



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TÍTULO

Evaluación de la performance de sistemas ópticos basada en enlaces
PON de modulación y detección directa (IM/DD) mediante modulación
OFDM

AUTOR

Pineda Poveda, Carlos Alfredo

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR

Altamirano Carrillo, Carlos Daniel

Santa Elena, Ecuador

Año 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

Ing. Alicia Andrade Vera, Mgtr.
**COORDINADORA DEL
PROGRAMA**

Ing. Carlos Altamirano Carrillo, Ph.D.
TUTOR

Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.
**DOCENTE
ESPECIALISTA**

Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgtr.
**DOCENTE
ESPECIALISTA**

Abg. María Rivera González, MSc.
**SECRETARIA GENERAL
UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por PINEDA POVEDA, CARLOS ALFREDO como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Telecomunicaciones.

TUTOR

Ing. Carlos Altamirano Carrillo, Ph.D.

Santa Elena, 15 de febrero de 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, CARLOS ALFREDO PINEDA POVEDA

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, Evaluación de la performance de sistemas ópticos basada en enlaces PON de modulación y detección directa (IM/DD) mediante modulación OFDM previo a la obtención del título en Magíster en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, 15 de febrero de 2025

EL AUTOR

Carlos Alfredo Pineda Poveda



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado Evaluación de la performance de sistemas ópticos basada en enlaces PON de modulación y detección directa (IM/DD) mediante modulación OFDM, presentado por el estudiante, Pineda Poveda, Carlos Alfredo fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 6%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



TUTOR

Ing. Carlos Altamirano Carrillo, Ph.D.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, CARLOS ALFREDO PINEDA POVEDA

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, 15 de febrero de 2025

EL AUTOR

Carlos Alfredo Pineda Poveda

AGRADECIMIENTO

Este trabajo es el resultado de un largo camino, lleno de retos, aprendizajes y crecimiento personal. No hubiera sido posible sin el apoyo, la paciencia y el amor incondicional de las personas que me han acompañado en este viaje.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por brindarme su apoyo y sabiduría en todo momento. También quiero agradecer a mi familia, quienes siempre creyeron en mí, por su apoyo condicional, incluso cuando yo dudaba. Su apoyo constante, sus sacrificios y sus palabras de aliento han sido mi fuerza motora en los momentos más difíciles. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mi asesor de tesis, Ing. Carlos Altamirano, por su guía y conocimiento. Su confianza me motivó a superar mis propios límites y a dar lo mejor en cada paso de este proyecto.

Finalmente, quiero agradecerme a mí mismo, por no rendirme. Por cada noche, por cada página escrita, por cada logro que me acercó un poco más a la meta. Este trabajo es un reflejo de mi esfuerzo y mi pasión, y estoy orgulloso del camino recorrido.

A todos, gracias de corazón.

Pineda Poveda, Carlos Alfredo

DEDICATORIA

A mis padres, por ser mi inspiración y mi mayor ejemplo de esfuerzo y amor incondicional.

A mi esposa, por creer en mí cuando yo dudaba y por ser mi constante apoyo en este camino.

Y a mí mismo, por no rendirme y por aprender a confiar en mis capacidades.

Pineda Poveda, Carlos Alfredo

ÍNDICE GENERAL

TÍTULO	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Las redes de telecomunicaciones ópticas.....	5
1.2.1. La red de transporte	6
1.2.2. La red de acceso	6
1.2.2.1. FTTH dedicado: La arquitectura Punto a Punto	8
1.2.2.2. FTTH compartido: La arquitectura punto multipunto pasivo.....	10
1.2.2.3. Comparación entre las dos arquitecturas P2P y P2MP.....	11
1.3. Redes Ópticas Pasivas (PON)	12
1.3.1. Red Óptica Pasiva con Multiplexación por División en el Tiempo.	13

1.3.2. Red Óptica Pasiva con Multiplexación por División de Longitud de Onda	15
1.4. Principios de la modulación de intensidad y detección directa en sistemas ópticos.....	18
1.4.1. Fundamentos de la modulación por intensidad y detección directa	19
1.4.2. Principios de la detección directa en sistemas ópticos	20
1.4.3. Características y limitaciones de la modulación IM/DD.....	22
1.5. Tecnología OFDM.....	22
1.6. Principios de OFDM	23
1.7. Modulación y demodulación de OFDM	25
1.8. Consideraciones del uso de OFDM en redes ópticas.....	26
1.8.1. Eficiencia Espectral	26
1.8.2. Tolerancia a la Dispersión Cromática	27
1.8.3. Resistencia al Ruido y Efectos No Lineales	27
1.8.4. Flexibilidad, Adaptación y Comparativa entre Sistemas OFDM y sin OFDM.....	27
1.9. Aplicación de Redes PON en el Fronthaul de 5G	28
1.10. Tasa de bits con y sin OFDM en redes GPON	30
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	32
2.1. Contexto de la investigación.....	32
2.2. Diseño y alcance de la investigación.....	32
2.3. Tipo y métodos de investigación	33
2.4. Población y muestra	33
2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	33
2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.	33
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34

3.1.	Plataforma de simulación OptiSystem.....	34
3.1.1.	Funcionalidades de la plataforma de simulación OptiSystem.....	34
3.1.2.	Ventajas de la plataforma OptiSystem	35
3.1.3.	Campos de aplicación del software OptiSystem	36
3.2.	Modelado de un sistema GPON (Gigabit Passive Optical Network).....	36
3.2.1.	Diseño de simulación de la OLT	37
3.2.2.	Diseño de simulación del transmisor por modulación de impulsos con formato QAM/OFDM	38
3.2.3.	Diseño de simulación del medio de transmisión óptica	41
3.2.4.	Diseño de simulación del receptor óptico de detección directa para formatos QAM/OFDM	42
3.2.5.	Diseño de simulación de la ONT.....	43
3.3.	Discusión de los resultados obtenidos en el sistema IM/DD OFDM.	44
3.3.1.	Validación de Resultados	56
	CONCLUSIONES	62
	RECOMENDACIONES	63
	REFERENCIAS.....	64
	ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1: Comparación entre P2P y P2MP	11
Tabla 1. 2: Especificaciones principales de los estándares GPON y EPON	15
Tabla 1. 3: Características más relevantes de IM/DD.	22
Tabla 3. 1: Parámetros de simulación del diseño propuesto.....	37
Tabla 3. 2: Parámetros de simulación del transmisor óptico usando multiplexación OFDM.....	40
Tabla 3. 3: Resumen de los datos obtenidos en la simulación del GPON basados en OFDM.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Estructura jerárquica de redes de telecomunicaciones.....	6
Figura 1. 2: Arquitectura de la red de acceso de fibra óptica.	7
Figura 1. 3: Arquitectura de redes FTTC y FTTB	8
Figura 1. 4: Arquitectura de FTTH punto a punto.....	9
Figura 1. 5: Arquitectura de FTTH punto a multipunto pasivo.....	10
Figura 1. 6: Estructura del sistema de comunicación TDM-PON.....	14
Figura 1. 7: Estructura del sistema de comunicación WDM-PON.....	16
Figura 1. 8: Estructura del sistema de comunicación TDM/WDM PON.....	17
Figura 1. 9: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación por fibra óptica.	20
Figura 1. 10: Modulación de intensidad y detección directa en los sistemas ópticos.....	21
Figura 1. 11: Sistema de banda base equivalente para un enlace óptico con IM/DD.....	21
Figura 1. 12: Espectro de frecuencias para la técnica OFDM sin solapamientos.....	24
Figura 1. 13: Espectro de frecuencias para la técnica OFDM con solapamientos.....	24
Figura 1. 14: Diagrama de bloques de OFDM basado en sistemas VLC.....	26
Figura 1. 15: Esquema resumen del análisis comparativo entre un sistema sin OFDM y con OFDM.....	28
Figura 2. 1: Data Center de la CNT EP, Mega construcción del sector TIC	32
Figura 3. 1: Ventana principal de la interfaz de la plataforma de simulación OptiSystem.....	34
Figura 3. 2: Esquema de simulación para la OLT.....	37
Figura 3. 3: Esquema de simulación para la transmisión usando la técnica OFDM.....	39
Figura 3. 4: Esquema de simulación para el medio de transmisión por fibra monomodo.....	41
Figura 3. 5: Ventana principal de la interfaz de la plataforma de simulación OptiSystem.....	42

Figura 3. 6: Ventana principal de la interfaz de la plataforma de simulación OptiSystem.	43
Figura 3. 7: Resultado obtenido del diagrama de constelaciones del formato de modulación 4-QAM para un enlace de 10 km.	44
Figura 3. 8: Resultado de componentes (a) en fase y (b) cuadratura del espectro de frecuencias.	46
Figura 3. 9: Resultado del espectro óptico del transmisor OFDM tras la modulación de Mach-Zehnder.....	46
Figura 3. 10: Resultado obtenido del diagrama de constelaciones del formato de modulación 4-QAM en el transmisor OFDM para un enlace de 50 km.	47
Figura 3. 11: Resultado obtenido del diagrama de constelaciones del formato de modulación 4-QAM en el transmisor OFDM para un enlace de 100 km.	48
Figura 3. 12: Resultado obtenido del diagrama de constelaciones del formato de modulación 4-QAM en el transmisor OFDM para un enlace de 200 km.	49
Figura 3. 13: Resultado obtenido del diagrama de constelaciones del formato de modulación 4-QAM en el transmisor OFDM para un enlace de 300 km.	50
Figura 3. 14: Diagrama de ojo obtenido del analizador BER para un enlace de 10 km.	51
Figura 3. 15: Diagrama de ojo obtenido del analizador BER para un enlace de 300 km.	52
Figura 3. 16: Resumen de los datos obtenidos de la OSNR frente a la distancia del enlace óptico entre 10 y 300 km.	53
Figura 3. 17: Resumen de los datos obtenidos de la BER frente a la distancia del enlace óptico entre 10 y 300 km.	54
Figura 3. 18: Resumen de los datos obtenidos de la BER vs. OSNR para enlaces ópticos entre 10 y 300 km.	55
Figura 3. 19: Diagrama de ojo obtenido de la revista científica del análisis de transmisión.....	56

Figura 3. 20: Diagramas de ojo obtenido del analizador BER para un enlace de 10 km y 10.3km	57
Figura 3. 21: Comparación del factor de dispersión por las curvas BER VS. OSNR dis.100km.....	59

RESUMEN

La creciente demanda de ancho de banda en las telecomunicaciones impulsa el desarrollo de tecnologías avanzadas con mayor capacidad, eficiencia y costos optimizados. En este contexto, las redes ópticas pasivas (PON) destacan como una solución clave por ofrecer altas tasas de transmisión con menor consumo energético y complejidad. Los sistemas basados en modulación por intensidad y detección directa (IM/DD) son populares por su simplicidad, pero se presentan limitaciones frente a la dispersión cromática y otros efectos adversos en largas distancias, lo que afecta la calidad y capacidad de la señal.

