más que suficiente para impulsarme a seguir. Estuviste pendiente de mis materias, me recordaste la importancia de seguir adelante y siempre creíste en mí. Compartir este logro contigo lo hace aún más significativo. Gracias por ser parte de este camino tan importante.

# CONVERGENCIA DE LTE Y OTSM EN REDES DE ACCESO PON

## CONVERGENCE OF LTE AND OTSM IN PON ACCESS NETWORKS

Felipe Shiguango, Milton N. Tipán

### Resumen

El artículo busca evaluar la convergencia de las señales LTE y OTSM en redes de acceso PON, analizando la distancia espectral mínima entre ellas. Las señales fueron evaluadas al transmitirse juntas usando multiplexación por división de frecuencia, OTSM en banda base y LTE en banda pasante, sobre una red PON con modulación en intensidad y detección directa. Los resultados muestran que la distancia espectral mínima es de aproximadamente 450 MHz, esto abre la posibilidad de crear sistemas convergentes con costos reducidos.

**Palabras clave:** OTSM, PON, LTE, Red de acceso

### Abstract

This article aims to evaluate the convergence of LTE and OTSM signals in PON access networks, analyzing the minimum spectral distance between them. The signals were evaluated when transmitted together using frequency-division multiplexing, baseband OTSM, and passband LTE over a PON network with intensity modulation and direct detection. The results show that the minimum distance is approximately 450 MHz, opening up the possibility of creating converged systems at reduced costs.

**Keywords:** OTSM, PON, LTE, Access Network

---

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

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

## 1. Introducción

En el mundo actual, la conectividad es un pilar fundamental para el desarrollo económico y social. Las redes ópticas pasivas (Passive Optical Network, PON) han revolucionado la infraestructura de telecomunicaciones al proporcionar acceso a internet de alta velocidad, mayor capacidad y menor consumo energético [1] en comparación con tecnologías tradicionales. Estas redes han sido ampliamente adoptadas en aplicaciones como el acceso a internet de banda ancha, redes metropolitanas y la interconexión de centros de datos [2], gracias a su arquitectura escalable y su capacidad para soportar la creciente demanda de datos [3].

Sin embargo, el incremento exponencial del tráfico de datos y la necesidad de mejorar la eficiencia espectral han planteado nuevos desafíos en la optimización de las redes PON [4]. Uno de los principales problemas radica en la elección de técnicas de transmisión que permitan maximizar el uso del ancho de banda disponible y reducir los efectos negativos de la dispersión cromática, la interferencia y la atenuación de la señal en redes convergentes [5]. En este contexto, la convergencia de señales inalámbricas de diferentes generaciones, como 4G, 5G y 6G, en redes PON es crucial para garantizar un servicio continuo y eficiente entre los usuarios [6].

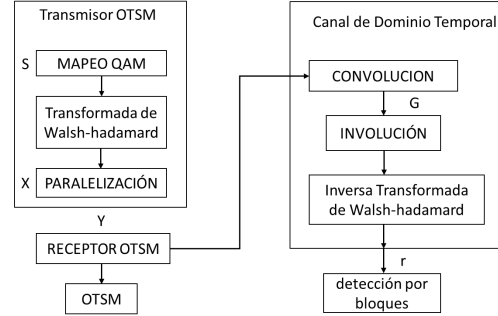
Los esquemas multiportadora utilizados en tecnologías como LTE y OTSM, juegan un papel clave en este proceso. LTE, como estándar de comunicaciones móviles desarrollado por el 3GPP, ha demostrado ser una tecnología eficiente para la transmisión de datos, con menor latencia y velocidades más altas [7]. Por otro lado, OTSM ha sido propuesta como una señal multiportadora para sistemas 6G debido a su reducido PAPR (Peak-to-Average Power Ratio), lo que la hace más eficiente en términos de consumo energético. [8] Sin embargo, OTSM requiere un mayor ancho de banda, lo que la hace más susceptible a ruido e interferencias, especialmente en redes convergentes. [8].

