

Evaluación de un sistema de comunicación óptico empleando modulación por desplazamiento de fase QPSK, 8PSK y 16PSK utilizando la técnica FDM.

Evaluation of an optical communication system using QPSK, 8PSK and 16PSK phase shift modulation using the FDM technique.

Dionel Roperro-Torres¹, Karla Puerto-López², Dinael Guevara³
^{1,2,3}Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta - Colombia

Recibido: 24 de enero de 2020.

Aprobado: 16 de abril de 2020.

Resumen— En este artículo se presenta el planteamiento de un sistema de comunicaciones óptico; partiendo desde el origen de la señal, generación de la modulación y el envío de datos por el canal. Se modulan los datos usando modulación por desplazamiento de fase (PSK, de phase shift keying), empleando la técnica de multiplexación por división de frecuencia (FDM). Se analiza el rendimiento del sistema de comunicaciones óptico realizando una comparación entre los formatos de modulación Q-PSK, 8-PSK y 16-PSK. Como herramienta de evaluación se emplean: la tasa de error de modulación (MER, modulation error rate) y la medición del error de la magnitud del vector (EVM, error vector magnitude). Se concluye que el valor promedio en MER para 16-PSK está en un 41% mayor que en Q-PSK y 8-PSK. Asimismo, el error EVM es 49% menor comparado con Q-PSK y 8-PSK, arrojando que el formato 16-PSK genera un mayor rendimiento y calidad en la transmisión de información para este tipo de sistemas.

Palabras Claves: Comunicaciones Ópticas, FDM, QPSK, 8-PSK, 16-PSK.

Abstract— This article presents the approach of an optical communication system; starting from the signal source, modulation generation and data sending through the channel. The data is modulated using phase shift keying (PSK), using the frequency division multiplexing (FDM) technique. The performance of the optical communications system is analyzed by comparing the Q-PSK, 8-PSK and 16-PSK modulation formats. The following evaluation tools are used: modulation error rate (MER) and vector magnitude error measurement (EVM). It is concluded that the average value in MER for 16-PSK is 41% higher than in Q-PSK and 8-PSK. Likewise, the EVM error is 49% lower compared to Q-PSK and 8-PSK, showing that the 16-PSK format generates a higher performance and quality in the transmission of information for this type of systems.

Keywords: FDM, Optical Communications, QPSK, 8-PSK, 16-PSK.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: dionelrt@ufps.edu.co (Dionel Roperro Torres).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Forma de citar: D. Roperro-Torres, K. Puerto-López y D. Guevara, "Evaluación de un sistema de comunicación óptico empleando modulación por desplazamiento de fase QPSK, 8PSK y 16PSK utilizando la técnica FDM", Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, vol. 8, no. 2, pp. 76-83, 2020, doi:[10.15649/2346030X.709](https://doi.org/10.15649/2346030X.709)

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones han presentado una evolución de forma significativa con respecto a la manera de transmitir información, contando desde sus inicios como el envío de datos por medio de pulsos eléctricos cómo funcionaba el telégrafo, asimismo el descubrimiento del espectro electromagnético y radioeléctrico, como también el uso de sistemas guiados más robustos como el cable coaxial como medio de transmisión [1], también en 1952 se describió científicamente la forma de transmisión de datos a través de un medio guiado, pero, fuera del espectro radioeléctrico y dentro del rango visible, a este medio se le denomina fibra óptica [2]

Todo esto ha traído consigo que al desarrollarse más las sociedad, los sistemas de transmisión existentes quedan cortos con respecto a la eficiencia del tráfico de datos [3], debido a que entre más pasan los días hay más dispositivos conectados a la red puesto que como lo revela Cisco, para el 2022 habrá 28.5 mil millones de dispositivos conectados a la red con respecto a los 18 mil millones conectados para el 2017 [4], así como existen transmisión de datos por medio de sistemas de guiados como la fibra óptica, también, hay transmisión por medios no guiados como la propagación a través de antenas [5]; en el desarrollo tecnológico y debido a la gran demanda de usuarios nuevos conectados a la red [6], ha llevado a las empresas implementar sistemas de comunicación digital, y buscar la forma de aprovechar los beneficios más significativos de cada una de las técnicas de transmisión, por lo que emergen los sistemas de radio sobre fibra óptica (RoF) [7], la cual emplea como medio de transmisión la fibra óptica y los sistemas inalámbricos, en donde la característica principal es el envío de información a grandes distancias con un mejor ancho de banda y poca atenuación [8]

Para que los sistemas de transmisión sean eficientes y puedan satisfacer las necesidades de los usuarios, existen técnicas para transmitir muchas señales por un mismo medio o canal de transmisión [9], a esto se le denomina multiplexación y demultiplexación o los denominados MUX-DEMUX [10], siendo este un proceso en el que se combinan dos o más señales de entrada en una sola señal única y total que es transportada por el único canal de transmisión hacia un dispositivo, el cual va a realizar el proceso inverso [11]. Existen diversas técnicas de multiplexación en la transmisión de datos como la multiplexación por división de tiempo (TDM, Time Division Multiplexing), multiplexación por división de frecuencia, (FDM, Frequency Division Multiplexing), multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing), multiplexación por división de longitud de onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing) [12], multiplexación por división de longitud de onda gruesa (DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing) entre otras.

Cada una de estas tiene una arquitectura del sistema diferente de las otras [13], por lo tanto para el desarrollo de esta investigación se realizó la evaluación de la transmisión de datos para un sistema de transmisiones ópticas en la que se tuvo en cuenta la técnica de multiplexación por división de frecuencia, debido que al trabajar la transmisión desde un fase inicial, es necesario tener presente las frecuencias en las que se proceden a transmitir los datos por consiguiente de decidió implementar FDM para el desarrollo de la investigación.

