	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15
			VERSIÓN	02
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN		FECHA	16/05/2020
			PÁGINA	1 de 130
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR:

NOMBRE(S): DIONEL

APELLIDOS: ROPERO TORRES

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): KARLA CECILIA

APELLIDOS: PUERTO LÓPEZ

NOMBRE(S): ANGELO JOSEPH

APELLIDOS: SOTO VERGEL

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN SEÑAL A RUIDO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICO EMPLEANDO LAS TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA Y MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA ORTOGONAL.

RESUMEN

Los avances tecnológicos en las telecomunicaciones aportar acceso a servicios más robustos en el proceso de transmisión de datos, con el propósito de satisfacer las necesidades como: mayor ancho de banda, velocidad de transmisión y baja atenuación en el tráfico de datos. Las comunicaciones por fibra óptica permiten enviar mayor información y acceder a servicios con gran velocidad y calidad. Sin embargo, en estos sistemas se presentan atenuación de la señal como la relación señal a ruido, la cual indica la distorsión existente entre los datos transmitidos y el ruido que lo corrompe. Debido a esto, la presente investigación está enfocada a estudiar, simular y evaluar un sistema de comunicación óptico empleando las técnicas FDM y OFDM a través de Matlab, cuyo objetivo principal es analizar el SNR, permitiendo identificar cuál de las técnicas de multiplexación emite una mejor calidad de la señal en la parte eléctrica con respecto a la relación señal a ruido

PALABRAS CLAVE: SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICO,

MULTIPLEXACIÓN, FDM, OFDM Y RELACIÓN SEÑAL A RUIDO.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 130 PLANOS: 0 ILUSTRACIONES: 50 CD ROOM: 1

EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN SEÑAL A RUIDO PARA UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN ÓPTICO EMPLEANDO LAS TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN
POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA Y MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE
FRECUENCIA ORTOGONAL

DIONEL ROPERO TORRES

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN SEÑAL A RUIDO PARA UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN ÓPTICO EMPLEANDO LAS TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN
POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA Y MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE
FRECUENCIA ORTOGONAL

Presentado por:

DIONEL ROPERO TORRES

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero
Electrónico

DIRECTOR:

KARLA CECILIA PUERTO LÓPEZ

M. Sc. Ingeniería en Telecomunicaciones

CODIRECTOR:

ANGELO JOSEPH SOTO VERGEL

Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

Fecha: CÚCUTA, 8 DE MAYO DE 2020
Hora: 16:00
Lugar: MODALIDAD REMOTA SINCRÓNICO
Plan de Estudios: INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Título de la Tesis: "EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN SEÑAL A RUIDO PARA UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICO EMPLEANDO LAS TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA Y MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA ORTOGONAL"
Jurados: IE, ES^p ARISTÓBULO SIERRA ROJAS
IE, MSc INGRID CLARIETHE GUZMÁN ROMO
Director: IE, MSc KARLA CECILIA PUERTO LÓPEZ
Codirector: IE, MSc ANGELO JOSEPH SOTO VERGEL

Nombre del Estudiante	Código	Calificación
DIONEL ROPERO TORRES	1161132	CUATRO, CINCO (4,5)

MERITORIA



ARISTÓBULO SIERRA ROJAS



INGRID CLARIETHE GUZMÁN ROMO



DINAEEL GUEVARA IBARRA
Coordinador Comité Curricular
Ingeniería Electrónica

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA
LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y LA PUBLICACIÓN
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Cúcuta, 16 de mayo de 2020

Señores
BIBLIOTECA EDUARDO COTE LAMUS
Ciudad

Cordial saludo:

Yo Dionel Ropero torres, identificado(s) con la C.C. N° 1020468077, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado Evaluación de la relación señal a ruido en un sistema de comunicación óptico empleando las técnicas de multiplexación por división de frecuencia y multiplexación por división de frecuencia ortogonal presentado y aprobado en el año 2020 como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico; autorizo(amos) a la biblioteca de la Universidad Francisco de Paula Santander, Eduardo Cote Lamus, para que con fines académicos, muestre a la comunidad en general a la producción intelectual de esta institución educativa, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página web de la Biblioteca Eduardo Cote Lamus y en las redes de información del país y el exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad Francisco de Paula Santander.
- Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet etc.; y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Lo anterior, de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la ley 1982 y el artículo 11 de la decisión andina 351 de 1993, que establece que **“los derechos morales del trabajo son propiedad de los autores”**, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Dionel Ropero Torres.

Dionel Ropero Torres
CC. 1020468077 de Bello

Dedicatoria

A Dios, Por estar en cada paso a mi lado, por haberme permitido llegar hasta el punto el punto que voy, por haber guiado mi formación personal y profesional, también por instruirme y darme fortaleza para superar cada obstáculo presentado. Gracias dios por poner en mi camino a personas que me han ayudado a lograr mis sueños y ser mi apoyo. También, a mi Madre, Martha Torres, por su amor, comprensión y apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por ser el pilar que me motiva a mejorar y que se sienta muy orgullosa de su hijo, a mis hermanos, Arles y Anderson por ser mis amigos y mi apoyo, sin lugar a duda, José Luis Arturo por acompañarme en este proceso y ayudarme a dar lo mejor de mí, motivándome en todo momento incluso cuando quise desfallecer

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Dionel Roperro Torres

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

Quiero agradecer a Dios por sus bendiciones y acompañamiento en todos los procesos de mi vida, gracias a mi madre Martha Torres Rodríguez por su perseverancia y acompañamiento en este camino, a mis hermanos Arles y Anderson ropero por su apoyo incondicional. A mis primos Fabián y Vladimir Granados y Adrián Coronel por su apoyo y ayuda a que este sueño se volviera realidad, a todos los profesores y compañeros que hicieron parte de este proceso de aprendizaje, a Roger Badillo, Diana Bastos, Leidy Acevedo, Angie Gómez y Ronald Daza, gracias por contar con su amistad a lo largo del proceso de formación, a José Luis Arturo Gelves Niño quien se convirtió en mi apoyo incondicional; a los miembros del grupo de investigación y desarrollo en electrónica y telecomunicaciones GIDET, especialmente a la M.Sc. Karla Cecilia Puerto López por su exigencia, perseverancia y dedicación en el transcurso del proyecto de investigación y al PhD. Dinael Guevara Ibarra por su confianza, orientación y apoyo en todo el proceso de formación profesional, a todos y cada uno de ellos ¡infinitas gracias!

Dionel Roperro Torres

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	19
1. Descripción del Problema	21
1.1 Planteamiento del Problema	21
1.2 Justificación	23
1.2.1 Impacto Esperado	24
1.2.2 Beneficios Tecnológicos.	25
1.2.3 Beneficios institucionales	25
1.2.4 Beneficios académicos	26
1.3 Alcances	26
1.4 Objetivos	27
1.4.1 Objetivo General	27
1.4.2 Objetivos Específicos	27
1.5 Limitaciones y Delimitaciones	28
1.5.1 Limitaciones	28
1.5.2 Delimitaciones.	28
2. Marco Referencial.	30
2.1 antecedentes	30
2.2 Marco Teórico	32

2.2.1	Sistemas de Comunicaciones	33
2.2.2	Sistemas de comunicaciones ópticas	33
2.2.3	Transmisión y generación de señal.	35
2.2.3.1	Espectro de Señales de Radio Frecuencia.	35
2.2.3.2	Modulación de amplitud en doble banda lateral (AM DBL)	37
2.2.3.3	Fuentes ópticas.	37
2.2.3.4	Teorema de Nyquist	38
2.2.3.5	Modulación Digital	38
2.2.3.6	Modulador Mach Zehnder	40
2.2.4	Multiplexación	40
2.2.4.1	Multiplexación por división de frecuencia	41
2.2.4.2	Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal. OFDM	42
2.2.5	Relación Señal a Ruido (SNR)	44
2.2.6	Software de simulación Matlab	45
2.2.7	Simulink	45
2.3	Marco Legal	46
3.	Metodología	48
3.1	Tipo de Investigación	48
3.2	Diseño metodológico	48
3.2.1	Recopilar información por medio de libros, proyectos de tesis, artículos de revista, artículos científicos y sitios web sobre sistemas de comunicaciones, técnicas de	

multiplexación FDM y OFDM, relación señal a ruido y su comportamiento en la señal eléctrica para la transmisión por fibra óptica.	48
3.2.2 Modelar por medio de un software especializado la etapa de transmisión del sistema de comunicaciones. la cual consiste en la generación de la señal de RF, la modulación digital, la multiplexación de las señales RF del sistema de comunicación.	49
3.2.3 Modelar y simular a través de un software especializado la etapa final del sistema de comunicación y así determinar el comportamiento del SNR en las diferentes técnicas de multiplexación.	50
3.2.4 Evaluar el sistema implementado mediante el análisis de parámetros de velocidad de transmisión, potencia y frecuencia, documentando los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en el programa.	50
3.2.5 Dar a conocer y divulgar los resultados del proyecto de investigación.	51
4. Resultados	52
4.1 Objetivo 1: Recopilar información por medio de libros, proyectos de tesis, artículos de revista, artículos científicos y sitios web sobre sistemas de comunicaciones, técnicas de multiplexación FDM y OFDM, relación señal a ruido y su comportamiento en la señal eléctrica para la transmisión por fibra óptica.	52
4.1.1 Norma ITU (International Telecommunication Union)	53
4.1.2 Modulador Mach Zehnder	53
4.1.3 Multiplexación por División de Frecuencia	54
4.1.4 Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.	55

4.1.5 Relación Señal a Ruido (SNR)	56
4.2 Objetivo 2: Modelar por medio de un software especializado la etapa de transmisión del sistema de comunicaciones. la cual consiste en la generación de la señal de RF, la modulación digital, la multiplexación de las señales RF del sistema de comunicación.	58
4.2.1 Modulador Mach Zehnder	58
4.2.2 Fuente Óptica	59
4.2.3 Multiplexación por División de Frecuencia	60
4.2.3.1 Señal de Información	61
4.2.3.2 Multiplexado	62
4.2.4 Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.	64
4.3 Objetivo 3: Modelar y simular a través de un software especializado la etapa final del sistema de comunicación y así determinar el comportamiento del SNR en las diferentes técnicas de multiplexación.	67
4.3.1 Canal de Transmisión	67
4.3.2 Conversión ópto-Eléctrica	68
4.3.3 Fuentes de Ruido.	69
4.3.4 Diagrama de constelación	72
4.3.4.1 Conversor análogo-digital.	72
4.3.4.2 Modulación por Código de Pulso	74
4.3.4.3 Modulación digital	75

4.3.5 Análisis en Frecuencia.	77
4.4 Objetivo 4: Evaluar el sistema implementado mediante el análisis de parámetros de velocidad de transmisión, potencia y frecuencia, documentando los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en el programa.	79
4.4.1 Evaluación de la transmisión de datos a través de la multiplexación FDM	79
4.4.1.1 Mapa de constelación QPSK, FDM	82
4.4.1.2 Mapa de constelación 8PSK, FDM	83
4.4.1.3 Mapa de constelación 16QAM, FDM	85
4.4.1.4 Mapa de constelación 64QAM, FDM	86
4.4.1.5 Análisis en Frecuencia, de la transmisión FDM	87
4.4.2 Evaluación de la transmisión de datos a través de la multiplexación OFDM	90
4.4.2.1 Evaluación para la transmisión QPSK, OFDM	90
4.4.2.2 Evaluación para la transmisión 8PSK, OFDM	95
4.4.2.3 Evaluación para la transmisión 16QAM, OFDM	100
4.4.2.4 Evaluación para la transmisión 64QAM, OFDM.	105
4.5 Dar a conocer y divulgar los resultados del proyecto de investigación.	110
5. Conclusiones	115
6. Referencias	118
Anexos	123

Lista de Figuras.

	Pág.
Figura 1. Evolución de la tecnología de las telecomunicaciones. Imagen tomada de (Stelvio Salomone, 2019)	31
Figura 2. Esquema básico de un sistema de comunicación óptico. Imagen tomada de (Huerta, 2019)	32
Figura 3. Diagrama de bloques de un sistema de transmisión digital. Imagen tomado de (González C. Y. Venuska, 2018)	36
Figura 4. Esquema modulador Mach Zehnder, Fuente: Rajjbir Singh “Estudio y Evaluación del rendimiento de radio sobre fibra utilizando el modulador Mach Zehnder” 2017 (Rajbir Singh, 2017)	38
Figura 5. Proceso de Multiplexación FDM. Imagen tomada de (Comprés, 2013).	39
Figura 6. Espectro de un Subcanal OFDM. Imagen tomada de. (Jimenez, 2015)	40
Figura 7. Espectro OFDM. Imagen tomada de. (Jimenez, 2015)	40
Figura 8. Diagrama desarrollado en simulink, del modulador Mach-Zehnder.	55
Figura 9. Diagrama desarrollado en simulink, de la fuente óptica. Fuente: Elaboración propia	56
Figura 10. Modelado de la generación de señal FDM en Simulink de Matlab, Fuente: elaboración propia	57
Figura 11. Diagrama desarrollado en simulink, de la señal análoga original con amplitud de 1 y frecuencia de 3.5 GHz. Fuente: Elaboración propia	58
Figura 12. Modelado de la multiplexación FDM. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 13. Señales multiplexadas FDM. Fuente: Elaboración Propia	60

Figura 14. Modelado de la generación de señal OFDM en Simulink de Matlab, Fuente: elaboración propia	60
Figura 15. Modulador OFDM en Simulink de Matlab. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 16. Señal OFDM con modulación 64QAM. Fuente: Elaboración propia	62
Figura 17. Modelado del canal de transmisión en Simulink. Fuente: elaboración propia	64
Figura 18. Conversión óptico-eléctrica	65
Figura 19. Modelado del conversor análogo-digital en Simulink. Fuente: Elaboración propia	68
Figura 20. Modelado del modulador PCM en Simulink. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 21. Modelado del modulador digital en Simulink. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 22. Modelado del análisis en frecuencia en Simulink. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura 23. Señales multiplexadas FDM en Simulink. Fuente: Elaboración Propia.	75
Figura 24. Señal en la salida del canal de transmisión. FDM en Simulink. Fuente: Elaboración Propia.	76
Figura 25. Diagrama de constelación, modulación QPSK en FDM. Fuente: Elaboración propia	78
Figura 26. Diagrama de constelación, modulación 8PSK en FDM. Fuente: Elaboración propia	79
Figura 27. Diagrama de constelación, modulación 16QAM en FDM. Fuente: Elaboración propia	80
Figura 28. Diagrama de constelación, modulación 64QAM en FDM. Fuente: Elaboración propia	82
Figura 29. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión, FDM en Simulink. Fuente: Elaboración propia	83

Figura 30. Análisis del espectro a la salida del canal de transmisión, FDM en Simulink. Fuente: Elaboración propia	85
Figura 31. Diagrama de constelación, modulación QPSK en OFDM. Fuente: Elaboración propia	87
Figura 32. Señal en la salida del canal de transmisión QPSK. OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración Propia.	88
Figura 33. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión QPSK, OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración propia	89
Figura 34. Análisis del espectro a la salida del canal de transmisión QPSK, OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración propia	90
Figura 35. Diagrama de constelación, modulación 8PSK en OFDM. Fuente: Elaboración propia	91
Figura 36. Señal en la salida del canal de transmisión 8PSK. OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración Propia.	92
Figura 37. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión 8PSK, OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración propia	93
Figura 38. Análisis del espectro a la salida del canal de transmisión 8PSK, OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración propia	94
Figura 39. Diagrama de constelación, modulación 16QAM en OFDM. Fuente: Elaboración propia	96
Figura 40. Señal en la salida del canal de transmisión 16QAM. OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración Propia.	97
Figura 41. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión 16QAM, OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración propia	98

Figura 42. Análisis del espectro a la salida del canal de transmisión 16QAM, OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración propia	99
Figura 43. Diagrama de constelación, modulación 64QAM en OFDM. Fuente: Elaboración propia	101
Figura 44. Señal en la salida del canal de transmisión 64QAM. OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración Propia.	102
Figura 45. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión 64QAM, OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración propia	103
Figura 46. Análisis del espectro a la salida del canal de transmisión 64QAM, OFDM en Simulink. Fuente: Elaboración propia	104
Figura 47. Certificado de ponente de RedColsi Regional	106
Figura 48. Certificado de ponencia, RedColsi Nacional.	107
Figura 49. Certificado de ponencia en CIENTECCG	108
Figura 50. Certificado de VI Semana Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación	109

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Bandas en el espectro Electromagnético	34
Tabla 2. Parámetros de las señales modulantes y portadoras para multiplexación FDM	58
Tabla 3. Parámetros de simulación para el modelado de las fuentes de ruido	67
Tabla 4. Medición Estática de la señal multiplexada FDM	75
Tabla 5. Señal en la salida del canal de transmisión. FDM en Simulink. Fuente: Elaboración Propia.	76
Tabla 6. Medición Estática de la señal a la salida del canal de transmisión FDM.	77
Tabla 7. Medición del ciclo de la señal a la salida del canal de transmisión.	77
Tabla 8. Evaluación del diagrama de constelación QPSK. FDM	78
Tabla 9. Evaluación del diagrama de constelación 8PSK. FDM	80
Tabla 10. Evaluación del diagrama de constelación 16QAM. FDM	81
Tabla 11. Evaluación del diagrama de constelación 64QAM. FDM	82
Tabla 12. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal, FDM en Simulink.	84
Tabla 13. Evaluación del análisis de espectro a la salida del canal, FDM en Simulink.	85
Tabla 14. Evaluación del diagrama de constelación QPSK en OFDM	87
Tabla 15. Medición del ciclo de la señal a la salida del canal de transmisión QPSK, OFDM.	88
Tabla 16. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal QPSK, OFDM en Simulink.	89
Tabla 17. Evaluación del análisis de espectro a la salida del canal QPSK, OFDM en Simulink.	91

Tabla 18. Evaluación del diagrama de constelación 8PSK en OFDM	92
Tabla 19. Medición del ciclo de la señal a la salida del canal de transmisión 8PSK, OFDM.	93
Tabla 20. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal 8PSK, OFDM en Simulink.	94
Tabla 21. Evaluación del análisis de espectro a la salida del canal 8PSK, OFDM en Simulink.	95
Tabla 22. Evaluación del diagrama de constelación 16QAM en OFDM	96
Tabla 23. Medición del ciclo de la señal a la salida del canal de transmisión 16QAM, OFDM.	97
Tabla 24. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal 16QAM, OFDM en Simulink.	98
Tabla 25. Evaluación del análisis de espectro a la salida del canal 16QAM, OFDM en Simulink.	100
Tabla 26. Evaluación del diagrama de constelación 64QAM en OFDM	101
Tabla 27. Medición del ciclo de la señal a la salida del canal de transmisión 64QAM, OFDM.	102
Tabla 28. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal 64QAM, OFDM en Simulink.	103
Tabla 29. Evaluación del análisis de espectro a la salida del canal 64QAM, OFDM en Simulink.	105

Introducción

El avance en las tecnologías de los sistemas de comunicación, requiere eficiencia en la transmisión de datos a causa del crecimiento masivo de usuarios conectados a la red, debido a que, los pronósticos indican que para el 2022 hayan alrededor de 28.5 mil millones de dispositivos conectados en la red con respecto a los 18 mil millones conectados para el 2017 (Cisco, 2019). Para transmitir información hay diferentes canales como el hilo trenzado, cable coaxial y tecnologías inalámbricas, pero estos presentan un ancho de banda corto, pérdidas de datos y atenuación de la señal considerable con la distancia (García, 2009). Por lo tanto, surge la fibra óptica como canal de comunicación alternativo, el cual posee gran capacidad de envío de datos, velocidad y calidad en la transmisión de la señal.

Sin embargo, cuando se emplea la fibra óptica como medio de transmisión se presentan ciertos fenómenos, los cuales contribuyen a la que la señal presente pérdidas, degradaciones y/o atenuaciones en la señal de información transmitida. Entre estos fenómenos se encuentran el error de la magnitud del vector (EVM, error vector magnitude), la tasa de error de modulación (MER, Modulation Error Rate); esta investigación se centró en la relación señal a ruido (SNR, Signal-to-Noise Ratio), siendo esta la variable que indica la relación entre la señal a transmitir y el ruido que la corrompe.

Asimismo, existen técnicas de multiplexación que permite transmitir múltiples señales en diferentes portadoras, como la multiplexación por división de frecuencia FDM y multiplexación por división de frecuencia ortogonal OFDM (Rivas, 2012), siendo técnicas que brindan grandes ventajas en la industria de las telecomunicaciones, puesto que estas garantizan gran ancho de banda y velocidad en las redes de comunicación.

Para la ejecución de este proyecto se realizó el modelado, la simulación y evaluación de un sistema de comunicación óptico empleando las técnicas FDM y OFDM, por medio la herramienta computacional Matlab. Como parte inicial se identificó el modelo matemático de los componentes análogos, digitales y ópticos requeridos para implementar el sistema de comunicación, seguidamente se implementó por medio del software mencionado, la generación de la señal, modulación y conversión electro-óptica; también, se implementó el canal de transmisión por medio de la ecuación no lineal de Schrödinger, posterior a esto se realizó la conversión óptico-electrica y su acondicionamiento para la modulación digital. Por último, se realizó la evaluación del sistema de comunicación óptico en el cual se verifica el ancho de banda, potencia de transmisión, mapa de constelación, magnitud del error del vector, la tasa de error de modulación y la relación señal a ruido que afecta la transmisión de la información.

1. Descripción del Problema

En este capítulo se define el planteamiento del problema, la justificación, los alcances, objetivos, limitaciones y delimitaciones, marco referencial, marco teórico y marco legal que se establecieron para llevar a cabo esta investigación

1.1 Planteamiento del Problema

El desarrollo de la tecnología en el área de las comunicaciones exige que los sistemas sean construidos y analizados con proyección a enormes crecimientos de tráfico de datos, debido a la cantidad de usuarios que se pueden presentar; esto hace que el ancho de banda para transmitir la información sea alto y a su vez se debe mejorar la calidad de los sistemas de transmisión de información. (Gustavo Puerto Leguizamón, 2008)

Las señales de Radio Frecuencia (RF) por lo regular han sido enviadas a través de un medio no guiado como lo es el aire y este tiene consigo algunos inconvenientes como lo es el ruido eléctrico ya sea el correlacionado y el no correlacionado, por lo tanto, algunas líneas de investigaciones llevaron consigo adaptar otros medios de transmisión para disminuir este tipo de interferencia en las comunicaciones.

El estudio de diferentes medios de transmisión para las comunicaciones trajo como resultado el uso de la fibra óptica como canal de comunicación, pero, para que la información que se desea enviar sea apta para viajar por este medio, hay un proceso de construcción de la señal tanto en la parte eléctrica como en la parte óptica.

Uno de los problemas más grandes a la hora de transmitir es la interferencia de la calidad de la señal con respecto a la relación señal a ruido (Papiewski, 2018); la fibra óptica no es un medio que se salve de este problema, debido a que por su composición, esta distorsión se disminuye en este medio; por otra parte, en los procesos de modulación de la señal para el envío de información es donde se presentan las alteraciones en la calidad de la señal, por lo tanto se analizó el proceso de acondicionamiento de la señal con el fin de disminuir las atenuaciones presentadas.

Existen diferentes técnicas de modulación que brindan la posibilidad de transmitir múltiples portadoras por un mismo canal de comunicación, en este caso la fibra óptica; la “Multiplexación por División de Frecuencia (FDM) ha dado grandes avances en el mundo de las comunicaciones al igual que la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM), a simple vista la diferencia de estas dos técnicas de modulación es la eficiencia espectral de OFDM con respecto a la FDM” (Rivas, 2012), pero, esta no es la única cualidad que hay que tener en cuenta a la hora de transmitir información, es necesario analizar el comportamiento de la señal de comunicación tomando en cuenta la interferencia de la misma con respecto a la relación señal a ruido, los diferentes tipos de ruido, las anomalías y perturbaciones del sistema de transmisión que provoca que la información llegue con distorsión. Teniendo en cuenta la problemática anterior se planteó el siguiente interrogante:

¿Cuál de las técnicas de multiplexación FDM y OFDM podrá emitir una mejor calidad en la señal de comunicaciones en su parte eléctrica, con respecto a la relación señal a ruido (SNR)?

1.2 Justificación

Actualmente trabajar con los sistemas de comunicación implica que estos sean eficaces tanto en la velocidad de transmisión como en la eficiencia del sistema; a la hora de transmitir se debe tener cuidado debido a que a mayor frecuencia y velocidad de transmisión se puede generar mayor distorsión de la señal con respecto a la relación señal a ruido (SNR).

Las técnicas de modulación para transmitir FDM y la OFDM dio un gran avance en el tráfico masivo de datos puesto que estas permite enviar diferentes frecuencias o sub-portadoras por el mismo canal de comunicación; el desarrollo en las aplicaciones industriales sobre estas técnicas de modulación han avanzado a lo largo de la historia desde la transmisión por DAB (*digital audio Broadcasting*) inicialmente en 1987 pasando por el formato DVB (*digital video Broadcasting*) a principio de la década de los 90 en la cual son usados los formatos de modulación digital por fase PSK y cuadratura QAM, posteriormente los estándares de transmisión inalámbrica en redes de área local WLAN (*Wireless Local Area Network*) también conocido como WIFI (*Wireless Fidelity*) desarrollados en 1997, luego de esto el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas punto a multipunto llamado WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) del estándar IEEE 802.16 el cual fue desarrollado a finales de la década de los 90, el desarrollo de LTW (*Lower Tree Wavelet*) en el 2004 y LTE-A (*Long Term Evolution-Advanced*) en el 2009 con el objetivo de aportar eficiencia espectral, altas tasas de transmisión, flexibilidad en frecuencia y ancho de banda. (LÓPEZ, 2018)

En la aplicación de todos los desarrollos mencionados anteriormente se implementó las técnicas de modulación de Multiplexación por División de Frecuencia (FDM) y Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM), en el análisis de eficiencia espectral se puede definir que es más eficiente transmitir por la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal, pero, no es claro ni preciso decir cuál de las dos técnicas brindaría una mejor calidad de la información.

