

Análisis de un Sistema De Comunicación Óptico Empleando las Técnicas De Multiplexación Fdm Y Ofdm.

Analysis Of an Optical Communication System Using The Fdm And Ofdm Multiplexing Techniques.

Peñaranda-Villalba, Valentina¹, Ropero-Torres Dionel², Puerto-López, Karla Cecilia³, García-Ortiz, Luilly Alejandro⁴

¹ Estudiante de Ingeniería Electrónica. Departamento de Electricidad y Electrónica. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8202-5372> E-mail: valentinapv@ufps.edu.co

² Ingeniero Electrónico. Departamento de Electricidad y Electrónica. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1329-5154> E-mail: dionelrt@ufps.edu.co

³ M. Sc. Ingeniería en Telecomunicaciones, Departamento de Electricidad y Electrónica, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3749-676X> E-mail: karlaceciliapl@ufps.edu.co

⁴ Estudiante de Doctorado en Ingeniería Eléctrica, Laboratorio de Optimización de Proyectos Asistidos – LOPAC, Universidad Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5167-2585> E-mail: luillygarcia@ufmg.br

Recibido: 13/04/2021

Aceptado: 19/05/2021

Cite this article as: V. Peñaranda Villalba, D. Ropero Torres, K. Puerto López, Luilly A. G. Ortiz “Análisis de un Sistema de Comunicación Óptico empleando las técnicas de Multiplexación FDM y OFDM” *Prospectiva*, Vol.19, N°2,2021.

<https://doi.org/10.15665/rp.v19i2.2708>

RESUMEN

En este artículo se presenta el análisis comparativo de un sistema óptico empleando las técnicas de multiplexación por división de frecuencias (FDM) y multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), en una fibra óptica monomodo estándar de 50 km de longitud, con atenuación de la fibra de 0.22 dB/km y de 0.22 dB en acoples cada 2 km. Como parámetros evaluativos se emplearon la tasa de error de modulación (Modulation Error Rate, *MER*), la medición del error de la magnitud (Error Vector Magnitude, *EVM*) y la relación señal a ruido (Signal-to-Noise Ratio, *SNR*). Se concluye que, al trabajar con frecuencias altas, el diagrama de constelación de FDM no se muestra eficiente por lo que presenta puntos en los cuales no llega la trama de bits, indicando una pérdida significativa en la información. La magnitud de error vectorial, la tasa de error de modulación y la relación señal a ruido para OFDM presentaron una reducción del 24.39%, 75.7% y 10.34% respectivamente. Por esta razón, el mejor modelo de multiplexación para el tráfico de datos a frecuencias altas es la multiplexación OFDM.

Palabras clave: Sistema de comunicación óptico, fibra óptica, técnicas de multiplexación, FDM, OFDM.

ABSTRACT

This article presents the comparative analysis of an optical system using frequency division multiplexing (FDM) and orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) techniques, in a standard 50KM long single-mode optical fiber with length equal to 50 km, with attenuation of fiber of 0.22 dB/km and 0.22 dB in couplings every 2 km. The modulation error rate (MER), the magnitude error measurement (Error Vector Magnitude, EVM) and the signal-to-noise ratio (Signal-to-Noise Ratio, SNR) were used as evaluative parameters. It is concluded that, when working with high frequencies, the FDM constellation diagram is not efficient because it presents points in which the bit frame does not arrive, indicating a significant loss in information. The vector error magnitude, the modulation error rate and the signal-to-noise ratio for OFDM presented a reduction of 24.39%, 75.7% and 10.34%, respectively. For this reason, the best multiplexing model for high-frequency data traffic is OFDM multiplexing.

Keywords: Optical communication system, optical fiber, multiplexing techniques, FDM, OFDM.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de un sistema de comunicaciones, es transferir información de un lugar a otro. Por lo tanto, se puede decir, que las comunicaciones son la transmisión, recepción y procesamiento de información entre dos o más lugares [1]. No obstante, el tráfico en las redes ha aumentado y hoy en día, los usuarios demandan una conexión inalámbrica permanente a una alta velocidad de transmisión de datos[2], [3]. Por esta razón, surge la Fibra óptica prometiendo una alternativa capaz de suplir tal demanda [4].

La Fibra Óptica es un medio físico de transmisión de información, que consiste en un filamento delgado de vidrio o plástico, a través del cual viajan pulsos de luz láser o led, en la cual se contienen los datos a transmitir [5]. Uno de los aspectos más importantes para tener en cuenta, es que la fibra óptica es inmune a las interferencias electromagnéticas [6].

Asimismo, se encuentran diferentes tipos de multiplexación, los cuales permiten transmitir múltiples señales en diferentes portadoras como, por ejemplo, la Multiplexación por División de Frecuencia, FDM, la cual es una técnica analógica que se puede aplicar cuando el ancho de banda de un enlace es mayor que los anchos de banda de las señales a transmitir combinados [1]. Por otro lado, se encuentra la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) que es el método de modulación más empleado en la actualidad en sistemas inalámbricos. Esta multiplexación consiste en enviar un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias [7].