La poca información disponible sobre estas nuevas redes convergentes dificulta que los diseñadores de redes y proveedores de servicios tomen decisiones informadas sobre cuál de estas tecnologías es más adecuada para mejorar el rendimiento de las redes ópticas pasivas. Por ello, esta investigación busca llenar el vacío existente en estudios sobre redes convergentes para la sexta generación de señales inalámbricas, evaluando la distancia espectral mínima entre las señales LTE y OTSM en redes PON [9]. Este análisis permitirá optimizar los sistemas de comunicación óptica de próxima generación, garantizando una mejor transmisión de datos y una mayor eficiencia espectral [10].

## 2. Teoría

### 2.1. OTSM

OTSM es una alternativa a OFDM que realiza la transmisión en el dominio del tiempo en lugar de la frecuencia, proporcionando mayor robustez en escenarios con alta dispersión de canal. Aunque, menos común OTSM ofrece ventajas en términos de tolerancia a la dispersión y ha sido explorado en el contexto de redes ópticas pasivas [3].



**Figura 1.** Diagrama del transmisor de OTSM

La Figura 1, representa el esquema de transmisión de un sistema OTSM, una técnica de modulación utilizada en comunicaciones inalámbricas avanzadas, como en redes 6G. El transmisor toma una matriz de símbolos modulados  $A$  y les aplica una Transformada de Walsh-Hadamard (Walsh-Hadamard transform, WHT) [11]. Se puede ver como un esquema de recodificación en el dominio del tiempo donde los símbolos de información se dividen en bloques y cada bloque se precodifica utilizando la WHT(1).

$$\tilde{A} = A \cdot WN \quad (1)$$

Donde:

- $WN$  es la matriz de Walsh-Hadamard de tamaño  $N$ .
- $A$  es la matriz de datos de tamaño correspondiente.
- $\tilde{A}$  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. Consideramos donde

$T\Delta f = 1$ , es decir, la señal OTSM se muestrea críticamente para cualquier forma de onda de conformación de pulso como se observa en la ecuación (2).

$$\mathbf{A} = [a_0, a_1, \dots, a_{M-1}] \quad (2)$$

La ecuación (3) nos muestra la matriz  $X$  y 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.

$$s = \text{vec}(\tilde{\mathbf{A}}) \quad (3)$$

La operación del transmisor anterior se puede expresar en forma de matriz simple como se observa en la ecuación (4):

$$s = P \cdot (I_M \otimes W_N) \cdot A \quad (4)$$

En la ecuación (5) se observa que  $P$  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  $X$  y  $Y$ .

$$X \otimes Y = P \cdot (Y \otimes X) \cdot P^T \quad (5)$$

Además, dado que  $P$  es una matriz de permutación,  $P^T = P^{-1}$ . Utilizando la propiedad de mezcla perfecta en la ecuación (6), la operación del transmisor en donde se puede simplificar:

$$s = (W_N \otimes I_M) \cdot (P \cdot a) \quad (6)$$

Las muestras en el dominio del tiempo, con forma de pulsos, son convertidas de formato digital a analógico y transmitidas a través del canal inalámbrico como la señal  $s(t)$ . En el receptor,  $r(t)$  luego de la conversión de la señal analógica a digital y el proceso de muestreo, se realiza la inversión de las operaciones llevadas a cabo en el transmisor con el objetivo de demodular las muestras recibidas en el dominio temporal. Sea  $r$   $CNM \times 1$  el vector que representa la señal en el dominio temporal tras pasar por el bloque de entrada de RF y el muestreo realizado por el conversor analógico-digital (ADC). Los símbolos de información recibidos, denotados por  $y$  y se reorganizan en la matriz  $B$  un proceso de replegado por columnas, tal como se indica en la ecuación correspondiente. (7):

$$\tilde{B} = \text{vec}^{-1}(\cdot) \quad (7)$$

Los símbolos de información recibidos se obtienen tomando un WHT de punto  $N$  de las muestras de tiempo de retardo recibidas  $B$   $[.]$  como se puede observar en las ecuaciones(8), (9) .

$$B = [B_0, B_1, \dots, B_{M-1}] \quad (8)$$

$$T = \tilde{B} \cdot W_N \quad (9)$$

En resumen, la selección entre OFDM-IM y OTSM en redes PON debe basarse en una evaluación detallada de las necesidades de eficiencia espectral, tolerancia a la dispersión y capacidad de procesamiento de la red en cuestión [3] .