Por lo tanto, se realizó una investigación sobre el comportamiento del SNR con el fin de verificar y constatar cuál de estas dos técnicas de modulación proporciona una mejor calidad de la señal de información, a su vez brindar grandes beneficios tanto al desarrollo educativo al verificar técnicas las técnicas para aplicarlas no solo a nivel teórico sino industrial.

1.2.1 Impacto Esperado

Por medio del análisis de la señal de radio frecuencia (RF) adaptada a través del sistema FDM u OFDM se podría determinar cuál de estos dos componentes pueden ser útil y eficiente para la transmisión de datos o información usando el canal guiado de comunicación como lo es la fibra óptica, determinar que componente contribuye a entregar una señal más pura y con menos interferencia a la fibra, ayuda a que el desarrollo tecnológico en el área de las comunicación pueda abarcar nuevas tecnologías y usando este sistemas de modulación para la transmisión de datos.

1.2.2 Beneficios Tecnológicos.

- Trabajar en la generación de señales de radio frecuencia (RF) para ser enviada a través de la fibra óptica, a este método se conoce como radio sobre fibra (ROF) la cual consiste transmitir ondas de radio por medio de este medio guiado, estudiar esta línea de investigación contribuye a dar a conocer diferentes tipos de aplicaciones en dichos sistemas.
- Implementar sistemas FDM y OFDM para transmiten diferentes tipos de señales cada una de ellas sobre una sub portadora diferente que viajan por medio de un mismo canal de comunicación, pero sin hacer interferencia entre ellas mismas debido a que ninguna se superpone en la otra.
- Adaptar las señales de radio frecuencia usando el sistema de Multiplexación a través de los diferentes tipos de modulaciones, y verificar por medio de simulaciones en un software especializado que dieron soporte valido a las conclusiones de esta investigación.

1.2.3 Beneficios institucionales

- Contribuir con el desarrollo tecnológico e investigativo de los estudiantes da reconocimiento a la institución y a la carrera, debido a su educación de calidad y compromiso institucional.
- A través del desarrollo de proyectos de investigación y la colaboración institucional, que permite que los estudiantes tengan acceso a los recursos de

personal docente como orientadores y a los laboratorios para la ejecución del proyecto ayuda a constatar que el programa Ingeniería Electrónica esté comprometido con la educación de alta calidad.

1.2.4 Beneficios académicos

- Trabajar en proyectos de investigación de calidad como este, permite que los estudiantes puedan acceder a ser parte del desarrollo investigativo y tecnológico de la región, puesto que se pone en práctica lo que se ha visto en las aulas de clase en conjuntos con las habilidades de investigación.
- Contribuir en la investigación da a los estudiantes la posibilidad de mostrar sus avances en las diferentes redes académicas y eventos programados, dando reconocimiento a este y a la academia por su compromiso con la investigación.

1.3 Alcances

El proyecto tuvo un alcance establecido y este está definido por medio del tipo de proyecto y los resultados esperados procedentes al análisis comparativo con respecto a la relación señal a ruido (SNR) de los modelos de Multiplexación por división de frecuencia (FDM) y Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) en la adaptación de señales de radio para transmisión por Fibra óptica, se pueden observar detalladamente a continuación.

1.4 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos planteados y realizados en el proyecto de investigación.

1.4.1 Objetivo General

Analizar la relación señal a ruido de un sistema de comunicación óptico empleando las técnicas de multiplexación por división de frecuencia y multiplexación por división de frecuencia ortogonal en la adaptación de señales de radio para transmisión por fibra óptica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información por medio de libros, proyectos de tesis, artículos de revista, artículos científicos y sitios web sobre sistemas de comunicaciones, técnicas de multiplexación FDM y OFDM, relación señal a ruido y su comportamiento en la señal eléctrica para la transmisión por fibra óptica.
- Modelar por medio de un software especializado la etapa de transmisión del sistema de comunicaciones. la cual consiste en la generación de la señal de RF, la modulación digital, la multiplexación de las señales RF del sistema de comunicación.
- Modelar y simular a través de un software especializado la etapa final del sistema de comunicación y así determinar el comportamiento del SNR en las diferentes técnicas de multiplexación.

- Evaluar el sistema implementado mediante el análisis de parámetros de velocidad de transmisión, potencia y frecuencia, documentando los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en el programa.
- Dar a conocer y divulgar los resultados del proyecto de investigación.

1.5 Limitaciones y Delimitaciones

Al realizar el análisis en el comportamiento de la señal de comunicación en su forma eléctrica a través de la FDM y OFDM, se verifica la relación señal a ruido de la misma, se presentan algunas limitaciones y delimitaciones que pueden ver descritas a continuación:

1.5.1 Limitaciones

El desarrollo del análisis del sistema de comunicación y el comportamiento de la señal eléctrica a través de la Multiplexación se realizó a través de la herramienta computacional Matlab y este análisis está limitado a las características que dispone el software especializado.

No fue posible la comprobación experimental del proyecto debido a que la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS) no cuenta con los equipos ni los laboratorios especializados en fibra óptica.

1.5.2 Delimitaciones.

En este proyecto de investigación se realizó un modelo de un sistema óptico de comunicaciones por medio del software especializado Matlab, como una herramienta para

hacer las simulaciones y así analizar el comportamiento de la relación señal a ruido en la señal eléctrica empleando las técnicas FDM y OFDM. El modelo del sistema está conformado por el generador de la señal RF, la modulación digital (PSK y QAM), la FDM u OFDM, y la adición de la modulación electro-óptica para entregar la información en el canal de comunicación que este caso es la fibra óptica. Se realizó las respectivas pruebas de funcionamiento para evaluar la calidad, la eficiencia y los posibles errores del sistema.

2. Marco Referencial.

Con el fin de ejecutar el marco referencial se tomaron antecedentes prácticos y teóricos relacionados con el tema de las técnicas de multiplexación FDM y OFDM para la transmisión de datos a través de la fibra óptica.

2.1 antecedentes

Posteriormente se da a conocer algunas investigaciones sobre las cuales se fundamentó para el desarrollo del proyecto.

El artículo “Rendimiento de un sistema de control de errores con turbo códigos para canales PLC”. En este trabajo se estudió el desempeño de los turbo-códigos para el control de errores en transmisiones de datos que se realizan a través de la red eléctrica (Powerline Communications), para el modelado del sistema de esta red de datos se utilizan simulaciones por computadora, basadas en el modelo que se encuentra en la literatura conocido como indoor, y como técnica de modulación se usa la OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Tomando en cuenta el canal, la modulación y los turbo códigos, se propone una metodología para minimizar la tasa de bit en error (BER), como una función de la relación señal a ruido (SNR) promedio en el receptor. (Balbuena-Campuzano Carlos Alberto, 2014). Este artículo permitió verificar que las técnicas propuestas a investigar son de gran utilidad en el área de las telecomunicaciones y aplicaciones a diversos campos.

El artículo “OFDM óptimo para la comunicación bidireccional en las redes eléctricas inteligentes”. En este documento se diseñó un sistema OFDM óptimo para la comunicación bidireccional en las redes eléctricas inteligentes. La transmisión se realiza simulando un canal con ruido clase A, el cual es característico de las líneas eléctricas de alto, medio y bajo voltaje. El sistema OFDM es óptimo porque se emplean constelaciones bidimensionales rotadas: rectangular, circular y hexagonal de cuatro y dieciséis símbolos que tienen mejores desempeños comparados a sus contrapartes que son las constelaciones sin rotar. El OFDM óptimo disminuye la probabilidad de error de bits como mínimo de 1×10^{-2} cuando se comparan con OFDM-QAM, en un canal con ruido clase A. (R., 2018) se logró observar la multiplexación OFDM aplicada en modulación QAM, pero, es viable realizar pruebas con diferentes tipos de modulación digital como lo son PSK, FSK y QAM.

La tesis “Estimación del B.E.R. en un enlace de comunicaciones Ópticas”, En este proyecto se aplicaron los procedimientos para realizar la estimación de la tasa de error de bit B.E.R. en un enlace de comunicaciones ópticas, usando el software de PTDS o Photonics Transmission Design Suite. La simulación es una herramienta de inestimable valor a la hora de planificar sistemas de telecomunicación de altas prestaciones y costo. Ello es especial e importante en sistemas de comunicaciones ópticas, debido a su elevadísimo precio, en el que concurren tanto el hecho de que los equipos terminales son de banda muy alta, como porque las tecnologías de desarrollo e implementación de los dispositivos en los que se basan están en maduración, habiéndose comenzado muy recientemente la producción en masa de algunos de sus componentes. (Fabián Eduardo Sierra Sánchez, 2015) En el documento anterior se estimaron los valores arrojados en el estudio de un

sistema de comunicaciones ópticos del SNR y a su vez la verificación de BER dando así valores reales sobre las tasas de errores en el sistema a través de las simulaciones previas.

En la tesis doctoral “Técnicas Ópticas de Transmisión Avanzada para Redes OOFDM-WDM”. La generación de señales OFDM moduladas en intensidad y detectadas de forma directa a partir de modulaciones en doble banda lateral dan lugar a un uso ineficiente del espectro, además de que sufren penalizaciones importantes debido a la dispersión cromática. De forma alternativa, las modulaciones en banda lateral única evitan este inconveniente. En este trabajo presentaremos un esquema original de transmisión de señales ópticas OFDM basado en la modulación de banda lateral única que permite un uso del espectro más eficiente. Consiste en la definición de canales pareados que incluyen dos portadoras espectralmente próximas moduladas, cada una de ellas con la banda lateral única externa. (Fabián Eduardo Sierra Sánchez, 2015). El documento anterior mencionado da grandes aportes a la hora de aplicar técnicas de multiplexación por OFDM y FDM ya que explica el comportamiento y funcionamiento del mismo en las tecnologías existentes.

2.2 Marco Teórico

Para Realizar el análisis del comportamiento del SNR del sistema de comunicación por medio de la multiplexación FDM y OFDM, es necesario tener en cuenta algunas bases teóricas, conceptos y generalidades básicas y específicas, las cuales se verán reflejadas a continuación de una forma más detallada.

2.2.1 Sistemas de Comunicaciones

Las comunicaciones a lo largo del tiempo han estado en una constante evolución para que las personas tengan de una manera simple y fácil la información que requieran, desde la aparición del telégrafo donde viajaban señales de pulsos eléctricos a través de una línea o redes de comunicación luego de esto, la aparición del teléfono utilizando el mismo método de transmisión de información, en su constante evolución con la aparición de las señales de radio, las cuales viajan a través del aire, no conforme el hombre con esto se vieron con la necesidad de crear algo llamado Televisión, que además de permitir escuchar el sonido, también deja proyectar una imagen en suceso. (Fernández, 2009)

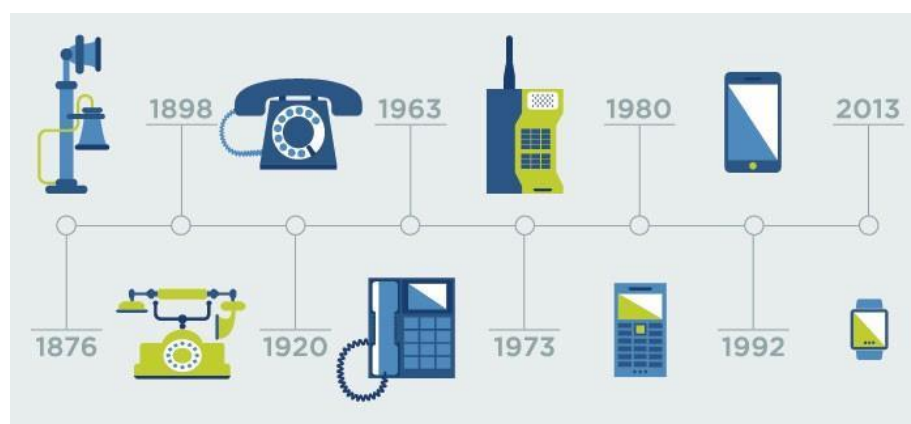


Figura 1. Evolución de la tecnología de las telecomunicaciones. Imagen tomada de (*Stelvio Salomone, 2019*)

2.2.2 Sistemas de comunicaciones ópticas

Un sistema óptico de comunicaciones en esencia es un sistema electrónico de comunicaciones que usa la luz como portadora de información, sin embargo, es impráctico y difícil propagar ondas luminosas por atmósfera terrestre; en consecuencia, los sistemas de

comunicación por fibra óptica usan fibras de vidrio o plástico para guiar ondas luminosas, tal y como se transmiten ondas electromagnéticas en una guía de onda.

Entonces la opto-electrónica es la rama de la electrónica que estudia la transmisión de la luz a través de fibras de muy alta pureza y que suelen ser fabricadas de vidrio o de plástico.

La capacidad de transmisión de información de un sistema electrónico de comunicaciones, es directamente proporcional a su ancho de banda. Para fines de comparación, se acostumbra expresar el ancho de banda de un sistema analógico como un porcentaje de su frecuencia portadora. A esto se llama relación de utilización del ancho de banda. Por ejemplo, un sistema de comunicaciones en VHF (Very High Frequency) que trabaja a una frecuencia portadora de 100 MHz con un ancho de banda de 10 MHz, tiene una relación de utilización del ancho de banda de 10%. Un sistema de microondas que funciona con frecuencias portadoras más altas, es obvio que el ancho de banda será mayor y por ende la capacidad de conducción de la información. (Ricardo Alfonso Pinto García, 2014)

Las frecuencias luminosas que se usan en sistemas de telecomunicaciones con fibra óptica están entre 1×10^{14} y 4×10^{14} Hz (100.000 a 400.000 GHz). Por tanto, la relación de utilización del ancho de banda de 10% estaría en una banda entre 10.000 GHz y 40.000 GHz (Tomasi, 2003)

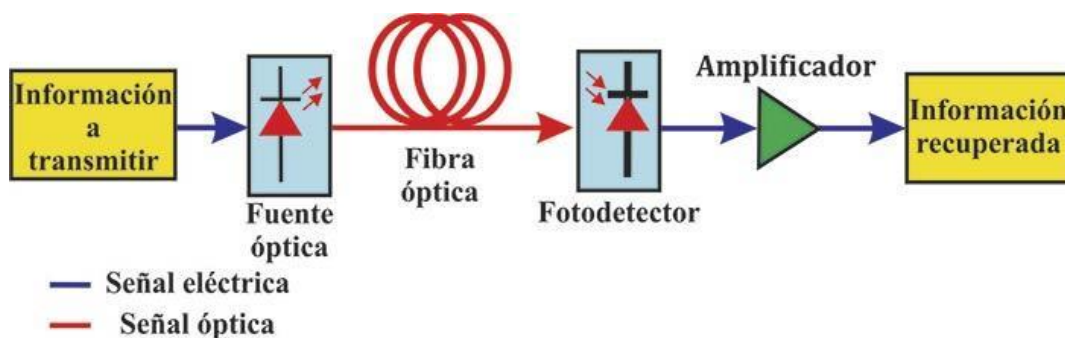


Figura 2. Esquema básico de un sistema de comunicación óptico. Imagen tomada de (Huerta, 2019)

2.2.3 Transmisión y generación de señal.

En un sistema de comunicación, esta es la etapa en la que se generan las señales, las cuales deben ser acondicionadas para ser transmitidas por el canal, por lo tanto, hay algunos conceptos básicos que deben ser manejados en esta sección que son: el espectro de las señales de radio frecuencia, modulación en amplitud con doble banda lateral (AM-DSB), fuente o portadora óptica, proceso en el cual se convierte una señal análoga a señal digital, conversión electro-óptica y la Multiplexación FDM y OFDM.

2.2.3.1 Espectro de Señales de Radio Frecuencia.

El espectro de radio frecuencia o espectro radio eléctrico, se trata del medio en el cual se transmiten las señales de ondas electromagnéticas que permiten las comunicaciones de televisión, internet, telefonía móvil, radio difusión, entre otras; y estas son administradas y reguladas por los gobiernos de cada país (Ministerio de tecnologías de información y telecomunicaciones, 2019).

El espectro de ondas electromagnéticas utilizadas en las comunicaciones se divide en diferentes bandas, cada una tiene características diferentes y propiedades de propagación especiales, en la tabla uno se puede observar la banda, símbolo, frecuencia y longitud de onda. (Ordóñez, 2012)

Tabla 1. Bandas en el espectro Electromagnético

BANDA	SÍMBOLO	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA	NOMENCLATURA
-1		$0,03 \text{ Hz} < f \leq 0,3 \text{ Hz}$	$1 \text{ Gm} \leq \lambda < 10 \text{ Gm}$	Gigamétricas
0	ELF (Extremely Low)	$0,3 \text{ Hz} < f \leq 3 \text{ Hz}$	$100 \text{ Mm} \leq \lambda < 1 \text{ Gm}$	Hectomegamétricas
1		$3 \text{ Hz} < f \leq 30 \text{ Hz}$	$10 \text{ Mm} \leq \lambda < 100 \text{ Mm}$	Decamegamétricas
2	SLF (Super Low)	$30 \text{ Hz} < f \leq 300 \text{ Hz}$	$1 \text{ Mm} \leq \lambda < 10 \text{ Mm}$	Megamétricas
3	ULF (Ultra Low)	$300 \text{ Hz} < f \leq 3000 \text{ Hz}$	$100 \text{ km} \leq \lambda < 1 \text{ Mm}$	Hectokilométricas
4	VLF (Very Low)	$3 \text{ kHz} < f \leq 30 \text{ kHz}$	$10 \text{ km} \leq \lambda < 100 \text{ km}$	Miriamétricas
5	LF (Low)	$30 \text{ kHz} < f \leq 300 \text{ kHz}$	$1 \text{ km} \leq \lambda < 10 \text{ km}$	Kilométricas
6	MF (Medium)	$300 \text{ kHz} < f \leq 3000 \text{ kHz}$	$100 \text{ m} \leq \lambda < 1 \text{ km}$	Hectométricas
7	HF (High)	$3 \text{ MHz} < f \leq 30 \text{ MHz}$	$10 \text{ m} \leq \lambda < 100 \text{ m}$	Decamétricas
8	VHF (Very High)	$30 \text{ MHz} < f \leq 300 \text{ MHz}$	$1 \text{ m} \leq \lambda < 10 \text{ m}$	Métricas
9	UHF (Ultra High)	$300 \text{ MHz} < f \leq 3000 \text{ MHz}$	$100 \text{ mm} \leq \lambda < 1 \text{ m}$	Decimétricas
10	SHF (Super High)	$3 \text{ GHz} < f \leq 30 \text{ GHz}$	$10 \text{ mm} \leq \lambda < 100 \text{ mm}$	Centimétricas
11	EHF (Extremely High)	$30 \text{ GHz} < f \leq 300 \text{ GHz}$	$1 \text{ mm} \leq \lambda < 10 \text{ mm}$	Milimétricas
12		$300 \text{ GHz} < f \leq 3000 \text{ GHz}$	$100 \mu\text{m} \leq \lambda < 1 \text{ mm}$	Decimilimétricas
13		$3 \text{ THz} < f \leq 30 \text{ THz}$	$10 \mu\text{m} \leq \lambda < 100 \mu\text{m}$	Centimilimétricas
14		$30 \text{ THz} < f \leq 300 \text{ THz}$	$1 \mu\text{m} \leq \lambda < 10 \mu\text{m}$	Micrométricas
15		$300 \text{ THz} < f \leq 3000 \text{ THz}$	$100 \text{ nm} \leq \lambda < 1 \mu\text{m}$	Decimicrométricas

Fuente: Javier Luque Ordóñez “Espectro Electromagnético y Espectro Radioeléctrico” 2012

(Ordóñez, 2012)

2.2.3.2 Modulación de amplitud en doble banda lateral (AM DBL)

La modulación de amplitud en doble banda lateral, es una modulación lineal que consiste en modificar la amplitud de la señal portadora en función de las variables de la señal de información o moduladora, La modulación en doble banda lateral equivale a una modulación AM, pero sin reinsertión de la portadora, la cual consiste en modificar la amplitud de la señal portadora en función de las variables de la señal de información o moduladora (Granados, 2010), la expresión matemática para una señal DBL, está definida por:

$$V_{DBL}(t) = X(t) * A_p * \text{Cos}(2\pi f_0 t) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde X(t) es la señal de información o el mensaje a transmitir y $V_{DBL(t)}$ es la señal modulada en DBL. Básicamente, este proceso consiste en multiplicar la señal moduladora y la señal portadora de forma que se obtiene una señal cuyo envolvente es directamente la señal de información multiplicado por la amplitud de la portadora.

2.2.3.3 Fuentes ópticas.

Las fuentes ópticas son aquellas que sirven para convertir las señales eléctricas en energía luminosa con el propósito de ser emitidas a diferentes longitudes de onda, algunos de los dispositivos más usados son:

Diodo LED, siendo este elemento es un emisor de baja potencia generalmente usado para cortas y medias distancias, se utiliza en la primera y segunda ventana en fibras multimodo. Por otra parte, el Láser, siendo este un dispositivo de alta potencia por lo que sus aplicaciones básicamente son tramos a grandes distancias, y es puesto en operación por lo general en la segunda ventada alrededor de los 1300 nm en fibras monomodo. Asimismo, el PIN, de este elemento se dice que es una versión mejorada de una unión PN elemental

que trabaja polarizada en inversa, este tipo de fuente no está ligada del tipo de fibra óptica a usar (Boquera, 2005)

2.2.3.4 Teorema de Nyquist

El teorema de muestreo de Nyquist se conoce como el teorema fundamenta, estableciendo una frecuencia mínima de muestreo, a su vez, este teorema puede usarse en un determinado sistema de modulación por codificación de pulso o PCM. Por lo tanto, la frecuencia mínima de muestreo es igual al doble de la frecuencia máxima de la entrada, en consecuencia si una señal tiene una frecuencia de 3GHz, según Nyquist la frecuencia mínima de muestreo es 6GHz, en otras palabras $F_{Nyquist} = 2 * F_{máx}$ (Semeria, 2015)

2.2.3.5 Modulación Digital

Existen muchas técnicas para modular o acondicionar la señal de información para que dicha señal se encuentre lista para ser enviada por el medio de transmisión; técnicas tanto para la modulación de señales analógicas como señales digitales, aunque sus principios pueden ser similares los métodos a usar y sus expresiones varias de acuerdo a lo que se requiera.

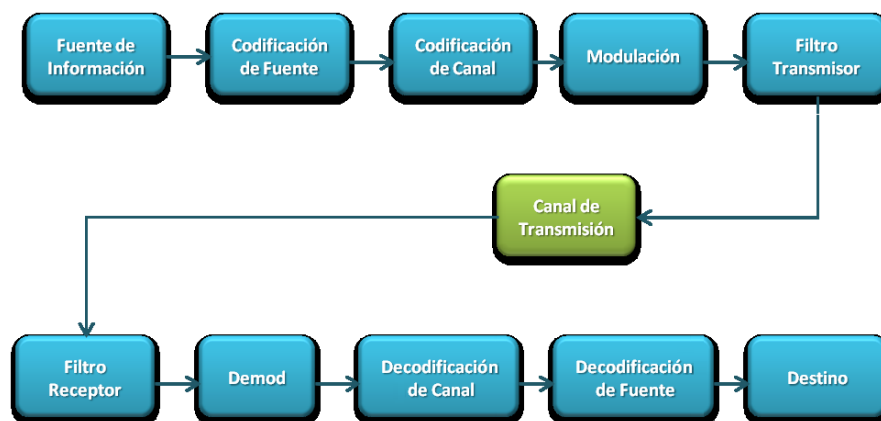


Figura 3. Diagrama de bloques de un sistema de transmisión digital. Imagen tomado de
(González C. Y. Venuska, 2018)

Como se puede reflejar en el anterior diagrama de bloques para transmitir la información es necesario una fuente de información que es lo que se desea transmitir, como siguiente paso se procede a realizar la codificación, y muestreo de la señal, este tipo de codificación y muestreo generalmente se procede a realizar sobre el método PAM, la cual consiste a realizar el muestreo y la cuantificación de la señal con respecto a la amplitud de la misma a esto se le conoce como modulación por amplitud de pulsos. Siguiendo a este paso se puede determinar la modulación en la cual se aplicará la portadora a la señal de comunicación con el propósito que esté lista para que esta pueda ser transmitida por el canal de comunicación, esta modulación puede ser en forma analógica o digital, en las que se modifican características propias de la señal para ser transmitida por el medio, características como amplitud, frecuencia y fase en la mayoría de los casos. Para transmitir varios canales de comunicación por el mismo medio es necesario que al momento de realizar el filtrado de comunicación se realice un proceso de multiplexación el cual consiste en componentes con múltiples entradas y única salida.

2.2.3.6 Modulador Mach Zehnder

Los formatos de modulación en comunicación óptica no difieren en esencia de los empleados en otros sistemas, se usa la amplitud la frecuencia y la fase, generalmente se emplea un diodo láser como una fuente de luz o portadora óptica que pueden ser modulador de forma directa o mediante dispositivos que modulen la luz radiante; el modulador externo más implementado es el Mach Zehnder, siendo este un modulador sobre la intensidad óptica mediante un láser semiconductor.