En este artículo es presentado el modelado, la simulación y el análisis de un sistema de comunicación óptico para una red de acceso empleando las técnicas FDM y OFDM, en una fibra óptica monomodo estándar de 50KM de longitud, con atenuación de fibra de 0.22 dB/km y de 0.22 dB en acoples colocados a cada 2km. La simulación fue realizada por medio de la herramienta computacional, MATLAB. Para cada multiplexación fueron utilizados dos tipos de modulación: Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (Quadrature Phase-Shift Keying, *QPSK*) y la modulación 8PSK. El análisis del sistema óptico fue realizado calculando primero el diagrama de constelación: se usa para cuantificar el rendimiento de un transmisor o receptor de radio digital, en otras palabras, es una medida de la calidad de la señal [8]; segundo el error de la magnitud del vector (Error Vector Magnitude, *EVM*) [9]; por último, la tasa de error de modulación (Modulation Error Rate, *MER*): es la diferencia entre la señal que entra con respecto a la ideal, se expresa en decibelios; cuanto más cercanos estén los puntos en la constelación mejor será la señal [10]. Del análisis es concluido que la magnitud de error vectorial, la tasa de error de modulación y la relación señal a ruido para OFDM presentaron una reducción del 24.39%, 75.7% y 10.34% respectivamente. De esta forma, la multiplexación OFDM es la más indicada para el tráfico de datos a altas frecuencias.

Este artículo está dividido de la siguiente forma: en la sección 2 se detalla la metodología a utilizar para el desarrollo del trabajo; en la sección 3 se encuentran los resultados obtenidos y su respectivo análisis. Y finalmente, se enuncian las conclusiones de esta investigación.

2. METODOLOGÍA

El estudio realizado se basa en un análisis comparativo de un sistema óptico empleando las técnicas FDM y OFDM, con el objetivo de encontrar el mejor modelo de multiplexación para el tráfico de datos a frecuencias altas. Para llevar a cabo la simulación del sistema de comunicaciones óptico, fue necesario utilizar MATLAB, para de esta forma, evaluar el sistema mediante el análisis de parámetros como velocidad de transmisión, potencia y frecuencia, comparando las técnicas de multiplexación dichas anteriormente [11].

FDM, es una técnica usada en las telecomunicaciones que se puede aplicar cuando el ancho de banda de un enlace es mayor que los anchos de banda combinados de las señales a transmitir. Esta técnica, permite que por un solo medio de transmisión ya sea el espectro de radio, un cable o fibra óptica se pueda transportar múltiples señales independientes en el mismo vínculo [1]. Por otro lado, OFDM, es una multiplexación que consiste en enviar la información modulando en QAM (Modulación de Amplitud en Cuadratura) y en PSK (Modulación por desplazamiento de fase) un conjunto de portadoras de diferente frecuencia [12]. Lo que diferencia OFDM de otros procedimientos de multiplexación en frecuencia es la ortogonalidad, pues el espaciamiento adecuado entre portadoras es un espaciamiento óptimo. Este espaciamiento consiste en que la separación espectral entre portadoras consecutivas es siempre la misma e igual al inverso del periodo de símbolo, de esta manera la señal OFDM se puede expresar, en notación compleja, como se muestra en la Ecuación 1[13].

$$s(t) = \sum_{i=\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} d_i \exp \left[j2\pi \left(f_c + \frac{i}{T} \right) t \right] \quad (1)$$

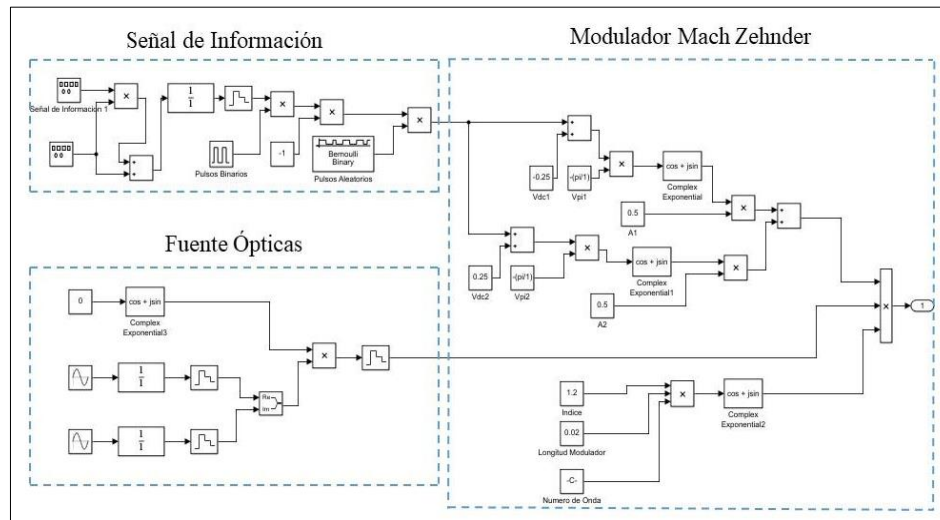
Donde:

- f_c es la frecuencia central
- T es el periodo de símbolo
- d_i es el símbolo que lleva la información
- $s(t)$ es la señal OFDM en el tiempo
- N es el número de subportadoras

A través de MATLAB, se desarrolló un modelo de la etapa de transmisión del sistema de comunicaciones, tanto para FDM como para OFDM [14]. En la Figura 1, se observa el modelo de la generación de señal en FDM, donde se hizo necesario llevar un esquema por separado para cada una de las señales a transmitir. Paralelamente, se ilustran tres subsistemas que consisten en la generación de la señal de información, junto con su portadora analógica, su respectiva modulación en doble banda lateral y su conversión análogo-digital. Igualmente, se realiza el modelo del modulador óptico externo Mach-Zehnder [15], y finalmente, se encuentra una fuente óptica o láser de inyección, el cual emite una portadora en el espectro óptico con una longitud de onda central.