La modulación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) emerge como una técnica avanzada que mejora la eficiencia espectral, refuerza la transmisión y mitiga los efectos adversos. Este estudio compara sistemas PON basados en IM/DD y aquellos con OFDM, analizando su impacto en calidad de señal, robustez y eficiencia espectral, explorando como esta tecnología puede optimizar el rendimiento en aplicaciones de alta capacidad y larga distancia.

Palabras claves: PON, IM/DD, OFDM

ABSTRACT

The increasing demand of bandwidth in telecommunications systems is driving the development of advanced technologies with greater capacity, efficiency and optimized costs. In this context, passive optical networks (PONs) stand out as a key solution by offering high transmission data rates with lower power consumption and complexity. Systems based on intensity modulation and direct detection (IM/DD) are popular for their simplicity, but these are limited by chromatic dispersion and other adverse effects over long distances, which affect signal quality and capacity.

Orthogonal frequency division modulation (OFDM) emerges as an advanced technique that improves spectral efficiency, enhances transmission and mitigates adverse effects. This study compares PON systems based on IM/DD and OFDM, analyzing their impact on signal quality, robustness and spectral efficiency, by exploring how OFDM technology can optimize performance in high capacity and long-distance applications.

Keywords: PON, IM/DD, OFDM

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de ancho de banda en las redes de comunicaciones (Luzón C., 2023) ha sido un motor clave para el desarrollo y la adopción de tecnologías ópticas avanzadas, como las redes ópticas pasivas (Passive Optical Networks, PONs), ofrecen una serie de ventajas significativas (López R., 2018) en términos de eficiencia espectral, capacidad de transmisión y costos de operación y mantenimiento en comparación con las tecnologías de acceso tradicionales (Alarcón, 2022), como el cable coaxial y el par trenzado de cobre.

La modulación por intensidad y detección directa (IM/DD) ha sido ampliamente utilizada en sistemas PON debido a su simplicidad, eficiencia y su capacidad para soportar velocidades de transmisión moderadas a altas (Escallón P. & Ruiz G., 2018; Molina L., 2023). En un sistema IM/DD, la información se transmite modulando directamente la intensidad de la señal óptica transmitida, sin modular la fase (Pérez Soler, 2009; Rodríguez L., 2022).

Pese a los beneficios de la modulación IM/DD se ha reconocido como la modulación por desplazamiento de frecuencia ortogonal (OFDM) a la implementación de técnicas de modulación más avanzadas, lo que ayudaría a mejorar el rendimiento de las redes PON.

OFDM es una técnica de mucha importancia con respecto a la modulación multiportadora la cual su función es dividir el ancho de banda total en múltiples subportadoras ortogonales, lo que permite una transmisión segura, eficiente y robusta frente a la difusión cromática y otros eventos de la fibra óptica.

La implementación de OFDM en sistemas de redes de óptica pasiva con enlaces IM/DD enfrenta retos técnicos muy importantes como la compensación de la dispersión cromática, es decir entre la interferencia entre subportadoras y la sensibilidad al ruido óptico. Esta investigación su objetivo es evaluar el desempeño de los sistemas, analizando el rendimiento visual y de resistencia a condiciones adversas. Los resultados deseados van a contribuir al desarrollo de las comunicaciones ópticas lo que nos brindará información clave para la optimización de futuras redes.

Planteamiento de la investigación

Aunque se reconocen los posibles beneficios potenciales, la implementación de la modulación OFDM en sistemas PON basados en IM/DD enfrentan desafíos muy importantes, entre ellos la compensación de la dispersión cromática y la interferencia entre subportadoras. Los estudios demuestran que la implementación de estos mecanismos es esencial para minimizar la interferencia entre portadoras, garantizando así un rendimiento óptico del sistema (Goma et al., 2019).

Formulación del problema de investigación

La investigación propuesta referente el análisis del rendimiento de los sistemas ópticos de comunicación que utilizan enlaces de redes de óptica pasivas IM/DD con modulación OFDM se fundamenta en el ámbito contemporáneo en el área de telecomunicaciones. Dada la gran necesidad de brindar mayor capacidad de ancho de banda y los avances en las tecnologías de comunicación, resulta primordial analizar y optimizar el rendimiento y la efectividad de las PONs.

Las redes de fibra óptica pasivas presentan varias ventajas frente a las tecnologías de acceso tradicionales, tales como el cable coaxial y los pares de cobre.

Estas ventajas abarcan una gran capacidad de transmisión superior, mejorando la utilización del espectro y reduciendo la dependencia de equipos activos lo que conlleva gastos operativos menores y de mantenimiento. En consecuencia, es esencial optimizar el rendimiento y la eficiencia de las redes PON para hacer frente a la creciente demanda de servicios de banda ancha y asegurar la sostenibilidad económica de las infraestructuras de telecomunicaciones.

En ese sentido, la modulación por intensidad y detección directa (IM/DD) ha sido una metodología o esquema que se utiliza en sistemas PON por su facilidad, eficacia y rendimiento. No obstante, la incorporación de métodos de modulación más sofisticados, tales como la modulación por desplazamiento de frecuencia ortogonal, podría potenciar aún más la efectividad de estas redes, la modulación OFDM facilita una transmisión eficiente y resistente ante la dispersión cromática, lo que resulta interesante para usos de acceso óptico.

Por consiguiente, evaluar el rendimiento de los sistemas PON que utilizan enlaces IM/DD con modulación OFDM es primordial para conocer más sobre los atributos y restricciones de esta tecnología, así como para identificar puntos o áreas de mejoras. Este análisis detallado puede ofrecer datos valiosos para el desarrollo y la optimización de redes venideras, de este modo impulsando el avance de las tecnologías de transmisión óptica.

Del mismo modo la investigación en esta área es importante dentro de un proceso de evolución constante de las tecnologías de comunicación. Con el lanzamiento de nuevas aplicaciones y servicios que requieren cada vez más ancho de banda, es necesario promover y mejorar las infraestructuras de comunicaciones para atender o satisfacer demandas en aumento. La investigación planteada podría aportar a este objetivo al proporcionar conocimientos y recomendaciones prácticas para el diseño e implementación de redes ópticas pasivas más efectivas y sofisticadas.

Objetivo General:

Evaluar la performance de sistemas de comunicaciones ópticas basados en enlaces PON IM/DD mediante modulación OFDM, considerando aspectos como la capacidad de transmisión y eficiencia espectral.

Objetivos Específicos:

1. Describir el marco teórico referencial en sistemas PON basados en enlaces de modulación directa, detección directa y la técnica OFDM.
2. Evaluar la eficiencia espectral de sistemas PON basados en enlaces IM/DD con modulación OFDM en comparación con sistemas tradicionales.
3. Analizar la robustez de los sistemas PON basados en enlaces IM/DD con modulación OFDM frente a ruido y otros efectos adversos de la red

Planteamiento de la idea a defender

Se plantea que la implementación de la modulación OFDM en sistemas PON basados en enlaces IM/DD lo que permitirá una mejora considerable en la eficiencia espectral y la capacidad de transmisión de la red, siempre que se traten de manera efectiva los problemas relacionados con esta configuración.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Introducción

Como consecuencia del ancho de banda del espectro luminoso, las comunicaciones ópticas representan una parte fundamental de las técnicas de comunicación modernas (Mane, 2023). Teóricamente, las comunicaciones ópticas ofrecen un rendimiento mucho mayor que las comunicaciones por radiofrecuencia (RF). Por lo tanto, tiene múltiples aplicaciones y nos facilita la vida.

Entre los escenarios típicos de comunicación óptica se encuentran la comunicación por fibra óptica, la comunicación óptica en espacio libre (Free-Space Optical, FSO) (Raj et al., 2023) y la comunicación por luz visible (Visible Light Communication, VLC) (Eldeeb et al., 2022; Umair et al., 2023).

En estos contextos de comunicación, el esquema de modulación de intensidad y detección directa (IM/DD) se presenta como una opción más económica en comparación con los métodos coherentes. En IM/DD, la potencia o intensidad del haz luminoso de un láser o un LED es ajustada según los bits de datos, sin requerir información de fase. Debido a esta característica, la comunicación IM/DD no requiere oscilador local, lo que reduce considerablemente los gastos en hardware.

A consecuencia de los nuevos servicios multimedia de Internet, tales como las aplicaciones simétricas de alta definición en tiempo real, las videoconferencias y la radiodifusión, se espera en un futuro próximo que los usuarios finales tengan que garantizar un ancho de banda mucho mayor que el disponible en la actualidad. Para superar la limitación de ancho de banda que suponen las actuales soluciones de acceso basadas en cobre e híbridas, es necesario recurrir a la tecnología FTTH. El propósito de esta tecnología es suministrar fibra directamente al hogar.

Cuando la implementación de la tecnología de fibra hasta el hogar (Fiber To The Home, FTTH) está basada en una PON y no en una solución punto a punto, los costes de la red pueden reducirse eliminando la fuente de alimentación (coste operativo), mediante la instalación de elementos de red pasivos y compartiendo una parte significativa del coste de la red entre varios usuarios.

El objetivo de este capítulo es presentar primero la red óptica de manera general para familiarizarse con los términos y las tecnologías utilizadas. En la primera parte, describiremos las diferentes arquitecturas FTTx (Fibra a la X) y las dos arquitecturas FTTH (P2P y P2MP), comparándolas entre sí. Luego, se aborda la parte de la red óptica pasiva, sus elementos constitutivos como la ONU, el OLT, el splitter, su arquitectura y su principio de funcionamiento, así como las diferentes normas de las redes PON, a saber, las normas APON (ITU-T G.983.1), BPON (ITU-T G.983.3), EPON (IEEE 802.3ah-2004) y GPON (ITU-T G.984.3). (ITU-T, 2005, 2008)

Posteriormente, discutiremos las futuras generaciones de la red de acceso óptico NGPON, centrándonos en la integración de la multiplexación de longitud de onda WDM (Multiplexación por División de Longitud de Onda) en un PON. Finalmente, presentamos algunas limitaciones relacionadas con el despliegue de la red PON.

1.2. Las redes de telecomunicaciones ópticas

En la estructura jerárquica de las redes públicas de telecomunicaciones, se distingue diferentes porciones de la red que corresponden a distintos niveles de esta jerarquía, ilustrado en la Figura 1.1. Una primera distinción se establece entre la red de acceso y la red de transporte.