Un haz de luz se divide en dos mediante un espejo semi-plateado, los dos resultantes son reflejados cada uno por un espejo y finalmente pasan por un segundo espejo semi-plateado desde donde llegan a los dos detectores (Ortiz, 2012); en la figura X se ilustra un sistema simplificado del modulador Mach Zehnder

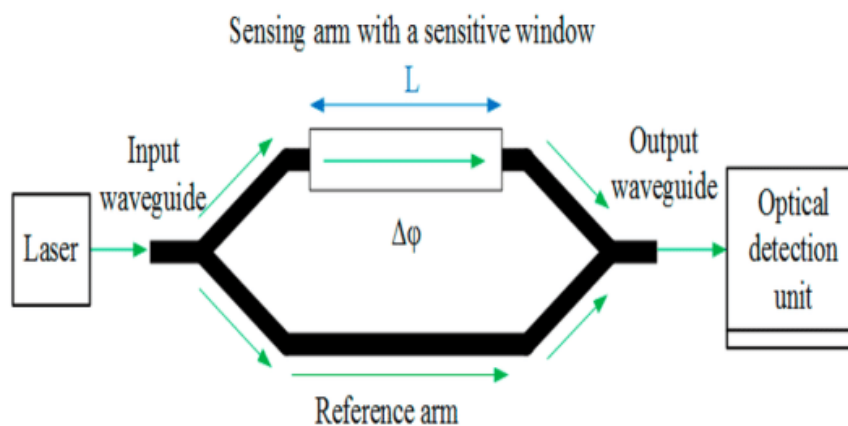


Figura 4. Esquema modulador Mach Zehnder, Fuente: Rajbir Singh “Estudio y Evaluación del rendimiento de radio sobre fibra utilizando el modulador Mach Zehnder” 2017 (Rajbir Singh, 2017)

2.2.4 Multiplexación

La multiplexación es el proceso donde se combinan dos o más canales de información en un solo medio de transmisión, la principal ventaja es que permite realizar varias

comunicaciones de forma simultanea para realizar este proceso es necesario implementar un dispositivo llamado multiplexor (López, 2017). Existen muchas estrategias de multiplexación según el protocolo de comunicación empleado, que pueden combinarlas para alcanzar el uso más eficiente.

2.2.4.1 Multiplexación por división de frecuencia

En el multiplexado por división de frecuencia (FDM, de Frequency Division Multiplexing), se convierte cada fuente de varias que originalmente ocupaban el mismo espectro de frecuencias, a una banda distinta de frecuencias, y se transmite en forma simultánea por un solo medio de transmisión. Así se pueden transmitir muchos canales de banda relativamente angosta por un solo sistema de transmisión de banda ancha. Hay muchas otras aplicaciones de la FDM, por ejemplo, la FM comercial y las emisoras de televisión, así como los sistemas de telecomunicaciones de alto volumen. Dentro de cualquiera de las bandas de transmisión comercial, las transmisiones de cada estación son independientes de las demás. (Tomasi, 2003)

Unas de las principales ventajas del sistema de FDM es que apoya el flujo de dúplex total de información que es requerido por la mayor parte de la aplicación y los problemas as de ruido en las comunicaciones tienen menos efecto, pero en su contraparte estos sistemas tienen un costo inicial elevado y cada usuario requiere una frecuencia de portadora precisa, así como cada canal de comunicación (O., 2012).

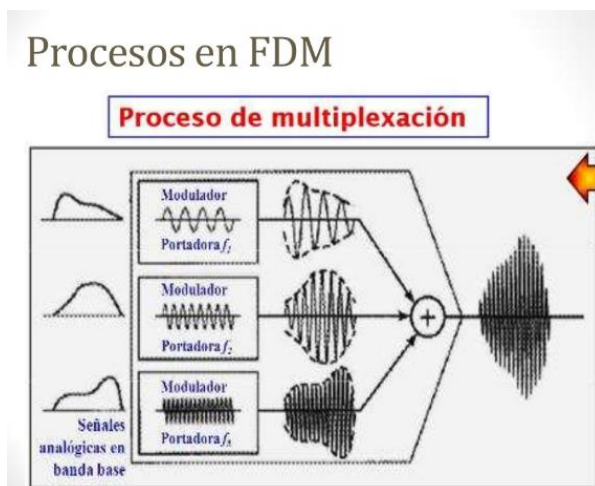


Figura 5. Proceso de Multiplexación FDM. Imagen tomada de (*Comprés, 2013*).

2.2.4.2 Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal. OFDM

La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, en inglés Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), o Discrete Multi-tone Modulation (DMT) es una multiplexación que consiste en enviar un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta información, la cual es modulada en QAM o en PSK. Normalmente se realiza la multiplexación OFDM tras pasar la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir los errores producidos en la transmisión, entonces esta multiplexación se denomina COFDM, del inglés Coded OFDM.

La multiplexación de portadoras OFDM es muy robusta frente al multitrayecto (multi-path), que es muy habitual en los canales de radiodifusión, frente a las atenuaciones selectivas en frecuencia y frente a las interferencias de RF. Debido a las características de esta multiplexación, es capaz de recuperar la información de entre las distintas señales con distintos retardos y amplitudes (fading) que llegan al receptor, por lo que existe la

posibilidad de crear redes de radiodifusión de frecuencia única sin que existan problemas de interferencia. (ESACADEMIC, 2015)

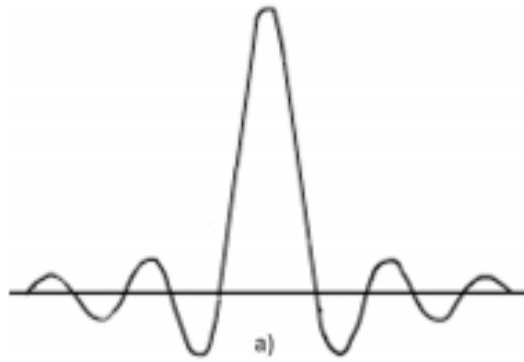


Figura 6. Espectro de un Subcanal OFDM. Imagen tomada de. (Jiménez, 2015)

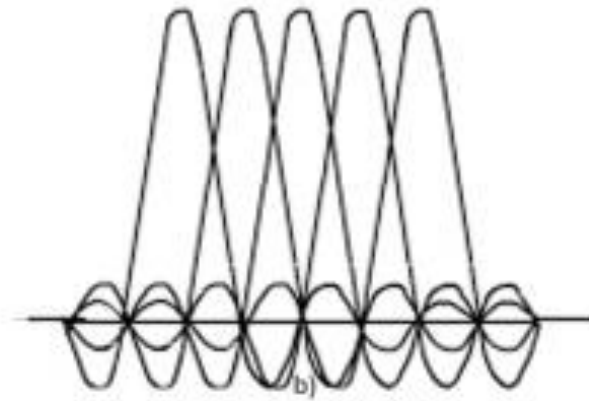


Figura 7. Espectro OFDM. Imagen tomada de. (Jiménez, 2015)

En la figura 6 puede determinar el comportamiento de una sola señal de comunicación, pero, en la figura 7 se refleja el funcionamiento de varias señales multiplexadas en un mismo sistema por la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM).

2.2.5 Relación Señal a Ruido (SNR)

La relación señal ruido (a menudo abreviado como SNR o S/R) es una medida de ingeniería electrónica que define la relación entre la potencia de una señal con la potencia del ruido que la corrompe.

En términos menos técnicos, la relación señal ruido compara el nivel de una deseada señal (como música) con el nivel del ruido de fondo. Cuanto más alto la relación, menos molesto es el ruido de fondo. El concepto también puede ser entendido como normalizando el nivel de ruido a 1 (0 dB) y midiendo como la señal destaca. En algunos casos de entrelazado puede ayudar incrementar el margen del ruido a un nivel aceptable. (Garai, 2013). En general cuanto más alto es la señal sobre el ruido mejor; la señal es más clara. A

5. continuación, puede verse ilustrada la ecuación general para determinar esta relación.

$$F = \frac{\left(\frac{S}{R}\right)_{ent}}{\left(\frac{S}{R}\right)_{sal}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde F se denomina como el factor de ruido, $(S/R)_{ent}$ por la relación Señal/Ruido en la entrada y $(S/R)_{sal}$ por la relación Señal/Ruido en la salida y se expresa en números simples, sin embargo, estos suelen expresarse en forma logarítmica.

$$\begin{aligned} 10 \log \log (F) \\ = 10 \log \log \left(\frac{S}{R}\right)_{ent} - 10 \\ \log \log \left(\frac{S}{R}\right)_{sal} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 3}$$

Esta expresión normalmente en decibelios, el factor de ruido en decibelios será, por tanto, la diferencia entre las relaciones S/R en la entrada y en la salida del elemento bajo prueba (Tomasi, 2003)

2.2.6 Software de simulación Matlab

MATLAB (Abreviatura de MATrix LABoratory) siendo este un sistema computacional numérico con un lenguaje de programación propio, el cual se encuentran disponible para diversas plataformas como Unix, Windows, macOS y Linux; en esta herramienta se puede manipular matrices, presentación de datos y funciones mediante algoritmos, creación de interfaz de usuario (GUI), Adquisición de datos, análisis y procesamiento de datos, entre otros. Asimismo, dispone de una amplia gama de programas de apoyo denominados “Toolbox”, cubriendo estas herramientas casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería. (Cálculo Científico, 2017)

2.2.7 Simulink

Simulink es una de las aplicaciones de Matlab que permite construir mediante diagramas de bloques los sistemas físicos y de control, la manipulación de estos sistemas se hace mediante funciones de transferencia (Erik Cuevas, 2010), operaciones matemáticas simples y complejas, señales de cualquier tipo y modelamientos propios si bien se desea, asimismo, es multidisciplinario en donde puede soportar sistemas complejos como lineales y no lineales, regidos en el dominio del tiempo, tiempo continuo, muestreados, sistemas híbridos o de múltiples frecuencias mediante multiplexores, entre otras funciones

2.3 Marco Legal

A continuación, se presentan algunas recomendaciones estandarizadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, las cuales fueron consideradas para ejecutar el proyecto de investigación.

Características de los transceptores de comunicación por la línea eléctrica de banda estrecha con modulación por división de frecuencia (OFDM). Aprobado en 2012-11 por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en la recomendación G.9901 (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2012).

Vocabulario de términos de las telecomunicaciones móviles internaciones (IMT). El cual fue aprobado en 2012-03 por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en la recomendación M.1224-1 (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2013)

Conexiones y circuitos telefónicos internaciones – Recomendaciones generales sobre la calidad de transmisión para una conexión telefónica internacional completa aprobado por Unión Internacional de Telecomunicaciones en la recomendación G.114 (Union Internacional de Telecomunicaciones, 2003)

Métodos de medición de equipos video digitales con Entrada/Salida analógica. Aprobado en 1995 por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en la recomendación BT.1204 (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1995)

Determinación de la relación de protección en radiofrecuencia en la radiodifusión sonora con modulación de frecuencia. Aprobado en 1986 por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en la recomendación BT.1204 (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1986)

Parámetros y objetivos de las características de error de extremo a extremo para conexiones y trayectos digitales internacionales de velocidad binaria constante. Aprobado en 2002-12 por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en la recomendación G.826 (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2002)

La recomendación G.652, describe las características geométricas y de transmisión de fibras y cables monomodo cuya dispersión cromática y longitud de onda de corte no este desplazado de la región de longitud de onda de 1310nm, optimizando su uso en la región de longitud de onda de 1310nm y que puede utilizarse también a longitudes de onda en la región (International Telecommunication Union - ITU, 2016)

3. Metodología

Posteriormente, se describe el tipo de investigación ejecutada y la metodología que se llevó a cabo para desarrollar cada uno de los objetivos específicos planteados.

3.1 Tipo de Investigación

En el proyecto se realizó una investigación de tipo descriptiva, ya que busca conocer y evaluar el comportamiento de una señal a través de un sistema óptico, analizando la relación señal a ruido durante la transmisión de la información, basados en las técnicas de multiplexación por división de frecuencia y multiplexación por división de frecuencia ortogonal, asimismo, es una investigación tipo tecnológica aplicada por lo que pretende ser un diseño de tecnología práctica a las telecomunicaciones.

3.2 Diseño metodológico

3.2.1 Recopilar información por medio de libros, proyectos de tesis, artículos de revista, artículos científicos y sitios web sobre sistemas de comunicaciones, técnicas de multiplexación FDM y OFDM, relación señal a ruido y su comportamiento en la señal eléctrica para la transmisión por fibra óptica.

Para llegar a cabo este objetivo, se recopiló información en libros, tesis de investigación, artículos científicos en las bases de datos de la Universidad Francisco de Paula Santander y de otras universidades acerca de los sistemas de comunicación por fibra óptica, las técnicas de multiplexación FDM y OFDM, también, se consultaron las técnicas para determinar el SNR de la señal, en los sistemas de comunicación y así poder analizar el

comportamiento y afectación sobre la misma.

Asimismo, se examinaron los aspectos más importantes de las técnicas de multiplexación FDM y OFDM como ancho de banda, rango de frecuencia, entre otros basado según la norma establecida en la ITU-T G9901 y las características de la fibra óptica monomodo estándar a través de la recomendación ITU-T G.652.

Además, Se consultaron los manuales del software Matlab, con el fin de poder obtener más conocimiento del mismo, de sus librerías y entornos más relevantes para la simulación y el análisis del sistema de comunicación.

3.2.2 Modelar por medio de un software especializado la etapa de transmisión del sistema de comunicaciones. la cual consiste en la generación de la señal de RF, la modulación digital, la multiplexación de las señales RF del sistema de comunicación.

Para llevar a cabo la ejecución de este objetivo, se establecieron 5 señales analógicas de entrada, cada una de estas fue moduladas con una señal de radio distinta. Estas señales cada una por separado contiene 3 subsistemas y cada uno ellos cumplen un papel importante en la transmisión. El primer subsistema es el encargado de realizar la generación de la señal análoga, la modulación en doble banda lateral y la conversión análogo-digital de la señal de radio frecuencia o RF. El segundo subsistema es el que se encarga de generar la señal óptica para ser transmitida por el canal, este sistema se fija básicamente en la longitud de onda funcionando, así como el diodo láser o portadora óptica. Por último, el tercer subsistema es el encargado de realizar la conversión electro-óptica a través del modulador Mach Zehnder y de multiplexar las señales de entrada obteniendo una sola señal óptica multiplexada adecuada al canal de transmisión.

3.2.3 Modelar y simular a través de un software especializado la etapa final del sistema de comunicación y así determinar el comportamiento del SNR en las diferentes técnicas de multiplexación.

En el desarrollo de este objetivo, se realizó el modelado del canal de transmisión teniendo en cuenta el lenguaje de programación utilizado por el Toolbox simulink del software Matlab.

Para desarrollar el canal de transmisión, se realizó el modelado de la ecuación no lineal de Schrödinger, la cual establece los fenómenos de orden lineal y no lineal en función de la longitud del canal óptico. Por otra parte, para el desarrollo del bloque receptor se realizaron 3 subsistemas: el primero encargado de realizar la conversión óptico-eléctrica, el segundo encargado de realizar una conversión análogo-Digital y el tercero el cual realizó la modulación digital y así entregar la señal a un diagrama de constelación para que esta sea evaluada mediante esta técnica.

3.2.4 Evaluar el sistema implementado mediante el análisis de parámetros de velocidad de transmisión, potencia y frecuencia, documentando los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en el programa.

Se analizaron los parámetros básicos de transmisión como: potencia y frecuencia de transmisión, asimismo, se tuvieron en cuenta otras variables como el Error de la magnitud del vector o por sus siglas en inglés (EVM, Error Vector Magnitud) y la Tasa de Error de Modulación o por sus siglas en inglés (MER, Modulation Error Rate), tanto en sus valores porcentuales como los datos en decibeles (dB), todas estas evaluaciones logro determinar

cuál técnica de multiplexación para la transmisión de datos emite una mejor calidad de la señal evaluando el análisis de espectro en frecuencia y el diagrama de constelación.

Se documentaron los resultados obtenidos en las simulaciones del software Matlab con el propósito de generar productos como artículos científicos y futuras líneas de investigación.

3.2.5 Dar a conocer y divulgar los resultados del proyecto de investigación.

En el desarrollo de este objetivo se dieron a conocer los resultados del proyecto de investigación en la participación como ponente en eventos como la RedColsi (Red Colombiana de Semillero de Investigación) en el encuentro regional, nodo Norte de Santander y encuentro nacional el cual se realizó en la ciudad de Valledupar, en el congreso Internacional CIENTECG en la ciudad de Medellín, también en la VI semana internacional de ciencia, tecnología e innovación en la Universidad Francisco de Paula Santander, Además, se socializaron los objetivos alcanzados, resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones frente al jurado correspondiente para la evaluación del proyecto de investigación.

4. Resultados

En este capítulo se describen los procesos que implementaron para la elaboración del sistema de comunicación óptico a través del entorno de simulación Simulink. Como parte inicial se indicaron los fundamentos teóricos y matemáticos utilizados para la elaboración de cada etapa de dicho sistema; luego de esto se lleva a cabo el montaje del sistema de transmisión, el cual se explicará detalladamente el funcionamiento a continuación. Asimismo, se realiza la evaluación del sistema analizando la relación señal a ruido, entre otras variables. Por último, se evidencia la divulgación parcial y total del proyecto de investigación a la comunidad estudiantil e investigativa.

4.1 Objetivo 1: Recopilar información por medio de libros, proyectos de tesis, artículos de revista, artículos científicos y sitios web sobre sistemas de comunicaciones, técnicas de multiplexación FDM y OFDM, relación señal a ruido y su comportamiento en la señal eléctrica para la transmisión por fibra óptica.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la recopilación de los conceptos relevantes para el desarrollo de este proyecto de investigación. En la información útil e importante se encuentra la normativa ITU, los aspectos básicos del modulador Mach Zehnder con su expresión matemática, técnicas de multiplexación FDM y OFDM, relación señal a ruido en la señal eléctrica para la transmisión por la fibra óptica.

4.1.1 Norma ITU (International Telecommunication Union)

La Unión Internacional de Telecomunicaciones es el organismo especializado encargada de las tecnologías de la información y las comunicaciones, las TIC (International Telecommunication Union - ITU, 2020). Este órgano estudia los aspectos técnicos, de exploración y tarifarios, publica y recomienda sobre los mismos, normaliza las telecomunicaciones en un plano internacional, dando normativas para cada disciplina en el área de las telecomunicaciones, incluyendo normativas de radio, televisión, internet, comunicaciones a través de antenas y propagación sobre fibra óptica; asimismo brinda recomendaciones sobre las formas de propagación sobre las diferentes técnicas de multiplexación.

4.1.2 Modulador Mach Zehnder

El modulador Mach-Zehnder actúa como un modulador de intensidad ya que cada rama de este propaga la luz y puede alterar las fases de uno de los brazos, dando que a la salida se sumen las ramas. La función de transferencia del modulador es una función sinusoidal, lo que confiere a es un carácter no lineal como lo muestra la ecuación 4:

$$\frac{|E_0|^2}{|E_i|^2} = \cos \cos \left[\frac{\pi * V(t)}{2 * V\pi} \right] \quad \text{Ecuación 4}$$

La tensión necesaria para conmutar el modulador de un máximo a un mínimo de transferencia de potencia es justamente el factor $V\pi$. La expresión general que relaciona $E_0(t)$ con $E_i(t)$ viene dada por la ecuación 5:

$$E_0 = \frac{E_i}{2} \left\{ e^{j \frac{(1+\alpha)\pi V(t)}{2V\pi}} + j e^{-j \frac{(1-\alpha)\pi V(t)}{2V\pi}} \right\} \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde α es el coeficiente chirp del modulador y $V(t)$ es la señal eléctrica moduladora. La relación entre las intensidades de entrada y salida $|E_0|^2$ y $|E_i|^2$, es independiente del coeficiente chirp del modulador. Si el coeficiente chirp no es nulo, tanto la amplitud como la fase de la portadora óptica son moduladas por la señal $V(t)$. Gracias a ello un modulador de amplitud Mach-Zehnder puede ser empleado tanto para generar modulaciones de intensidad como modulaciones de fase (Ortiz, 2012).

4.1.3 Multiplexación por División de Frecuencia

La Multiplexación por División de Frecuencia, es una técnica usada en las telecomunicaciones es una técnica mediante la cual, el ancho de banda disponible se divide en unas series de sub-bandas de frecuencias levemente distintas, en donde cada una de estas se usa para transportar una señal por separado. Esta técnica permite que por un solo medio de transmisión ya sea por frecuencia de radio, cable coaxial o fibra óptica se pueda transportar múltiples señales independientes en el mismo vínculo. Una de las aplicaciones más relevantes es la radiodifusión y la televisión por cable.

FDM es un esquema análogo de multiplexado, la información que entra a un sistema FDM es una técnica que usa múltiples protocolos de comunicaciones digitales como analógicos, principalmente de radio frecuencia y entre ellos los teléfonos móviles de redes GSM. Se suele utilizar esta técnica cuando las señales multiplexadas son de naturaleza analógica, así como la señal resultante transmitida por la línea, de modo que éstas varían de forma continua con el tiempo. En consecuencia, será necesario proteger la señal transmitida

para mantener tales variaciones intentando evitar o compensar efectos como el ruido, interferencias electromagnéticas o la atenuación sufrida por la distancia. (Cantero, 2015)

4.1.4 Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.

La multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) es un método de modulación donde el espectro asociado a cada dato es una pequeña porción del ancho de banda total, el cual se divide en N subcanales. Cada uno de esos subcanales se modula con un símbolo y se multiplexa en frecuencia, para generar OFDM se deben tener en cuenta varios parámetros como son: el número de subportadoras, el esquema de modulación y el intervalo de guarda a utilizar. El número de portadoras corresponden al número de puntos complejos que son procesados por la FFT.

OFDM es un esquema de modulación digital en el cual se realiza la división del espectro disponible en varios subcanales, similar a FDM, pero en vez de dejar espacio de guarda de subportadoras, en OFDM se encuentran más cercanas pero ortogonales entre sí. Este espaciado consiste en que la separación espectral entre portadoras consecutivas es siempre la misma e igual al inverso del periodo del símbolo, de forma que la señal OFDM se puede expresar, en notación compleja como se muestra en la siguiente ecuación (Cantero, 2015).

$$S(t) = \sum_{i=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} d_i e^{2\pi j \left(f_c + \frac{i}{T} \right) t} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- f_c : es la frecuencia central
- T : es el periodo del símbolo
- d_i : es el símbolo que lleva la información
- $s(t)$: es la señal OFDM en el tiempo.

La siguiente descripción de la señal OFDM, básicamente es tomada de las subportadoras mapeadas son sumadas y forman la onda a transmitir sobre el canal como se muestra en la ecuación 7.

$$S_m(t) = \sum_{n=0}^{n-1} x_{n,m} \phi_n(t - mT) \quad \text{Ecuación 7}$$

una secuencia infinita de símbolos OFDM o tramas es una yuxtaposición de todos los símbolos individuales OFDM, reemplazando el subíndice m se obtiene:

$$S(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{n=0}^{N-1} x_{n,m} \phi_n(t - mT) \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

En vista que $n(t)$ es un pulso rectangular modulado sobre la frecuencia portadora nW/N , se puede observar que en OFDM hay N subportadoras, cada una llevando una velocidad de símbolo baja $R_{OFDM} = RS/N$. Note que la velocidad de símbolo de cada Subcanal es la velocidad en la cual símbolos OFDM o tramas son enviadas (Leonardo Jiménez, 2001).

4.1.5 Relación Señal a Ruido (SNR)

La relación señal a ruido se define como el margen que hay entre la potencia que se transmite y la potencia del ruido que lo corrompe, este margen es medido en decibelios.

(Señal-Ruido SNR se utiliza para los sistemas de computación analógicos en su lugar), entendiéndose como ruido a cualquier señal no deseada que circula por el interior de un equipo electrónico. El ruido se mide sin ninguna señal a la entrada del ruido.

Existen dos tipos de ruido: correlacionado y no correlacionado; el correlacionado es aquel que involucra una señal, existe solo cuando una señal presente y no correlacionado está presente independientemente de que exista señal o no; hay algunos orígenes principales del ruido como el ruido atmosférico, ruido de disparo, ruido de tránsito, ruido térmico, entre otros. Básicamente todo ruido perturba o dificulta la comprensión de un mensaje. En algunos casos, la presencia del ruido puede transformarlos en desinformación (Garay, 2013).

La magnitud del ruido generado por un dispositivo electrónico se puede expresar mediante el denominado factor de ruido (F), siendo este el resultado de dividir la señal a ruido de entrada $(S/R)_{ent}$, por la señal a ruido de salida $(S/R)_{sal}$, como lo muestra en la ecuación 9; este valor de señal a ruido se expresa en numerología simple.

$$F = \frac{\left(\frac{S}{R}\right)_{ent}}{\left(\frac{S}{R}\right)_{sal}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Sin embargo, los valores que se relacionan con la señal a ruido suelen expresarse de forma logarítmica, generalmente expresada en decibelios, por lo tanto, el factor de ruido expresado de forma logarítmica se expresa según lo muestra en la ecuación 10.

$$F_{dB} = 10 \log \left[\left(\frac{S}{R}\right)_{ent} \right] - 10 \log \left[\left(\frac{S}{R}\right)_{sal} \right] \quad \text{Ecuación 10}$$

El factor de ruido es uno de los parámetros más importantes a la hora de realizar transmisión de datos, siendo este un parámetro que no puede ser eliminado por completo, se puede reducir mediante el diseño electrónico y elección de los componentes.