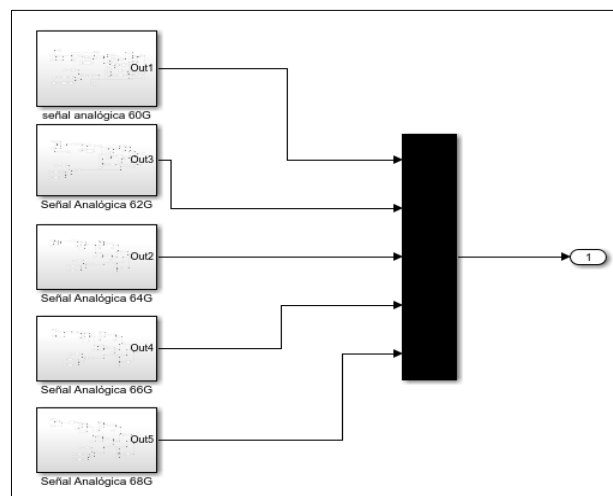
Figura 1. Modelo de la generación de la señal FDM.

Figure 1. Model of the FDM signal generation.



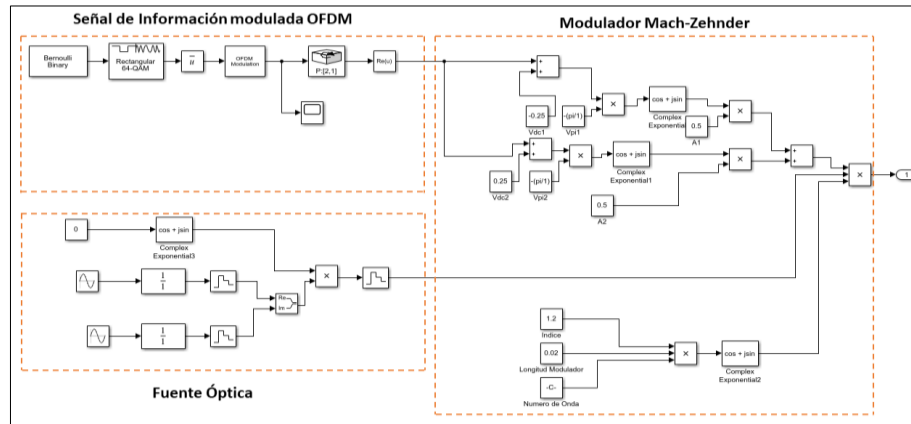
Luego de ejecutar el modelado de cada una de las señales de entrada, se procede a comprimir cada una de las señales en un subsistema para de esta forma entregarlas al multiplexor. La Figura 2 expone el modelo resultante, en donde entran cinco señales generadas y previamente moduladas para ser entregadas a la fibra, teniendo como resultado una única señal.

Figura 2. Modelo de la multiplexación FDM.
Figure 2. FDM multiplexing model.



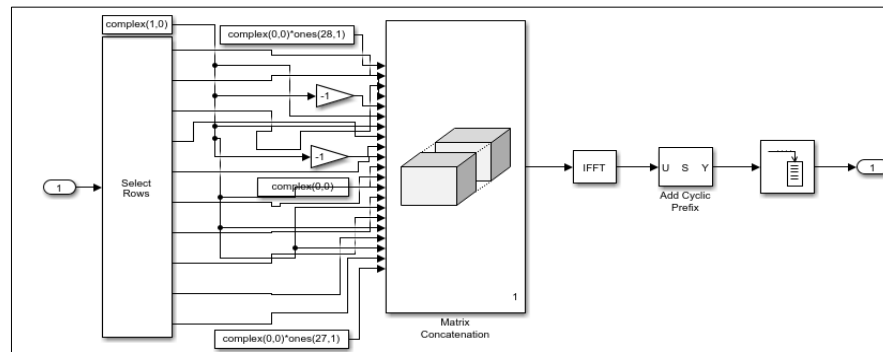
Por otra parte, para ejecutar el modelo de la etapa de transmisión del sistema de comunicaciones en OFDM, es necesario trabajar con una sola señal. Para esta multiplexación se requiere que el sistema se divida en tres subsistemas como se puede ver en la Figura 3, en donde el primer subsistema consta de una señal de entrada de pulsos binarios, llamada trama de bits. El segundo subsistema es el Modulador Mach-Zehnder, y, por último, el tercer subsistema está compuesto por una fuente óptica.

Figura 3. Modelo de la generación de la señal OFDM.
Figure 3. OFDM model signal generation.



Se realiza un mapeo de la señal mediante un modulador PSK, entregando de esta forma, una señal mapeada en la constelación al modulador OFDM, como se ilustra en la Figura 4, en donde se lleva a cabo la Transformada Inversa de Fourier, la cual sirve en la modulación para asegurar la ortogonalidad entre las señales, evitando que entre ellas se solapen o se superpongan unas con las otras [16].