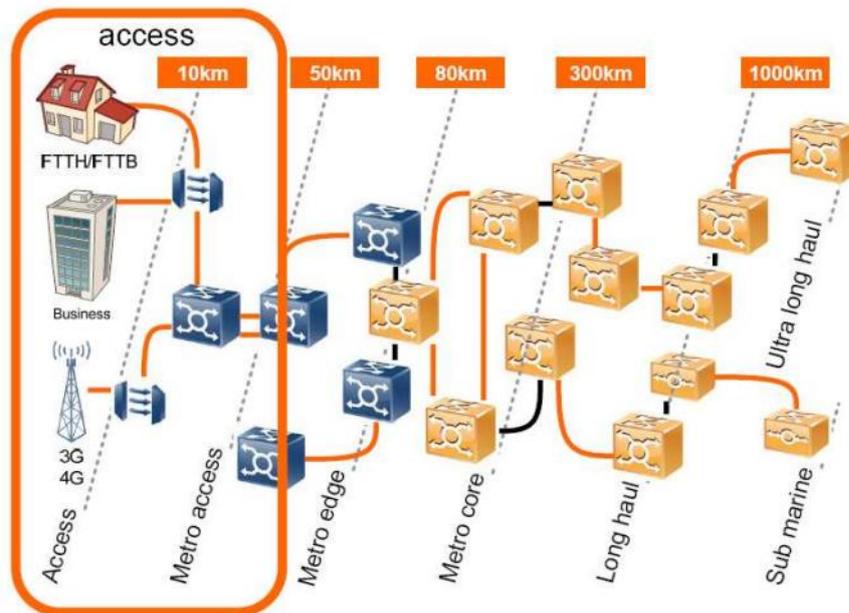


Figura 1. 1: Estructura jerárquica de redes de telecomunicaciones.

Fuente: (Saliou, 2010)

1.2.1. La red de transporte

Los conmutadores de telecomunicaciones conectados entre sí (particularmente por razones de protección del tráfico) forman la red de metropolitana (De Sousa & Drummond, 2023), que constituye el primer nivel de la red de transporte. Principalmente se puede distinguir a nivel nacional redes malladas formadas por varios subredes con una estructura en bucle (Huawei Technologies Co., Ltd., 2023).

Más allá de las redes nacionales, se encuentran redes que se extienden por varios miles de kilómetros a escala de los países más grandes o de continentes. Se habla entonces de redes continentales o (muy) de larga distancia o incluso de redes submarinas (Livadariu et al., 2024). La red de transporte permite realizar transmisiones de datos a velocidades que alcanzan cientos de Gbps hoy en día, en parte gracias al multiplexado en longitud de onda que existe desde hace unos veinte años (Alimonti et al., 2019).

1.2.2. La red de acceso

La red de acceso comprende todo lo que está situado entre la red metropolitana y el terminal del abonado. Incluye todos los medios utilizados para conectar los terminales de telecomunicaciones (fibra, móvil o inalámbrico). Su longitud varía de 2 a 50 km. La red

de acceso óptica suele estar constituida por una parte de fibra óptica (van der Linden, 2018) seguida de una parte en conductor metálico que va hasta el terminal del abonado.

Se definen varias configuraciones para conectar a los usuarios a la fibra óptica (véase la Figura 1.2), también conocidas como FTTx (Zeydan et al., 2021), donde la variable x declina el nivel más o menos profundo del despliegue de la fibra óptica hacia el abonado final: (a) FTTC (Fiber To The Curb) hasta un subdistribuidor de cobre a unas decenas de metros del abonado, (b) FTTB (Fiber To The Building) a pie del edificio, y (c) FTTH (Fiber To The Home) hasta el abonado (Shirvani M., 2024).

Para las arquitecturas FTTC y FTTB (Zeydan et al., 2021), la red de acceso está compuesta de fibras ópticas hasta cierto punto, a partir del cual la señal se distribuye clásicamente sobre redes tipo cable con pares de hilos de cobre o cable coaxial. Estas arquitecturas están esquematizadas en la Figura 1.3.

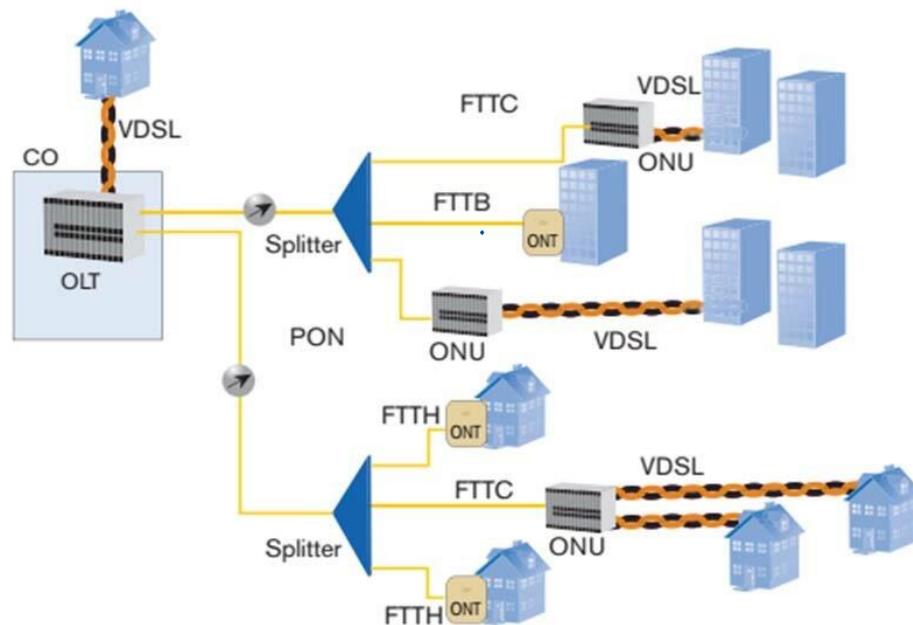


Figura 1. 2: Arquitectura de la red de acceso de fibra óptica.

Fuente: (Shirvani M., 2024)

Para la arquitectura FTTC, la fibra óptica solo conecta el subdistribuidor de red que sirve a determinadas zonas del usuario, mientras que los últimos metros reutilizan los cables de cobre existentes. Este subdistribuidor está entonces equipado con material de alta

capacidad, que permitirá transmitir una señal multiplexación de acceso de línea de abonado digital (Digital Subscriber Line Access Multiplexer, DSLAM) hasta el usuario.

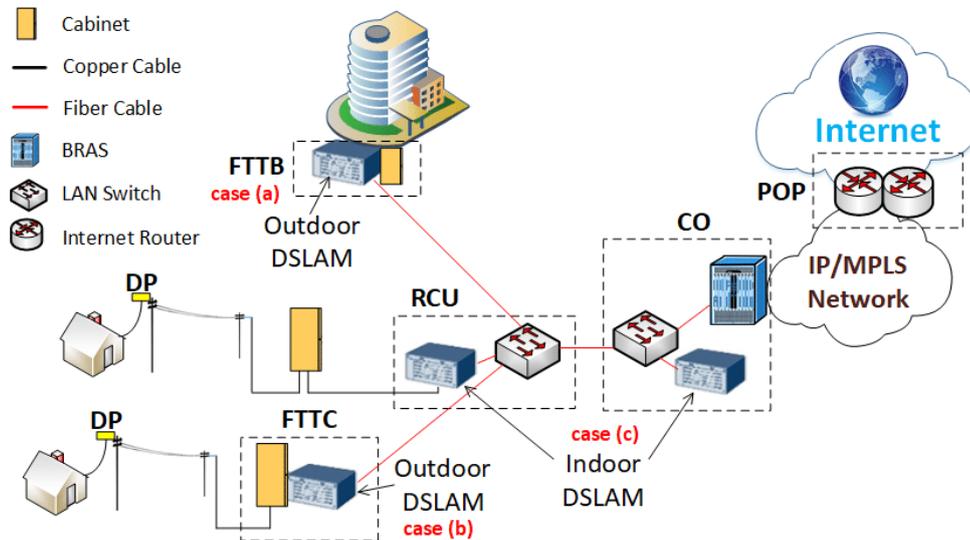


Figura 1. 3: Arquitectura de redes FTTC y FTTB

Fuente: (Zeydan et al., 2021)

En el caso de las arquitecturas FTTB y FTTH, la fibra óptica conecta el nodo de terminación óptica de la red de fibra (Optical Line Termination, OLT) a una terminal de red óptica (Optical Network Terminal, ONT), al pie del edificio (FTTB) o directamente a las tomas murales del abonado (FTTH). Las redes FTTH actualmente desplegadas se presentan bajo dos arquitecturas: la punto a punto (FTTH dedicado) y la punto a multipunto (FTTH compartido), también conocidas como PON.

La elección de la arquitectura depende del tipo de servicios que deben proporcionarse, del coste de la infraestructura, de la infraestructura actual y de los planes futuros de migración hacia nuevas tecnologías.

1.2.2.1. FTTH dedicado: La arquitectura Punto a Punto

FTTH punto a punto es la arquitectura más simple en términos de topología física, ya que consiste en tener un enlace físico de fibra óptica directamente entre la central (OLT) y el cliente (ONU: unidad de red óptica), tal como se muestra en la Figura 1.4. La función de concentración está asegurada por un nodo de conexión. Esta arquitectura permite un aislamiento absoluto entre las líneas de los diferentes abonados: ningún riesgo de

seguridad y garantiza una disponibilidad total de la línea (ningún reparto de ancho de banda).

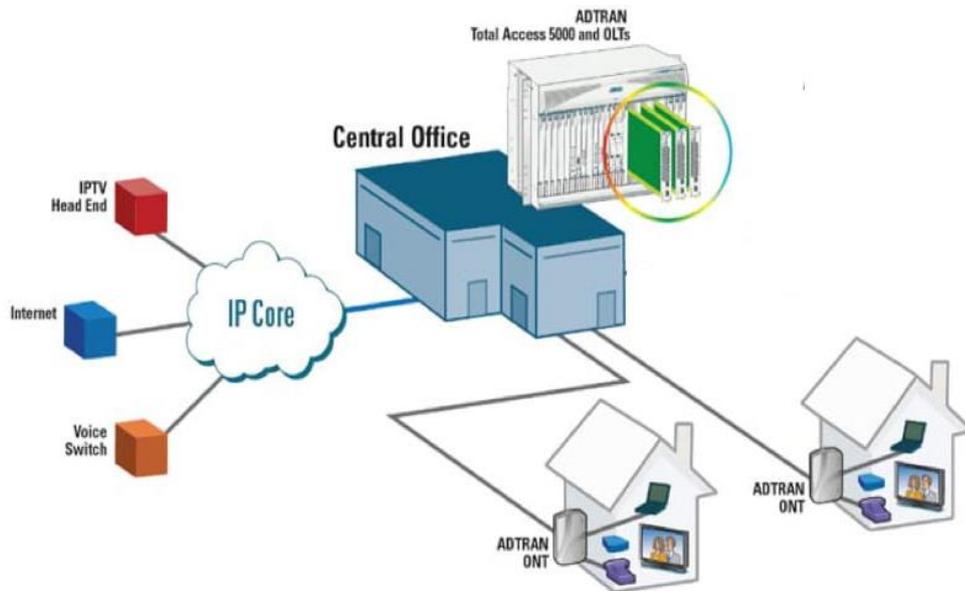


Figura 1. 4: Arquitectura de FTTH punto a punto.