4.2 Objetivo 2: Modelar por medio de un software especializado la etapa de transmisión del sistema de comunicaciones. la cual consiste en la generación de la señal de RF, la modulación digital, la multiplexación de las señales RF del sistema de comunicación.

Para el desarrollo de este objetivo se realizó un modelo de la generación de la señal en el entorno de programación de Simulink de Matlab, esta sección fue dividida en dos debido a que la investigación consta de la evaluación de dos tipos de multiplexación: FDM y OFDM.

4.2.1 Modulador Mach Zehnder

Para llevar a ejecución este segundo subsistema se implementó en el software, la ecuación (5) descrita anteriormente, la cual hace referencia, a la manera en cómo trabaja este modulador y como este realiza el proceso de conversión electro-óptico de la señal que fue generada. En la figura 10, se ilustra la señal resultante del modulador Mach Zehnder.

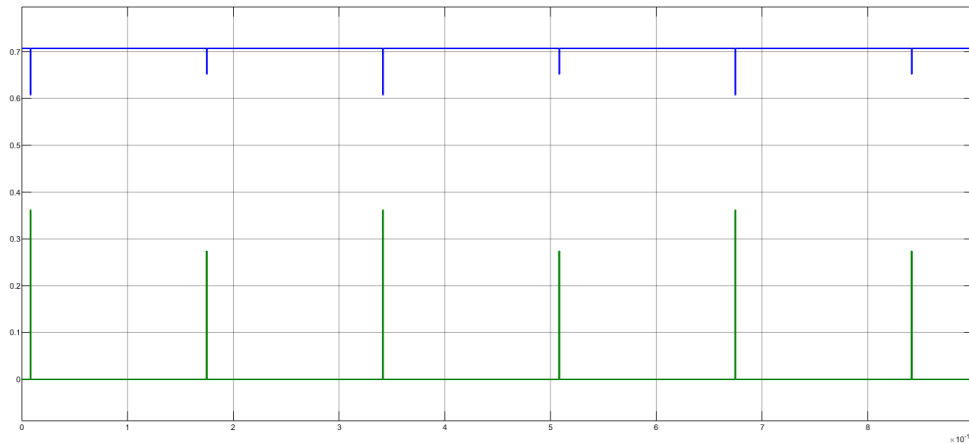


Figura 8. Diagrama desarrollado en simulink, del modulador Mach-Zehnder.

4.2.2 Fuente Óptica

Este subsistema es el encargado para generar esta señal en el espectro óptico el cual consta con una longitud de onda central alrededor de los 1550 nm el cual es definido en la tercera ventana de transmisión, así también, este es el encargado de generar la potencia óptica de las señales que fueron puestas a la entrada del canal óptico. Debido a que serán emitidas mediante un mismo canal de transmisión por medio de la multiplexación por división de frecuencia fue posible generar la misma fuente óptica para todas las señales. En la figura 9, puede observarse el resultado de la señal óptica generada.

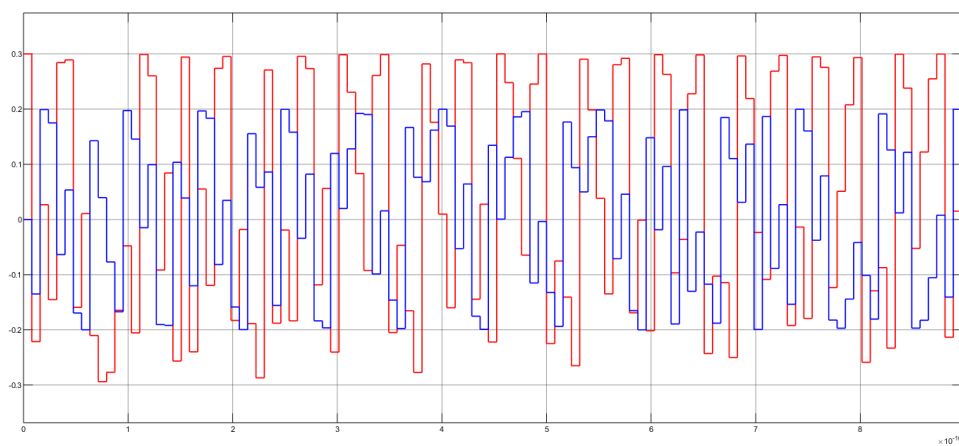


Figura 9. Diagrama desarrollado en simulink, de la fuente óptica

4.2.3 Multiplexación por División de Frecuencia

Para realizar este modelo en el software se hizo necesario llevar un esquema por separado para cada una de las señales a transmitir como se muestra en la figura 8.

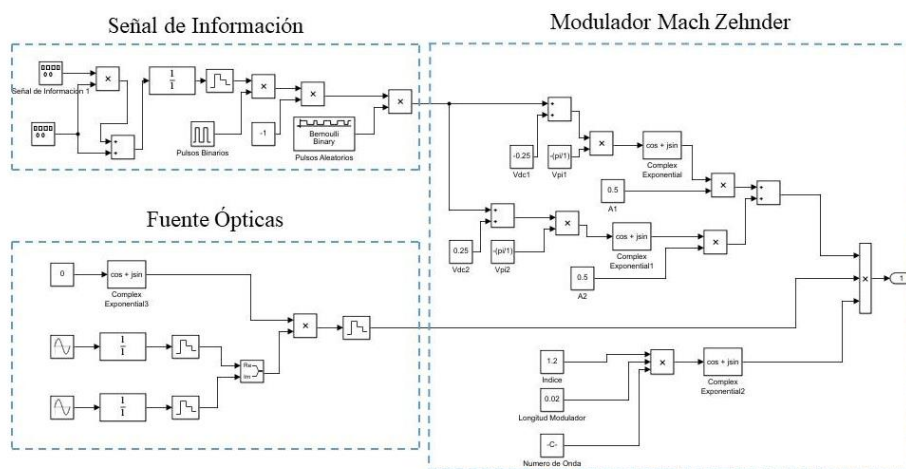


Figura 10. Modelado de la generación de señal FDM en Simulink de Matlab.

Este esquema, trae una ilustración en donde se muestran 3 subsistemas que consisten básicamente 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;

asimismo, el segundo subsistema es el encargado de realizar el modelo del modulador óptico externo Mach-Zehnder; por último se puede observar una fuente óptica o láser de inyección el cual emite una portadora en el espectro óptico con una longitud de onda central en la tercer ventana alrededor de los 1550nm.

4.2.3.1 Señal de Información

Para describir el proceso realizado en el modelado del primer subsistema, se tuvieron en cuenta 5 señales portadoras en la banda de frecuencia EHF (Frecuencia Extremadamente Alta, así también, 5 señales modulantes de entrada o señales de información los cuales son generadas de forma analógica. En la Figura X se puede ilustrar el resultado de la señal 2 la cual cuenta con una amplitud de 1 y una frecuencia de 3.5 GHz elaborada en el Scope de Simulink.

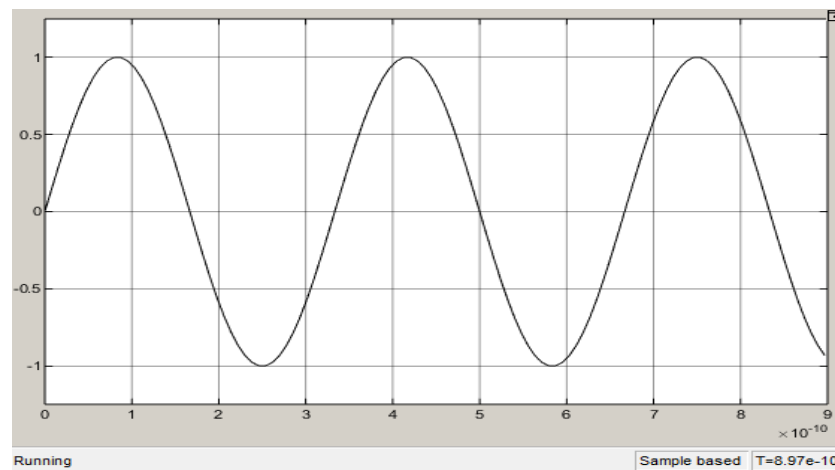


Figura 11. Diagrama desarrollado en simulink, de la señal analoga original con amplitud de 1 y frecuencia de 3.5 GHz.

En la tabla 2 se puede observar los valores de frecuencia y amplitudes que se usaron para la generación de estas señales, se igual forma, la generación de las señales fueron

sometidas a una modulación en su parte análoga de doble banda lateral, obteniendo de esta forma señales moduladas en ondas milimétricas.

Tabla 2. Parámetros de las señales modulantes y portadoras para multiplexación FDM

Señal	Frecuencia Analógica (GHz)	Frecuencia RF (GHz)	Amplitud Analógica (V)	Amplitud RF (V)
1	3	60	1	1
2	3.5	62	1	1
3	4	62	1	1
4	4.5	66	1	1
5	5	68	1	1

Para Realizar la modulación de doble banda lateral de la señal analógica de entrada, se toma en cuenta la ecuación (1), en donde se puede analizar a $X(t)$ como la señal modulante y $A_p * \text{Cos}(2\pi f_0 t)$, la cual representa la señal portadora o señal de radiofrecuencia (RF), asimismo, teniendo en cuenta el modelo planteado por el teorema de Nyquist se procede a realizar la conversión desde el formato análogo a un formato digitalizado, para de esta forma ser entregada al modulador Mach Zehnder.

4.2.3.2 Multiplexado

Luego de realizar el modelado con cada una de las señales de entrada se procede a comprimir cada una de las señales en un subsistema para poder entregarlas al multiplexor, posterior a esto se realiza el formato de multiplexación, para esta sección, se utilizó un bloque básico de multiplexación otorgado por simulink, en donde entran las 5 señales generadas y previamente moduladas para ser entregadas a la fibra, teniendo como resultado

una única señal. En la figura 12 puede verse el modelo resultante en el entorno de programación y en la figura 13 se observa la señal multiplexada en FDM.

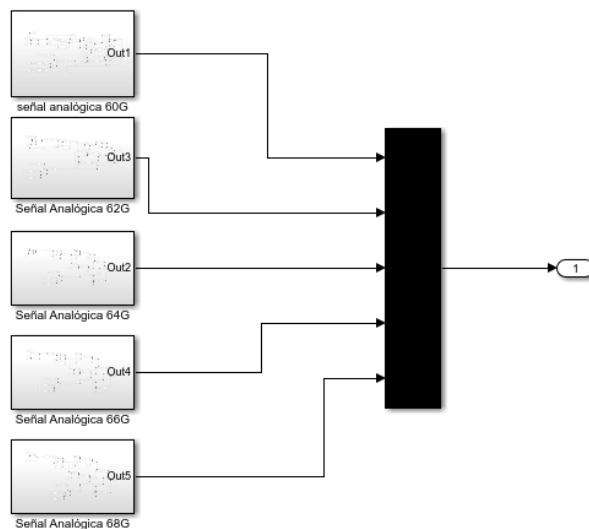


Figura 12. Modelado de la multiplexación FDM.

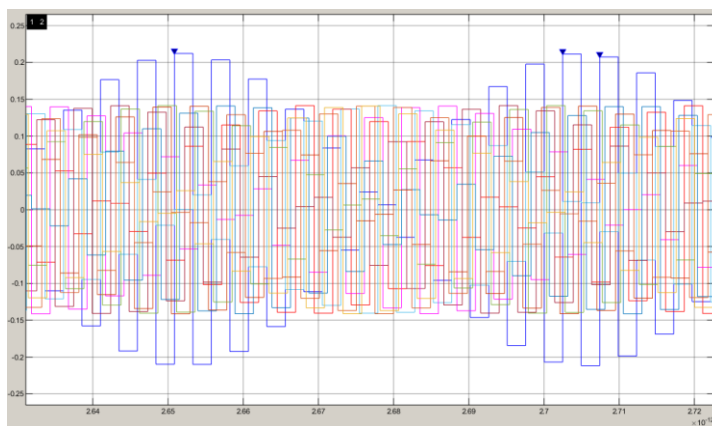


Figura 13. Señales multiplexadas FDM.

En la figura 13 se observa como entran las señales a la fibra óptica, como se mencionó antes estas señales llevaron un proceso de adaptación o modulación, cada uno de forma separada.

4.2.4 Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.

Para llevar a cabo la ejecución de esta sección, a diferencia de FDM en este tipo de multiplexación de hace necesario trabajar con una sola señal, siendo este caso se dispuso a operar con la señal de frecuencia 3GHz, para esta multiplexación se requiere que el sistema se divida en tres subsistemas como lo muestra la figura 14.

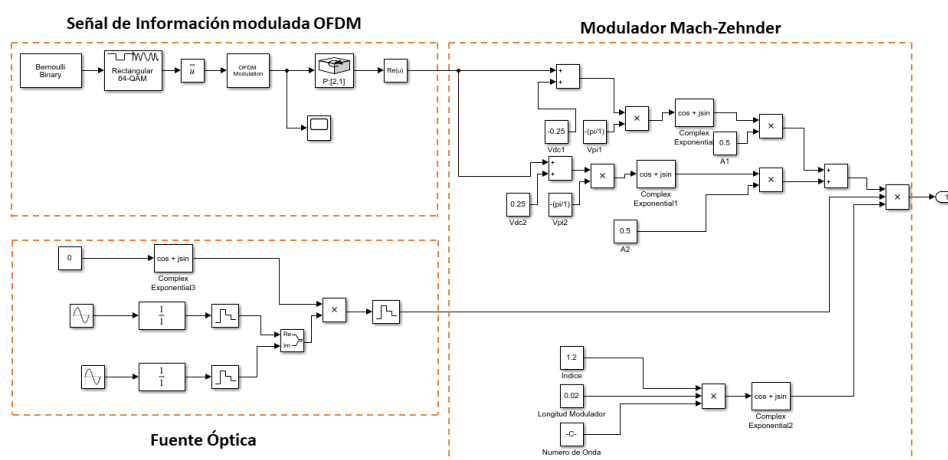


Figura 14. Modelado de la generación de señal OFDM en Simulink de Matlab.

El primer subsistema consta de una señal de entrada de pulsos binarios mediante un toolbox de simulink llamada Bernoulli Binary, el cual genera números binarios aleatorios utilizando una distribución de Bernoulli. La distribución de Bernoulli con el parámetro p produce cero con probabilidad p y uno con probabilidad $1-p$. La distribución de Bernoulli tiene valor medio $1-p$ y varianza $p(1-p)$. La probabilidad de un parámetro cero especifica p , y puede ser cualquier número real entre cero y uno. (MATLAB, 2020), a este bloque se le puede configurar la frecuencia de muestreo o frecuencia a la cual va a trabajar, seguidamente se realiza un mapeo de la señal mediante un modulador digital PSK o QAM, luego de este paso se entrega la señal mapeada en la constelación al modulador OFDM como se ilustra en la figura 15. Este consta de una caja *Multiport Selector*, siendo este el

encargado de seleccionar bien sea filas o columnas, para este caso selecciona columnas debido a que la señal sale de esa forma luego de la modulación digital o el mapeo respectivo. Posterior a esto se realiza la concatenación de la señal mediante la caja de herramientas *Matrix concatenation*, este recibe diferentes vectores de entrada o matrices de entrada convirtiéndolos en una sola matriz de salida, permitiendo de esta forma entregar los datos en paralelo de la señal de información.

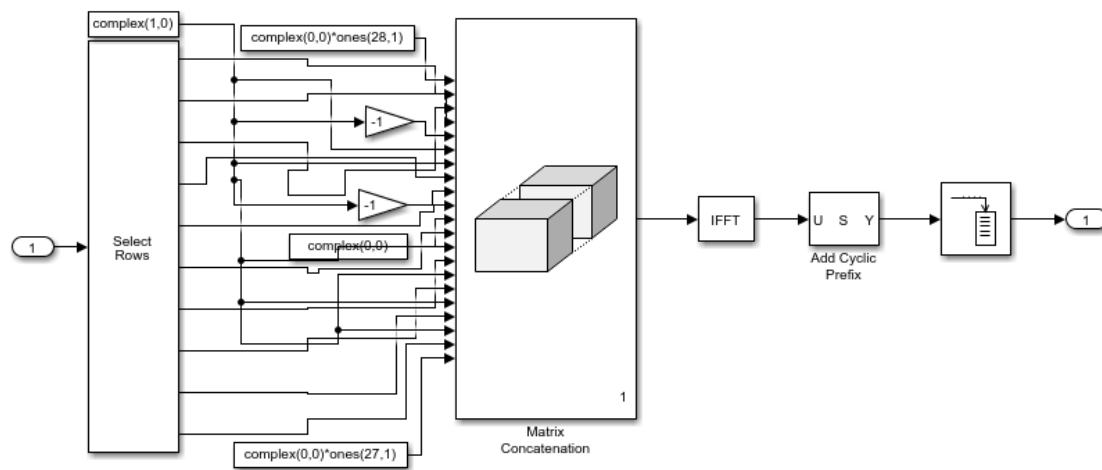


Figura 15. Modulador OFDM en Simulink de Matlab.

Luego de esto se presenta una transformada inversa de Fourier la cual sirve en la modulación para asegurar la ortogonalidad entre las señales, evitando de esta manera que entre ellas se solapen o se superpongan unas con las otras; también este subsistema trae consigo una caja denominada *add cyclic prefix*, siendo esta es la encargada de realizar ese prefijo cíclico para que la señal pueda ser identificada por las antenas si se quiere realizar transmisión por radio, aunque no es obligatorio agregar esta herramienta, es recomendable hacerlo puesto que los sistemas de fibra óptica para las tecnologías 4G y 5G, están siendo basados generalmente en la transmisión de radio sobre fibra o RoF.

Luego que la señal salga del modulador OFDM, se procede a realizar una conversión de paralelo a serie para ser acondicionada o modulada en el espectro óptico mediante el modulador Mach-Zehnder, este se hace mediante la caja *Permute Dimensions*, esta herramienta permite a la entrada una señal $[N \times M]$ y obtener a la salida su transpuesta de $[M \times N]$. Por último, la señal de información que recibe el modulador Mach Zehnder es una señal real por lo tanto se implementa enviando la magnitud de la señal de la señal mediante el bloque *complex to real-imag*. En la figura 16 puede analizarse la señal resultante OFDM

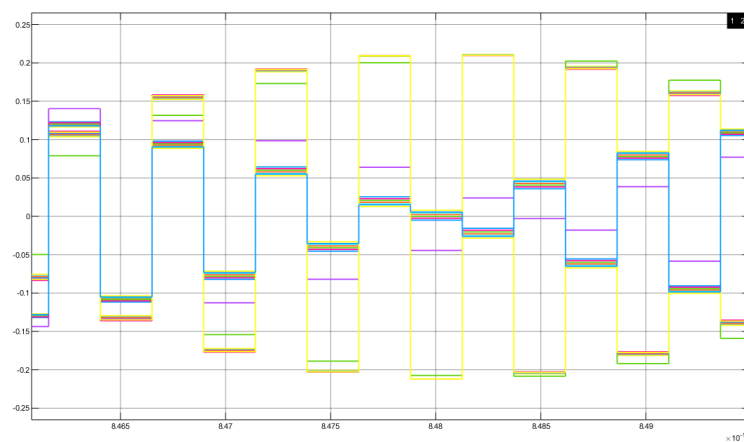


Figura 16. Señal OFDM con modulación 64QAM.

El segundo subsistema es el modulador Mach Zehnder el cual funciona de la misma forma como fue explicado en la sección anterior, asimismo, el tercer subsistema que es la fuente óptica, trabajando como portadora una señal a los 1550nm o 193.4THz.

4.3 Objetivo 3: Modelar y simular a través de un software especializado la etapa final del sistema de comunicación y así determinar el comportamiento del SNR en las diferentes técnicas de multiplexación.

Para el desarrollo de este objetivo, se realizó el modelo del canal de transmisión, para este caso la fibra óptica, análisis de la señal en su conversión óptico-análoga, conversión análoga-digital, modulación por código de pulsos PCM, seguida de una modulación digital en PSK o QAM respectivamente con el propósito de ser entregada a antenas para realizar transmisión de Radio sobre Fibra o RoF.

4.3.1 Canal de Transmisión

Para el desarrollo de esta actividad, se realizó un modelado del canal de transmisión teniendo en cuenta la ecuación no lineal de Schrödinger. En la figura 17 se puede observar el canal implementado, el cual se diseñó teniendo en cuenta las atenuaciones normalizadas para una fibra monomodo estándar de 1550nm según la recomendación ITU-T en donde se especifica que la atenuación debe ser alrededor de los 0.22 dB tanto para el tramo de fibra como para los acoples, asimismo se llevó a cabo especificaciones como longitud de la fibra y acoples básicos cada 2 Km siendo este un escenario semejante a la realidad que se presenta. Este canal fue construido en el entorno de simulink, aunque este software no es completamente especializado para esta área, brinda similitudes casi reales dependiendo de la forma de programarse.

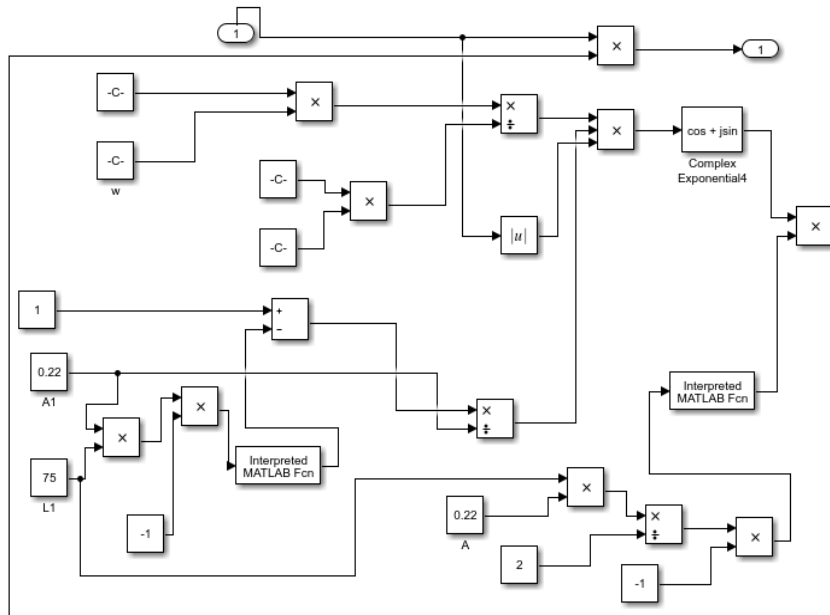


Figura 17. Modelado del canal de transmisión en Simulink.

4.3.2 Conversión ópto-Eléctrica

Para el desarrollo de esta actividad se lleva a cabo una recepción de los datos mediante el *block parameters: abs*, siendo este el encargado de detectar las señales de una positivas o negativas provenientes del bloque anterior, dando el valor absoluto de las mismas para su próxima adaptación para el campo eléctrico. A la entrada de esta señal se le pueden ver agregados tres tipos de ruidos básicos como se muestra en la figura 18.

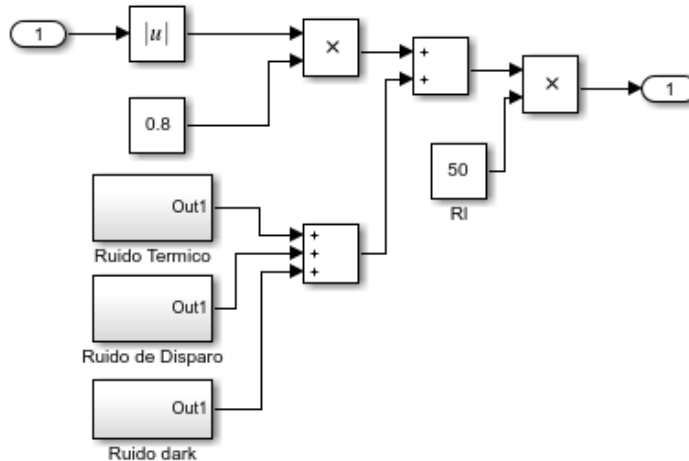


Figura 18. Conversión óptico-eléctrica

Aquí se puede observar tres tipos de ruido básicos que son agregados al sistema, con el propósito de garantizar que la transmisión no sea tan ideal, sino que a su vez tenga estos componentes reales.

4.3.3 Fuentes de Ruido.

Al realizar este análisis de cada una de las fuentes utilizadas para la degradación, se puede resaltar que solo se obtuvo las expresiones que fueron asociadas a las corrientes de ruido asociadas a ellas, en donde no se explica a detalle el proceso de reducción, debido a que estas expresiones son genéricas y se puede encontrar en cualquier libro de comunicaciones ópticas. (Marangione, 2007)

Se propone establecer una expresión que generalice la corriente total del ruido, que está asociada con la detección, estos tienen características de un proceso Poisson, el cual indica el valor cuadrático medio de la suma que contribuyen el ruido introducido del detector, expresión que se refleja en la ecuación 11 (Marangione, 2007).

$$[I^2_{ruido}(t)] = [I^2_{t\acute{e}rmico}(t)] + [I^2_{disparo}(t)] + [I^2_{dark}(t)] \quad \text{Ecuaci3n 11}$$

Siendo el primer t\acute{e}rmico quien describe el comportamiento del ruido t\acute{e}rmico, el cual, debido a los movimientos aleatorios de los electrones dentro de cualquier conductor la temperatura es constante en 0°K. este movimiento de cargas produce localmente gradientes de potencia, dando lugar a la generaci3n de corrientes de car\acute{a}cter ruidoso (Marangione, 2007). El modelo matem\acute{a}tico est\acute{a} dado por la ecuaci3n 12.

$$[I^2_{t\acute{e}rmico}(t)] = \frac{4 * K_B * T * F * B_{eq}}{Rl} \quad \text{Ecuaci3n 12}$$

En donde K_B es la constante de Boltzman, T es la temperatura absoluta dada en grados Kelvin, F es el factor de ruido del amplificador el\acute{e}ctrico, B_{eq} es el ancho de banda el\acute{e}ctrico a -3dB del receptor y Rl es la resistencia de carga del fotodetector.