Figura 4. Modulador OFDM.
Figure 4. OFDM modulator.



Luego de que la señal salga del modulador OFDM, se hace una conversión de paralelo a serie para ser acondicionada o modulada en el espectro óptico mediante el modulador Mach-Zehnder. Finalmente, la señal de información que recibe el modulador Mach-Zehnder es una señal real y se implementa enviando la magnitud de la señal.

3. RESULTADOS Y ANALISIS

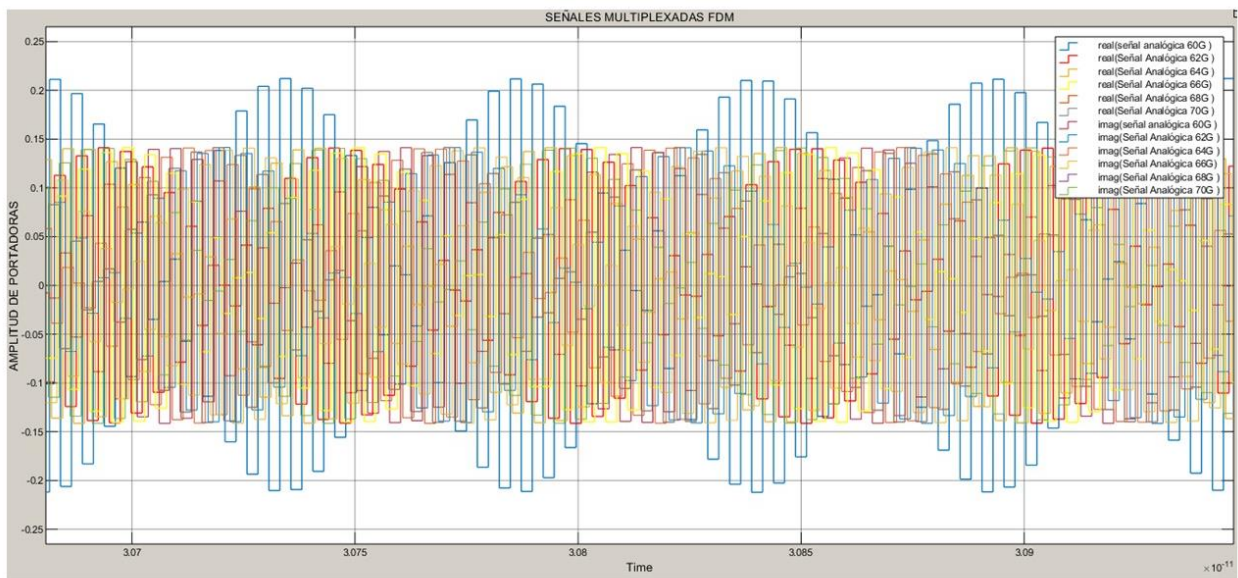
Después de realizar el modelado de FDM y OFDM, se procede a plasmar los resultados obtenidos de cada una de las simulaciones, en donde se podrá observar las señales multiplexadas, la salida de la fibra, los diagramas de constelación y el análisis en espectro.

A. Multiplexación por División de Frecuencia

Como parte inicial, en la Figura 5 es observado la forma de las 6 señal emitida en la multiplexación FDM. Con estas señales se puede evaluar el sistema de transmisión óptico, teniendo como resultado, señales viajando por un mismo canal, de forma ordenada y en donde no hay solapamiento.

Figura 5. Señales multiplexadas FDM.

Figure 5. FDM multiplexed signals.



Posteriormente, se realiza el análisis de la señal en el dominio del tiempo. Se evalúan los valores máximos y mínimos de la Figura 5, el valor pico a pico y el valor promedio RMS a partir de las mediciones estáticas de la señal. Esos datos son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Medición Estática de la señal multiplexada FDM

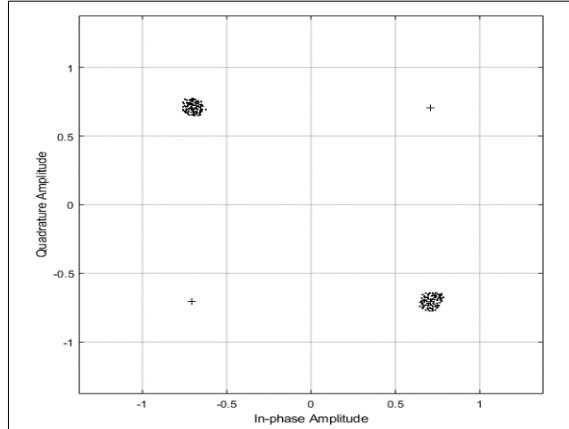
Table 1. Static Measurement of the FDM multiplexed signal

| Medición | Valor |
|------------------|---------|
| Punto Máximo (V) | 0.212 |
| Punto Mínimo (V) | -0.2117 |
| Pico a Pico (V) | 0.438 |
| RMS (V) | 0.159 |

Seguidamente, se realiza la conexión de la señal a la modulación QPSK, quien a la salida tiene cuatro diferentes fases resultantes como se ilustra en la Figura 6, en donde se analiza que los datos no corresponden a los puntos ideales, ya que, solo están llegando a dos de las cuatro fases.

Figura 6. Diagrama de constelación en la modulación QPSK en FDM.

Figure 6. Constellation diagram in QPSK modulation in FDM.