Para transmitir datos en un medio guiado o no guiado es necesario realizar una modulación a las señales bien sea modulación análoga o modulación digital [14], buscando de esta manera la mejor forma de transmisión donde se presenten menos pérdidas de señal [15], dado que los sistemas de modulación digital presentan menos interferencia debido a que estos dependen menos de los componentes y su interferencia al ruido es menor, para esta aplicación se implementó una modulación digital para realizar la transmisión [16].

Esta investigación tuvo como objetivo, brindar una referencia para aquellas pequeñas y medianas empresas que brindan servicios de telecomunicaciones, las cuales no poseen laboratorios especializados para verificar que tipo de transmisión de datos brinda menor pérdida de señal, de igual modo, determinar cuál de las técnicas de modulación por desplazamiento de fase brinda una mejor calidad de la señal comparadas bajo las mismas características de transmisión como portadoras análogas, longitud de onda del diodo láser, atenuación y longitudes de la fibra óptica.

Asimismo, para evaluar la transmisión de datos es necesario realizar mediante un esquema inicial, por medio de una herramienta computacional especializada, en la cual se realiza el proceso de generación de las señales, la modulación en su parte análoga que consta de modulación con doble banda lateral [17], su conversión de análogo a digital, el muestreo la cuantificación y retención [18], también poder realizar su conversión en el espectro visible para así realizar la multiplexación de las señales y a su vez poder ser transmitidas por la fibra óptica [19]. La evaluación se lleva a cabo mediante un método denominado diagrama de constelación sobre la cual se pueden determinar el comportamiento de algunas variables como: la Magnitud del Error del Vector (EVM, Error Vector Magnitud) [20], Tasa de Error de Modulación (MER, Modulation Error Rate) [21] y la Relación Señal a Ruido (SNR, Signal-to-Noise Ratio) [22].

A partir de las simulaciones se evaluó el sistema de comunicación en donde se concluye que en la modulación 16-PSK los datos de EVM en RMS y valores pico son un 20% menor comparados con Q-PSK y 8-PSK y el valor promedio en MER en dB para 16-PSK está en un 42.25% mayor que en Q-PSK y 8-PSK. Lo que indica que para el sistema de comunicación óptico implementado el formato de modulación 16-PSK proporciona un mejor rendimiento en la transmisión.

II. MARCO TEÓRICO

En la actualidad cuando se trabaja con sistemas de comunicación óptico, se requiere que estos posean propiedades características como la eficiencia del sistema y la velocidad de transmisión [23], pero, cuando se opera a altas frecuencias, existe la posibilidad que se presenten interferencia [24], atenuación o distorsión en los sistemas.

La técnica de multiplexación por división de frecuencia, consiste en transmitir dos o más señales mediante un mismo medio de transmisión que para este caso se refiere a la fibra óptica, mediante un procesamiento de las señales desde su generación análoga hasta realizar su conexión con la fibra [25], esta técnica de multiplexación ha desarrollado grandes aplicaciones industriales a lo largo de la historia desde la transmisión por DAB (Digital Audio Broadcasting) iniciando a mediados de 1987, pasando por el formato DVB (Digital Video Broadcasting) a principios de la década de los 90 en la cual fueron usados los formatos de modulación digital por desplazamiento de fase (PSK, Phase Shift Keying) [26] y de Amplitud en Cuadratura (QAM, Quadrature Amplitude Modulation) [27], luego vienen los estándares de transmisión inalámbrica en redes de área local WLAN (Wireless Local Area Network) también conocido como WIFI a mediados del 1997, comunicaciones inalámbricas punto a multipunto llamado WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) del estándar IEEE 802.16 finales de los 90, el desarrollo de LTE (Long Term Evolution) en el 2009 con el objetivo de aportar eficiencia espectral, altas tasas de transmisión, flexibilidad en frecuencia y ancho de banda robusto [28].

De la misma forma existen técnicas para realizar la modulación digital como por desplazamiento de amplitud (Amplitude-Shift Keying, ASK), desplazamiento de frecuencia (Frequency Shift Keying, FSK) desplazamiento de fase (Phase Shift Keying, PSK) y de Amplitud en Cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation, QAM);

para el desarrollo de esta evaluación se implementó mediante la técnica de modulación por desplazamiento de fase (PSK) [29]. La transmisión por desplazamiento de fase es similar a la modulación en fase convencional, excepto que en PSK la señal de entrada es una señal digital binaria y son posibles en números limitados de fases de salida. Para esta técnica se pueden contar con diversas formas de salida las cuales pueden tener 2 fases de salida, dicha técnica es conocida como BPSK; salidas con 4 fases diferentes se le da el nombre de QPSK, 8PSK y 16 PSK, entre otras siendo estas siempre potencias de 2 [30].

Del mismo modo, una de las técnicas de medición aplicadas es el error de la magnitud del vector o EVM [31], siendo esta la medida de la diferencia entre la forma de onda de referencia y la forma de onda medida, siendo esta diferencia denominada el error; siendo caracterizada como la raíz cuadrada de la relación entre la potencia del vector de error y la potencia media de referencia expresada generalmente en porcentaje (%) aunque también se puede expresar en dB [32].

Otro valor de medición es la tasa de error de modulación, o por sus siglas en inglés MER, siendo esta un factor que informa la exactitud de una constelación digital, esta es una herramienta cuantitativa que permite valorar que tan buena es una señal con modulada digital, es el equivalente a la información que aporta SNR (Relación señal/ruido) [33], para las modulaciones analógicas. Al igual que esta puede ser expresado en dB o en porcentaje [34], otra de las variables que permiten determinar la eficiencia de los sistemas de comunicación es la relación señal a ruido, siendo esta la relación entre la potencia de la señal que se transmite y el ruido que la corrompe, determinando que entre más grande sea esta relación, la señal será transmitida de una mejor forma [35]. A continuación, se muestra la metodología usada para el desarrollo de la investigación tratada en el artículo presente.

III. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

Para realizar la simulación del sistema de comunicaciones óptico fue necesario emplear una herramienta computacional especializada, la cual permite construir y simular el modelo del sistema de comunicaciones por medio de diagramas de bloques [36]. El sistema de transmisión consistió en 4 etapas básicas como se muestra en la figura 1, las cuales están definidas como: generación de las señales RoF, Fibra Óptica, la modulación digital y el diagrama de constelación el cual servirá como apoyo para realizar la evaluación.

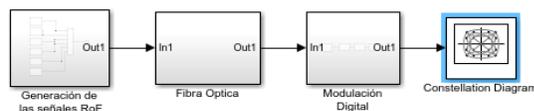


Figura 1: Etapa del sistema de comunicaciones óptico en el software especializado.

Fuente: Elaboración propia.

Para la simulación del sistema de comunicación óptico se consideraron 6 señales análogas descritas en la tabla 1, las cuales se adecuaron mediante una modulación análoga de doble banda lateral, que permitió realizar la división de frecuencia para la multiplexación a tratar [37], en donde se aplicaron unas portadoras análogas de 2GHz de diferencia como se describe en la tabla 1, con una potencia de salida de 10.3 mW.

Tabla 1: Características de las señales del transmisor de RoF.

Señal	1	2	3	4	5	6
λ (nm)	1511	1531	1551	1571	1591	1611
F _{ms} (GHz)	3	3.5	4	4.5	5	5.5
FRf (GHz)	60	62	64	66	68	70
F _{Opt} (THz)	198.5	195.95	193.4	190.9	188.56	182.2

Fuente: Elaboración propia.

Se hizo el modelado del medio de transmisión, teniendo en cuenta la solución analítica de la ecuación no lineal de Schrödinger, en donde se ajustaron parámetros como la atenuación, dispersión y la longitud de la fibra óptica [38], seguido de esto se encuentra la etapa de evaluación de la transmisión en donde se hizo necesario realizar una modulación digital, partiendo desde la conversión Óptico-Eléctrico [39], conversión análogo a digital, la retención y muestreo, para así poder aplicar la modulación QPSK, 8PSK y 16PSK, posterior a esto se aplica el diagrama de constelación, en el que se evalúan los datos determinando cual técnica brinda mejor transmisión de información [40].

Por medio del diagrama de constelación se procederá a realizar la evaluación de los datos en cada uno de los formatos de modulación digital y por ende se llevará a cabo la comparación de los mismos determinando cuál de las 3 técnicas de modulación brinda mejor transmisión de la información. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la investigación y la interpretación de los mismos.

Luego de analizar el diagrama de bloques a implementar, se realiza la generación de señal análoga que será transmitida por la fibra óptica; para realizar esta transmisión mediante la Multiplexación por División de Frecuencia, se implementa un modelado el cual cuenta con los bloques que generan la señal modulada siendo esta la señal a transmitir, la portadora análoga, seguida de un acondicionamiento por doble banda lateral, posterior a esto se ejecuta la conversión análoga a digital con el propósito de acondicionar la señal para la conversión electro-óptica con el fin de adaptarla para el canal de fibra óptica.

En la figura 2 se representa el acondicionamiento de la señal la cual se divide en tres fases, la primera consta de la generación de la señal moduladora y modulante, la cual, siendo una portadora análoga comprendida en el rango de las ondas milimétricas desde los 30 y 300 GHz [41]; como segunda parte se realiza un proceso de conversión de la señal eléctrica para su salida óptica mediante el modulador Mach Zehnder MZM [42]; como parte final de esta etapa, se procede a realizar una fuente óptica el cual cuenta con un láser ideal de fase inicial constante y nula, que funciona transportando señales como fuentes ópticas para la adecuación de RoF, sobre una frecuencia central alrededor de 193.4 THz, dichas señales son multiplexadas como se muestra en la figura 3 en donde se presenta la adaptación de todas las señales para entregarlas al canal de transmisión.

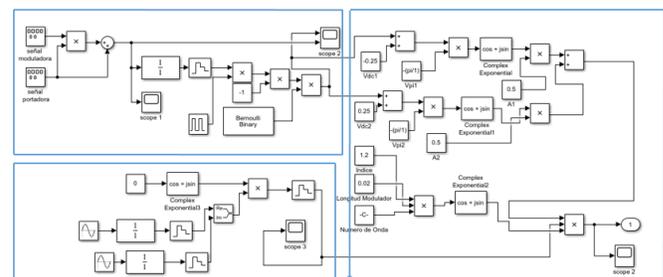


Figura 2: Diagrama de bloques desarrollada en la herramienta computacional, para la etapa de las señales de entrada.

Fuente: Elaboración propia.

Este proceso se hace de forma individual sobre 6 señales de entrada distintas como se muestra en la tabla 1, al realizar la generación de señal se implementa sobre para cada una de las señales el mismo proceso de modulación con doble banda lateral, conversión análoga a digital, modulación por el MZM y la inyección de la señal óptica, con el proceso de multiplexación por división de frecuencia se ejecuta después de realizar el tratamiento de las señales de forma individual a cada una de las señales analógicas de entrada.

En la figura 3 puede observarse un diagrama de bloques con el tratamiento realizado en cada una de las señales y la multiplexación de las mismas.