Fuente: (Kelly, 2022)

Ventajas

- Solución universal adaptada a clientes residenciales y empresas.
- Presupuesto óptico óptimo: no hay componentes ópticos entre el OLT y el ONU.
- La seguridad de los datos está garantizada, ya que una o dos fibras están dedicadas a cada cliente.
- La gestión de la red es muy simplificada.
- Ancho de banda ilimitado.
- Más económico en áreas de abonados de baja densidad.
- Mayor flexibilidad de servicio.

Inconvenientes

- Gestión de la fibra a nivel de la central (gestión Tx/Rx).
- No hay compartición de fibra.

- Congestión en el interior de la central debido a la gran cantidad de transceptores.
- Sin compartición del OLT o del puerto óptico, se deben desplegar muchas fibras (no es muy económico).

1.2.2.2. FTTH compartido: La arquitectura punto multipunto pasivo

Una única fibra parte de la central y sirve a varias viviendas, las cuales están conectadas a esta fibra a nivel del equipo pasivo (splitter o multiplexor), ubicado cerca de la zona a servir, tal como se muestra en la Figura 1.5. Cada casa recibe toda la información enviada por el equipo central (OLT); el equipo receptor (ONU) de cada abonado asegura el filtrado, lo que representa una solución que permite compartir la infraestructura entre varios clientes. La arquitectura Punto a Multipunto (P2MP) está compuesta de elementos ópticos pasivos y se llama red óptica pasiva.

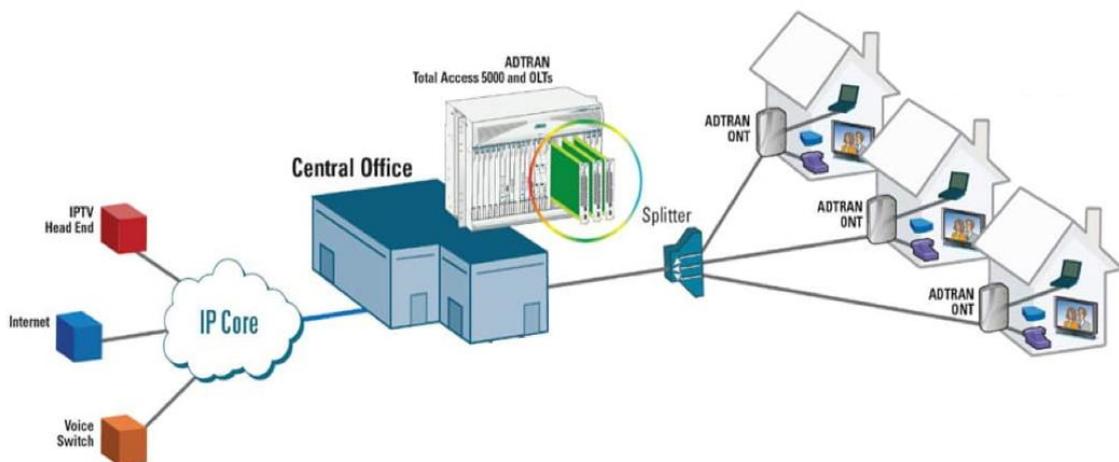


Figura 1. 5: Arquitectura de FTTH punto a multipunto pasivo.

Fuente: (Kelly, 2022)

Ventajas

- Ningún elemento electrónico activo en la red de acceso es una estructura pasiva.
- Reduce los gastos de capital y los costos de operación asociados.
- Los bajos costos de mantenimiento de estos componentes ópticos pasivos reducirán de manera significativa el costo de actualizaciones y gastos de funcionamiento.

- Permite ahorros en la cantidad de fibras a instalar, y por lo tanto en el dimensionamiento de las infraestructuras de acogida.
- Arquitectura favorable para la difusión.
- Flexibilidad en la asignación del ancho de banda.

Inconvenientes

- Ancho de banda compartido y limitado.
- Se requiere seguridad de datos.
- Zona de cobertura limitada: en función del número de divisiones (más divisiones = menos distancia).

1.2.2.3. Comparación entre las dos arquitecturas P2P y P2MP

El cuadro a continuación resume una comparación de las dos arquitecturas P2P y P2MP:

Tabla 1. 1: Comparación entre P2P y P2MP

Parámetro	Punto a Punto (P2P)	Punto a Multipunto (P2MP)
Gestión de cifrado	No necesaria	Requerida
Gestión del ancho de banda	Ancho de banda no compartido en la red de acceso.	Asignación dinámica del ancho de banda según las necesidades de los usuarios.
Zona de cobertura	Viviendas dispersas y para líneas especializadas.	Residenciales y para zonas de alta densidad.
Distancia (km)	15	20
Fibra	Una fibra por abonado de extremo a extremo.	1 fibra por abonado en la parte de distribución y conexión, 1 fibra por n abonados en la parte de transporte.
Energía	2 vatios/abonado disipada en el nodo de acceso (NA)	0,6 vatios/abonado disipada en el nodo de acceso (NA)

Ancho de banda garantizado	100 Mbps o 1 Gbps simétricos según la conexión.	Hasta 78 Mbps descendentes en una división de 32.
Ancho de banda máximo	100 Mbps o 1 Gbps simétricos según la conexión.	Hasta 2.5 Gbps descendentes y 1 Gbps ascendentes.

Fuente: (Hosseini, 2023; Soumplis et al., 2024; Welch et al., 2021)

En comparación una arquitectura punto a punto (P2P), la estructura punto a multipunto (P2MP) proporciona un desembolso inicial mas suave, permitiendo su adopción en contextos de expansión gradual de la red. No obstante, los gastos de funcionamiento y mantenimiento son generalmente mayores en P2MP debido a la complicación en la administración de los usuarios y la necesidad de realizar ajustes en los nodos de flexibilidad que contienen los acopladores ópticos.

Por otra parte, la arquitectura P2MP presenta notables beneficios en relación a la sostenibilidad y la eficiencia. Un OLT en un sistema P2PM tiene la capacidad de atender a miles de usuarios utilizando menos módulos en comparación con un conmutador en la configuración P2P. Esto resulta en un descenso del uso energético y una considerable disminución del espacio físico necesario en el centro de datos. En cambio, P2P ofrece una conexión directa y personalizada para cada cliente, lo que facilita la administración, aunque demanda inversiones iniciales más elevadas y un mayor uso de recursos para cada enlace activo.

Este análisis resalta de qué manera P2MP maneja el equilibrio entre los gastos iniciales, la efectividad en la operación y la capacidad de crecer, mientras que P2P se centra en la facilidad de uso y el rendimiento específico para cada usuario.

1.3. Redes Ópticas Pasivas (PON)

La red de acceso óptico experimenta actualmente una evolución muy rápida que acompaña al aumento de la demanda de ancho de banda. La descarga y otras aplicaciones de alta velocidad requieren un gran ancho de banda para recuperar la información lo más rápidamente posible. La demanda de uso de un gran ancho de banda ha provocado la

implementación de PONs, esta última entre las diferentes aplicaciones de redes de acceso del tipo FTTH.

Las redes ópticas pasivas están basadas en componentes pasivos, por ejemplo, splitters ópticos de potencia. En la actualidad, las PON permiten normalmente entre 32 y 64 usuarios, de manera que se minimizan los despliegues y se supone una mayor reducción de costes. Típicamente, una PON se caracteriza por una terminación de línea óptica (OLT) situada en la oficina central (Central Office, CO) y varias unidades de red óptica (Optical Network Units, ONUs).

Para las redes de acceso de nueva generación, los retos son varios: por un lado, ofrecer la capacidad necesaria para soportar un tráfico de datos cada vez mayor y, por otro, proponer un crecimiento modular de la capacidad a lo largo del tiempo. En la actualidad, las redes de acceso óptico instaladas sobre el terreno son principalmente del tipo Redes Ópticas Pasivas Gigabit (Gigabit Passive Optical Network, GPON), mediante el uso de la tecnología de multiplexación de división de tiempo (Time Division Multiplexing, TDM) y división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM)

1.3.1. Red Óptica Pasiva con Multiplexación por División en el Tiempo.

En la Figura 1.6 puede verse una implementación básica de una PON también denominada TDM-PON. En una TDM PON, la OLT realiza la multiplexación temporal de los paquetes y los transmite a las ONU. En el enlace downstream, la señal se divide entre todas las ONUs a través de un splitter. Una red de distribución común se encarga de conectar la OLT a un splitter (divisor/combinador) óptico pasivo, situado en el nodo remoto (Remote Node, RN), a través del cual se transmite la señal a cada ONU de la red.

Las ONU comparten el enlace upstream en el dominio del tiempo, utilizando la tecnología de Acceso Múltiple por División en el Tiempo (Time Division Multiple Access, TDMA), mientras que el enlace downstream se transmite a todas las ONU. Cada ONU, que tiene un identificador único, interpreta la dirección de destino de cada paquete y selecciona los que coinciden con su dirección.

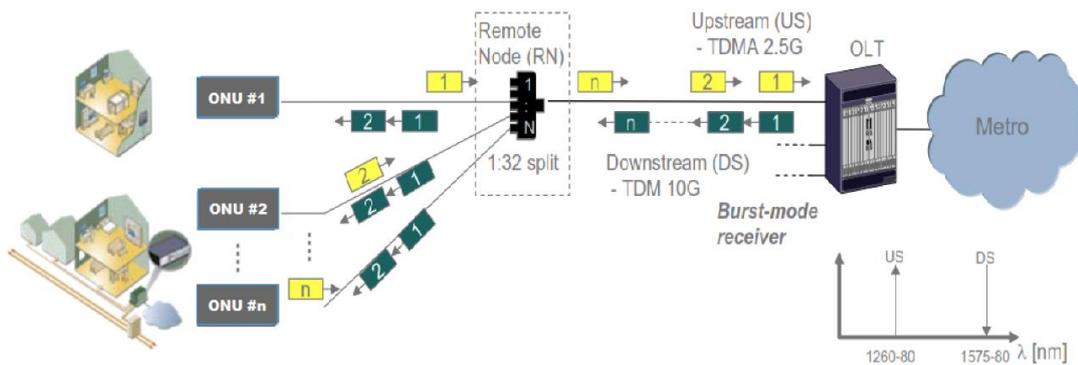


Figura 1. 6: Estructura del sistema de comunicación TDM-PON.