## 2.2. LTE

LTE es un estándar de comunicaciones móviles desarrollado por el Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) como una evolución natural de las redes 3G como se observa en la Figura 2. LTE permite una mayor eficiencia en la transmisión de datos, menor latencia y velocidades más altas, lo que lo convierte en una base fundamental para aplicaciones modernas que requieren alta capacidad y velocidad de conexión [7]

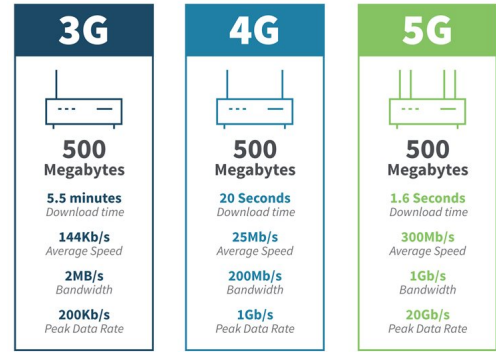
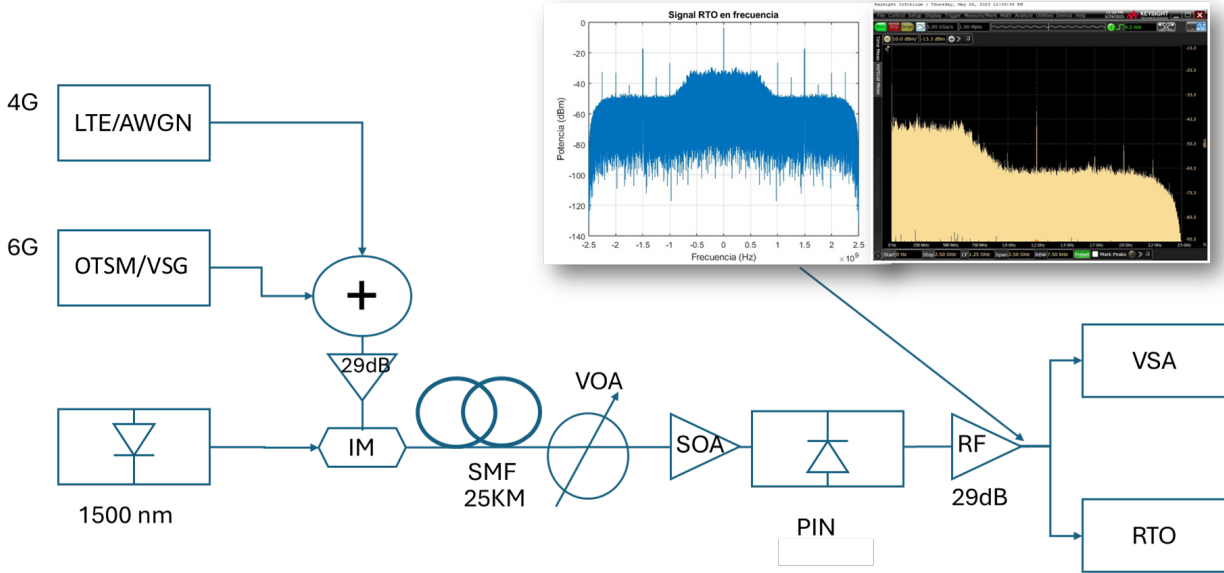


Figura 2. Gráfica de la evolución de la tecnología LTE [12]

Las señales LTE presentan múltiples avances técnicos, como la utilización de esquemas de modulación adaptativa (QPSK, 16-QAM, 64-QAM) que optimizan la transmisión según las condiciones del canal [13]. En el enlace descendente, LTE emplea un Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA*), permitiendo dividir el ancho de banda total en subportadoras independientes. Para el enlace ascendente se usa un Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (*Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access, SC-FDMA*), favoreciendo la eficiencia energética de los dispositivos móviles [14].