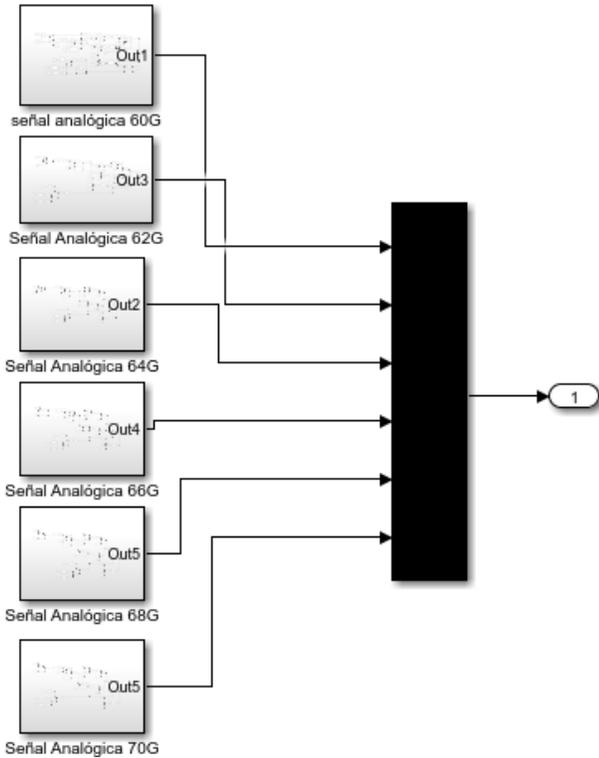


Figura 3: Diagrama de bloques desarrollada en la herramienta computacional especializada, para la etapa de multiplexación de las señales
Fuente: Elaboración propia.

Como segunda etapa del sistema de transmisión se realiza un modelado de la transmisión de la fibra óptica [43], como se ilustra en la figura 4, en donde se realiza la transmisión de la señal óptica hasta el sistema de modulación digital para proceder a realizar la evaluación, esta etapa de fibra óptica se realizó mediante un modelamiento matemático de la fibra monomodo estándar [44], con diferentes parámetros.

Como última etapa se realiza la modulación en digital con el propósito de acondicionar la señal para realizar la evaluación pertinente mediante el método de diagrama de constelación [45]; para llevar a cabo este proceso es necesario realizar un acondicionamiento de la señal saliente de la fibra óptica, este proceso lleva en sí otros subprocesos, como se puede ver en la figura 4, aquí se puede observar que para realizar este acondicionamiento se convierte de óptico a analógico, seguido a esto su conversión de analógico a digital, posterior se hace la modulación por ancho de pulso.

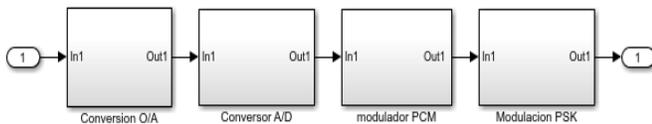


Figura 4: Diagrama de bloques desarrollada en la herramienta computacional especializada, para la etapa del proceso de modulación digital.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la investigación y la interpretación de los mismos.

IV. RESULTADOS ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Después de realizar el modelado, se procede a plasmar los resultados obtenidos de cada una de las simulaciones del sistema de comunicación óptico, en donde evaluaron 3 diferentes formas de modulación por desplazamiento de fase: QPSK, 8PSK y 16PSK, en donde se observa como se ve afectada de forma clara el EVM, MER y SNR evaluado en el sistema de transmisión.

Primero se verificó el procesamiento de la señal como se muestra en la figura 5, se puede observar que en ella se encuentra la señal original o señal analógica a transmitir y en la figura 6, puede notarse la señal saliente del multiplexor en donde se encuentran las 6 señales con las que se pretende evaluar el sistema de transmisión óptico.

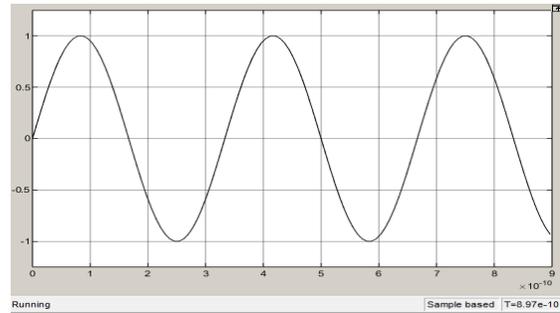


Figura 5: Diagrama desarrollada en la herramienta computacional especializada, de la señal analógica original con amplitud de 1 y frecuencia de 3.5 GHz.
Fuente: Elaboración propia.

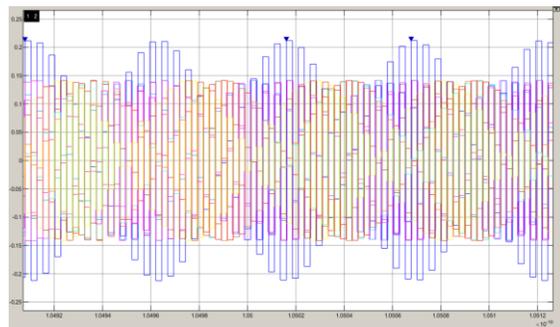


Figura 6: Diagrama desarrollada en la herramienta computacional especializada, de la señal resultante de la multiplexación.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7 se puede observar el espectro de frecuencia a través del analizador de espectro que ofrece la herramienta computacional especializada, observando el nivel de potencia promedio de la señal de 10.36mW, permitiendo analizar los efectos lineales presentes en el medio de transmisión.