Fuente: (Memon et al., 2019)

En el enlace downstream, la sincronización entre las transmisiones de los distintos ONU es sencilla, ya que la realiza directamente la OLT, que es el único transmisor en esta dirección. Sin embargo, en el enlace upstream, a cada ONU se le asigna un intervalo de tiempo en el que los paquetes se transmiten a la OLT a través del splitter, que ahora actúa como un combinador, y donde los paquetes ópticos se multiplexan de forma pasiva.

Es posible que, mediante el uso de protocolos más complejos, se puede ajustar dinámicamente la duración del intervalo de tiempo en función de las necesidades de cada ONU, de modo que sea posible una asignación dinámica del ancho de banda (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA) asignado a cada usuario o dispositivo en función de la demanda real en un momento dado. DBA es un mecanismo utilizado en PONs para gestionar de manera eficiente el ancho de banda disponible.

En la actualidad se han estandarizado y comercializado distintas soluciones PON, como las redes ópticas pasivas Ethernet (Ethernet PON, EPON) y Gigabit (Gigabit PON, GPON). En la Tabla 1.2 se describen brevemente las principales características de los estándares GPON y EPON. Las dos soluciones utilizan equipos totalmente pasivos, como divisores/combinadores ópticos, con una cobertura de red de hasta 20 km y una topología punto a multipunto. Por otra parte, proporcionan un amplio ancho de banda a los usuarios finales, permitiendo también la difusión de vídeo (digital y/o analógico).

Tabla 1. 2: Especificaciones principales de los estándares GPON y EPON

	GPON	EPON
Estándar	ITU G.984	IEEE 802.3 ah
Velocidad Descendente (DS) (Gbps)	1.244 / 2.488	1.0
Velocidad Ascendente (US) (Gbps)	0.155 / 0.622 / 1.244 / 2.488	1.0
Longitud de onda DS/US (nm)	1490 / 1310	1490 / 1310
Relación de división típica	1:32 / 1:64	1:16 / 1:32
Rango del enlace óptico (km)	10 - 20	10 – 20
Velocidad máxima de transmisión de datos (Gbps)	2.5	1.0
MAC (entramado)	GEM	Ethernet

Fuente: (Hajduczenia et al., 2006; ITU-T, 2008; Konstadinidis et al., 2018)

La relación de división varía entre 32 y 64 usuarios. Lo que las hace diferentes es el protocolo MAC y el esquema de encapsulamiento de datos. Mientras que EPON transporta ráfagas de tramas Ethernet puras, GPON encapsula los datos utilizando el método de encapsulación genérica (Generic Encapsulation Method, GEM), también denominado método de encapsulación GPON.

1.3.2. Red Óptica Pasiva con Multiplexación por División de Longitud de Onda

Para mejorar la relación de divisiones, la cantidad de usuarios de la red y el ancho de banda ofrecido, en los últimos años se han introducido muchas soluciones que emplean la multiplexación por división de longitud de onda (denominada WDM PON). En la Figura 1.7 se puede observar un modelo sencillo de WDM PON, en el que cada ONU

tiene asignado un par diferente de longitudes de onda, una para transmitir en sentido ascendente y otra en sentido descendente, lo que permite ofrecer un gran ancho de banda a cada usuario.

Así, en las redes WDM PON, las ONUs pueden clasificarse en: descoloridas o coloreadas. Por ejemplo, en el primer caso, la portadora descendente es reutilizable o remodulada en las ONUs, de modo que en este elemento de red no se requiere ninguna fuente de luz. A estos componentes de red se les denomina Amplificadores Ópticos Semiconductores Reflectivos (Reflective Semiconductor Optical Amplifiers, RSOA). Otra forma de implementar una ONU incolora es mediante la instalación de un láser sintonizable (Tunable Laser, TL).

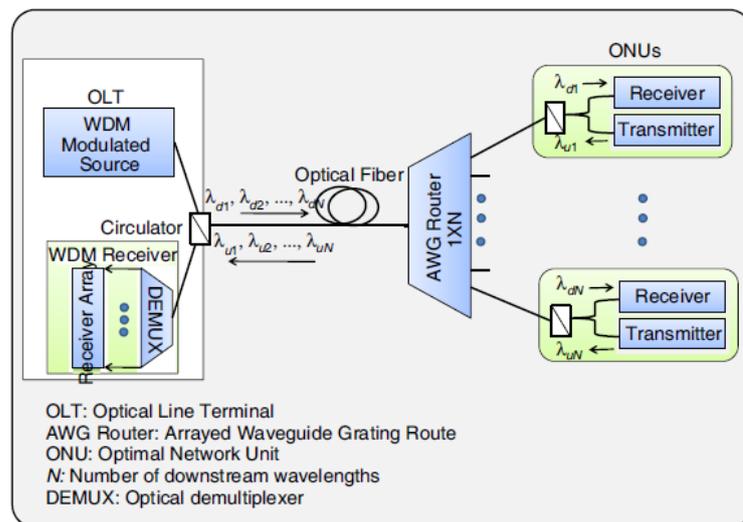


Figura 1. 7: Estructura del sistema de comunicación WDM-PON.

Fuente: (Shaddad et al., 2012)

Dicho componente puede sintonizarse dinámicamente a una longitud de onda específica en función de las necesidades de la ONU. Por el contrario, una ONU coloreada debe tener un transmisor/receptor (ver Figura 1.7) configurado a una longitud de onda determinada. Esta característica puede lograrse mediante una configuración de láser sintonizado fijo. Es muy conveniente utilizar una ONU incolora para minimizar los costes de las funciones de operación, administración y mantenimiento (OA&M) en una red WDM PON.

Por otra parte, estos transceptores también permiten la instalación a gran escala, dado el elevado número de componentes necesarios para una PON. De este modo se reducen los costes de producción. En una WDM PON, el splitter, habitualmente utilizado en TDM PON, es reemplazado por un filtro selectivo de longitud de onda mediante una rejilla de

guía de onda (Arrayed Waveguide Grating, AWG). Este componente, además de otras funciones más complejas como el encaminamiento de longitudes de onda, permite multiplexar o demultiplexar distintas longitudes de onda.

Pero WDM-PON pura puede generar ineficiencias en el uso de la capacidad disponible, ya que las ONUs no siempre transmiten o utilizan toda la capacidad del canal. Debido a ello, resulta fundamental una combinación de WDM y TDM en el sistema de acceso para incrementar la capacidad de los canales compartiéndolos entre varias ONUs.

La investigación de arquitecturas híbridas TDM/WDM se debe también a la necesidad de disponer de un sistema compatible con las arquitecturas TDM PON existentes. Por lo tanto, un sistema que integre TDM y WDM garantizará la flexibilidad en la asignación del ancho de banda y una transición sin problemas de las redes TDM PON ya existentes a las redes WDM PON de gran ancho de banda.

Por su parte, los sistemas PON que combinan las técnicas TDM y WDM son denominados PON TDM/WDM. Éstas son una solución intermedia entre los dos esquemas de multiplexación que se benefician de las ventajas de ambas técnicas y combinan las características propias de las redes TDM y WDM PON.

Las redes de este tipo requieren instalación simultánea de splitters y AWG. De esta manera es posible conseguir una relación de división mucho mayor, ya que la señal es dividida tanto por el divisor de potencia como por el AWG. En las Figuras 1.7 y 1.8 se presentan las dos formas de combinar los divisores y los AWG en una TDM/WDM PON. Por otra parte, este tipo de configuración de red permite que todas las ONU compartan el medio físico tanto en el dominio del tiempo como de la longitud de onda.

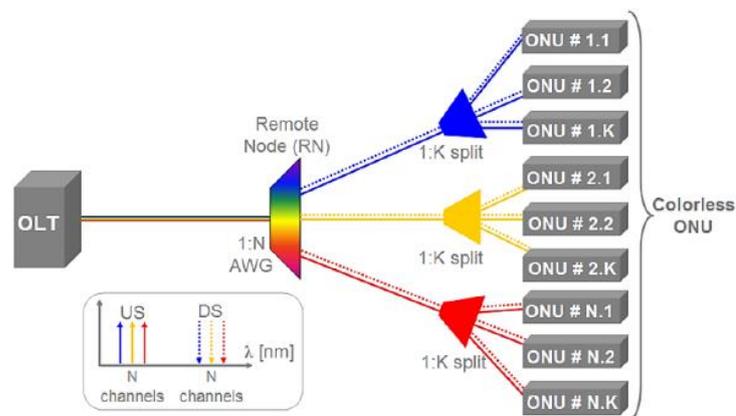


Figura 1. 8: Estructura del sistema de comunicación TDM/WDM PON.

Fuente: (Memon et al., 2019)

En comparación con las WDM PON, en las que cada ONU envía y recibe datos a través de un par de longitudes de onda distintas, en los sistemas TDM/WDM PON híbridos las ONU transmiten a diferentes longitudes de onda. Por este motivo, las ONU deben disponer de transceptores (TL o RSOA) capaces de cambiar la longitud de onda de acuerdo con la asignación realizada por la OLT.

Concretamente, las PON permiten disponer de una gran cantidad de ancho de banda, utilizando distintas longitudes de onda y compartiéndolas dinámicamente, en función de las necesidades de cada usuario, mediante la asignación de franjas horarias. Por otra parte, como el ancho de banda puede compartirse tanto en el dominio del tiempo como en el de la longitud de onda, en este caso la coordinación entre las distintas transmisiones es aún más complicada. Por eso es necesario implantar esquemas eficientes de asignación dinámica del ancho de banda y la longitud de onda (DBWA, Dynamic Bandwidth and Wavelength Allocation).

Sin embargo, la disminución de costos que supone una PON podría no ser suficiente para las futuras redes de telecomunicaciones. De hecho, a modo de ejemplo, la investigación muestra que la realización de este tipo de acceso de fibra, en todo el Reino Unido, costaría alrededor de 15.000 millones. Por este motivo, una tecnología alternativa, denominada red óptica pasiva de largo alcance (LR-PON), fue propuesta como arquitectura más rentable para la futura red de acceso de banda ancha.

1.4. Principios de la modulación de intensidad y detección directa en sistemas ópticos

La fibra óptica monomodo ofrece unas características de transmisión de datos muy eficaces sin necesidad de recurrir a técnicas sofisticadas. Por ello, los esquemas de modulación y demodulación se han mantenido muy simplificados, utilizando modulaciones de dos niveles. La modulación de intensidad que considera el formato de modulación de no retorno a cero de encendido-apagado (Non-Return-to-Zero On-Off Keying, NRZ-OOK) y la detección directa a través de un fotodiodo conforma el esquema de transmisión/recepción IM/DD considerado dominante en la actualidad.