De igual forma, en la Figura 7 es presentado el diagrama de constelación para la modulación 8PSK en FDM. En comparación con QPSK, esta modulación indica mejoras debido a que la señal presenta algunas pérdidas solamente en una de las ocho fases. El error de EVM, MER y la relación SNR para QPSK y 8PSK son presentados en la Tabla 2. Los resultados son expresados en decibelios para su expresión original y porcentual para sus valores pico y promedio. Es observado que hay un aumento en EVM y SNR de 83.79% y 46.36%, respectivamente y una disminución de MER del 83.79% en comparación con la modulación QPSK.

Figura 7. Diagrama de constelación en la modulación 8PSK en FDM.

Figure 7. Constellation diagram in 8PSK modulation in FDM.

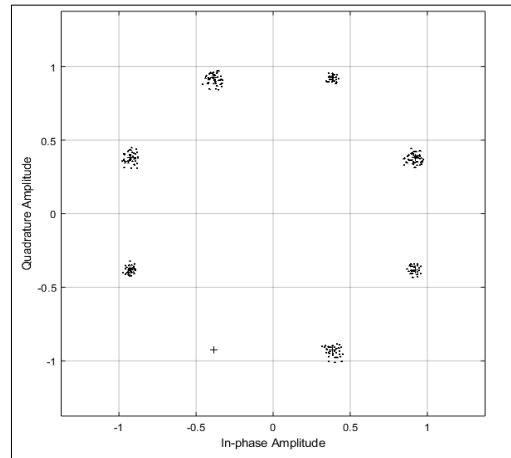


Tabla 2. Evaluación del diagrama de constelación QPSK y 8PSK en FDM.

Table 2. Evaluation of the QPSK and 8PSK constellation diagram in FDM.

| Variable | QPSK | 8PSK |
|-------------------|--------|--------|
| RMS EVM (%) | 7.2 | 39 |
| Pico EVM (%) | 7.2 | 39 |
| Promedio EVM (dB) | -50.6 | -8.2 |
| Pico EVM (dB) | -50.6 | -8.2 |
| Pico MER (dB) | 50.6 | 8.2 |
| SNR (dB) | -34.08 | -18.28 |

Asimismo, se evaluó el espectro de la señal que entra a la fibra, como se detalla en la Figura 8, en donde se muestran cinco picos de frecuencia, siendo estos los picos más significativos de las señales multiplexadas. En la Tabla 3, se observa la potencia en el canal de transmisión, el ancho de banda ocupado, la frecuencia de error, la frecuencia portadora, la distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion, *THD*), señal a ruido y distorsión de radio (Signal to Noise and Distortion Ratio, *SINAD*), el rango dinámico libre de espurios (Spurious-Free Dynamic Range, *SFDR*) y SNR.

Figura 8. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión en FDM
Figure 8. Spectrum analysis at the input of the transmission channel in FDM

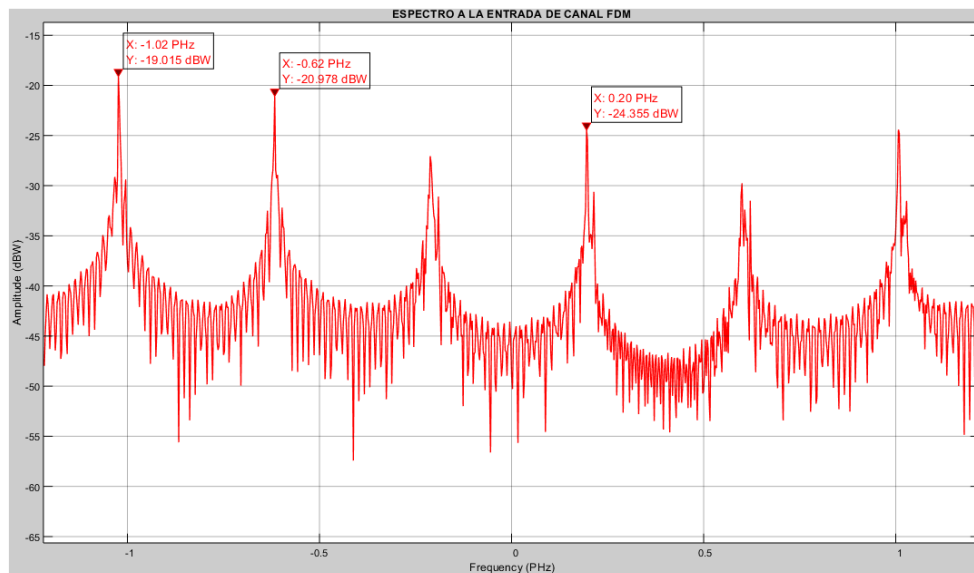


Tabla 3. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal en FDM
Table 3. Evaluation of the spectrum analysis at the input of the channel in FDM

| Variable | Dato |
|-------------------------------------|-------------|
| Potencia en el canal de transmisión | -20.015 dBW |
| Ancho de banda ocupado | 194.17 THz |
| Frecuencia de error | -0.911 THz |
| Frecuencia de portadora | 507.73 THz |
| THD | -6.9 dBc |
| SINAD | -12.16 dBc |
| SFDR | 0.65 dBc |
| SNR | -12.16 dBc |