El ruido de disparo, se debe a la naturaleza cuantificada de la detecci3n de los fotones de la se\~{n}al \3ptica incidente al fotodiodo. Con esto se deduce que la corriente detectada de la se\~{n}al sea un flujo discreto de electrones generados en instantes aleatorios (Marangione, 2007). La corriente del ruido de disparo se puede expresar en la ecuaci3n 13.

$$[I^2_{disparo}(t)] = 2 * e * I_{DET} * B_{eq} \quad \text{Ecuaci3n 13}$$

Donde $I_{DET}(A)$ es el valor promedio de la corriente instant\acute{a}nea detectada $I_{DET}(t)$.

La corriente de oscuridad, se debe a la generaci3n t\acute{e}rmica de pares e-h, que ser\acute{a}n separados inmediatamente por la tensi3n inversa. Aunque la entrada al fotodiodo se cierre completamente, se generar\acute{a} corriente de oscuridad en su interior. El valor medio de la corriente de oscuridad va a depender del dispositivo fotodiodo empleado en el sistema. Como la generaci3n t\acute{e}rmica es de car\acute{a}cter estad\acute{i}stico tambi\acute{e}n sobre la corriente media, I_{DARK} , se van a producir fluctuaciones que se manifiestan como ruido aditivo (ruido de

oscuridad) a la fotocorriente detectada (Marangione, 2007). La corriente asociada al ruido de oscuridad o ruido Dark se expresa en la ecuación 14.

$$[I^2_{dark}(t)] = 2 * e * I_{dark} * B_{eq} \quad \text{Ecuación 14}$$

Siendo I_{dark} la corriente de ruido de fondo de entrada al fotodiodo, normalmente esta variable, $I_{dark} \leq 10nA$.

En la tabla 3 se puede observar los parámetros que fueron usados en la implementación en la ecuación 11, la cual modela las fuentes de ruido asociadas al receptor.

Tabla 3. Parámetros de simulación para el modelado de las fuentes de ruido

Parámetro	Valor
Constante de Boltzman (Kb)	1.3807×10^{-23}
Temperatura (T)	293°K
Factor de ruido	1
Ancho de Banda (B_{eq})	10GHz
Resistencia de Carga RL	50Ω
I_{Dark}	10Na
Corriente Promedio (I_{Det})	4.2458×10^{-4}

Para completar el diseño del sistema de transmisión se realizó un estudio en diagrama de constelación y análisis del espectro. A continuación, se presentarán cada uno de los procesos por aparte y se mostrará a detalle el diseño implementado para realizar el análisis en frecuencia y diagrama de constelación.

4.3.4 Diagrama de constelación

Para desarrollar esta sección se realizó un modelado, el cual consta de tres fases o subsistemas, siendo cada uno de estos un proceso de adaptación de la señal, para ser tratada mediante un modulador digital y así realizar análisis por medio del mapa o diagrama de constelación. El primer subsistema trata sobre un conversor análogo-digital con el fin de adaptar y hacer el muestreo, el segundo subsistema consiste en la modulación PCM, el tercer subsistema acondiciona la señal al modulador digital en PSK o QAM respectivamente y este a su vez entrega al diagrama de constelación.

4.3.4.1 Conversor análogo-digital.

Como se logra ver en la figura 19, se analiza que este proceso se realiza mediante tres bloques, siendo el primero el *block parameters: zero-order hold*, siendo este un bloque de retención de orden cero, que retiene su entrada durante el periodo de muestra que se especifique, si la entrada es un vector, el usuario debe especificar el tiempo de muestra para la retención específica.

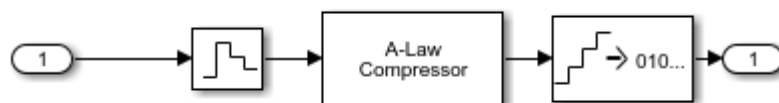


Figura 19. Modelado del conversor análogo-digital en Simulink.

El segundo bloque que conforma este subsistema se denomina *block parameters: A-law compressor*, El bloque de compresor de ley A implementa un compresor de ley A para la señal de entrada. La fórmula para el compresor de ley A se puede ver expresada en la ecuación 15:

$$y = \begin{cases} \frac{A|x| \operatorname{sgn}(x)}{1 + \log(A)} & \text{para } 0 \leq |x| \\ < \frac{V}{A} \frac{V \left[(1 + \log(A \frac{|x|}{V})) \right]}{1 + \log(A)} & \text{para } \frac{V}{A} \leq |x| \leq V \end{cases}$$

donde A es el parámetro de la ley A del compresor, V es la magnitud de señal máxima para x , \log es el logaritmo natural y sgn es la sgn función. El valor A más utilizado es 87.6. La entrada puede tener cualquier forma o estado de cuadro. Este bloque procesa cada elemento del vector de forma independiente (MATLAB, 2020).

Como parte final de este subsistema se implementa el *block parameters: uniform encoder*. El bloque Uniform Encoder realiza las siguientes dos operaciones en cada muestra de punto flotante en el vector o matriz de entrada:

- Cuantifica el valor usando la misma precisión
- Codifica el valor cuantificado de coma flotante en un valor entero

En el primer paso, el bloque cuantifica un valor de entrada a uno de los 2^B niveles uniformemente espaciados en el rango $[-V, (1-2^{1-B})V]$, donde especifica B en el parámetro Bits y especifica V en el pico parámetro. El proceso de cuantización redondea las entradas positivas y negativas hacia abajo al nivel de cuantificación más cercano, con la excepción de las que caen exactamente en un límite de cuantificación. Los componentes reales e imaginarios de las entradas complejas se cuantifican de forma independiente.

El número de bits, B , puede ser cualquier valor entero entre 2 y 32, inclusive. Las entradas mayores que $(1-2^{1-B})V$ o menores que $-V$ se saturan en esos valores respectivos. Los componentes reales e imaginarios de entradas complejas se saturan independientemente (MATLAB, 2019).

4.3.4.2 Modulación por Código de Pulso

Para llevar a cabo el modelado de este subsistema fue necesario la implementación de 4 cajas o bloques de herramienta como se muestra en la figura 20, este subsistema consta de un bloque denominado *permute dimensions*, siendo este el encargado de recibir las tramas de bits vectorizadas y aplicar una matriz transpuesta convirtiendo este proceso de serie a paralelo o paralelo a serie según fuese necesario.

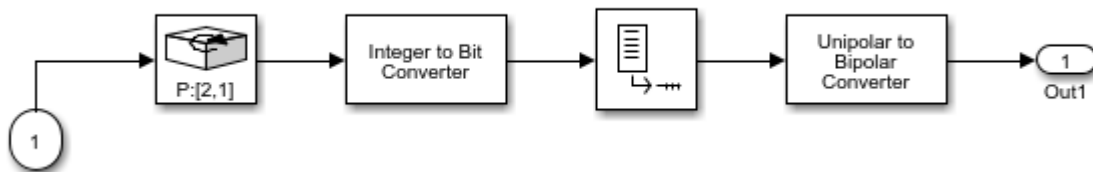


Figura 20. Modelado del modulador PCM en Simulink.

El segundo bloque implementado denominado *integer to Bit converter*, el bloque Convertidor de bit a entero asigna grupos de bits en el vector de entrada a enteros en el vector de salida. M define cuántos bits se asignan para cada entero de salida. Para enteros sin signo, si M es el número de bits por entero, entonces el bloque asigna cada grupo de M bits a un entero entre 0 y $2^M - 1$. Como resultado, la longitud del vector de salida es $1/M$ veces la longitud del vector de entrada. Para enteros con signo, si M es el Número de bits

por entero, el bloque asigna cada grupo de M bits a un entero entre -2^{M-1} y $2^{M-1} - 1$. (MATLAB, 2019)

El tercer bloque de esta sección está compuesto por un elemento denominado *block parameters: unbuffer*, el bloque Unbuffer libera una entrada M -by- N en una salida 1 -by- N . Es decir, las entradas no tienen búfer en fila para que cada fila de matriz se convierta en una muestra de tiempo independiente en la salida. La velocidad a la que el bloque recibe entradas es generalmente menor que la velocidad a la que el bloque produce salidas. El último bloque a tratar en esta sección es el denominado *block parameters: Unipolar to Bipolar Converter*, siendo este bloque el encargado de asignar a la señal de entrada unipolar a una señal bipolar. Si la entrada consta de enteros entre 0 y $M-1$, donde M es el parámetro de número M -aria, entonces la salida consta de enteros entre $-(M-1)$ y $M-1$. Si M es par, entonces la salida es impar. Si M es impar, entonces la salida es par. Este bloque solo está diseñado para funcionar cuando el valor de entrada está dentro del conjunto $\{0, 1, 2, \dots, (M-1)\}$, donde M es el parámetro de número M -aria. Si el valor de entrada está fuera de este conjunto de enteros, la salida puede no ser válida (MATLAB, 2018).

4.3.4.3 Modulación digital

Para la realización de la modulación digital es necesario que la señal reciba un accionamiento luego de tener la retención y muestro de la señal mediante los procesos anteriores mencionados como la conversión análogo-digital y la modulación por código de pulso. Para entregar la señal al modulador digital, se debe entregar la señal en tramas, para este proceso

se implementó mediante 3 etapas antes de ser entregado al modulador, como se observa en la figura 21.

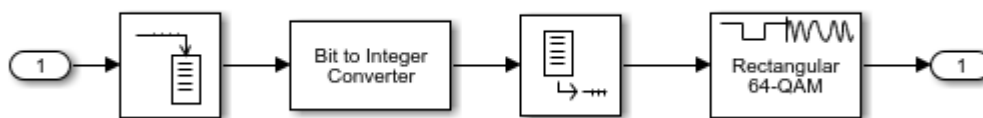


Figura 21. Modelado del modulador digital en Simulink.

La primera caja de herramientas se denomina *block parameters: buffer*, esta herramienta de simulink permite que la señal de entrada sea reordenada mediante matrices o bloques de salida, a este elemento se le debe especificar el tipo de salida que se necesita, para este caso se le impuso una salida del canal dada en forma logarítmica, $\log_2(8)$, con el propósito que esta salida sea de convertida en tramas de 8 bits. La segunda parte de este subsistema se denomina *block parameters: bit to integer converter*, siendo este el Convertidor de bit a entero, el cual asigna grupos de bits en el vector de entrada a enteros en el vector de salida. De la misma manera que en el proceso anterior se designa el número de bit a números enteros el cual se denomina que la entrada viene en tramas de $\log_2(8)$. El último bloque que fue asignado a esta área es el *block parameters: unbuffer*, siendo sus funciones descritas en la sección anterior.

Al momento de tener la señal acondicionada en tramas de bits o pulsos binarios se entrega al modulador digital, independientemente cual sea el modulador que se elija, este mismo proceso se debe realizar, para la evaluación de los datos se ejecutará mediante la modulación QPSK, 8-PSK, 16-QAM y 64-QAM tanto para la multiplexación por división de frecuencia y multiplexación por división de frecuencia ortogonal.

4.3.5 Análisis en Frecuencia.

Con el propósito de realizar el análisis en frecuencia, es necesario que a la señal se le agreguen algunas características y modificación para cambiarla del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y poder observar su comportamiento a la entrada y a la salida de la fibra para verificar el comportamiento de la señal en el canal de transmisión. En la figura 22 se observa como se analiza la salida de la señal multiplexada y la salida de la señal luego de realizar la transmisión por la fibra, contando este subsistema con 4 etapas esenciales y una ganancia unitaria al final antes de ser entregada al *block parameters: Spectrum Analyzer*, quien para este caso es el encargado de realizar el análisis de la frecuencia.

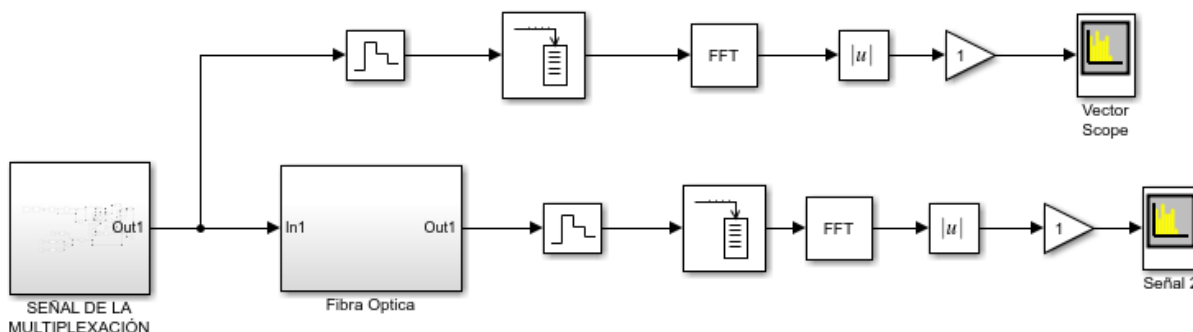


Figura 22. Modelado del análisis en frecuencia en Simulink.

Como se observa en la figura 22 el proceso para verificar el comportamiento de la señal tanto a la entrada como a la salida del canal de transmisión es el mismo. Primero, a dicha señal se le adiciona una caja de herramienta denominada *block parameters: zero-order hold*, siendo este el encargado de hacer una retención a la entrada durante el periodo de muestreo que se especifique, si la entrada es un vector, este bloque contiene todos los elementos del vector durante el periodo que se especifique. La segunda herramienta utilizada es el *block parameters: buffer*, siendo esta la herramienta de simulink que permite,

que la señal de entrada sea reordenada mediante matrices o bloques de salida, a este elemento se le debe especificar el tipo de salida que se necesita, siendo para este caso tramas por canal de 1024. La tercera herramienta y una de las más importantes denominada *block parameters FFT*, esta caja de cumple la función de cambiar la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, siendo esta de gran importancia en una amplia variedad de aplicaciones, pero el más relevante el tratamiento de señales, este modelo impone algunas limitaciones en la señal propia y en el espectro resultante ya que se la señal debe consistir de un número de muestras igual a una potencia de 2, por lo tanto para el bloque anterior se implementó una salida de 2×10^{10} , el análisis del FFT depende del número de muestras a la entrada por lo que se necesita que el muestreo sea eficiente con el ancho de banda implementado. El último bloque de acondicionamiento consiste en el *block parameters: Abs*, siendo este el encargado de generar el valor absoluto de la entrada, básicamente acondiciona los datos y permite su salida en valor absoluto para su tratamiento binario, al tratamiento de esta señal se le aplica una ganancia unitaria y a su vez es entregada al *Spectrum Analyzer*, este analizador tiene herramientas como la medición con cursores, valores pico, mediciones del canal, la distorsión, máscaras espectrales, entre otros valores. El resultado de estas pruebas se puede observar en el desarrollo del siguiente capítulo.

4.4 Objetivo 4: Evaluar el sistema implementado mediante el análisis de parámetros de velocidad de transmisión, potencia y frecuencia, documentando los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en el programa.

Para llevar a cabo el desarrollo de este objetivo, se realizó el análisis de forma ordenada y separada, realizando las mediciones respectivas de cada multiplexación, se podrá observar las señales multiplexadas, la salida de la fibra, diagramas de constelación y análisis en espectro.

4.4.1 Evaluación de la transmisión de datos a través de la multiplexación FDM

Como parte inicial se puede observar en la figura 23 la forma de señal emitida de la multiplexación FDM en donde se muestran las señales viajando por un mismo canal, relativamente de forma ordenada y donde no se solapan las señales unas con otras.

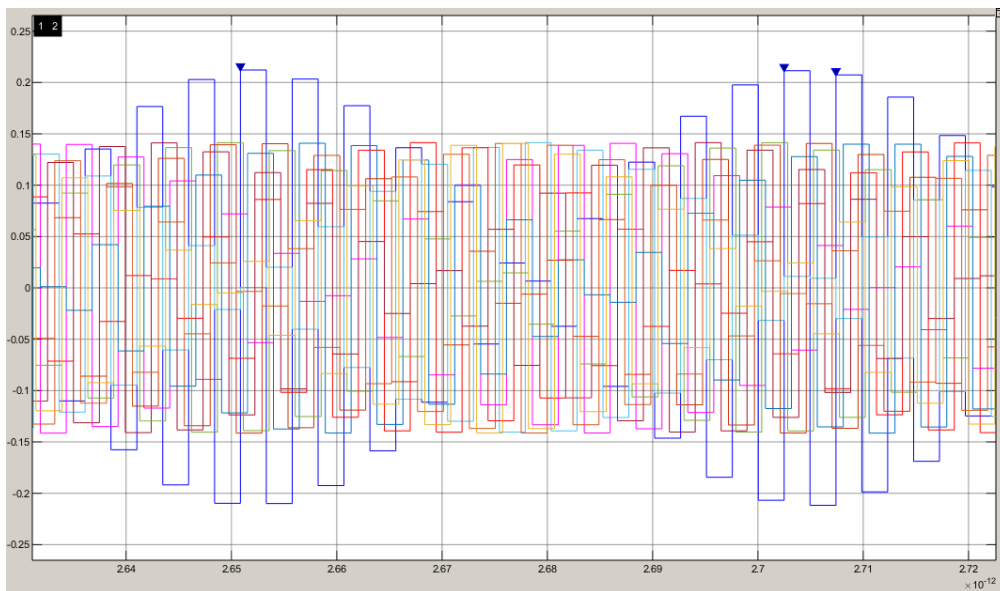


Figura 23. Señales multiplexadas FDM en Simulink.

Con el análisis de la señal en el dominio del tiempo se pueden apreciar los datos en la tabla 4 a partir de las mediciones estáticas de la señal, en donde se aprecian los valores máximos y mínimos de la gráfica el valor pico a pico y valor promedio RMS

Tabla 4. Medición Estática de la señal multiplexada FDM

	Valor
Punto Máximo	0.212
Punto Mínimo	-0.2117
Peak to Peak	0.438
RMS	0.159

De la misma forma, se realizan mediciones de los ciclos de la señal en donde se observa el periodo en femtosegundos, la frecuencia en terahertz, ciclo de trabajo porcentual, el tiempo de subida y de bajada de la señal en attosegundos como se observa en la tabla 5.

Tabla 5. Señal en la salida del canal de transmisión. FDM en Simulink. Fuente: Elaboración Propia.

Periodo	Frecuencia	Duty cycle	Rise Time	Fall Time
18.85 fs.	53.03 THz	65.35 %	51.466 as	52.48 as

Luego de estudiar los parámetros de salida de la multiplexación, esta señal es entregada a la fibra óptica en donde se comprobó el comportamiento de la señal multiplexada y transmitida por el canal, gráfica que se puede observar en la figura 24.

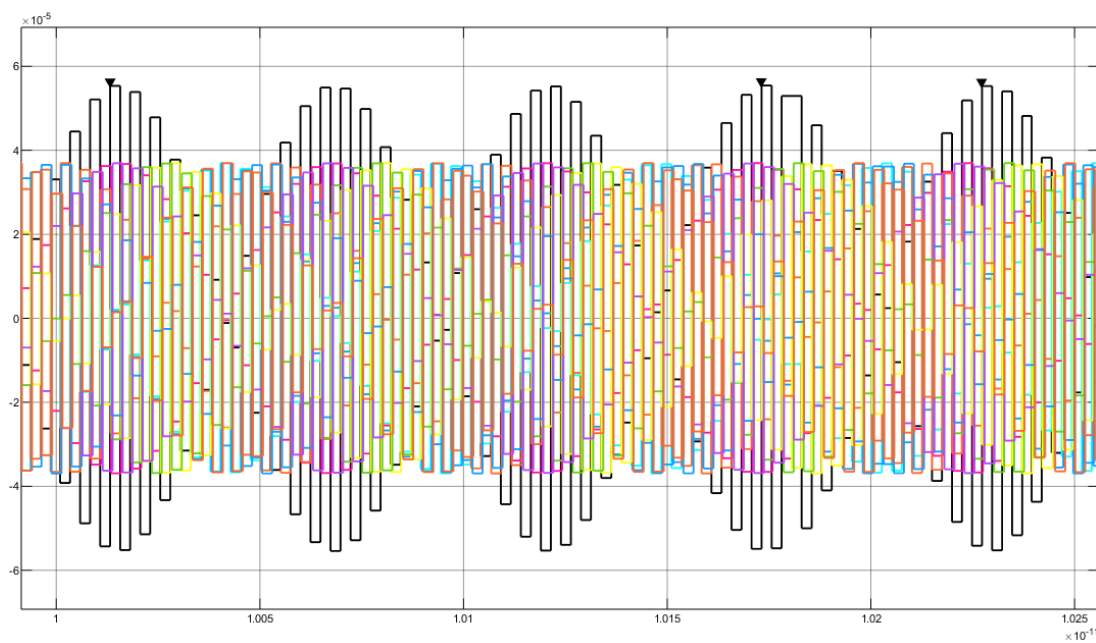


Figura 24. Señal en la salida del canal de transmisión. FDM en Simulink.

como en la sección anterior se muestran los resultados de los parámetros evaluados, resultados que se pueden observar en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Medición Estática de la señal a la salida del canal de transmisión FDM.

	Valor
Punto Máximo	5.543×10^{-5}
Punto Mínimo	-5.543×10^{-5}
Peak to Peak	1.108×10^{-4}
RMS	3.917×10^{-5}

Esta sección se analiza la señal luego de pasar por el canal de transmisión en donde puede observarse que la frecuencia sufre una atenuación de casi el 26%, pero, esto no quiere decir que la señal presente pérdidas significativas debido a que las variaciones se presentan en todas las variables resultantes.

Tabla 7. Medición del ciclo de la señal a la salida del canal de transmisión.

Periodo	Frecuencia	Duty cycle	Rise Time	Fall Time
25.744 fs.	38.844 THz	49.97 %	44.837 as	44.496 as

4.4.1.1 Mapa de constelación QPSK, FDM

Se realiza la conexión de la señal al modulación digital QPSK, quien a la salida tiene 4 diferentes fases resultantes como se observa en la figura 25, en la tabla 8 se manifiestan los resultados de la evaluación teniendo en cuenta la magnitud del error del vector (EVM) en su expresión en decibelios y porcentual tanto en sus valores pico como valores promedio respectivamente; se determina la tasa de error de modulación el decibelios; también, se determina el valor de la relación señal a ruido teniendo en cuenta la ecuación 16.

$$SNR(dB) = 10 \log \left(\frac{1}{EVM^2} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

En esta imagen se analiza que los datos no corresponden a los puntos ideales, debido a que, solo están llegando a dos de las cuatro fases.

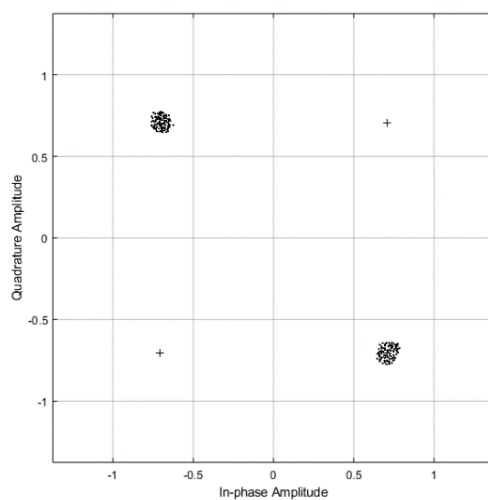


Figura 25. Diagrama de constelación, modulación QPSK en FDM.

En la tabla 8 se puede observar los resultados de dicha evaluación, aunque los resultados son buenos e indican que el error en la transmisión está por debajo del 10%, no se puede decir que realizar enlaces por medio de esta modulación sea efectivo, debido a que, los datos que deben llegar a las dos fases que están en blanco se están perdiendo indicando esto, que más de la mitad de las tramas de información de alguna forma no están siendo recibidos por la constelación.

Tabla 8. Evaluación del diagrama de constelación QPSK. FDM

VARIABLE	QPSK
Rms EVM (%)	7.2
Peak EVM (%)	7.2
Avg EVM (dB)	-50.6
Peak EVM (dB)	-50.6
Avg MER (dB)	50.6
SNR (dB)	-34.08

4.4.1.2 Mapa de constelación 8PSK, FDM

Para la evaluación del diagrama de constelación se observa en la figura 26, que la señal presenta algunas pérdidas en una de las ocho fases, aunque eso indica que hay error en la transmisión de datos, en comparación con QPSK se puede determinar que esta modulación indica mejorías.

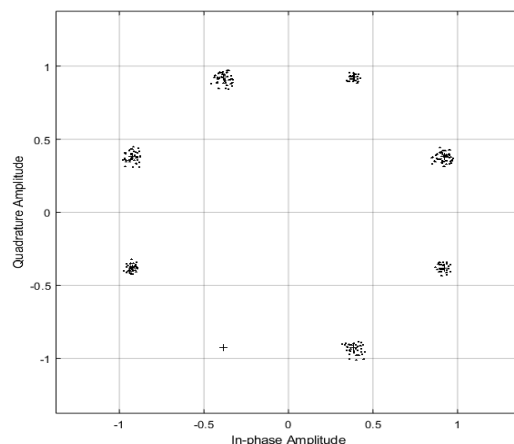


Figura 26. Diagrama de constelación, modulación 8PSK en FDM.

En la tabla 9 se analiza los resultados de la evaluación del diagrama de constelación. Dichos datos son entregados por el software Simulink de matlab, y así como en la sección anterior se obtuvo mediante la ecuación 16, la relación señal a ruido con este formato de transmisión.