1.4.1. Fundamentos de la modulación por intensidad y detección directa

La técnica de modulación por intensidad y detección directa, expuesta en "Sistemas ópticos de transmisión" de Josep Maria Fabrega, es un modelo que se utiliza muy a menudo en la comunicación óptica debido a su sencillez y eficacia. Este enfoque implica que la potencia de la luz portadora se modula en función de la señal eléctrica que transporta la información, utilizando esquemas como el NRZ-OOK (Non-Return-to-Zero On-Off Keying), en el que las intensidades de luz representan directamente los bits "1" (intensidad alta) y "0" (intensidad baja o inexistente). Para la recepción, la señal óptica modulada es capturada por un fotodiodo, que transforma la luz en una corriente eléctrica proporcional, empleando una detección cuadrática que se basa únicamente en la envoltura óptica, sin intentar recuperar la fase del campo eléctrico. Este método hace que el diseño del sistema sea mucho más sencillo, aprovechando las propiedades inherentes de la fibra óptica monomodo, que incluyen una alta capacidad y mínimas pérdidas, permitiendo así transmisiones efectivas sin requerir técnicas complicadas. No obstante, esta tecnología enfrenta retos como la dispersión cromática, pero sigue siendo dominante en las redes ópticas actuales debido a su practicidad y bajo costo (Fábrega, s/f). Además, la corriente generada es proporcional a la potencia de la señal óptica o a la amplitud del campo óptico (ver ecuación 1.1).

$$P_{out} = E_0(t)e^{j(\omega_0 t + \varphi)} \quad (1.1)$$

Donde:

P_{out} = Potencia óptica de salida.

Representa a la cantidad de energía de la fuente en función del tiempo

$E_0(t)$ = Envolvente del campo eléctrico

Es la variación de la amplitud del campo eléctrico en función del tiempo, representación de la información transmitida.

$e^{j(\omega_0 t + \varphi)}$ = Oscilación de la señal óptica

ω_0 = Frecuencia angular

t = tiempo en función de evolución temporal de la señal

φ = Fase inicial del campo eléctrico

$j =$ Unidad imaginaria para describir componentes en fase y cuadratura

En la modulación de intensidad, resulta fundamental la relación entre la corriente eléctrica y la potencia óptica emitida, que necesariamente debe ser lineal para atenuar la distorsión de la señal. Por otra parte, es necesario considerar la respuesta espectral del transmisor para garantizar que el ancho de banda óptico se adapte al sistema y se eviten pérdidas o atenuaciones importantes en la fibra óptica (Belete, 2018).

1.4.2. Principios de la detección directa en sistemas ópticos

Como en todos los sistemas de comunicaciones, consta de un transmisor, un receptor, canal (fibra óptica) y un repetidor, tal como se muestra en la Figura 1.9. Los primeros sistemas comerciales de transmisión por fibra óptica se desplegaron a finales de los años 70 y han evolucionado exponencialmente hasta nuestros días. Las razones del enorme éxito de la transmisión por fibra óptica tienen que ver con lo siguiente: gran ancho de banda, inmunidad a las interferencias electromagnéticas, atenuación reducida, bajo coste, dimensiones reducidas y mayor fiabilidad.

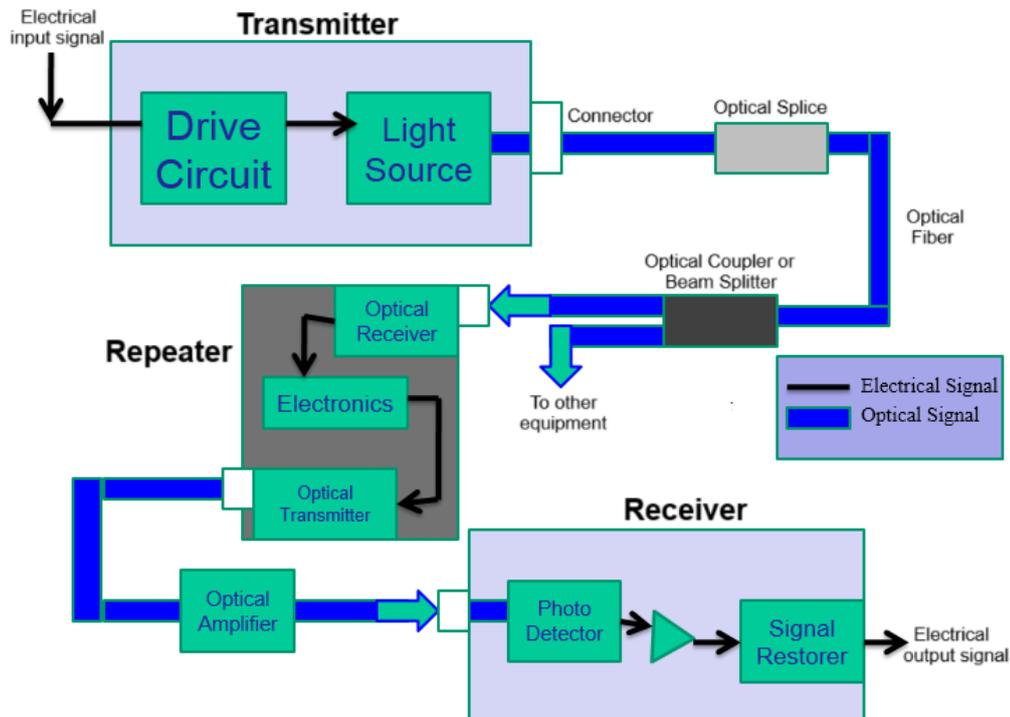


Figura 1. 9: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación por fibra óptica.

Fuente: (Miriamally, 2016)

En sistemas de comunicaciones ópticas, como, por ejemplo, VLC que utiliza la modulación de intensidad (IM) en el transmisor. La señal directa acciona el transmisor LED, que a su vez convierte la magnitud de la señal eléctrica de entrada en intensidad óptica o luminosa. El ojo humano no puede percibir las variaciones rápidas de intensidad luminosa y sólo responde a la intensidad luminosa media. En el receptor se utiliza la detección directa (DD), es decir, un fotodiodo (Photo-Diode, PD) que transforma la potencia óptica recibida en la amplitud de una señal eléctrica. La figura 1.10 muestra el concepto básico de modulación de intensidad y detección directa en el sistema de comunicaciones ópticas.



Figura 1. 10: Modulación de intensidad y detección directa en los sistemas ópticos

Fuente: (Miao et al., 2021)

La intensidad del LED, que se denomina $x(t)$, está modulada por la señal de entrada. Denotando la fotocorriente generada por el fotodiodo (PD) en el receptor por $y(t)$, el modelo equivalente de banda base de un enlace de comunicación IM/DD puede describirse según el diagrama de la Figura 1.11.

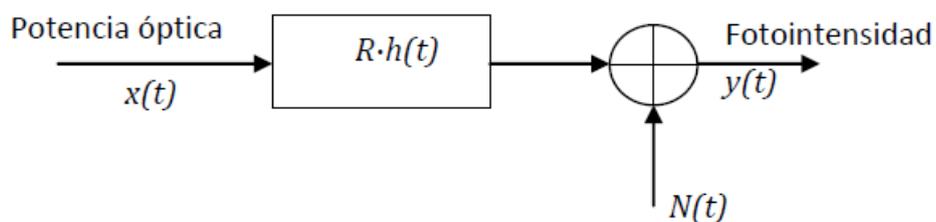


Figura 1. 11: Sistema de banda base equivalente para un enlace óptico con IM/DD.

Fuente: (Miao et al., 2021)

Este diagrama puede traducirse en la siguiente ecuación:

$$y(t) = Rx(t) * h(t) + N(t) \quad (1.2)$$

donde, el símbolo $*$ representa la convolución, R la sensibilidad del receptor, $h(t)$ la respuesta al impulso (IR) del canal y $N(t)$ el ruido gaussiano blanco aditivo.

1.4.3. Características y limitaciones de la modulación IM/DD

Como se ha explicado previamente, IM/DD es una técnica fundamental de los sistemas de comunicación óptica, conocida por su sencillez de aplicación y su rentabilidad. IM/DD tiene determinadas características o ventajas que lo hacen apropiado para diversas aplicaciones, pero también tiene limitaciones que afectan el rendimiento en determinadas condiciones en la transmisión y recepción. En la tabla 1.2 se muestra las características de IM/DD.

Tabla 1. 3: Características más relevantes de IM/DD.

Parámetro	Valor/Característica
Velocidad máxima de datos	Hasta 10 Gbps
Sensibilidad a la dispersión	Alta sensibilidad a la dispersión cromática y la dispersión de modo de polarización (PMD).
Rendimiento	Limitado por ruido térmico y no linealidades en moduladores.
Alcance típico	Generalmente inferior a 80 km sin amplificación.
Costo	Relativamente bajo debido a su simplicidad de hardware.
Complejidad del receptor	Baja, ya que no requiere técnicas complejas de procesamiento digital.

Fuente: (Miao et al., 2021)

1.5. Tecnología OFDM

En los tradicionales sistemas de datos en paralelo, el ancho de banda de la señal puede dividirse en un número de frecuencias de subcanal sin solapamiento entre dos subcanales. Para ello, se modula cada subcanal individualmente con un símbolo dividido y, a

continuación, se multiplexan en frecuencia sin embargo esto no elimina la susceptibilidad a la interferencia entre portadoras (ICI – Inter-Carrier Interference) (Sai et al., 2020). En la década de 1960, surgió una idea para eliminar la ICI incluso con subcanales solapados en la multiplexación por división de frecuencia (Frequency División Multiplexing, FDM). Para realizar esa idea fue necesario ortogonalizar matemáticamente los subcanales. Con el fin de lograr la ortogonalidad, se creó teóricamente la multiplexación por división ortogonal de frecuencias OFDM (Akintoye et al., 2020). En 1980 apareció la tecnología OFDM por primera vez en la transmisión de líneas telefónicas porque permitía reducir la complejidad del proceso y demostrar la capacidad de la transmisión mediante la transformada rápida de Fourier. Años más tarde, el uso de OFDM se expandió hasta convertirse en un componente decisivo en la implementación de sistemas de comunicaciones ópticas móviles y esquemas de radiodifusión (Singh & Chouksey, 2018). Desde esa fecha, OFDM ha evolucionado notablemente convirtiéndose en una parte fundamental de los estándares de telecomunicaciones.

1.6. Principios de OFDM

OFDM es un método de modulación de datos digitales para varias frecuencias portadoras. En comparación con los sistemas de transmisión de una sola portadora, OFDM soporta la alta velocidad de transmisión de datos. OFDM es una técnica que se ha utilizado en muchas aplicaciones de comunicaciones, como el acceso a Internet de banda ancha mediante redes ópticas pasivas (OFDM-PON) (Rajalakshmi & Shankar, 2020) y en comunicaciones móviles 4G. (Domathoti et al., 2022)

En la Figura 1.12, se muestra que cada subportadora se fija con una amplia banda de guarda cuando se modula por medio de los datos del usuario para evitar que interfiera con las subportadoras adyacentes conocido como sin solapamientos. Así, esta banda de guarda disminuirá la eficiencia espectral del sistema. En el receptor, las señales recibidas serán demoduladas con bancos de osciladores (Hussein Ali et al., 2019).