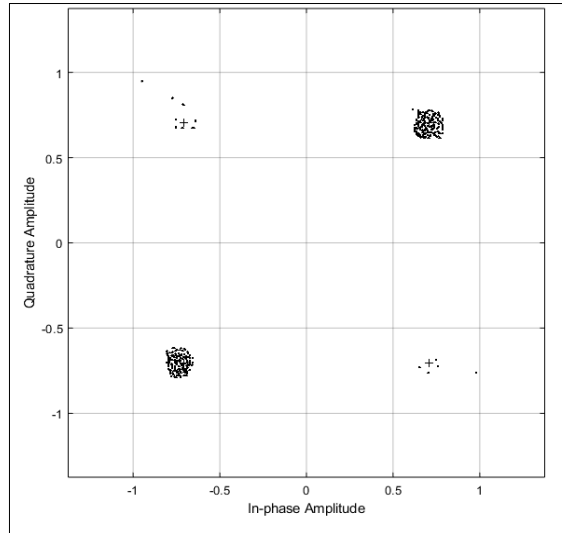
B. Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal

En esta sección es presentado el análisis de la transmisión de datos en OFDM. El mapa de constelación resultante de transmitir datos mediante la modulación QPSK es presentado en la Figura 9. Los datos llegan

a todos los puntos, sin embargo, en dos de los cuatro puntos presenta una baja intensidad de datos representado pérdida parcial de la información. No en tanto, la pérdida parcial de información es menor en comparación con FDM.

Figura 9. Diagrama de constelación en la modulación QPSK en OFDM.

Figure 9. Constellation diagram in OFDM QPSK modulation.



Para el análisis de frecuencia se realizó una medición antes de que señal entrara al canal de transmisión, como se expone en la Figura 10, en la cual se muestran varias alteraciones de la señal debido a las diferentes portadoras en la que viaja la información. En la Tabla 4, se detalla su respectivo análisis.

Figura 10. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión QPSK en OFDM.

Figure 10. Spectrum analysis at the input of the QPSK transmission channel in OFDM.

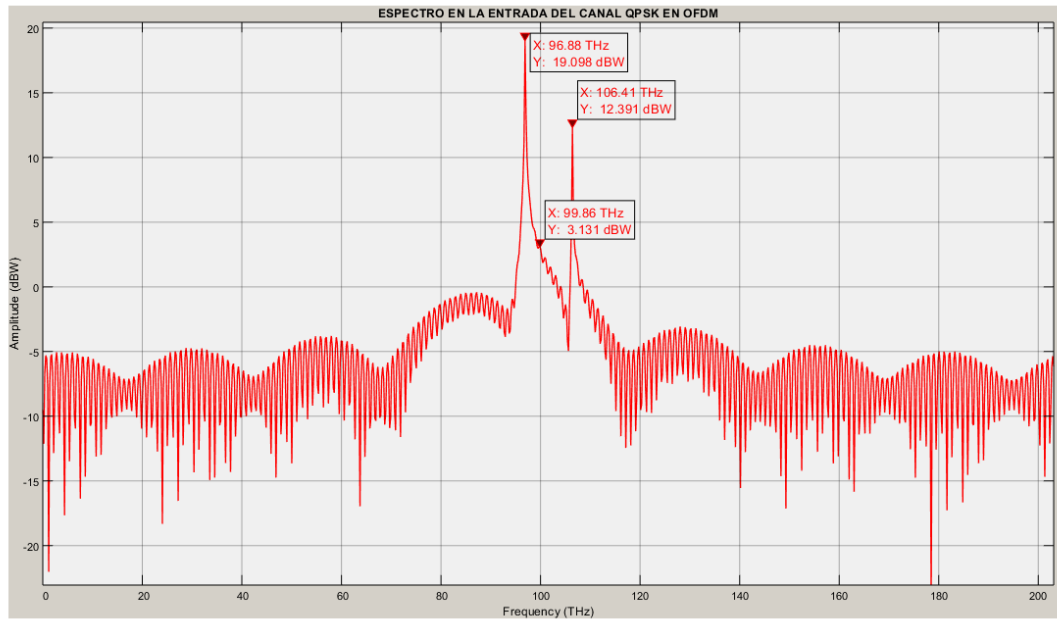


Tabla 4. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal QPSK en OFDM

Table 4. Evaluation of the spectrum analysis at the input of the QPSK channel in OFDM

| Variable | Dato |
|-------------------------------------|------------|
| Potencia en el canal de transmisión | -22.7 dBW |
| Ancho de banda ocupado | 37.091 THz |
| Frecuencia de error | -0.289 THz |
| Frecuencia de portadora | 40.62 THz |
| THD | -24.65 dBc |
| SINAD | -10.19 dBc |
| SFDR | 1.19 dBc |
| SNR | -10.19dBc |

Por último, se realiza el diagrama de constelación para la transmisión 8PSK en OFDM y presentado en la Figura 11. El diagrama indica algunos puntos de dispersión en las fases, pero de igual forma muestra una transmisión de datos limpia, indicando efectividad en el sistema. En la Tabla 5, se muestran los resultados del error EVM, MER y la relación SNR para QPSK y 8PSK, en donde se evidencia un aumento en EVM y SNR del 17.07% y 7.48%, en comparación con la modulación QPSK en OFDM. Presentándose una mejoría del error EVM y la relación SNR, con respecto a la transmisión en 8PSK en FDM del 24.39% y 10.33%, respectivamente.