Aquí se observa que hay más error de EVM, MER y SNR que con la modulación QPSK, pero, con este formato la señal, aunque genera menos pérdida de datos ya que las tramas llegan a casi todos los puntos de la constelación esperados.

Tabla 9. Evaluación del diagrama de constelación 8PSK. FDM

VARIABLE	8PSK
Rms EVM (%)	39
Peak EVM (%)	39
Avg EVM (dB)	-8.2
Peak EVM (dB)	-8.2
Avg MER (dB)	8.2
SNR (dB)	-18.28

4.4.1.3 Mapa de constelación 16QAM, FDM

El formato de modulación 16QAM, según el mapa de constelación ilustrado en la figura 27 muestra que la señal presenta una poca pérdida de datos, como se muestra en la figura las tramas de bits llegan a quince de los 16 puntos esperados.

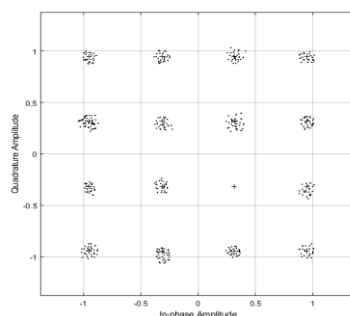


Figura 27. Diagrama de constelación, modulación 16QAM en FDM.

Como se puede ver en la tabla 10 la transmisión mediante 16QAM brinda una mejoría de 30.7% del EVM y 29.1% del SNR con respecto al formato 8PSK, asimismo, aunque con esta modulación no se llegue a todos los puntos es recomendable realizar transmisión de datos mediante los diferentes formatos de QAM ya que con estos hay menos distancia entre los puntos de llegada, permitiendo de esta forma, que los errores sean significativamente bajos.

Tabla 10. Evaluación del diagrama de constelación 16QAM. FDM

VARIABLE	16QAM
Rms EVM (%)	27
Peak EVM (%)	27
Avg EVM (dB)	-19.5
Peak EVM (dB)	-19.4
Avg MER (dB)	19.5
SNR (dB)	-25.76

4.4.1.4 Mapa de constelación 64QAM, FDM

En la figura 28 se muestra el resultado del diagrama de constelación de la transmisión de datos mediante el formato 64QAM, este formato como ya se mencionó antes emite menos porcentajes de error con respecto a la modulación PSK, esto se debe a que entre más puntos de llegada tenga la modulación, menos distancia habrá entre punto y punto permitiendo de esta forma que los valores porcentuales del error sean menores y la relación señal a ruido aumente. Asimismo, según la figura la señal solo llega a 59 de los 64 posibles puntos de llegada, aunque lo ideal fuera que la señal cumpla su ruta y llegue toda la información a los puntos indicados, este formato brinda calidad en la transmisión de la señal.

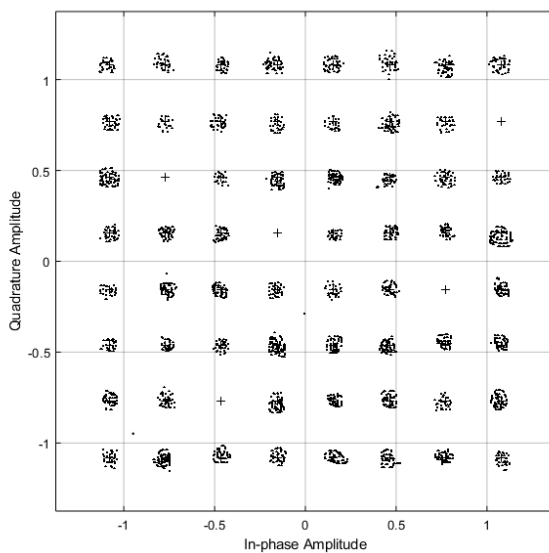


Figura 28. Diagrama de constelación, modulación 64QAM en FDM.

En la tabla 11 se ilustran los resultados de la evaluación por el diagrama de constelación, y si se hace una relación comparativa con el formato anterior, se obtiene una mejoría de más del 20% del EVM y 6.4% del SNR con respecto a 16QAM, indicando de esta forma que la mejor técnica de transmisión de datos mediante los formatos de modulación

presentados es la de 64 QAM en donde los valores del EVM, MER y SNR es significativamente mejores con respecto a los demás.

Tabla 11. Evaluación del diagrama de constelación 64QAM. FDM

VARIABLE	64QAM
Rms EVM (%)	21
Peak EVM (%)	21
Avg EVM (dB)	-23.7
Peak EVM (dB)	-23.7
Avg MER (dB)	23.7
SNR (dB)	-27.5

4.4.1.5 Análisis en Frecuencia, de la transmisión FDM

Para evaluar la densidad espectral de la señal, se hicieron pruebas antes de entrar al canal de transmisión y cuando sale del canal de transmisión, resultados que son ilustrados a continuación. Como parte inicial se evalúa el espectro de la señal que entra a la fibra, como se observa en la figura 29.

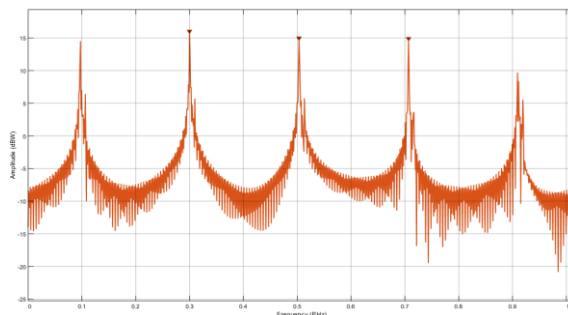


Figura 29. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión, FDM en Simulink.

Aquí se puede observar 5 picos de frecuencia, siendo esto los picos más significativos de las señales multiplexadas. Se puede observar que frecuencia está dada en el orden de los

Terahertz, asimismo, la caja de herramientas *block parameters: Spectrum Analyzer*, permite realizar una evaluación de los datos mediante las mediciones que se obtienen de dicha gráfica, en la tabla 12 se observa la potencia en el canal de transmisión, el ancho de banda ocupado, la frecuencia de error, la frecuencia del Carrier o de portadora, la distorsión armónica total (THD), señal a ruido y distorsión de radio (SINAD), el rango dinámico libre de espurios (SFDR) y relación señal a ruido (SNR)

Tabla 12. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal, FDM en Simulink.

VARIABLE	DATO
Channel Power	-20.015 dBW
Occuped BW	194.17 THz
Frequency Error	-0.911 THz
Frequency Carrier	507.73 THz
THD	-6.9 dBc
SINAD	-12.16 dBc
SFDR	0.65 dBc
SNR	-12.16 dBc

Como segunda parte de este análisis en frecuencia se sitúa el analizador de espectro a la salida del canal de transmisión o el modelado de la fibra óptica, esto se hace con el propósito de evaluar la transmisión de datos en dicho canal de comunicación, verificando de esta forma el buen funcionamiento del modelado. En la figura 30 se puede observar la señal resultante del analizador de espectro a la salida del canal, reflejando de la misma forma los 5 picos donde se presenta intensidad de las señales en la transmisión.

Asimismo, en la tabla 13 descrita a continuación se muestra los valores resultantes de dicha evaluación, estos valores muestran una caída de la potencia del canal, caída que es esperada debido a la atenuación general que se presenta a través de cualquier canal de comunicación, en este caso la fibra óptica posee pérdidas muy pequeñas alrededor de los 0.22 dB/Km. También se ve una caída mínima de la relación señal a ruido de menos del 6%, esto refleja que la transmisión a través de este modelado de la señal, es similar al de una fibra óptica convencional.

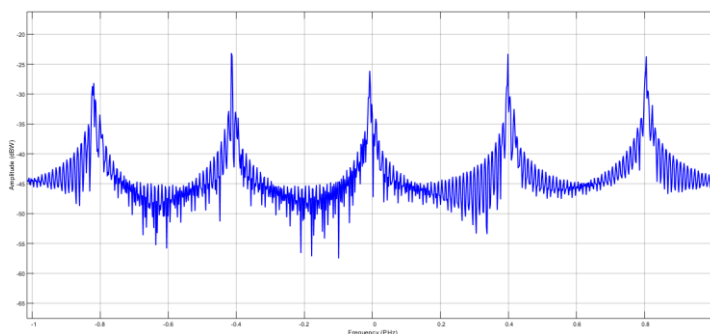


Figura 30. Análisis del espectro a la salida del canal de transmisión, FDM en Simulink.

Tabla 13. Evaluación del análisis de espectro a la salida del canal, FDM en Simulink.

VARIABLE	DATO
Channel Power	-29.649 dBW
Occupied BW	368.1 THz
Frequency Error	-0.33 THz
Frequency Carrier	406.19 THz
THD	-7.34 dBc
SINAD	-11.50 dBc
SFDR	0.54 dBc
SNR	-11.45 dBc

Además, la señal saliente de la fibra tiene una menor pérdida de la frecuencia de la portadora y una distorsión armónica un poco más elevada.

4.4.2 Evaluación de la transmisión de datos a través de la multiplexación OFDM

Para la evaluación de la transmisión de datos por medio de la multiplexación por división de frecuencia (OFDM) se consideró dividir este proceso en cuatro etapas significativas que constaron de la generación de la señal y mapeo inicial en QPSK, 8PSK, 16QAM y 64QAM en donde para cada uno de los formatos de modulación se realizaron los siguientes análisis: Diagrama de constelación, señal saliente de la fibra en el dominio del tiempo, Densidad espectral a la entrada y salida de la fibra; cada uno de estos análisis trae consigo su respectiva gráfica e interpretación de los datos de forma individual.

4.4.2.1 Evaluación para la transmisión QPSK, OFDM

Cuando se realiza transmisión de datos bajo el formato de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM), es necesario que la señal tenga un mapeo inicial por lo que se evaluará de forma separada cada una de las transmisiones. Para este caso se ilustrará la modulación QPSK en la cual como se mencionó en la sección anterior, este tiene 4 posibles fases de salida; en la figura 31 se observa el mapa de constelación resultante de transmitir datos mediante la modulación QPSK, este muestra, que los datos aunque llegan a todos los puntos, en dos de los cuatro se presenta mayor intensidad de puntos, lo que

representa que aunque está llegando a las fases esperadas hay tramas que se están perdiendo aunque de forma menos significativa que QPSK en FDM.

La evaluación de estos datos se ve reflejados en la tabla 14, donde se muestra EVM en decibelios y porcentual, MER en decibelios y SNR en decibelios respectivamente.

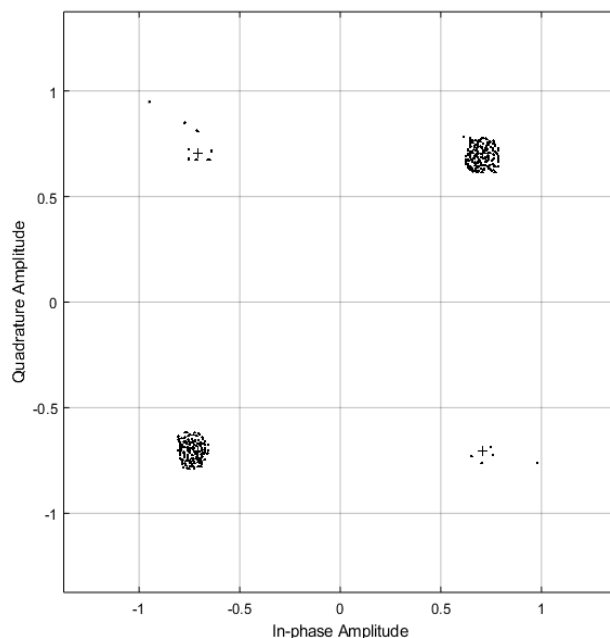


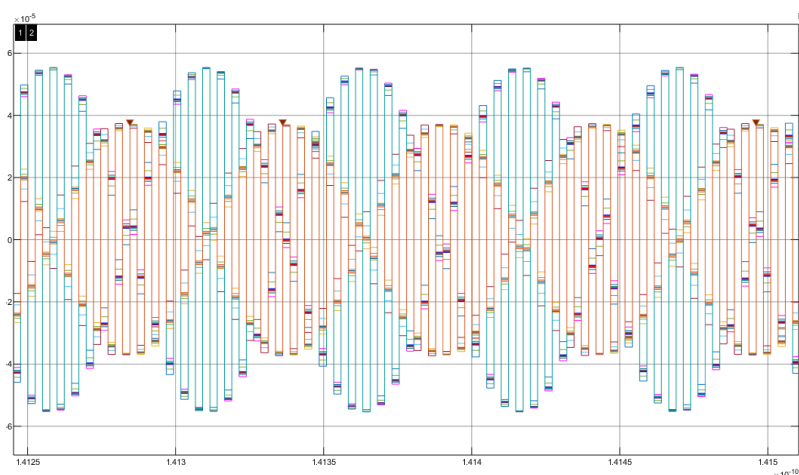
Figura 31. Diagrama de constelación, modulación QPSK en OFDM.

En la tabla 14 se muestra que el error de la magnitud del vector es de un 32.4% tanto en valores pico como en valor medio; así también el EVM expresado en decibelios alcanza un valor de -12.3 dB, la tasa de error de modulación alcanza 12.3 dB en valores promedio y mediante la ecuación 16 se interpreta la relación señal a ruido alcanzo un valor de -21.8dB indicando esto que son datos buenos, aunque sería favorable corregir los datos de llegada en las fases que no están presentando suficientes tramas.

Tabla 14. Evaluación del diagrama de constelación QPSK en OFDM

VARIABLE	QPSK
Rms EVM (%)	32.4
Peak EVM (%)	32.4
Avg EVM (dB)	-12.3
Peak EVM (dB)	-12.3
Avg MER (dB)	12.3
SNR (dB)	-21.8

En la figura 32 se observa la señal resultante a la salida de la fibra, en esta gráfica se muestra la señal en el espectro óptico, los datos más relevantes se encuentran plasmados en la tabla 15.

**Figura 32.** Señal en la salida del canal de transmisión QPSK. OFDM en Simulink.

En la evaluación de los datos se observa que la frecuencia promedio a la cual trabaja la señal es de 41.587 THz y el periodo tiene valores de 24,046 fs, indicando estos valores tomados de la muestra, que la señal está operando en términos relativamente normales con un ciclo de trabajo del 61.25%.

Tabla 15. Medición del ciclo de la señal a la salida del canal de transmisión QPSK, OFDM.

Periodo	Frecuencia	Duty cycle	Rise Time	Fall Time
24.046 fs.	41.587 THz	61.25 %	40.53 as	41.43 as

Para el análisis de la frecuencia se realizó una medición antes de que la señal entrara al canal de transmisión y a la salida del mismo; como se muestra en la figura 33, dicha gráfica muestra el espectro en la entrada de la fibra, en la cual se muestran varias alteraciones de la señal debido a las diferentes portadoras en la que viaja la información por la multiplexación OFDM, sin embargo, se observa unos puntos elevados de potencia descritos en la tabla 16.

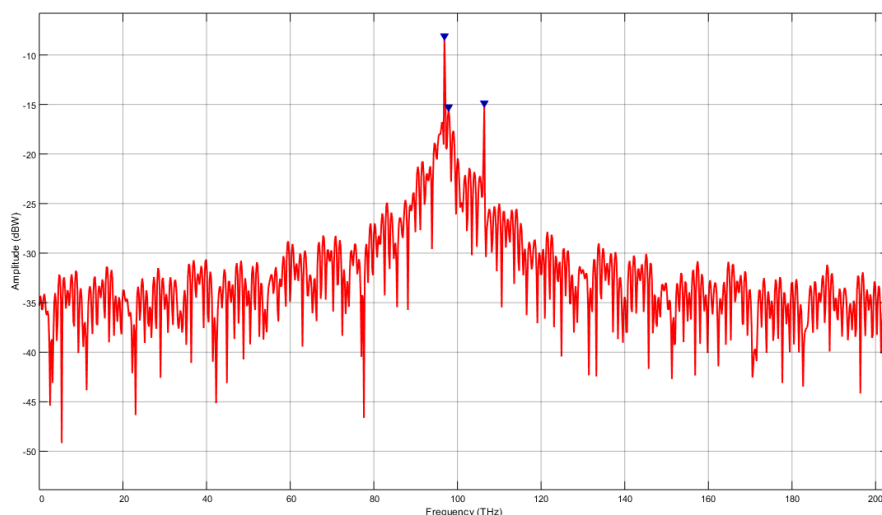


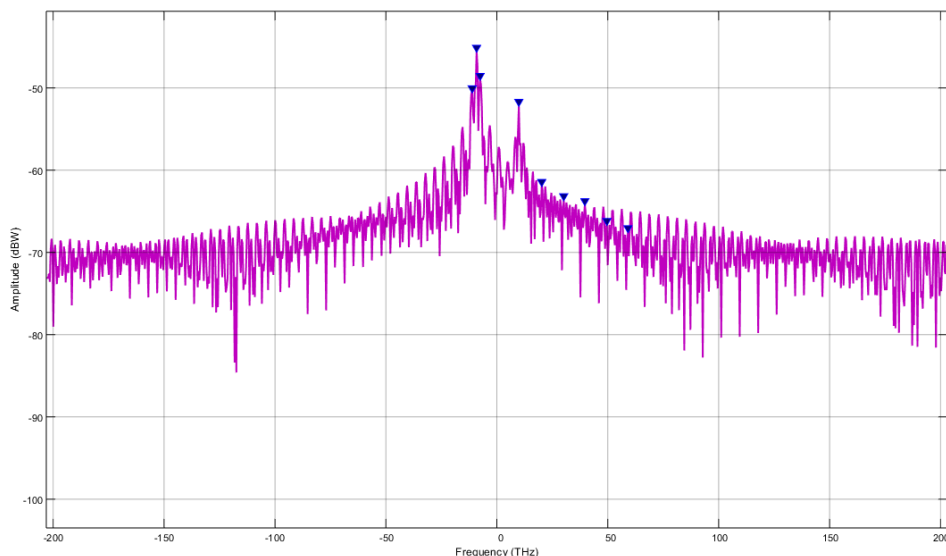
Figura 33. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión QPSK, OFDM en Simulink.

Se observa que la señal tiene una potencia en el canal de transmisión de -22.7 dBW, además que opera en un ancho de banda de 37.091 THz, con una frecuencia de error de tan solo 0.289 THz, asimismo se analiza que la relación señal a ruido o SNR tiene valores de -10.19 dBc indicando esto un valor aceptable para realizar la transmisión por este medio.

Tabla 16. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal QPSK, OFDM en Simulink.

VARIABLE	DATO
Channel Power	-22.7 dBW
Occuped BW	37.091 THz
Frequency Error	-0.289 THz
Frequency Carrier	40.62 THz
THD	-24.65 dBc
SINAD	-10.19 dBc
SFDR	1.19 dBc
SNR	-10.19 dBc

En la figura 34 se muestra una forma de del espectro resultante, dicha gráfica tiene varios picos de potencia y alteraciones en la señal, esto se debe a que por medio de la multiplexación OFDM, se adicionan portadoras ortogonalmente separadas para evitar que dichas señales se solapen entre ellas.

**Figura 34.** Análisis del espectro a la salida del canal de transmisión QPSK, OFDM en Simulink.

En la tabla 17 se analizan los resultados de la evaluación anterior en donde se presenta una caída de potencia esperada por la atenuación de la fibra, y los conectores cada dos kilómetros según lo indica la normativa. También se observa que el ancho de banda ocupado es de 76.64 THz con un rango de frecuencia de error de 0.36 THz con una señal portadora de 84 THz, también, el rango dinámico libre de espurios aumenta casi 1 dB, asimismo se encuentra una relación señal o ruido o SNR de -12.07 dBc; con lo cual se deduce que la transmisión de datos es efectiva por este canal,

Tabla 17. Evaluación del análisis de espectro a la salida del canal QPSK, OFDM en Simulink.

VARIABLE	DATO
Channel Power	-27.3.352 dBW
Occuped BW	76.642 THz
Frequency Error	-0.36 THz
Frequency Carrier	84 THz
THD	-4.76 dBc
SINAD	-12.16 dBc
SFDR	2.06 dBc
SNR	-12.07 dBc

4.4.2.2 Evaluación para la transmisión 8PSK, OFDM

Asimismo, se realiza la evaluación mediante el diagrama de constelación como se muestra en la figura 35, la cual indica algunos puntos de dispersión en las fases, pero, de igual forma muestra una transmisión de datos limpia, indicando efectividad en el sistema bajo este formato de modulación

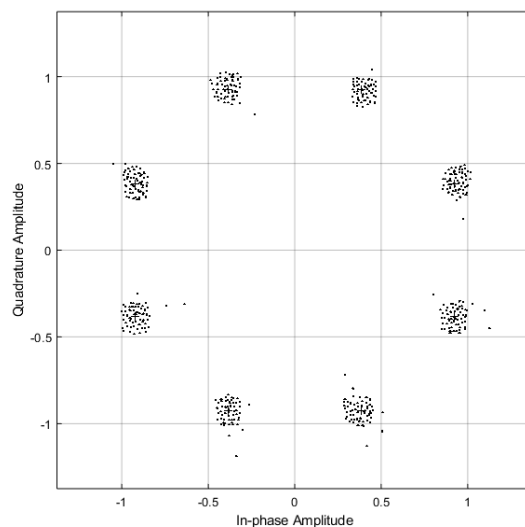


Figura 35. Diagrama de constelación, modulación 8PSK en OFDM.

En la tabla 18 se muestran los resultados de dicha evaluación, dando esta una mejoría en el error de la magnitud del vector con respecto a la transmisión 8PSK en FDM del 27.4% y 19.25% mejor SNR en este formato de modulación.

Tabla 18. Evaluación del diagrama de constelación 8PSK en OFDM

VARIABLE	8PSK
Rms EVM (%)	28.3
Peak EVM (%)	28.3
Avg EVM (dB)	-10.2
Peak EVM (dB)	-10.2
Avg MER (dB)	10.2
SNR (dB)	-20.17

En la figura 36 se ilustra la señal a la salida del canal de transmisión, esta señal previamente multiplexada, se muestra que a pesar de la frecuencia tan alta de transmisión sigue manteniendo de forma armónica sin presentación de anomalías

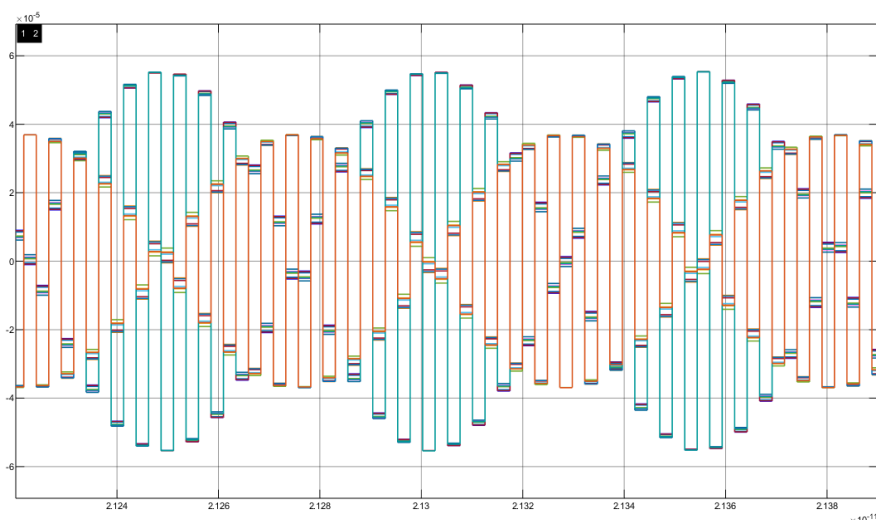


Figura 36. Señal en la salida del canal de transmisión 8PSK. OFDM en Simulink.

En la tabla 19 se muestra el periodo, la frecuencia, el ciclo de trabajo, el tiempo de subida y de bajada de la señal indicando esto que el canal de transmisión bajo este formato opera de forma normal y es efectivo para realizar transmisión 8PSK en OFDM.

Tabla 19. Medición del ciclo de la señal a la salida del canal de transmisión 8PSK, OFDM.

Periodo	Frecuencia	Duty cycle	Rise Time	Fall Time
31.96 fs.	31.28 THz	59.024 %	41.36 as	40.04 as

En el estudio del análisis en frecuencia se observa a la entrada y a la salida del canal de transmisión, para este punto se muestra el espectro en la entrada de la fibra como se observa en la figura 37, en donde se muestra algunas variaciones debido a las diferentes portadoras que la multiplexación OFDM aporta.

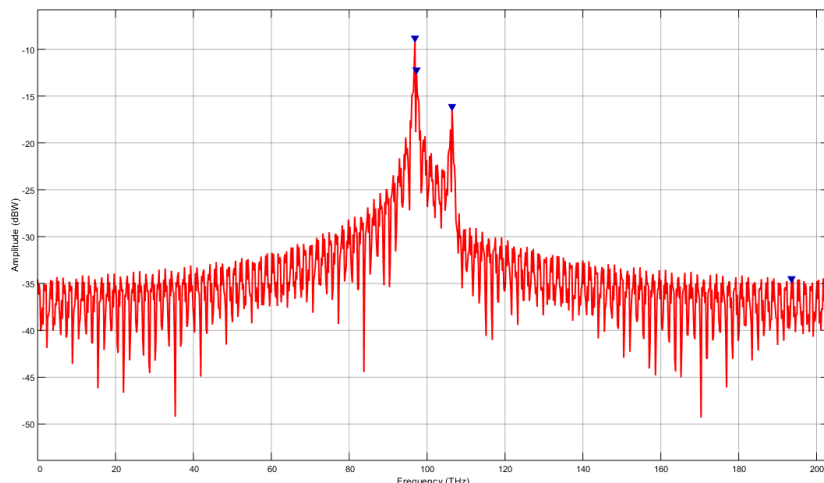


Figura 37. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión 8PSK, OFDM en Simulink.