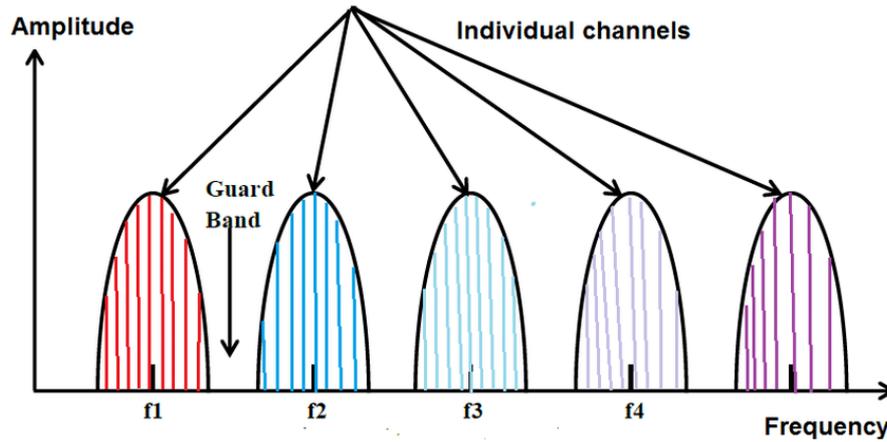


Figura 1. 12: Espectro de frecuencias para la técnica OFDM sin solapamientos.

Fuente: (Zenhom et al., 2024)

En OFDM, como caso especial de FDM, se utilizan muchas portadoras en un espectro determinado que están muy próximas entre sí, pero a una distancia exacta, de modo que siguen siendo ortogonales entre sí. El uso de la transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) y la FFT inversa (Inverse FFT, IFFT) ayuda a demodular y construir la señal original incluso si hay solapamiento entre las subportadoras, como se muestra en la Figura 1.13.

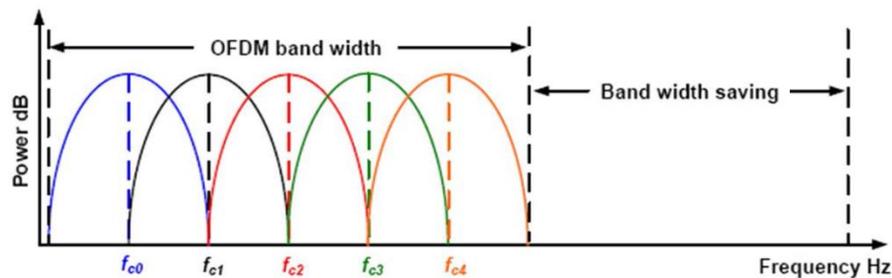


Figura 1. 13: Espectro de frecuencias para la técnica OFDM con solapamientos.

Fuente: (Zenhom et al., 2024)

OFDM es más robusta ante los efectos no deseados introducidos por el canal de comunicaciones y hace que sea preferible a los sistemas de frecuencia de portadora única. Además de ese impacto, controlar la ortogonalidad de los sistemas (Kebede et al., 2022) El uso del formato de modulación OFDM en los sistemas TWDM-GPON bidireccionales (Kumari et al., 2021) ha demostrado su capacidad para satisfacer la demanda futura de banda ancha.

1.7. Modulación y demodulación de OFDM

OFDM posee una eficiencia de datos espectrales muy alta. Está diseñado para mejorar la capacidad del sistema y la distancia de transmisión a través de fibra óptica y RF (Shariati, 2014). Se puede considerar que OFDM es un método de modulación con grandes beneficios potenciales para los sistemas inalámbricos ópticos en el futuro. Según (Dai et al., 2013; Sayed et al., 2022) OFDM es un método eficaz para resolver el problema de la interferencia entre símbolos (ISI) causada por la dispersión de los canales inalámbricos en la señalización de banda ancha a través de canales de radio multitrayecto. Con este método, los datos se transfieren de forma paralela a través de una cantidad de subcanales planos de banda estrecha (Zhang et al., 2018).

En los esquemas de receptor y transmisor OFDM es necesario modular y demodular las señales transmitidas. En la Figura 1.12 se presenta un diagrama de bloques de la técnica básica de modulación y demodulación OFDM para sistemas de comunicación por luz visible (Visible Light Communication, VLC) (Zenhom et al., 2024). Este diagrama contiene dos partes principales: el transmisor y el receptor.

En el lado del transmisor, el proceso parte de una técnica de mapeo mediante los métodos de modulación QAM o PSK. Luego de la conversión de serie a paralelo, el canal de alta velocidad de datos digitales en el transmisor se divide en N canales paralelos con algunos esquemas de modulación (QAM, PSK, etc.) utilizados para asignar cada uno de los canales a un canal de símbolos que pasan por IFFT (Dhingra et al., 2018). Así, para proteger las señales del solapamiento, se añade un periodo protector antes de la conversión de paralelo a serie (Ajewole et al., 2019).

En el lado del receptor, el proceso de transmisión comienza con la conversión de serie a paralelo para eliminar el prefijo cíclico. Antes de estimar el paso, se utiliza FFT para la señal. La demodulación de la señal mediante QAM o PSK es la última etapa del proceso de modulación OFDM.

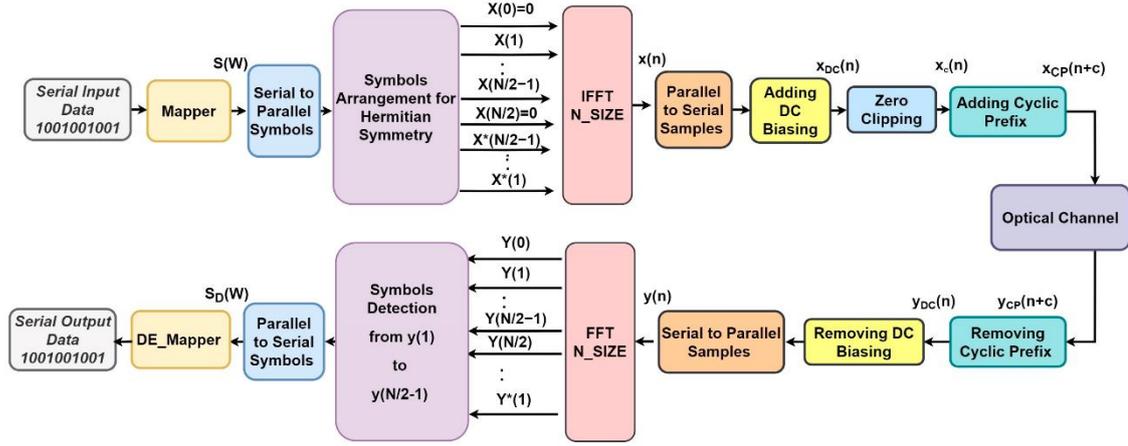


Figura 1. 14: Diagrama de bloques de OFDM basado en sistemas VLC.

Fuente: (Zenhom et al., 2024)

La señal base OFDM transmitida con N_{sc} subportadoras puede venir dada por:

$$x_n = \frac{1}{N_{sc}} \sum_{k=0}^{N_{sc}-1} X_k e^{\frac{j2\pi nk}{N_{sc}}}$$

donde x_n es el n -ésimo símbolo OFDM transmitido, X_k es la forma de onda de frecuencia para la k -ésima subportadora y N_{sc} es el número de subportadoras.

1.8. Consideraciones del uso de OFDM en redes ópticas

La modulación OFDM constituye un progreso notable en el ámbito de las redes ópticas, ya que enfrenta los inconvenientes de transmisión que restringen la eficacia de métodos convencionales como la modulación de intensidad y la detección directa. A continuación, se presentan las principales distinciones y ventajas que respaldan la implementación de OFDM:

1.8.1. Eficiencia Espectral

La técnica de modulación OFDM facilita la separación del ancho de banda en diversas subportadoras ortogonales, optimizando así la utilización del espectro. En contraste, los sistemas que dependen únicamente de IM/DD tienden a aprovechar el espectro de manera menos eficiente, ya que no se benefician de la multiplexación con varias portadoras.

- **Sistema sin OFDM:** Utiliza esquemas de modulación como NRZ (Non-Return-to-Zero), que requieren mayor ancho de banda por bit transmitido.
- **Sistema con OFDM:** Puede implementar esquemas avanzados como QAM en subportadoras, lo que permite transmitir más bits por Hz y mejorar la eficiencia espectral.

1.8.2. Tolerancia a la Dispersión Cromática

La dispersión de color es un problema significativo en las redes ópticas de gran distancia. En configuraciones sin modulaciones OFDM, este fenómeno deteriora la calidad de la señal al expandir los pulsos de luz. Por otro lado, al funcionar a tasas de símbolos reducidas en cada subportadora, OFDM es menos influido por la dispersión de color, lo que ayuda a preservar la calidad de la señal en conexiones más extensas.

1.8.3. Resistencia al Ruido y Efectos No Lineales

La habilidad de fragmentar la señal en varias subportadoras disminuye la vulnerabilidad al ruido y a la interferencia entre símbolos. Esto resulta en tasas de error de bits mejoradas bajo situaciones de un alto nivel de ruido óptico.

1.8.4. Flexibilidad, Adaptación y Comparativa entre Sistemas OFDM y sin OFDM

La modulación OFDM presenta beneficios clave en las redes ópticas al dividir el ancho de banda en varias subportadoras ortogonales, lo que facilita la transmisión simultánea de datos. Esta capacidad no solo maximiza la eficiencia del espectro, sino que también mejora la resiliencia frente a problemas como la pérdida de señal y la dispersión cromática. Además, OFDM permite la adaptación dinámica de parámetros de transmisión, como la modulación y la potencia de cada subportadora, lo cual es ideal para redes con condiciones cambiantes de canal o fluctuaciones en la carga.

En comparación, los sistemas que no utilizan OFDM y que se basan únicamente en esquemas como IM/DD dependen de una sola portadora, lo que les impide ajustar sus parámetros de manera dinámica. Esto los hace más vulnerables a la interferencia entre símbolos y la pérdida de señal, además de necesitar un mayor ancho de banda por bit transmitido. Como resultado, su capacidad para manejar condiciones adversas en el canal óptico y su eficiencia espectral se ven limitadas.