Además, LTE soporta diferentes anchos de banda (1.4 MHz a 20 MHz), lo que lo hace adaptable a diversos entornos de red. También integra técnicas Múltiple Entrada Múltiple Salida (*Multiple Input Multiple Output, MIMO*), mejorando el rendimiento del canal de comunicación mediante el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción [15].

## 3. Configuración de la simulación



**Figura 3.** Configuración experimental LTE y OTSM en una red PON.

Se diseñó e implementó un sistema experimental para analizar la convergencia de las tecnologías LTE y OTSM en una red PON. El transmisor y el receptor de la señal OTSM en banda base con un ancho de banda de 750 MHz, fueron implementados en Matlab® 2020b y está fue cargada en un generador arbitrario de señales (Arbitrary Waveform Generator, AWG) con una frecuencia de muestreo  $F_s = 1.25$  GSa/s, mientras que la señal LTE fue generada por un generador de señales vectoriales (Vectorial Signal Generator, VSG), a una frecuencia de portadora de 1,5 GHz y un ancho de banda de 10 MHz. Estas señales fueron sumadas y amplificadas por un amplificador de radio frecuencia (Radio Frequency, RF) de 29 dB.

Luego, inyectadas en un modulador en intensidad (Intensity Modulation, IM) óptico, con una tensión de polarización ( $V_{bias}$ ) de 4,5 V, el cual modula la portadora óptica generada por un láser de cavidad externa (External Cavity Laser, ECL) que opera a 1550 nm y lo transmite por una fibra óptica monomodo (Single Mode Fiber, SMF) de 25 km, además se introdujo un atenuador óptico variable (VOA) para simular la distribución multiusuario.

En la etapa de recepción, la señal se amplifica mediante un amplificador óptico semiconductor (SOA) y posteriormente se detecta mediante un fotodiodo PIN de responsividad  $R = 0.8 \frac{A}{W}$ , que convierte la señal óptica en una señal eléctrica.

Finalmente, La señal eléctrica se capturó mediante un osciloscopio en tiempo real (RTO), lo que permitió la observación independiente de los espectros LTE y OTSM. Los datos se extrajeron para su posterior procesamiento en Matlab®, donde se evaluaron métricas de la tasa de error de bit (BER) para el límite

de corrección de errores hacia adelante (FEC) para un  $BER = 1 \times 10^{-3}$  y la magnitud vectorial del error (EVM) para la señal LTE, la cual fue recuperada mediante un analizador vectorial de señales (VSA).

## 4. Resultados y análisis

El experimento fue iniciado con la transmisión en conjunto de las señales OTSM en banda base y en banda pasante la señal LTE, con una potencia de transmisión  $P_{tx} = -19$  dBm a una frecuencia de 1.5 MHz, con 0 dBm de potencia de transmisión óptica luego del modulador IM y  $V_{bias}$  de 3.7 V a una atenuación de 5 dB en el VOA, estos valores fueron obtenidos de una optimización previa.

La Figura 4, muestra el desempeño de la señal LTE respecto al EVM para diferentes valores de la potencia óptica recibida (PRX), un buen desempeño de la señal LTE es obtenido en PRX de -30.73 dBm y -11.57 dBm, ya que se tienen valores de EVM por debajo del límite FEC, el cual corresponde a 33.62% y 6.91%.