En la tabla 20 se muestra los datos en diferentes variables medidas, por el *Analyzer Spectrum*, mostrando así el ancho de banda al cual se está transmitiendo, la potencia en el canal de transmisión, SNR, THD, SNID entre otras mediciones, bajo el formato de modulación 8PSK.

Tabla 20. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal 8PSK, OFDM en Simulink.

VARIABLE	DATO
Channel Power	-23.7 dBW
Occupied BW	38.16 THz
Frequency Error	-0.276 THz
Frequency Carrier	40.62 THz
THD	-30.64 dBc
SINAD	-7.73 dBc
SFDR	7.11 dBc
SNR	-7.73 dBc

A la salida del canal de transmisión se muestran las variaciones por las portadoras de OFDM, asimismo se muestra algunos picos elevados de potencia emitida en el ancho de banda en el cual se trabaja.

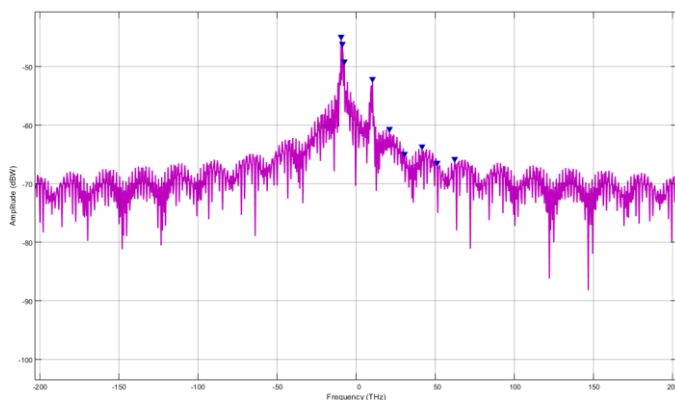


Figura 38. Análisis del espectro a la salida del canal de transmisión 8PSK, OFDM en Simulink.

En la tabla 21 se muestra los resultados de las mediciones del espectro a la salida de la fibra óptica, con este formato de modulación se presenta una potencia de transmisión de -35 dBW, con un ancho de banda ocupado de 77.03 THz, asimismo una frecuencia de error de 0.46 THz, un rango dinámico libre de espurios de 0.17 dBc y un SNR en el canal de 13.62dBc.

Tabla 21. Evaluación del análisis de espectro a la salida del canal 8PSK, OFDM en Simulink.

VARIABLE	DATO
Channel Power	-35.93 dBW
Occupied BW	77.03 THz
Frequency Error	-0.46 THz
Frequency Carrier	81.24 THz
THD	-3.26 dBc

SINAD	-13.71 dBc
SFDR	0.17 dBc
SNR	-13.62 dBc

4.4.2.3 Evaluación para la transmisión 16QAM, OFDM

Se realiza la transmisión a través de la modulación 16QAM, bajo la multiplexación OFDM, en donde se analiza el mapa de constelación, mostrando este, alguna dispersión en las tramas de datos, pero, la señal llega a todos los puntos esperados por el formato ideal, esto indica que la multiplexación por división de frecuencia ortogonal cuando se hace mediante el formato de modulación 16QAM emite buenos valores de transmisión, asimismo se observa en la figura 39 que la señal llega a 16 de los 16 puntos ideal, aunque se presente alguna dispersión, de igual forma se puede considerar una transmisión eficiente y confiable bajo esta modulación.

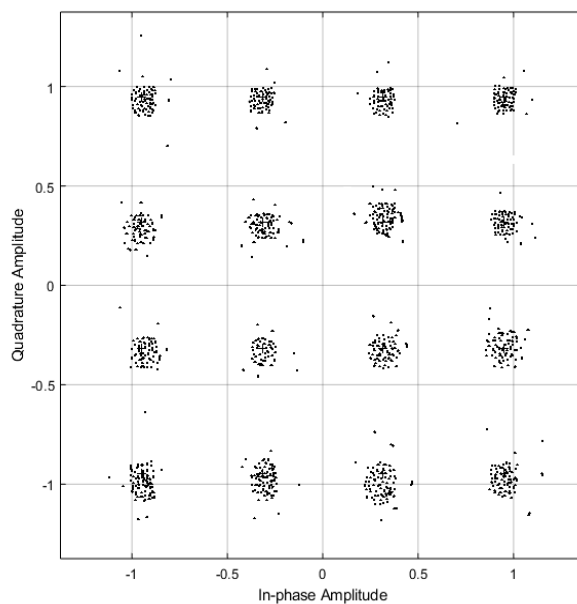


Figura 39. Diagrama de constelación, modulación 16QAM en OFDM.

En la tabla 22 se ilustra los resultados de la evaluación de esta transmisión por medio de la modulación 16QAM, indicando que hay 13.9% menos en error del EVM, y casi 2% mejor relación señal a ruido con respecto a la transmisión por medio de la modulación 8PSK.

Tabla 22. Evaluación del diagrama de constelación 16QAM en OFDM

VARIABLE	16QAM
Rms EVM (%)	23.3
Peak EVM (%)	23.3
Avg EVM (dB)	-20.3
Peak EVM (dB)	-20.3
Avg MER (dB)	19.4
SNR (dB)	-26.15

En la figura 40 se muestra la señal saliente del canal de comunicación, dicha señal se encuentra multiplexada en formato OFDM, en el dominio del tiempo. A pesar que esta viaja con una portadora óptica de 1550 nm, según la normativa lo indica para fibra monomodo estándar. La señal se observa de forma armónica, sin presentar perturbaciones significativas a pesar que en el canal de comunicación están impuestas las atenuaciones básicas de conectores y acoples.

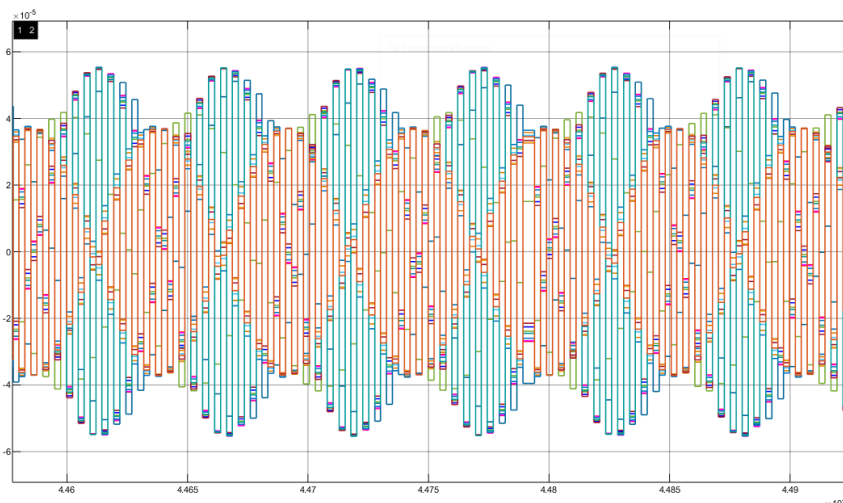


Figura 40. Señal en la salida del canal de transmisión 16QAM. OFDM en Simulink.

En la tabla 23 se representa la frecuencia y periodo, así como también el ciclo de trabajo al cual opera la señal a la salida de la fibra óptica.

Tabla 23. Medición del ciclo de la señal a la salida del canal de transmisión 16QAM, OFDM.

Periodo	Frecuencia	Duty cycle	Rise Time	Fall Time
26.845 fs.	37.251 THz	50.018 %	14.911 as	12.864 as

Se examina el espectro de frecuencia de la señal a la entrada de la fibra óptica, en la figura 41 se muestra en ancho de banda en el cual está trabajando, esta señal presenta algunas fluctuaciones por las diferentes portadoras ortogonales dadas por la multiplexación OFDM. En la tabla 24 se puede ver los datos emitidos de esta evaluación

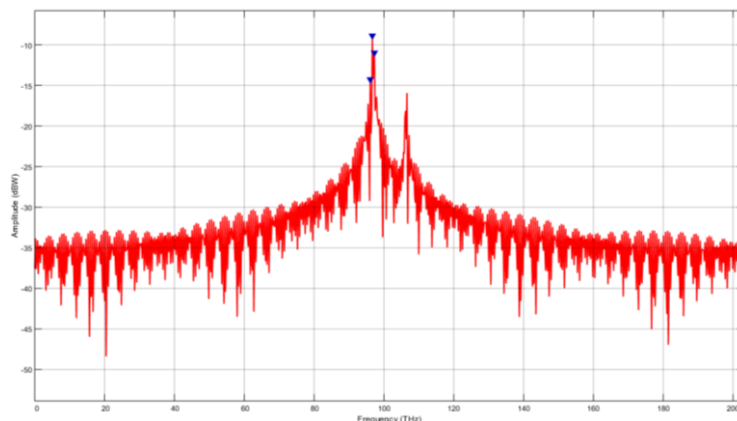


Figura 41. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión 16QAM, OFDM en Simulink.

Aquí se logra destacar que el ancho de banda ocupado de la señal es de 39.28 THz, valor que indica que se puede transmitir demasiada información y la frecuencia de error indicando un 0.032 THz habla de la eficiencia de este modelo de transmisión, se muestra que hay una relación señal a ruido de 9.49 dBc y un rango dinámico libre de espurios de 3.30 dBc.

Tabla 24. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal 16QAM, OFDM en Simulink.

VARIABLE	DATO
Channel Power	-23.62 dBW
Occupied BW	39.38 THz
Frequency Error	-0.032 THz
Frequency Carrier	40.61 THz
THD	-24.68 dBc
SINAD	-9.49 dBc
SFDR	3.30 dBc
SNR	-9.49 dBc

El análisis del espectro a la salida de la fibra como en los otros formatos de modulación muestra algunos picos en donde se presenta el mayor tráfico de datos o el ancho de banda ocupado principalmente, los otros picos representados, aunque no tan significativos son debido a las diferentes portadoras por OFDM

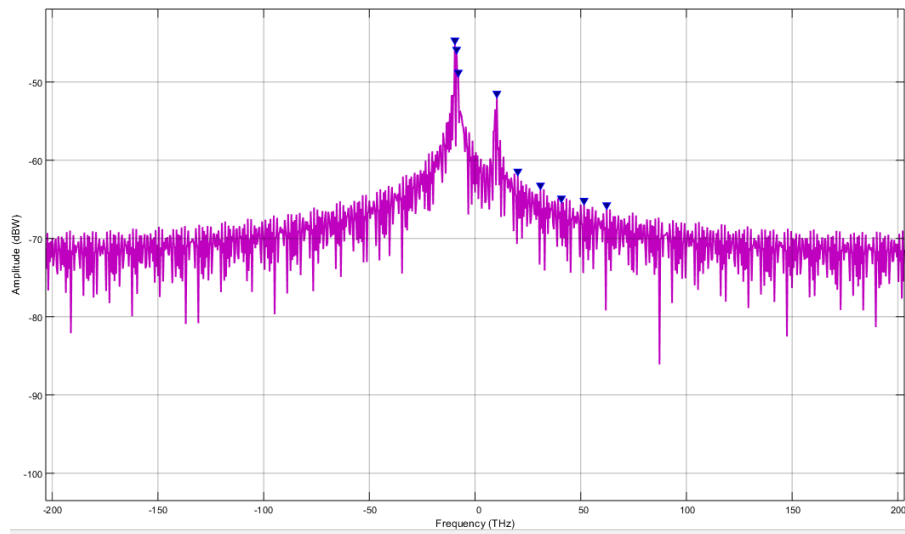


Figura 42. Análisis del espectro a la salida del canal de transmisión 16QAM, OFDM en Simulink.

En la tabla 25 se muestra que la potencia en el canal de transmisión es de -35.163 dBW, con un ancho de banda de 78.29 THz, así también representa una tasa de error en la transmisión baja ya que la frecuencia que presenta error es de 0.056 THz, indicando de esta forma que el error es casi nulo, porcentualmente hablando. La frecuencia de la portadora se encuentra alrededor de los 81.24 THz, dicho valor parece ser constante en todos los formados y esto se debe a que se implementó el mismo diodo laser como portadora óptica a 1550nm.

Tabla 25. Evaluación del análisis de espectro a la salida del canal 16QAM, OFDM en Simulink.

VARIABLE	DATO
Channel Power	-35.163 dBW
Occuped BW	78.29 THz
Frequency Error	-0.056 THz
Frequency Carrier	81.24 THz
THD	-6.06 dBc
SINAD	-10.76 dBc
SFDR	4.36 dBc
SNR	-10.67 dBc

4.4.2.4 Evaluación para la transmisión 64QAM, OFDM.

El último formato de modulación que fue evaluado es 64QAM, siendo este uno de los modelos que menos error presenta, dado que, entre más puntos de llegada en la constelación, hay menos distancia entre punto y punto, por lo tanto, se esperaba que, de todas las modulaciones, esta fuera la que menos perdida o errores representaran. En la figura 43 se muestra el mapa de constelación evaluado para este formato de transmisión, aquí se observa que los puntos presentan una dispersión normal en la llegada de las tramas, idealmente estas deben llegar específicamente al punto, pero, en la realidad, ningún sistema presenta transmisiones puras y perfectas, esto se debe a que los componentes generan atenuaciones normales y permitidas.

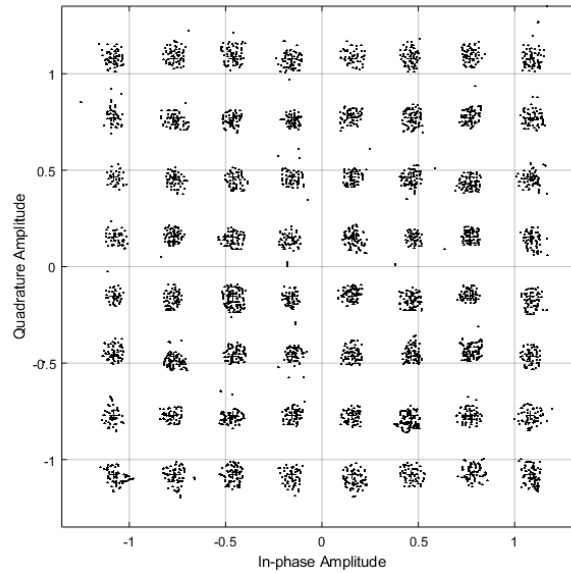


Figura 43. Diagrama de constelación, modulación 64QAM en OFDM.

En la tabla 26 se muestra los datos de la evaluación del mapa de constelación, estos datos muestran una mejoría del 2.8% del EVM y 4% del SNR con respecto a la modulación 64QAM en FDM.

Tabla 26. Evaluación del diagrama de constelación 64QAM en OFDM

VARIABLE	64QAM
Rms EVM (%)	20.4
Peak EVM (%)	20.4
Avg EVM (dB)	-25.3
Peak EVM (dB)	-25.3
Avg MER (dB)	25.3
SNR (dB)	-28.6

En la figura 44 se muestra una señal en la cual viaja, el mensaje modulada con la multiplexación OFDM y su respectiva portadora óptica para ser transmitida por el canal de transmisión, asimismo en la tabla 27 se muestra la evaluación de la salida de la fibra.

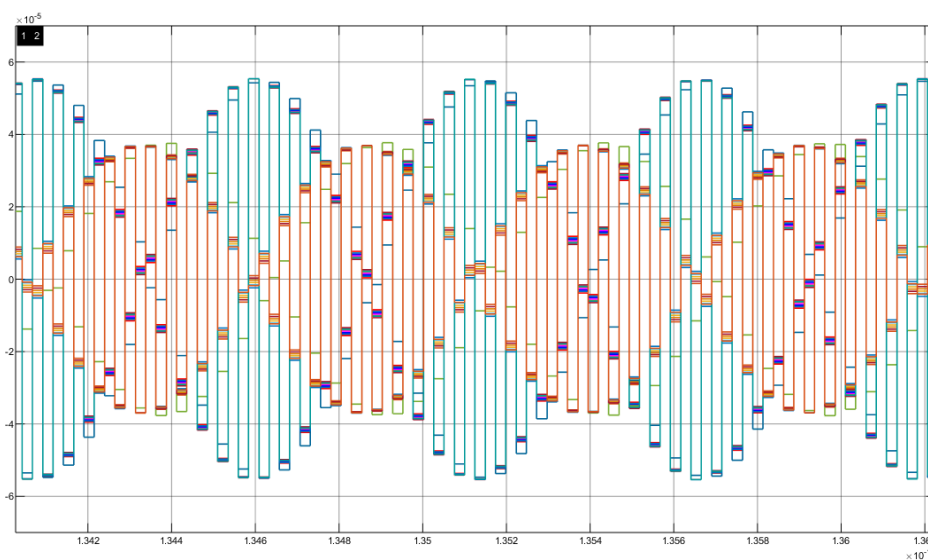


Figura 44. Señal en la salida del canal de transmisión 64QAM. OFDM en Simulink.

En la tabla 27 se describe la frecuencia de trabajo en la que opera en la salida de la fibra, el periodo de trabajo, el tiempo de subida y bajada de la señal, esta señal es modulada inicialmente bajo un modulador digital 64QAM.

Tabla 27. Medición del ciclo de la señal a la salida del canal de transmisión 64QAM, OFDM.

Periodo	Frecuencia	Duty cycle	Rise Time	Fall Time
20.595 fs.	48.55 THz	55.57 %	15.523 as	16.265 as

Para realizar el análisis del espectro, como en las otras modulaciones se evalúa el espectro a la entrada y a la salida del canal de transmisión o la fibra óptica, en la figura 46 se ve el espectro de trabajo de la señal a la entrada de la fibra, esta muestra algunos picos de potencia, lo que indica en cual rango de frecuencia se presenta la mayor transmisión de datos y con qué potencia se transmite por este canal.

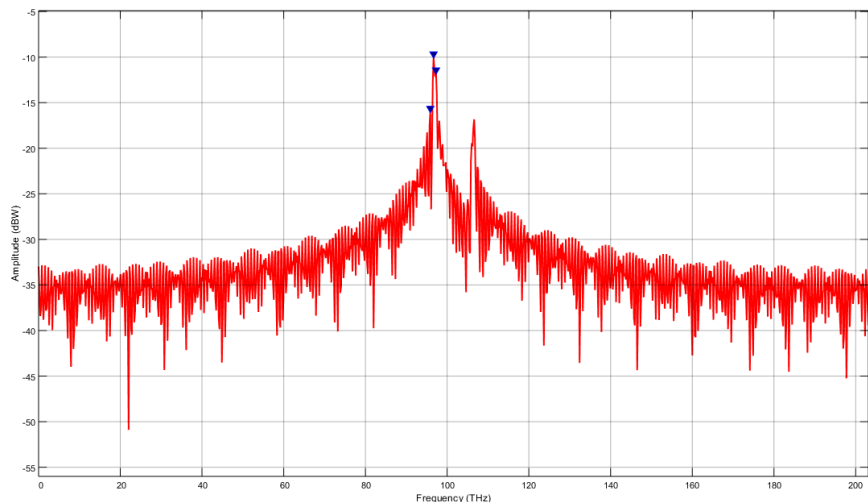


Figura 45. Análisis del espectro a la entrada del canal de transmisión 64QAM, OFDM en Simulink.

En la tabla 28 se muestran los datos de la evaluación del análisis del espectro a la entrada de la fibra indicando una potencia de 2.45mW, asimismo, un ancho de banda ocupado alrededor de los 38.5THz con una frecuencia de error de menos de 1% del ancho de banda ocupado, con un rango dinámico libre de espurios de 1.76dBc.

Tabla 28. Evaluación del análisis de espectro a la entrada del canal 64QAM, OFDM en Simulink.

VARIABLE	DATO
Channel Power	-26.1 dBW
Occuped BW	38.45 THz
Frequency Error	-0.04 THz
Frequency Carrier	40.61 THz
THD	-23.99 dBc
SINAD	-10.27dBc
SFDR	1.76dBc
SNR	-10.27 dBc

De la misma forma, a la salida del canal de analiza el espectro de la señal, el cual se ilustra en la figura 46, en este se observan los armónicos debido a las diferentes portadoras ortogonales entre ellas, la cuales no se solapan ni se superponen y viajan en el dominio de la frecuencia de forma eficiente.

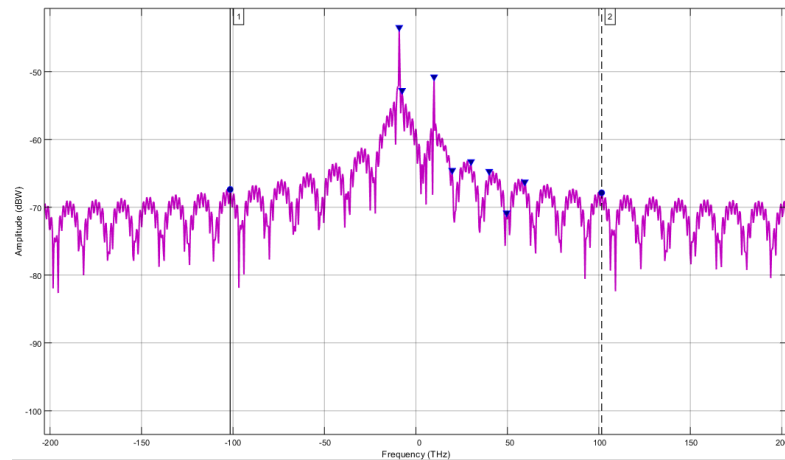


Figura 46. Análisis del espectro a la salida del canal de transmisión 64QAM, OFDM en Simulink.

En la tabla 29 se indican los datos resultantes del análisis de espectro para la modulación 64QAM, en la cual se observa una salida de potencia de 0.237mW, indicando esto que la señal presenta una relación señal a ruido de 10.33 dBc, esto muestra que la transmisión a través de esta modulación es efectiva y confiable para realizar envío de datos en alta frecuencia. La señal a través de esta modulación presenta en un ancho de banda de 76.79 THz, en la cual se presenta una frecuencia de error de menos de 0.5% y un rango dinámico libre de espurios de 6.46 dBc.

Tabla 29. Evaluación del análisis de espectro a la salida del canal 64QAM, OFDM en Simulink.

VARIABLE	DATO
Channel Power	-36.24 dBW
Occuped BW	76.79 THz
Frequency Error	-0.286 THz
Frequency Carrier	81.24 THz
THD	-7.52 dBc
SINAD	-10.40 dBc
SFDR	6.46 dBc
SNR	-10.33 dBc

4.5 Dar a conocer y divulgar los resultados del proyecto de investigación.

A continuación, se presenta la socialización realizada de los resultados y las conclusiones obtenidas en el proyecto de investigación. Para el desarrollo de este objetivo se efectuó la divulgación por medio de la participación de diferentes congresos regionales, nacionales e internacionales, también, se realiza una breve descripción de los eventos en los cuales se participó con su respectiva certificación.

Se participó en calidad de ponente en el V Encuentro Regional de Semilleros de Investigación RedColsi 2019 en la modalidad de proyectos de investigación en curso, titulado: “Evaluación de la relación señal a ruido de un sistema de transmisión óptico empleando las técnicas de multiplexación por división de frecuencia y multiplexación por división de frecuencia ortogonal” el cual tuvo lugar en la Universidad de Pamplona (UP), ubicada en la ciudad de Pamplona, Norte de Santander, los días 16 y 17 de Mayo del 2019.

En la figura 47 se observa el certificado de ponente, en el cual se verifica la participación en el evento.



Figura 47. Certificado de ponente de RedColsi Regional

Se hizo presencia en calidad de ponente en el XXII ENCUENTRO NACIONAL Y XVI ENCUENTRO INTERNACIONAL DE SEMILLEROS DE INVESTIGACIÓN – FUNDACIÓN REDCOLSI con el proyecto en la modalidad de proyectos en curso titulado “Evaluación de la relación señal a ruido de un sistema de transmisión óptico empleando las técnicas de multiplexación por división de frecuencia y multiplexación por división de frecuencia ortogonal” el cual se realizó en la Universidad de Santander (UDES), ubicada en la ciudad de Valledupar, Cesar los días 8 al 11 de octubre de 2019.

EL SUSCRITO VICERRECTOR ASISTENTE DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

CERTIFICA

Que el joven DIONEL ROPERO TORRES, identificado con Cédula de ciudadanía N°1020468077 de Bello (Antioquia), perteneciente al programa de ingeniería electrónica con código 1161132, representó a la Universidad Francisco de Paula Santander en el XXII Encuentro nacional y XVI internacional de semilleros de investigación realizado en la ciudad de Valledupar del 8 al 12 de Octubre del 2019 con el proyecto titulado: "EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN SEÑAL A RUIDO PARA UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICO EMPLEANDO LAS TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA Y MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA ORTOGONAL".

En constancia, se emite en el mes de febrero de 2020


JHAN PIERO ROJAS SUÁREZ
Vicerrector Asistente de Investigación y Extensión

Avenida Gran Colombia No. 12E-96 Barrio Colsag
Teléfono (057)(7) 5776655 - www.ufps.edu.co
oficinadeprensa@ufps.edu.co - San José de Cúcuta - Colombia



Figura 48. Certificado de ponencia, RedColsi Nacional.