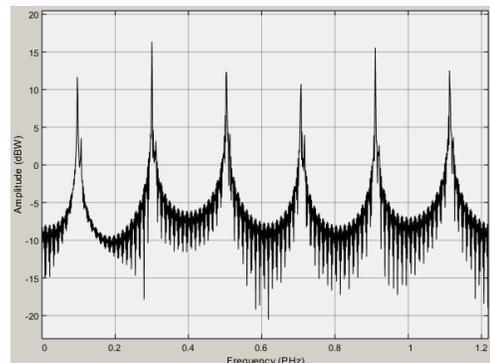


Figura 7: Espectro de frecuencia de la señal óptica multiplexada a la salida del transmisor.
Fuente: Elaboración propia.

Este estudio consta de tres partes por lo cual se centra en realizar las simulaciones en los tipos de modulación por desplazamiento de fase las cuales son QPSK, 8PSK y 16PSK en donde se irán ilustrando a continuación.

a. Análisis para la modulación QPSK

Para realizar la evaluación a cada una de las formas de modulación por lo tanto se hace todo el procesamiento de las señales pasando en su parte final por el componente que realiza el diagrama de

constelación, en donde se realiza un seguimiento de la trayectoria en los puntos en donde se llega la señal como se puede ver en la figura 8, siendo este el caso específico para la modulación QPSK.

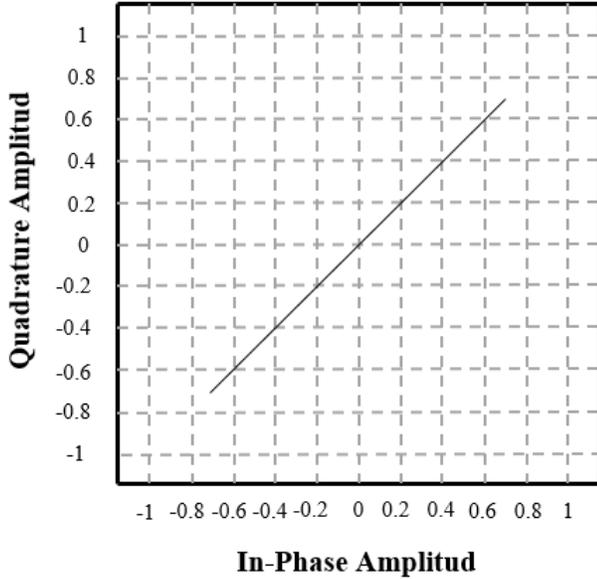


Figura 8: Diagrama desarrollada en la herramienta computacional especializada, del diagrama de constelación y trayectoria de la modulación QPSK.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se muestra en la tabla 2 los valores que se obtuvieron a través de esta modulación, en donde se plasman los valores RMS y Pico del EVM en su relación porcentual, los valores promedio y pico del EVM expresado en dB, el valor promedio del MER dado en dB y por último el valor dado de la relación señal a ruido SNR.

Tabla 2: Evaluación de la transmisión del sistema de comunicación óptico empleando la modulación QPSK.

RMS EVM (%)	76.5
Peak EVM (%)	76.5
Avg EVM (dB)	-2.3
Peak EVM (dB)	-2.3
Avg MER (dB)	2.3
SNR (dB)	-7.24

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 2 indica que al analizar la constelación con la modulación QPSK, la transmisión no llega a todos los puntos requeridos por lo tanto el error del vector marca un 76.5 % y la tasa de error de modulación no supera los 2,3 dB, dando como resultado que el SNR brinda un -7.24 dB, donde se puede concluir que es posible realizar la transmisión mediante esta modulación, pero también es probable que se presenten grandes pérdidas de datos en la recepción de la información.

b. Análisis para la modulación 8PSK

Posteriormente se procede a evaluar el mismo tratamiento de la señal anterior, pero con la diferencia de que se cambiará el modulador, por un 8PSK, dando este, 8 fases de salida y un diagrama de constelación con su trayectoria diferente, en la figura 7 puede observar ser como es el comportamiento de la señal y su trayectoria ilustrada a continuación.

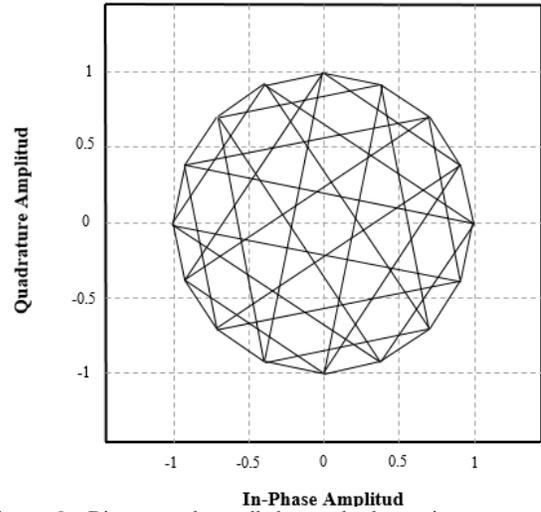


Figura 9: Diagrama desarrollada en la herramienta computacional especializada, del diagrama de constelación y trayectoria de la modulación 8PSK.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3 pueden observarse los valores que se obtuvieron luego de realizar la simulación en la herramienta computacional con el modulador por desplazamiento de fase, 8PSK en el cual se muestran las mismas variables que en la parte A, aunque con sus propios valores concluyentes

Tabla 3: Evaluación de la transmisión del sistema de comunicación óptico empleando la modulación QPSK.

RMS EVM (%)	39.0
Peak EVM (%)	39.0
Avg EVM (dB)	-8.2
Peak EVM (dB)	-8.2
Avg MER (dB)	8.2
SNR (dB)	-18.276

Fuente: Elaboración propia.