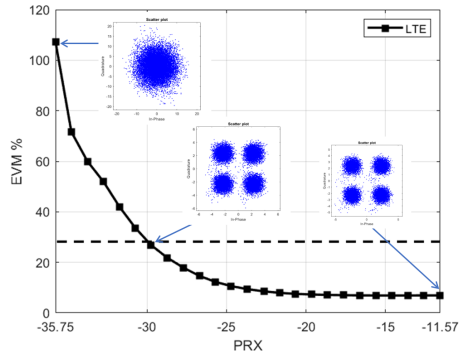


Figura 4. EVM vs PRX de las señal LTE convergente

Del mismo modo, se puede observar en la Figura 5 que la señal OTSM también supera el límite FEC cuyo valor es de  $2.9297 \times 10^{-4}$ , con lo cual se comprueba que las dos señales coexisten en el enlace PON, esto es corroborado por los diagramas de constelaciones insertos en las figuras.

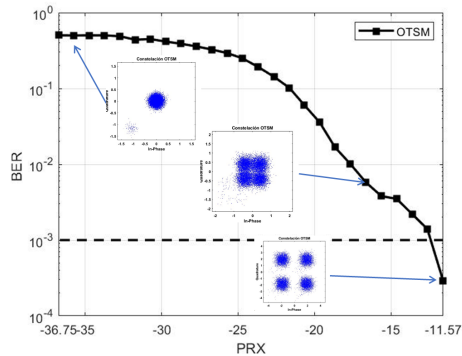


Figura 5. EVM vs PRX de las señal OTSM convergente

Entonces, se procedió a variar la frecuencia de la portadora de la señal LTE desde 800 MHz hasta 1.5 GHz. Los resultados se observan en la Figura 6, donde el peor EVM fue de 7.07% a una frecuencia de 1.16 GHz y el mejor EVM fue de 6.49% a una frecuencia de 1.2 GHz.

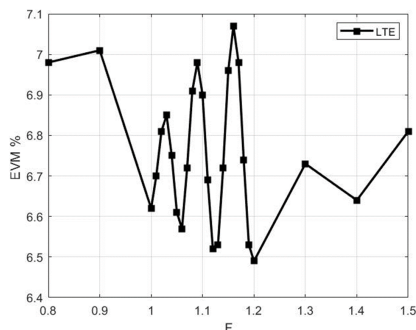


Figura 6. Variación de Frecuencia

Finalmente, la señal OTSM fue evaluada al mismo tiempo respecto al BER, cuyo mínimo valor fue de  $5.4 \times 10^{-4}$  y se dio a una frecuencia de 1.18 GHz, como se observa en la Figura 7.

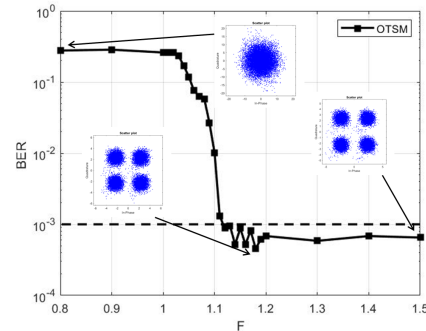


Figura 7. BER

En ambas figuras, se observa que existe una oscilación tanto del EVM como del BER, estas se deben a los armónicos generados en estas frecuencias debido al desacoplamiento en la unión T usada para las unir las señales multiportadora, como se observa en el espectro insertado en la Figura 3.

## 5. Conclusiones

Una red convergente de las señales LTE y OTSM fue evaluada en términos del EVM y el BER respectivamente para obtener la distancia mínima de separación entre estas dos señales multiportadoras. El mejor punto de operación para LTE fue de  $EVM = 6.49\%$  a una frecuencia de 1.2 GHz y para OTSM fue de  $BER = 5.4 \times 10^{-4}$  a una frecuencia de 1.18 GHz. Ya que es una convergencia hacia 6G la frecuencia de operación de LTE sería de 1.18 GHz obteniéndose una distancia respecto a OTSM de aproximadamente 430 MHz. Los hallazgos obtenidos durante este estudio evidencian que la convergencia de las señales LTE y OTSM en redes de acceso PON es técnicamente factible, este estudio establece los cimientos para la creación de arquitecturas ópticas convergentes que se ajusten a las demandas de las redes de nueva generación, proporcionando soluciones útiles para la implementación de sistemas de telecomunicación más sólidos, eficaces y sustentables.