Figura 11. Diagrama de constelación para la modulación 8PSK en OFDM.

Figure 11. Constellation diagram for 8PSK modulation in OFDM.

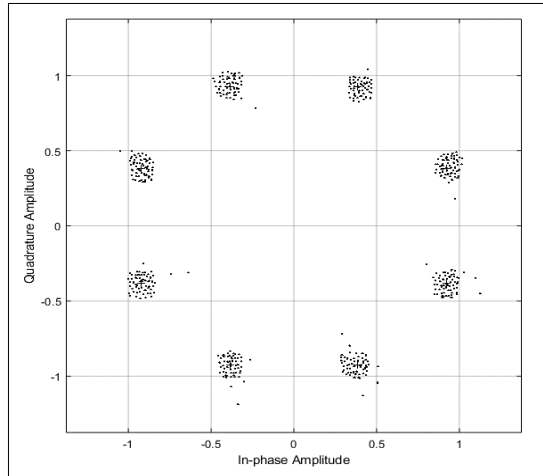


Tabla 5. Evaluación del diagrama de constelación QPSK y 8PSK en OFDM

Table 5. Evaluation of the QPSK and 8PSK constellation diagram in OFDM

| Variable | QPSK | 8PSK |
|-------------------|-------------|-------------|
| RMS EVM (%) | 32.4 | 28.3 |
| Pico EVM (%) | 32.4 | 28.3 |
| Promedio EVM (dB) | -12.3 | -10.2 |
| Pico EVM (dB) | -12.3 | -10.2 |
| Pico MER (dB) | 12.3 | 10.2 |
| SNR (dB) | -21.8 | -20.17 |

El estudio del análisis en frecuencia se observa en la Figura 12, la cual muestra algunas variaciones debido a las diferentes portadoras que la multiplexación OFDM aporta. En la Tabla 6, se pueden ver los datos en diferentes variables medidas, en donde los resultados son expresados en decibeles referidos a un watt (dBW), Hertz (Hz) y decibeles con respecto a la potencia de portadora sin modular (dBc).

Figura 12. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión en 8PSK en OFDM

Figure 12. Spectrum analysis at the input of the transmission channel in 8PSK in OFDM

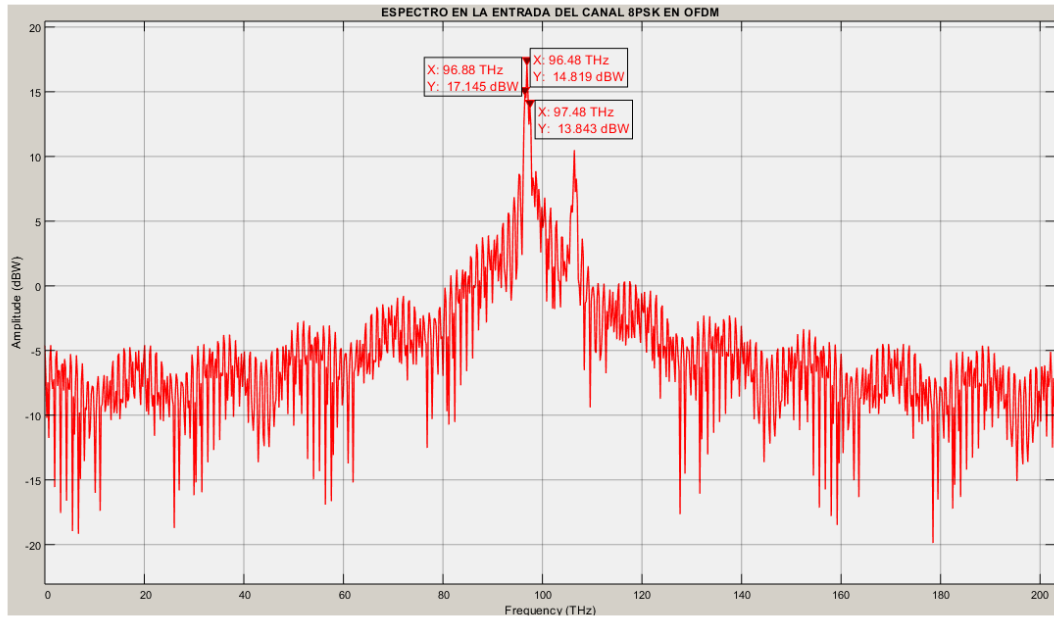


Tabla 6. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal 8PSK en OFDM
Table 6. Evaluation of the spectrum analysis at the input of the 8PSK channel in OFDM

| Variable | Dato |
|-------------------------------------|------------|
| Potencia en el canal de transmisión | -23.7 dBW |
| Ancho de banda ocupado | 38.16 THz |
| Frecuencia de error | -0.276 THz |
| Frecuencia de portadora | 40.62 THz |
| THD | -30.64 dBc |
| SINAD | -7.73 dBc |
| SFDR | 7.11 dBc |
| SNR | -7.73 dBc |

4. CONCLUSIONES

En este artículo se realizó un análisis comparativo en un sistema de comunicación óptico utilizando las técnicas de multiplexación FDM y OFDM. El sistema de comunicación óptico implementado es un modelado de fibra óptica monomodo estándar de 50KM de longitud, con atenuación de la fibra de 0.22 dB/KM y de 0.22 dB en acoples cada 2KM. El análisis comparativo es realizado calculando la tasa de error de modulación, la magnitud del error vectorial y el diagrama de constelación. Para cada multiplexación fueron analizadas las modulaciones de QPSK y 8PSK. Los diagramas de constelaciones en FDM muestra que la trama de datos no llega a todos los puntos esperados, por otro lado, OFDM llega a todos los puntos deseados presentando una menor pérdida en la información. No obstante, la modulación QPSK en FDM obtuvo una reducción en la magnitud del error del vector en valores picos y promedio del 75.7%. Sin embargo, es recomendable realizar un envío de datos por OFDM, en los respectivos diagramas de constelación.