Al observar el comportamiento de la trayectoria de la modulación en el diagrama de constelación y en base a los resultados obtenidos, los cuales están plasmados en la tabla 3, se puede notar que el error vectorial en la recepción de datos teniendo en cuenta el punto ideal al cual debería llegar el dato con el punto real en el que llegó no supera el 39%, su valor en dB es de -8.2, así también la tasa de error de modulación es de 8.2 y su valor de SNR siendo de -18.276 dB indicando que aunque no son los resultados ideales si son aceptables en el tráfico de datos.

c. Análisis para la modulación 16PSK.

Finalmente se procede a realizar el mismo esquema, pero para esta parte de modifica el modulador que ofrece 16 fases distintas conocidas como 16PSK, en la figura 8 puede observarse el diagrama de constelación con su trayectoria, con el propósito de conocer como es el comportamiento de la transmisión con esta modulación el cual otorgará las mediciones resultantes de la simulación, en donde se podrán determinar el funcionamiento del sistema de transmisión óptico.

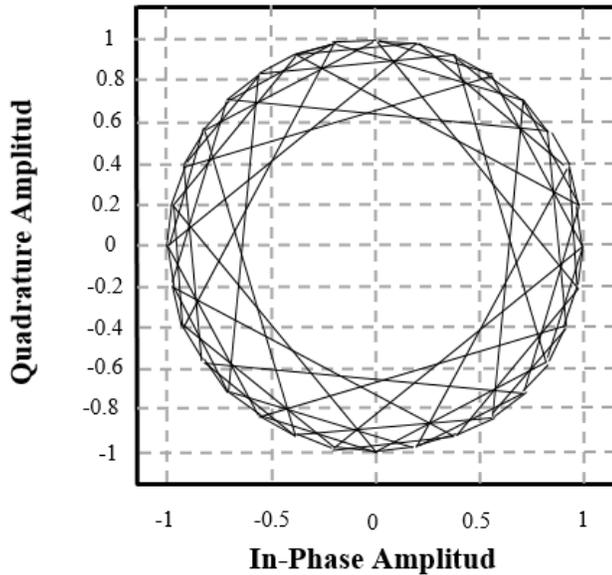


Figura 10: Diagrama desarrollado en la herramienta computacional especializada, del diagrama de constelación y trayectoria de la modulación 16PSK.

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 4 se plasmaron los datos resultantes del diagrama de constelación en donde se puede observar como en las anteriores evaluaciones los valores pico y promedio del EVM tanto en porcentaje como su equivalente en decibeles (dB), así también el valor promedio del MER en dB, como determinando el valor de la relación señal a ruido.

Tabla 4: Evaluación de la transmisión del sistema de comunicación óptico empleando la modulación QPSK.

RMS EVM (%)	19.6
Peak EVM (%)	19.6
Avg EVM (dB)	-14.2
Peak EVM (dB)	-14.2
Avg MER (dB)	14.2
SNR (dB)	-23.05

Fuente: Elaboración propia.

Con el diagrama de constelación ilustrado en la figura 6 y los resultados obtenidos en la tabla 4 se observa que el error porcentual del vector no supera el 19.6% tanto en valores pico como promedio, asimismo sus datos en dB son de -14.2, el resultado del MER es de 14.2 dB y el SNR indica -23.05 dB determinando de esta forma que este formato brinda más confianza y seguridad a la hora de la transmisión de datos. Al evaluar la transmisión de datos en un sistema de comunicación óptico bajo la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia, teniendo en cuenta los 3 formatos de modulación digital PSK, se obtuvo, una mejor calidad de la señal al transmitir bajo la modulación 16-PSK debido a que esta brinda menos error en la magnitud del vector, una mejoría significativa en la tasa de error de modulación y una mejor relación señal a ruido con respecto a las demás.

V. CONCLUSIONES

Se realizó un análisis de la evaluación de los datos obtenidos para el sistema de transmisión óptico, en él se pudo destacar la potencia de la señal que de entrada en la fibra es de 10.3mW, para dicha evaluación se implementó una fibra óptica monomodo estándar de 30km de longitud con una atenuación de 0.22 dB/Km.

En la modulación QPSK se pudo observar mediante el diagrama de constelación que la trama de datos no llega a todos los puntos esperados, por lo tanto, el EVM tanto para valores pico y promedio

alcanza un 76.5% de error, su valor en decibeles no supera el -2.3 dB y al realizar el cálculo del SNR, este da un valor de -7.24 dB, indicando esto que implementar la transmisión de datos a través de este formato de modulación es posible, pero, se deben tener en cuenta que la posibilidad de pérdida de información es alta y poco confiable.

En la modulación 8PSK a diferencia del anterior las tramas si llegan a los puntos o fases esperadas, pero también con una tasa de error de EVM significativa, puesto que sus valores pico y promedio están alrededor del 39%, su valor en decibeles alcanza un -8.2dB, asimismo un MER de 8.2dB; luego de efectuar los cálculos se encuentra un SNR de -18.276, indicando esto que a comparación de la modulación QPSK brinda una mejoría en la transmisión de datos de un 39.61%, pero sin embargo, sigue presentando un error vectorial de 39%, por lo que aunque es mejor que la modulación anterior no lo convierte en el mejor modelo de transmisión.

En el diagrama de constelación con su trayectoria para la modulación 16PSK ilustrada en la figura 6 se puede observar que la transmisión llega a todos los puntos o fases que se espera y al evaluar que se encuentran plasmados en la tabla 4, los cuales indican un EVM en valores pico y promedio de 19.6%, su equivalente en decibeles alcanza -14.2 dB la tasa de error de modulación indica un 14.2 dB y el SNR de -23.05dB; al evaluar los datos obtenidos se puede concluir que las tasas de error vectorial son aceptables y la relación señal a ruido es significativamente alta para la transmisión de información en la fibra óptica.