## Referencias

- [1] T. Horvath, P. Munster, V. Oujezsky, and N.-H. Bao, "Passive optical networks progress: A tutorial," *Electronics*, vol. 9,

- no. 7, p. 1081, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/7/1081>
- [2] Fortune Business Insights, “Global passive optical network market forecast, 2022–2030,” <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/04/03/2639471/0/en/Passive-Optical-Network-Market-Size-Expected-to-Reach-USD-35-59-Billion-at-a-14-5-CAGR-by-2030.html>, 2023, market size was USD 12.27 billion in 2022, projected USD 35.59 billion by 2030 at 14.5% CAGR.
- [3] G. A. Gómez-Agredo and J. G. López-Perafán, “Eficiencia espectral de formatos de modulación avanzados en redes xgs-pon,” *Visión electrónica*, vol. 2, no. 1, pp. 30–39, 2019. [Online]. Available: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/18408/17353>
- [4] A. Girón, E. Rivera, and G. Gómez, “Measurement of the spectral efficiency of a heterogeneous network architecture of the ng-pon type for a quasi-linear propagation regime,” *Entropy*, vol. 24, no. 4, p. 481, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1099-4300/24/4/481>
- [5] F. D. Costales Vallejo, “Comparación del desempeño de las modulaciones pam-2, pam-4 y pam-8 en la transmisión de datos a alta velocidad en redes pon de nueva generación (ng-pon),” 2020. [Online]. Available: <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/27887>
- [6] M. Sumaila, “Filter bank multicarrier waveforms for future wireless networks,” Ph.D. thesis, University of Sheffield, 2021. [Online]. Available: [https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/29904/1/Sumaila\\_thesis\\_final.pdf](https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/29904/1/Sumaila_thesis_final.pdf)
- [7] 3GPP. (2022) The lte network architecture. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org>
- [8] C. D. Quilindo Mendez, E. F. Hoyos Zúñiga, and G. A. Gómez Agredo, “Efecto de la técnica de modulación m-qam para una infraestructura de red convergente radio sobre fibra (rof),” *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 39, no. 1, pp. 66–85, 2021.
- [9] F. Slyne, C. Browning, A. Delmade, L. P. Barry, and M. Ruffini, “Experimental demonstration of network convergence with coherent and analog radio-over-fibre signals for densified 5.5g/6g small cell networks,” *arXiv preprint*, 2023, arXiv:2302.04915.
- [10] O. J. Cicero, C. A. Astudillo, G. B. Figueiredo, Z. Zhu, and N. L. S. da Fonseca, “Passive optical networking for 5g and beyond 5g low-latency mobile fronthauling services,” *arXiv preprint*, 2021, arXiv:2109.08989.
- [11] T. Thaj and E. Viterbo, “Orthogonal time sequence multiplexing modulation,” in *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Nanjing, China, 2021, pp. 1–7.
- [12] J. A. Londoño, “Aspectos básicos de 4g,” 2012. [Online]. Available: <https://bibliotecadigital.iue.edu.co/handle/20.500.12717/448>
- [13] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Cambridge University Press, 2024, <https://www.cambridge.org/core/books/wireless-communications-principles-and-practice/1009489836>.
- [14] M. H. Rahman, S. F. Al-Sarawi, K. Eshraghian, and D. Abbott, “Integration of lte-m and nb-iot for smart grid communications: A survey,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 102 573–102 593, 2021.
- [15] FS Community. (2025) Passive optical network tutorial. Recuperado el 31 de marzo de 2025. [Online]. Available: <https://community.fs.com/es/article/passive-optical-network-tutorial.html>