En la modulación 8PSK en OFDM se presenta un error EVM de 28.3%, los valores pico y promedio en decibelios alcanzan los -10.2 dB, en cambio en FDM se presenta un aumento del error EVM de 19.60% y

una reducción de 19.60% en el error MER. Por otra parte, se detalla que el SNR mejora un 10.34% en la multiplexación OFDM. Finalmente, al considerar las dos multiplexaciones se encuentra un error en la transmisión FDM, ya que, al trabajar a frecuencias tan altas, el diagrama de constelación no se muestra eficiente, por lo que presenta puntos en los cuales no llega la trama de bits, indicando una pérdida significativa en la información. Por esta razón, el mejor modelo de multiplexación para el tráfico de datos a frecuencias altas es la multiplexación OFDM.

Asimismo, se propone seguir estudiando esta temática, realizando una evaluación con diversas multiplexaciones como, por ejemplo, multiplexación por división de tiempo o longitud de onda. También, se puede examinar toda la transmisión completa, incluyendo la transmisión de las antenas, la transmisión y recepción del radio enlace.

REFERENCIAS

- [1] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Cuarta Edi. 2003.
- [2] Cisco, “Cisco Annual Internet Report (2018–2023),” 2018.
- [3] J. J. Granada Torres, C. M. Serpa Imbett, G. M. Varón Durán, and N. Guerrero González, “Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra de banda ancha: retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas,” *Rev. Científica Ing. y Desarro.*, vol. 29, no. 2, pp. 242–265, 2011.
- [4] R. A. Pinto García and A. F. Cabezas, *Sistemas de Comunicaciones Ópticas*, 1 Edición. Bogotá, 2014.
- [5] S. Addanki, I. S. Amiri, and P. Yupapin, “Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers,” *Results Phys.*, vol. 10, pp. 743–750, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.rinp.2018.07.028.
- [6] A. Gangwar and B. Sharma, “Optical Fiber: The New Era of High Speed Communication (Technology, Advantages and Future Aspects),” *Int. J. Eng. Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 19–23, 2012.
- [7] H. Kim, “Orthogonal Frequency-Division Multiplexing,” in *Wireless Communications Systems Design*, 2015, pp. 209–238.
- [8] W. Ciciora, J. Farmer, D. Large, and M. Adams, “Chapter 4 - Digital Modulation,” in *Modern Cable Television Technology*, Elsevier, 2004, pp. 137–181.
- [9] R. A. Shafik, M. S. Rahman, A. H. M. R. Islam, and N. S. Ashraf, “On the error vector magnitude as a performance metric and comparative analysis,” *Proc. - 2nd Int. Conf. Emerg. Technol. 2006, ICET 2006*, no. March, pp. 27–31, 2006, doi: 10.1109/ICET.2006.335992.
- [10] R. M. Alonso, E. F. Pupo, R. D. Hernández, and G. Guillen, “Sistema experimental para la caracterización del MER,” *Rev. Telemática*, vol. 14, no. 3, pp. 30–40, 2015.
- [11] F. I. Chicharro López, “TÉCNICAS ÓPTICAS DE TRANSMISIÓN AVANZADAS PARA REDES OOFDM-WDM,” Universidad Politecnica de Valencia, 2018.
- [12] W. Fernández R. and A. Rodríguez R., “OFDM óptimo para la comunicación bidireccional en las redes eléctricas inteligentes,” *Ingeniare*, vol. 26, no. 1, pp. 43–53, 2018, doi: 10.4067/S0718-33052018000100043.
- [13] J. P. Gallardo Moreno and R. Boloiz Tortosa, “Capítulo 2: Modulación OFDM,” in *Estudio de un Sistema OFDM-CDMA*, 2006.
- [14] F. Gómez López, L. A. García Ortiz, K. C. Puerto López, and D. Guevara Ibarra, “Modelado de los Fenómenos No Lineales Generados por el Efecto Electro-Óptico Kerr en una Transmisión por Fibra Óptica,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 2, no. 28, pp. 77–81, 2016.
- [15] S. S S and S. Prabhu, “External modulators and, Electro-optic Mach-Zehnder modulator-modelling and analysis using Matlab,” *Int. J. Adv. Inf. Sci. Technol. ISSN*, vol. 5, no. 2, 2016, doi: 10.15693/ijaist/2016.v5i2.10-19.
- [16] C. Suárez, “Modulación multiportadora OFDM,” *Ing.*, vol. 6, no. 2, pp. 30–34, 2001, doi: 10.14483/23448393.2699.