Al comparar la trayectoria de las señales en el diagrama de constelación 8PSK y 16PSK, en ambas figuras se puede notar como la señal llega a cada uno de los puntos de salida de cada modulador, pero, si se comparan las tablas dadas en cada sección se puede definir que en 16PSK brinda menos error en la Magnitud del vector (EVM) en un 50.25% y una mejor relación señal a ruido en por lo menos 20.77 % de mejoría en la transmisión de datos del sistema de comunicación óptico, pero si se compara con la modulación QPSK se encuentran valores de 74.37% de mejoría en EVM y más del 68.59% con el SNR; concluyendo de esta forma que realizar transmisión de datos bajo los términos de la Multiplexación por División de Frecuencia y comparando los 3 diferentes formatos de modulación por desplazamiento de fase, el método más eficiente es la transmisión por 16PSK.

VI. RECOMENDACIONES

El proceso de evaluación de datos podría ser más confiable implementado diversas herramientas computacionales más robustas en donde se pueden encontrar parámetros de la fibra óptica más puros y realistas; asimismo, esta investigación puede abarcar no solo la modulación por desplazamiento de fase sino también podría realizar la comparación de la transmisión de datos para ASK, FSK y QAM.

VII. REFERENCIAS

- [1] G. Campuzano, "Telecomunicaciones Radio sobre Fibra," [En línea]. Disponible en: <http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transferecia/67/67-III.03.html>. [Accessed 24 Febrero 2019].
- [2] ONSICOM, "ONSICOM," ONSICOM, 10 Marzo 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.onsicom.es/breve-recorrido-historico-de-la-fibra-optica>. [Accessed 29 Octubre 2019].
- [3] J.J.G.T. y. N.G.G. A. Betancur-Pérez, "Redes elásticas del futuro: beneficios para la red interna de telecomunicaciones de colombia," *Tecno Lógicas*, vol. 18, no. 34, pp. 125-136, junio 2015.
- [4] Cisco, "CISCO," 17 FEBRERO 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11->