También se participó en calidad de ponente en el I CONGRESO INTERNACIONAL Y II CONGRESO NACIONAL DE CIENCIA TECNOLOGIA Y GESTION CIENTECG, EXPLORANDO IDEAS, con el proyecto titulado: "Radio on optical fiber: generalities, principles and applications", el cual se realizó en Tecnoparque Nodo Medellín, los días 23 al 25 de octubre de 2019. En la figura 49 se muestra el certificado que corrobora la participación



Figura 49. Certificado de ponencia en CIENTECG

También se realizó participación en la VI SEMANA INTERNACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGIA E INNOVACIÓN, con el proyecto titulado “evaluación de un sistema de comunicaciones óptico modulado en desplazamiento de fase empleando multiplexación por división de frecuencia”, el cual se realizó en la Universidad Francisco de Paula Santander, en el cual se desarrolló los días 19 al 22 de noviembre del 2019.



Figura 50. Certificado de VI Semana Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación

Por último, se observa en el anexo 1 el artículo: EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICO EMPLEANDO MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE QPSK, 8PSK Y 16PSK UTILIZANDO LA TÉCNICA FDM. que fue enviado a *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, categoría B, de la Universidad de Santander (UDES), en la ciudad de Cúcuta.

5. Conclusiones

Se realizó el análisis en el sistema de comunicación óptico bajo el formato de multiplexación FDM en donde se destacó una potencia de la señal de entrada de 9.96mW y en la multiplexación OFDM una potencia de transmisión de 8.23 mW, para dicha evaluación se implementó un modelado de fibra óptica monomodo estándar de 50 KM de longitud, con atenuación de la fibra de 0.22 dB/KM y atenuación de 0.22 dB en acoples cada 2 KM.

En la modulación QPSK se logró observar por medio del diagrama de constelación una mejoría en: 77% en el EVM tanto en valores pico como valores promedio, un 75% en valor promedio de MER y un 36% de SNR a favor de la multiplexación FDM, pero, bajo este mismo formato de multiplexación la trama de datos no llega a todos los puntos esperados, indicando de esta manera que, aunque pareciera favorable transmitir por FDM es recomendable realizar envío de datos por OFDM ya que este presenta menos pérdida en la información, debido a que bajo este formato si se llega la información a todos los puntos deseados.

En la transmisión de datos bajo los dos formatos de multiplexación, se evaluó mediante la modulación 8PSK, en donde se destaca que, FDM sigue presentando el mismo error en las fases de llegada, debido a que no todas las tramas llegan a los puntos esperados y OFDM en contraparte si cumple con esta función, asimismo, OFDM presenta un error de EVM de 28.3% y los valores pico y promedio en decibelios alcanza -10.3 dB, en comparación con el 39% y el -8.2 dB que da FDM, también, se observa que el SNR es mejor un 9.39% bajo la multiplexación OFDM, el error de modulación es aceptable en

ambos formatos de multiplexación por el SNR revela una mejor transmisión mediante OFDM.

En el mapa de constelación en la transmisión 16QAM, muestra que bajo la multiplexación FDM presentó un error EVM de 27% comparado con el error de 23.3% en OFDM, la tasa de error de modulación es de 19.4 dB en FDM y 20.3 dB en OFDM, también, se observó que la relación señal a ruido en OFDM muestra una mejora del 1.5% en comparación con FDM; lo cual indica, que bajo la modulación 16QAM, OFDM es mejor para transmitir datos, aunque al analizar las dos multiplexaciones la diferencia no es mayor al 5%.

La transmisión de información teniendo en cuenta la modulación 64QAM, muestra los índices más bajos en el error de la magnitud del vector, dando un valor de 21% para FDM y 20.4% para OFDM, también el valor del MER alcanza un 23.7 dB en FDM y 25.3 dB en OFDM, asimismo, este formato de modulación refleja los mejores resultados con respecto a la relación señal a ruido en comparación con las modelaciones anteriores mencionadas expresando valores de -27.5dB en FDM y -28.6dB en OFDM; al evaluar los datos obtenidos en la investigación se puede concluir que se presenta menos pérdida de información en el envío de datos cuando se trabaja con la modulación 64QAM bajo los dos formatos de multiplexación.

Al evaluar las dos multiplexaciones tratadas en esta investigación se logra destacar un error en la transmisión FDM debido a que, al trabajar a frecuencias tan altas, la constelación no se muestra eficiente ya que presenta puntos en los cuales no llega la trama de bits, indicando esto, una pérdida significativa en la información. Concluyendo de esta forma que el mejor modelo de multiplexación para el tráfico de datos a frecuencias altas es

la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), bajo la modulación 64QAM ya que este presenta una relación señal a ruido más alta de forma significativa con respecto a las demás.

6. Referencias

- Balbuena-Campuzano Carlos Alberto, G.-U. F. (Julio-septiembre de 2014). Rendimiento de un sistema de control de errores con turbo códigos para canales PLC. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XV (3), 363-276.
- Boquera, M. C. (2005). *Comunicaciones ópticas, Conceptos Esenciales y resolución de ejercicios*. Madrid: Días de Santos S.A.
- Cáculo Científico. (2017). *comunidad de cálculo científico del CSIC*. Obtenido de <http://sitios.csic.es/web/calculo-cientifico/matlab>
- Cantero, H. F. (2015). RENDIMIENTO ESPECTRAL DE OFDM EN LAS TASAS DE TRANSMISION DE LAS REDES INALAMBRICAS 802.11X. *trabajo de grado*. Loricá, Córdoba, Colombia: Universidad de Cardona.
- Comprés, O. (23 de marzo de 2013). *SlideShare*. Recuperado el 28 de enero de 2019, de <https://www.slideshare.net/R3k3t0n/multiplexacin-por-divisin-de-frecuencia-fdm>
- Erik Cuevas, D. Z. (2010). *Procesamiento digital de imágenes con MatLAB y SIMULINK*. México: Alfaomega & RA-MA.
- ESACADEMIC. (2015). *ESACADEMIC*. (Foundation) Recuperado el 28 de enero de 2019, de <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/817001>
- Fabián Eduardo Sierra Sánchez, R. E. (2015). *Estimación del B.E.R. en un Enlace de Comunicación Ópticas*. Santa Marta.
- Fernández, M. (11 de marzo de 2009). *Sistema de Información*. (wordpress) Recuperado el 24 de enero de 2019, de

<https://mariafernandezuc3m.wordpress.com/2009/03/11/historia-y-evolucion-de-la-comunicacion/>

Garai, J. (01 de enero de 2013). *Nireleku*. (WordPress) Recuperado el 25 de enero de 2019, de <https://www.nireleku.com/2013/01/entendiendo-la-relacion-senal-ruido-y-la-atenuacion/>

González C. Y. Venuska, M. R. (Julio de 2018). *QuizOver*. (Copyrighth) Recuperado el 25 de enero de 2019, de <https://www.quizover.com/online/course/1-introduccion-a-los-sistemas-de-comunicaciones-digitales-by-openstax>

Granados, P. C. (2010). *Modulación y demodulación en amplitud modulada*. San José: Universidad HispanoAmericana.

Gustavo Puerto Leguizamón, B. O. (2008). Evolución de las redes de datos: Hacia una plataforma de comunicaciones completamente óptica. *Fac. Ing. Univ. Antioquia* (45), 148-156.

Huerta, I. E. (2019). *Saber Y Ciencias*. Recuperado el 24 de enero de 2019, de <http://saberesyciencias.com.mx/2015/09/02/el-uso-de-la-luz-en-un-sistema-de-comunicacion-optico/>

International Telecommunication Union - ITU. (2016). *Characteristics of a single-mode optical fiber and cable*. Ginebra: ITU-T.

International Telecommunication Union - ITU. (2020). *International Telecommunication Union*. Recuperado el 23 de febrero de 2020, de <https://www.itu.int/en/about/Pages/overview.aspx>

Jiménez, L. (2015). *Modulación Multiportadora OFDM*. México: academia y desarrollo.

LÓPEZ, F. I. (2018). *TÉCNICAS ÓPTICAS DE TRANSMISION AVANZADAS PARA REDES OOFDM-WDM*. Tesis Doctoral, UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA, Valencia, España.

López, M. T. (mayo de 2017). *Teorías de las Telecomunicaciones*. Recuperado el 28 de enero de 2019, de <https://teoriadelatelecomunicaciones.files.wordpress.com/2011/11/multiplexacion.pdf>

Ministerio de tecnologías de información y telecomunicaciones. (26 de diciembre de 2019). *MINTIC*. Obtenido de <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sector-TIC/Espectro/>

O., Y. D. (12 de marzo de 2012). *Telecomunicaciones*. Recuperado el 28 de enero de 2019, de <http://yuricodelaotelecomunicaciones.blogspot.com/2012/03/1-multiplexacion-por-division-en.html>

Ordóñez, J. L. (2012). Espectro Electromagnético y Espectro Radioeléctrico. *Autores Científicos Técnicos y Académicos* (62), 17-31.

Ortiz, A. M. (31 de 05 de 2012). Estudio y caracterización de un modulador Mach Zehnder. Madrid, España: ETSIT.

Papiewski, J. (28 de marzo de 2018). *Sciencing*. (copyright) Recuperado el 31 de enero de 2019, de <https://sciencing.com/how-to-calculate-signal-to-noise-ratio-13710251.html>

R., A. R. (2018). OFDM óptimo para la comunicación bidireccional en las redes eléctricas inteligentes. *Revista Chilena de Ingeniería*, 26(1), 43-53.

Rajbir Singh, D. S. (mayo de 2017). Estudio y evaluación del rendimiento de Radio sobre fibra utilizando el modulador Mach Zehnder. *Journal internacional de Investigación Avanzada en Conciencia puter*, 8(5), 1095-1100.

Ricardo Alfonso Pinto García, A. F. (2014). *UniMilitar*. Recuperado el 24 de enero de 2019, de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11995/Com%20opticas%20V.2014-03-28%20PDF.pdf;jsessionid=50A7142A70ECBD85E020A6E1760E129B?sequence=1>

Rivas, O. N. (2012). *SISTEMAS OFDM DE ALTA EFICIENCIA*. Madrid: UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID.

Semeria, M. (2015). Los tres teoremas: Fourier, Nyquist-Shannon. *Serie Documentos de Trabajo*, No. 582. (J. M., Ed.) Buenos Aires, Argentina: UCEMA.

Stelvio Salomone, M. S. (2019). *Telecomlérica*. (APWIRELESS) Recuperado el 24 de enero de 2019, de <https://www.telecomiberica.es/evolucion-de-la-tecnologia-de-la-telefonía-movil-en-espana/>

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. (V. G. Pozo, Trad.) PEARSON EDUCACION: MEXICO.

- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (1986). *Determinación de la relación de protección en radiofrecuencia en la radiodifusión sonora con modulación de frecuencia*. Ginebra: UIT.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (1995). *Métodos de medición de equipos video digitales con Entrada/Salida Analógica*. Ginebra: UIT.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2002). *Parámetros y objetivos de las características de error de extremo a extremo para conexiones y trayectos digitales internacionales de velocidad binaria constante*. Ginebra: UIT.
- Union Internacional de Telecomunicaciones. (2003). *Conexiones y circuitos telefónicos internacionales – Recomendaciones generales sobre la calidad de transmisión para una conexión telefónica internacional completa*. ginebra: UIT.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (20 de noviembre de 2012). *Transceptores de comunicación por la línea eléctrica de banda estrecha con modulación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) – Especificación de la densidad espectral de potencia*. Ginebra, Suiza: UIT. Recuperado el 28 de enero de 2019
- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (02 de 2013). *ITU*. Recuperado el 28 de enero de 2019, de https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1224-1-201203-I!!PDF-S.pdf

Anexos

Anexo 1. Artículo Enviado a Aibi revista de investigación, administración e ingeniería.

Aibi revista de investigación, administración e ingeniería.

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 Ropcro¹, Karla Puerto² y Dinael Gucvara³

Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Telecomunicaciones (GIDET)^{1,2,3}

Universidad Francisco de Paula Santander^{1,2,3}, Colombia^{1,2,3}

dionelrt@ufps.edu.co, karlaceciliapl@ufps.edu.co, dinaelqi@ufps.edu.co

Recibido: Fecha de recepción (diligenciado por el Editor).

Aprobado: Fecha de aprobación del artículo (diligenciado por el Editor).

Resumen— En este documento se presenta el planteamiento de un sistema de comunicaciones óptico desde la generación de la señal, la modulación y la transmisión por la fibra óptica. Se emplea la técnica de multiplexación por división de frecuencia (FDM), usando una modulación por desplazamiento de fase (PSK, de phase shift keying). Se evalúa el sistema de comunicaciones ópticas a través de una herramienta computacional de uso académico ya avalada por la comunidad científica, comparando los resultados bajo los diferentes formatos de modulación como son Q-PSK, 8-PSK y 16-PSK. Se realiza la medición del error de la magnitud del vector (EVM, error vector magnitude) como porcentaje y decibeles de los valores pico y promedio, adicionalmente se evalúa la tasa de error de modulación (MER, modulation error rate). Se concluye que en la modulación 16-PSK los datos de EVM en RMS y valores pico son un 50.25% 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.

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

Abstract— This document presents the approach of an optical communication system from signal generation, modulation and transmission over optical fiber. The technique of frequency division multiplexing (FDM), using phase shift keying (PSK), is employed. The optical communications system is evaluated through a computer tool of academic use already endorsed by the scientific community, comparing the results under the different modulation formats such as Q-PSK, 8-PSK and 16-PSK. The error of the vector magnitude (EVM) is measured as a percentage and decibels of the peak and average values. Additionally, the modulation error rate (MER) is evaluated. It is concluded that in 16-PSK modulation the EVM data in RMS and peak values are 50.25% lower compared to Q-PSK and 8-PSK and the average value in MER in dB for 16-PSK is 42.25% higher than in Q-PSK and 8-PSK. This indicates that for the implemented optical communication system the 16-PSK modulation format provides better transmission performance.

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

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: karlaceciliapl@ufps.edu.co (Karla C. Puerto López), dionelrt@ufps.edu.co (Dionel Ropero Torres).

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

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

Forma de citar: D. Ropero Torres, "Evaluación de la Transmisión de Datos en un Sistema de Comunicaciones Óptico Empleando la Técnica FDM, Comparando los Formatos de Modulación QPSK, 8PSK y 16PSK", Aibi revista de investigación, administración e ingeniería.

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 sociedades, 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 se 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 analógica 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 brindar servicios de telecomunicaciones, las cuales no poseen laboratorios especializados para verificar que tipo de transmisión de datos brinda menos 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 analógica que consta de modulación con doble banda lateral [17], su conversión de analógico 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.

I. 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 analógica 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

II. 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.

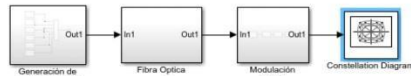


Figura 1: Etapa del sistema de comunicaciones óptico en el software especializado.

Fuente: Elaboración Propia.

Para la simulación del sistema de comunicación óptico se consideraron 6 señales analógicas descritas en la tabla 1, las cuales se adecuaron mediante una modulación analoga de doble banda lateral, que permitió realizar la división de frecuencia para la multiplexación a tratar [37], en donde se aplicaron unas portadoras analógicas 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
F _{rf} (GHz)	60	62	64	66	68	70
F _{Opt} (THz)	198.5	195.95	193.4	190.9	188.56	182.2

Fuente: 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 analógico 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 analoga 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 analoga, seguida de un acondicionamiento por doble banda lateral, posterior a esto se ejecuta la conversión analoga 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 analoga 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.

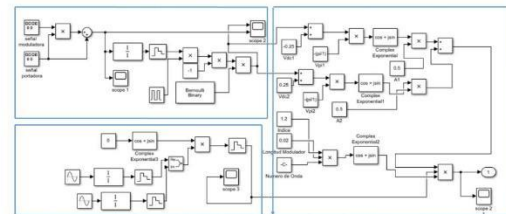


Figura 2: Diagrama de bloques desarrollada en la herramienta computacional, para la etapa de las señales de entrada.

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 analoga a digital, modulación por el MZM y la inyección de la señal óptica, con el proceso de multiplexación por división de frecuencia

Dionel Roper, Karla Puerto, Dinael Guevara

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.

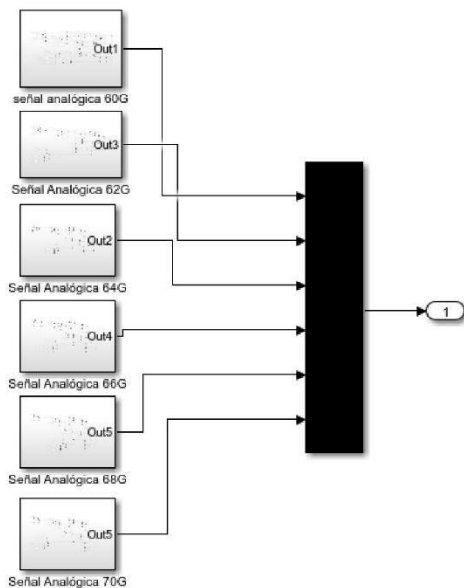


Figura 3: Diagrama de bloques desarrollada en la herramienta computacional especializada, para la etapa de multiplexación de las señales Fuente: Elaboración Propia

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 si 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

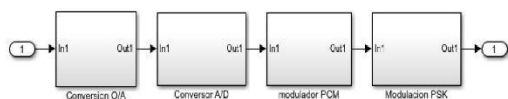


Figura 4: Diagrama de bloques desarrollada en la herramienta computacional especializada, para la etapa del proceso de modulación digital Fuente: Elaboración Propia

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

III. 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.

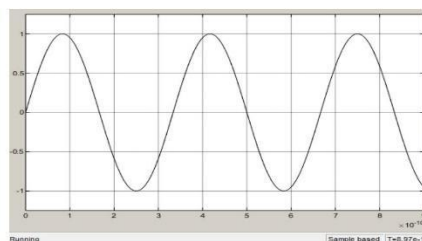


Figura 5: Diagrama desarrollada en la herramienta computacional especializada, de la señal analógica original con amplitud de 1 y frecuencia de 3.5 GHz.

Fuente: Elaboración Propia

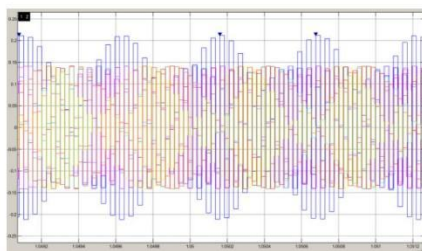


Figura 6: Diagrama desarrollada en la herramienta computacional especializada, de la señal resultante de la multiplexación.

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.

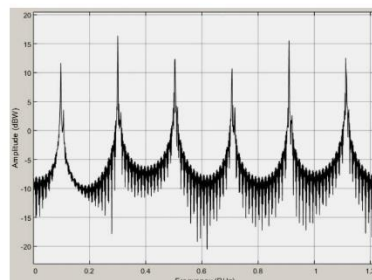


Figura 6: Espectro de frecuencia de la señal óptica multiplexada a la salida del transmisor.

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 llaga la señal como se puede ver en la figura 8, siendo este el caso específico para la modulación QPSK.

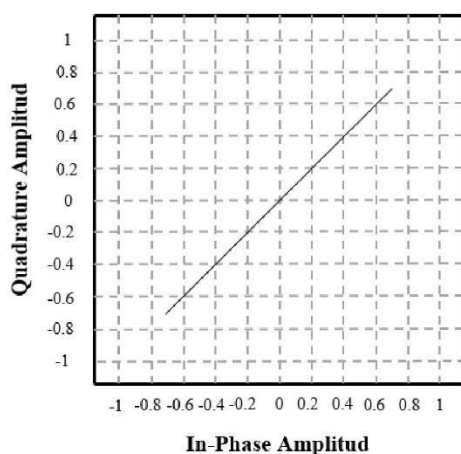


Figura 6: Diagrama desarrollada en la herramienta computacional especializada, del diagrama de constelación y trayectoria de la modulación QPSK

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: 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.

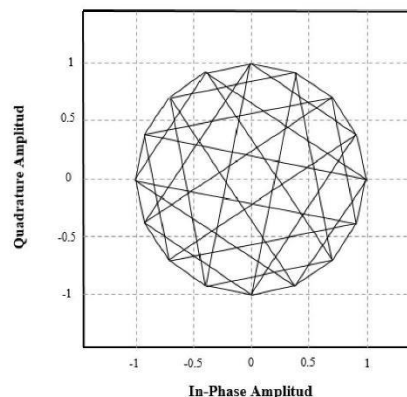


Figura 7: Diagrama desarrollada en la herramienta computacional especializada, del diagrama de constelación y trayectoria de la modulación 8PSK

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: 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

Dionel Ropero, Karla Puerto, Dinael Guevara

podrán determinar el funcionamiento del sistema de transmisión óptico.

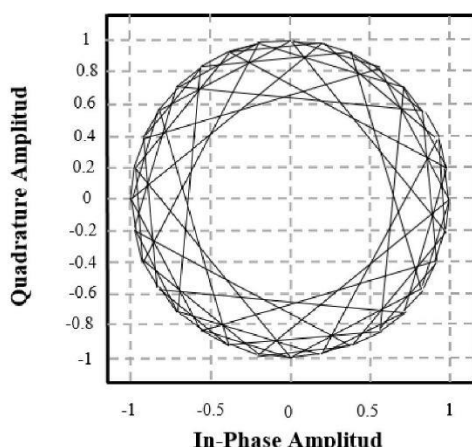


Figura 6: Diagrama desarrollada en la herramienta computacional especializada, del diagrama de constelación y trayectoria de la modulación 16PSK

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: 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 mejora significativa en la tasa de error de modulación y una mejor relación señal a ruido con respecto a las demás.

IV. 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.

V. 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.

VI. REFERENCIA

- [1] G. Campuzano, "Telecomunicaciones Radio sobre Fibra," [Online]. Available: <http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transferencia/67/67-III.03.html>. [Accessed 24 Febrero 2019].
- [2] ONSICOM, "ONSICOM," ONSICOM, 10 Marzo 2015. [Online]. Available: <https://www.onsicom.es/breve-recorrido>

- historico-de-la-fibra-optica. [Accessed 29 Octubre 2019].
- [3] J. J. G. T. y. N. G. G. Andrés F. 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. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>. [Accessed 30 SEPTIEMBRE 2019].
- [5] C. I. O. Ruiz, "Medios de Transmisión," Managua, 2015.
- [6] MINTIC, "Boletín trimestral del sector TIC - Cifras segundo trimestre de 2017," Julio 2018. [Online]. Available: 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. Jhon James 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] T. Xiao, Z. Zhang, X. Li and Y. Y. L. C. J. yu, "OFDM Vector al Generation Based on Optical Carrier Suppression," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 23, pp. 2449-2452, 28 August 2015.
- Techlandia, "TECHALANDIA," LEAF GROUP, 2018. [Online]. Available: https://techlandia.com/mux-demux-info_250607/. [Accessed 29 Octubre 2019].
- 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.
- E. Avendaño-Fernandez, J. j. Granada-Torres and 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.
- H.-D. Jung, K. W. Lee, J.-H. Kim, Y.-H. Kwon and 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- M. C. y. P. L. G. A. Palacios Garzón, "Sistema de Bibliotecas, Universidad Francisco José de Caldas," 25 Febrero 2019. [Online]. Available: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/14809>. [Accessed 30 junio 2019].
- 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.
- PROMAX, "PROMAX," Febrero 2017. [Online]. Available: <https://www.promax.es/downloads/manuals/Spanish/descripcion-de-senales.pdf>. [Accessed 29 Octubre 2019].
- NetSpot, "NetSpot 2.11," 2017. [Online]. Available: <https://www.netspotapp.com/es/signal-to-noise-ratio.html>. [Accessed 29 Octubre 2019].
- A. K. y. S. dewra, "Performance Analysis of 4x10 Gbps OFDM-PON System Over ROF Link," *Journal of Optical Communications*, 14 June 2017.
- 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.
- 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.
- T. Tang, X. Zou, P. Li and 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.
- 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.
- F. I. C. López, "Técnicas de transmisión avanzadas para redes OOFDM-WDM," Valencia, España, 2018.
- B. M. D. L. L. C. A. Karla Cecilia 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.
- F. M. G. G. Mercedes Alicia Tilleria Cabrera, "Diseño e

- Dionel Roper, Karla Puerto, Dinael Guevara
- 30] 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- E. Martínez, "Relación Señal a Ruido SNR," EVIux, Mexico, 2007.
- 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.
- F. R. R. J. P. V. J. A. G. L. B. A. F. A.-F. Katherine 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.
- C. D. C. V. N. D. B. M. y. D. G. I. Karla Cecilia Puerto López, "SOLUTION OF THE NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION FOR RADIO OVER FIBER SYSTEMS USING THE SPLIT-STEP FOURIER METHOD," in *CIETA*, Pamplona, Colombia, 2018.
- N. D. B. M. K. C. P. L. y. D. G. I. Cristian David Calderon Villamizar, "Evaluation of the nonlinear Schrödinger equation for radio over fiber systems," in *CONCAPAN*, El Salvador, 2018.
- C. D. C. V. K. C. P. L. y. D. G. I. Narly D. Bastos Moreno, "LINEAR EFFECTS IN AN OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM USING THE COARSE WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING TECHNIQUE," in *CIETA*, Pamplona, Colombia, 2018.
- Agencia Nacional del Espectro, "Agencia Nacional del Espectro," Julio 2016. [Online]. Available: <http://www.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Planacion/cnabf/CNABF.pdf>. [Accessed 31 Octubre 2019].
- Photonics Communications Research Laboratory, "PCRL,"
- 42] 2017. [Online]. Available: https://www.photonics.ntua.gr/OptikaDiktyaEpikoinwnias/Lecture_4_CoherentOptical_DSP.pdf. [Accessed 31 Octubre 2019].
- International Telecommunications Union ITU, *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*, Ginebra: ITU, 2016.
- A. Bekkali, T. Kobayashi, K. Nishimura, N. Shibagaki and 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.
- 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.