- [5] C.I.O. Ruiz, "Medios de Transmisión," Managua, 2015.
- [6] MINTIC, "Boletín trimestral del sector TIC - Cifras segundo trimestre de 2017," Julio 2018. [En línea]. Disponible en: https://colombiatic.mintic.gov.co/679/articles-75854_presentacion_cifras.pdf. [Accessed 26 Junio 2019].
- [7] J.Z.D. Diaz, "Análisis de sistema de radio sobre fibra usando fibras ópticas de plástico", Bogotá, Cundinamarca: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [8] C.M.S.I.G.M.V.D. y. N.G.G. J.J. Granada-Torres, "Toward Next Generation Broadband Radio-over-Fiber Systems: Technological Challenges in the Millimeters-Wave Band," INGENIERÍA Y DESARROLLO, vol. 29, no. 2, 2011.
- [9] K.K.V.K.D.Y.N.B.S.K.D.S. Sahoo, "Quality Analysis in Phase Modulated Radio over Fiber in WDM/DWDM Network," Journal of Optical communications, vol. 38, no. 2, 09 July 2016.
- [10] J. Xiao, Z. Zhang, X. Li y Y. Y. L. C. J. yu, "OFDM Vector Signal Generation Based on Optical Carrier Suppression," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 27, no. 23, pp. 2449-2452, 28 August 2015.
- [11] Techlandia, "TECHALANDIA," LEAF GROUP, 2018. [En línea]. Disponible en: https://techlandia.com/mux-demux-info_250607/. [Accessed 29 Octubre 2019].
- [12] X.T. y. X.W. Sushank-Chaudhary, "Comparison of Laguerre-Gaussian and Donut modes for MDM-WDM in OFDM-Ro-FSO transmission system," AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 93, pp. 208-214, Septiembre 2018.
- [13] E. Avendaño-Fernandez, J.J. Granada-Torres y A.M.C.S. y. N. Guerrero-Gonzalez, "Analysis of the impact of Analog-to-Digital conversion in the performance of Digitized RoF Systems," INGE CUC, vol. 15, no. 1, pp. 77-88, 2019.
- [14] H.D. Jung, K.W. Lee, J.H. Kim, Y.H. Kwon y P.J. ho, "Comparación sobre rendimiento de sistemas RoF analógicos y digitalizados con condición de canal no lineal," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 28, no. 6, pp. 661 - 664, 15 Marzo 2016.
- [15] P.L.C.P.G.D.J.d.M. y. I.S. Carlos-Mateo, "Radio-over-fiber linearization with optimized genetic algorithm CPWL model," Optics Express, vol. 25, no. 04, pp. 3694-3708, 20 febrero 2017.
- [16] M.H. y. T.Z. Bernhard-Schrenk, "Analog receiver for coherent optical analog radio-over-fiber transmission," Optics Letters, vol. 42, no. 16, pp. 3165-3168, 2017.
- [17] Y.H.H.S.K.H. y. C.C.L. Kun-Lin-Hsieh, "Radio-over-fiber DSB-to-SSB conversion using semiconductor lasers at stable locking dynamics," Optics Express, vol. 24, no. 9, pp. 9854-9868, 23 abril 2016.
- [18] L.C.L.Z.X.Z.C.Z.A.X.Z. YUHUA-DUAN, "Temporal radio-frequency spectrum analyzer, based on asynchronous optical sampling assisted temporal convolution.," Optics Express, vol. 26, no. 16, pp. 20735-20743, 6 agosto 2018.
- [19] M.C. y. P.L.G.A. Palacios Garzón, "Sistema de Bibliotecas, Universidad Francisco José de Caldas," 25 Febrero 2019. [En línea]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/14809>. [Accessed 30 junio 2019].
- [20] T.J.L. Xiao-Heng TAN, "EVM simulation and analysis in digital transmitter," The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, vol. 16, no. 6, pp. 43-48, 2009.
- [21] PROMAX, "PROMAX," Febrero 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.promax.es/downloads/manuals/Spanish/descripcion-de-senales.pdf>. [Accessed 29 Octubre 2019].
- [22] NetSpot, "NetSpot 2.11," 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.netspotapp.com/es/signal-to-noise-ratio.html>. [Accessed 29 Octubre 2019].
- [23] A.K. y. S. Dewra, "Performance Analysis of 4x10 Gbps OFDM-PON System Over ROF Link," Journal of Optical Communications, 14 June 2017.
- [24] G.B.J.N.P.J.U.S. M.I.G.V.-I.F.P.A.J.L. Luca Giorgi, "Subcarrier Multiplexing RF Plans for Analog Radio Over Fiber in Heterogeneous Networks," JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, vol. 34, no. 16, pp. 3859-3866, 15 agosto 2016.
- [25] MINTIC, Boletín Trimestral de las TIC, Cifras del primer trimestre del 2018, Bogota D.C.: Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2018.
- [26] T. Tang, X. Zou, P. Li y W. Pan, "2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)," in Proposal and demonstration of SIM-OFDM based radio-over-fiber system, Beijing, China, 2017.
- [27] M.N.T. Simbaña, Estudio comparativo del desempeño de OFDM-MIMO y FOFDM-MIMO en fibra óptica de pocos modos con bajo DMGD, Quito: Quito, 2016.
- [28] F.I.C. López, "Técnicas de transmisión avanzadas para redes OOFDM-WDM," Valencia, España, 2018.
- [29] B.M.D.L.L.C.A. K.C. Puerto-López, "Efectos de la dispersión cromática en un sistema Híbrido," Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, vol. 2, no. 24, pp. 59-63, 4 Junio 2014.
- [30] F.M.G.G. M.A. Tilleria-Cabrera, "Diseño e implementación de prácticas de laboratorio de telecomunicaciones aplicadas a la modulación y demodulación digital a través de la herramienta MATLAB/SIMULINK," Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2016.
- [31] G.P.L. y C.S.F.A. Patiño-Carrillo, "Bidirectional single sideband transmission of millimeter waves over fiber for 5G mobile Network," Tecnológicas, vol. 21, no. 43, pp. 15-26, 2018.
- [32] International Telecommunication Union (ITU), "Entrenamiento en Conformidad e Interoperabilidad para la Región AMS en Pruebas de Tipos de Terminales Móviles, Pruebas de Integración e Interoperabilidad NGN, y Procedimientos de Homologación y Vigilancia de Mercado.," ITU ACADEMY, Ginebra, 2016.
- [33] F.E.C.L. y J.A.R. Guevara, "Estimación de la influencia del número de amplificadores dopados de erbio, sobre la separación señal ruido y la tasa de error de BIT de un enlace óptico WDM, mediante una herramienta de simulación," Universidad Privada Antenor Orrego - UPAO, Trujillo, Perú, 2018.
- [34] K.N.F. ANGARITA, "MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE LA SEÑAL DE LOS CANALES DE TELEVISIÓN PÚBLICA EN LA LOCALIDAD DE CIUDAD BOLÍVAR," UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, Bogota, 2018.
- [35] E. Martinez, "Relación Señal a Ruido SNR," EVliux, Mexico, 2007.
- [36] G.S.H. Moreto, Diseño, Simulación y Pruebas de un laboratorio de comunicaciones óptico usando communications system toolbox, simulink y optisystem, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [37] F.R.R.J.P.V.J.A.G.L.B.A.F.A.F. K. Aguirre-Ortiz, "COLOMBIAN CONFERENCE ON COMMUNICATIONS AND COMPUTING – COLCOM 2015," in Implementación de una propuesta de Radio sobre Fibra para la comunicación de redes móviles basadas en Femtoceldas, Medellín, 2015.
- [38] C.D.C.V.N.D.B.M. y D.G.I. K. C. Puerto-López, "SOLUTION OF THE NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION FOR RADIO OVER FIBER SYSTEMS USING THE SPLIT-STEP FOURIER METHOD," in CIETA, Pamplona, Colombia., 2018.
- [39] N.D.B.M.K.C.P.L. y D.G.I. C. D. Calderon-Villamizar, "Evaluation of the nonlinear Schrödinger equation for radio over fiber systems," in CONCAPAN, El Salvador, 2018.
- [40] C.D.C.V.K.C.P.L. y D.G.I. N.D. Bastos-Moreno, "LINEAR EFFECTS IN AN OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM USING THE COARSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING TECHNIQUE," in CIETA, Pamplona, Colombia, 2018.
- [41] Agencia Nacional del Espectro, "Agencia Nacional del Espectro," Julio 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Planeacion/onabf/CNABF.pdf>. [Accessed 31 Octubre 2019].

- [42] Photonics Communications Research Laboratory, "PCRL," 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.photonics.ntua.gr/OptikaDiktyaEpikoinwnias/Lecture_4_CoherentOptical_DSP.pdf. [Accessed 31 Octubre 2019].
- [43] International Telecommunications Union ITU, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable, Ginebra: ITU, 2016.
- [44] A. Bekkali, T. Kobayashi, k. Nishimura, N. Shibagaki y K.K. y. Y. Sato, "Real-Time 10GbE Data Transmission Over a Covered RoF Links and 96-GHz Wireless Bridge," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 29, no. 1, pp. 15-18, 1 January 2017.
- [45] C.A.V.Q. y D.V.I. Balseca, "Diseño y simulación de una red WDM para medir el efecto no lineal de la fibra denominado Four Wave Mixing (FWM)," Universidad Nacional De Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2018.