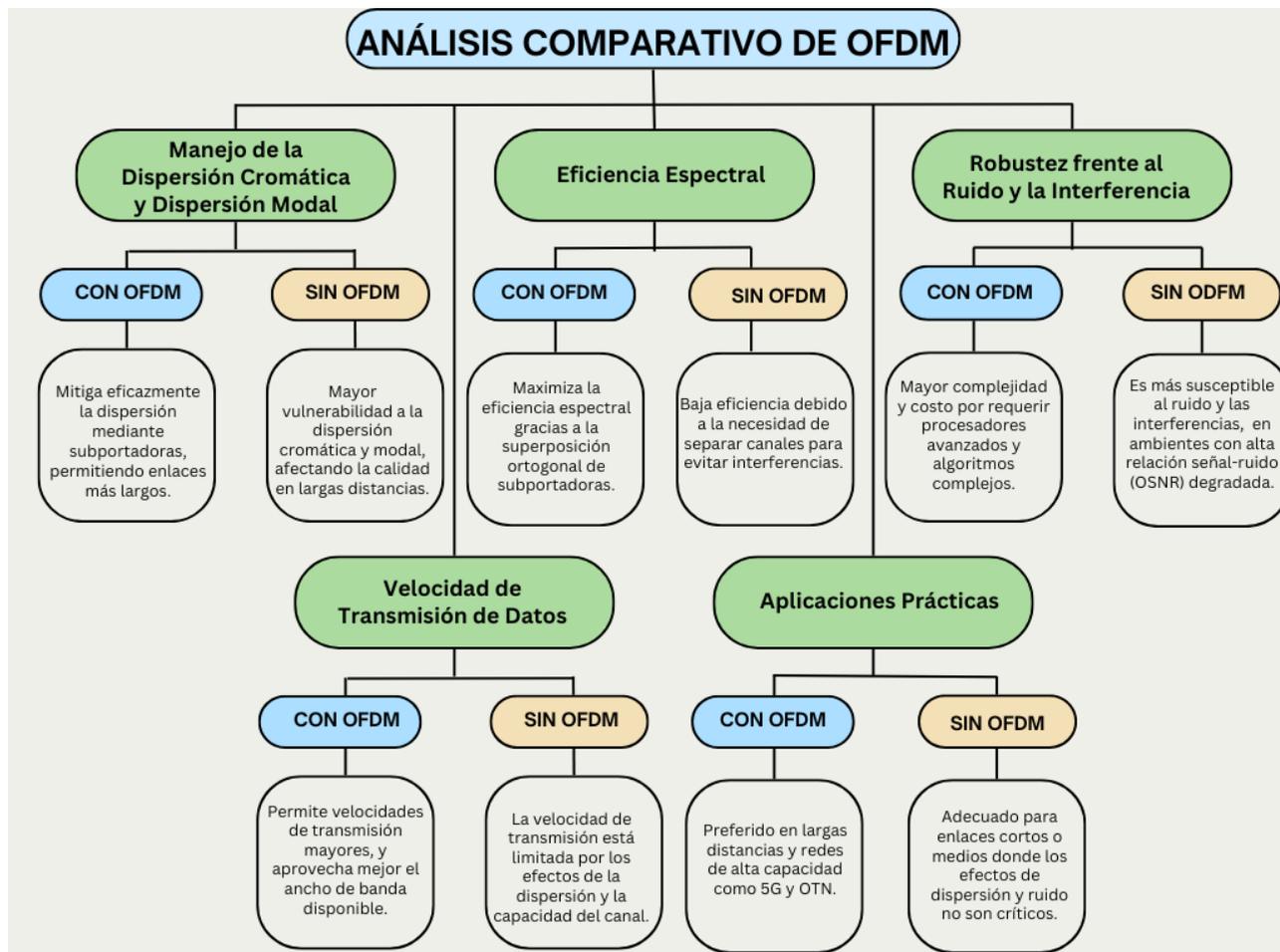


Figura 1. 15: Esquema resumen del análisis comparativo entre un sistema sin OFDM y con OFDM.

Fuente: (Ruiz & Joao, 2020).

1.9. Aplicación de Redes PON en el Fronthaul de 5G

Con el desarrollo de la tecnología 5G, las redes (PON) se han presentado como una solución novedosa y eficaz para abordar los retos del fronthaul 5G. Este fronthaul hace referencia a la conexión entre la unidad de banda base (Baseband Unit, BBU) y las cabezas de radio remoto (Remote Radio Heads, RRH) en las estaciones base, siendo un factor para el desempeño general de la red 5G.

- **Desafíos del Fronthaul en 5G**

La tecnología 5G establece requisitos exigentes en cuanto a capacidad de transmisión, tiempos de respuesta y coordinación. Estas demandas son consecuencia de la necesidad de facilitar aplicaciones con velocidades extremadamente altas, conexión masiva para dispositivos IoT, y servicios que requieren baja latencia, como vehículos automatizados o aplicaciones vitales en la industria.

- **Redes PON como Solución**

Las redes PON fueron creadas inicialmente para uso en viviendas, actualmente presentan una solución más efectiva y flexible para la implementación del fronthaul 5G. Su capacidad para permitir que varias conexiones utilicen una sola fibra óptica a través de splitter ópticos pasivos permite a las redes PON disminuir de manera considerable la cantidad de fibra necesaria, lo que reduce gastos y facilita la instalación física.

- **Uso de OFDM en Redes PON para el Fronthaul:**

La incorporación de OFDM en las redes PON facilita una gestión más eficiente de los recursos de frecuencia mediante la segmentación del ancho de banda accesible en subportadoras que son ortogonales entre sí. Esto permite una transferencia de datos eficiente como adaptable, actuando de forma dinámica a los cambios en la carga de la red, lo que permite una baja latencia y una alta capacidad. La multiplexación mediante OFDM también ayuda a minimizar problemas como la dispersión cromática y la interferencia de símbolos que son frecuentemente observados en enlaces ópticos extensos.

1.9.1 Beneficios Técnicos de PON en el Fronthaul 5G

Eficiencia en el Uso de Recursos de Fibra	Latencia Baja y Sincronización Precisa	Escalabilidad y Costos Reducidos	Soporte Multiservicio
<ul style="list-style-type: none">• Al compartir una única fibra entre múltiples RRH, las redes PON reducen la infraestructura requerida en comparación con sistemas punto a punto.	<ul style="list-style-type: none">• Pueden cumplir con las estrictas necesidades de latencia de 5G (por debajo de los 1 ms) gracias a la priorización del tráfico y la asignación dinámica de recursos.	<ul style="list-style-type: none">• Las PON facilitan la expansión de la red 5G en áreas densamente pobladas o rurales, manteniendo costos controlados.	<ul style="list-style-type: none">• Una red PON puede combinar fronthaul 5G con servicios residenciales o empresariales, maximizando el ROI para los operadores.

1.10. Tasa de bits con y sin OFDM en redes GPON

La velocidad de datos es un factor clave para evaluar la eficacia de un sistema. En las redes GPON se alcanzan velocidades de transferencia cercanas a los 10 Gbps. Sin embargo, la selección del método de modulación determina de manera directa en el rendimiento de la transmisión.

Tasa de bits en sistemas OFDM:

- Utilizando OFDM y la modulación 4-QAM, cada símbolo transmite 2 bits de datos. Al emplear 64 subportadoras, la velocidad de transmisión por símbolo aumenta de manera significativa, ya que las subportadoras operan de manera simultánea.
- Según los resultados de la simulación, los sistemas OFDM que están correctamente elaborados o diseñados mantienen altos índices de transferencia de datos (10 Gbps en el escenario simulado) y un BER reducido, incluso en conexiones de hasta 35 km donde las portadoras funcionan de manera simultánea.

Tasa de bits en sistemas sin OFDM:

- En una red que no utiliza OFDM, la comunicación se basa en una sola portadora óptica. Esto restringe la flexibilidad del sistema ante cambios en el canal de comunicación. Aunque puede alcanzar velocidades de hasta 10 Gbps, necesita más energía y una calidad de canal superior para obtener una tasa de error de bit aceptable.
- La dispersión cromática y el ruido afectan de manera directa a la velocidad de transmisión en sistemas que no implementan un sistema OFDM, particularmente en conexiones extensas, donde el servicio y calidad del canal baja considerablemente.

Comparación cuantitativa:

- **Con OFDM:** Este sistema es capaz de mantener velocidades de 10 Gbps con un BER bajo y alta eficiencia espectral.
- **Sin OFDM:** En este caso requiere mayor potencia y ajustes en los componentes para obtener los resultados requeridos en tasas similares, y la BER tiende a aumentar más rápidamente con la distancia.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Contexto de la investigación

El estudio se realizará en el sector de telecomunicaciones ópticas en CNT EP Guayaquil. Esta selección del sitio se justifica por su infraestructura y recursos adecuados para realizar la investigación, lo que incluye la disponibilidad de datos (aunque se generará la información para la propuesta) y profesionales con experiencia en el área de telecomunicaciones ópticas.



Figura 2. 1: Data Center de la CNT EP, Mega construcción del sector TIC

Fuente: (*Ministerio de Telecomunicaciones, 2025*)

2.2. Diseño y alcance de la investigación

La estructura del estudio será de tipo experimental, enfocándose en la creación y valoración de modelos de simulación para sistemas PON que utilizan conexiones IM/DD con modulación OFDM. La investigación tendrá un enfoque analítico y explicativo, con el objetivo de entender y clarificar los fenómenos asociados a la utilización de esta tecnología en redes de fibra óptica.

2.3. Tipo y métodos de investigación

El estudio se clasificará como cuantitativo, dado que se emplearán cifras para examinar el desempeño de los sistemas PON. Las técnicas de investigación se basarán en enfoques inductivos y deductivos, aplicando la observación y el estudio de datos para obtener conclusiones acerca del desempeño de los sistemas PON que usan modulación OFDM.

2.4. Población y muestra

Dado que el estudio se fundamenta en simulaciones, no se entiende una población de manera clásica. No se requerirá manejar una muestra en particular, puesto que la información empleada provendrá de los modelos de simulación.

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas cuantitativas que se emplearán para analizar los datos obtenidos en la simulación incluirán el análisis estadístico de los resultados de la simulación, como la medición de la eficiencia espectral, la capacidad de transmisión y la robustez frente a condiciones adversas de la red.

2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.

Para garantizar la fiabilidad y la precisión de los resultados obtenidos de la simulación, se realizarán evaluaciones y verificaciones de los modelos empleados. Esto incluirá la comparación de los resultados de la simulación con hallazgos teóricos previos de la simulación en distintas condiciones para verificar la consistencia de los resultados obtenidos. Del mismo modo se aplicarán métodos de análisis estadístico para evaluar la fiabilidad de los resultados y confirmar su validez dentro del área de estudio.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Plataforma de simulación OptiSystem

OptiSystem ha sido desarrollado para diseñar, probar y optimizar enlaces ópticos, así como de componentes y otros sistemas. Esta plataforma de simulación ha sido desarrollada por Optiwave y permite crear simulaciones de diversas tecnologías de comunicaciones ópticas, tales como, WDM, TDM, GPON, OFDM y otras. Además, este software integra una interfaz gráfica de usuario intuitiva, así como una gran librería de componentes ópticos y diversas herramientas para la evaluación del rendimiento.

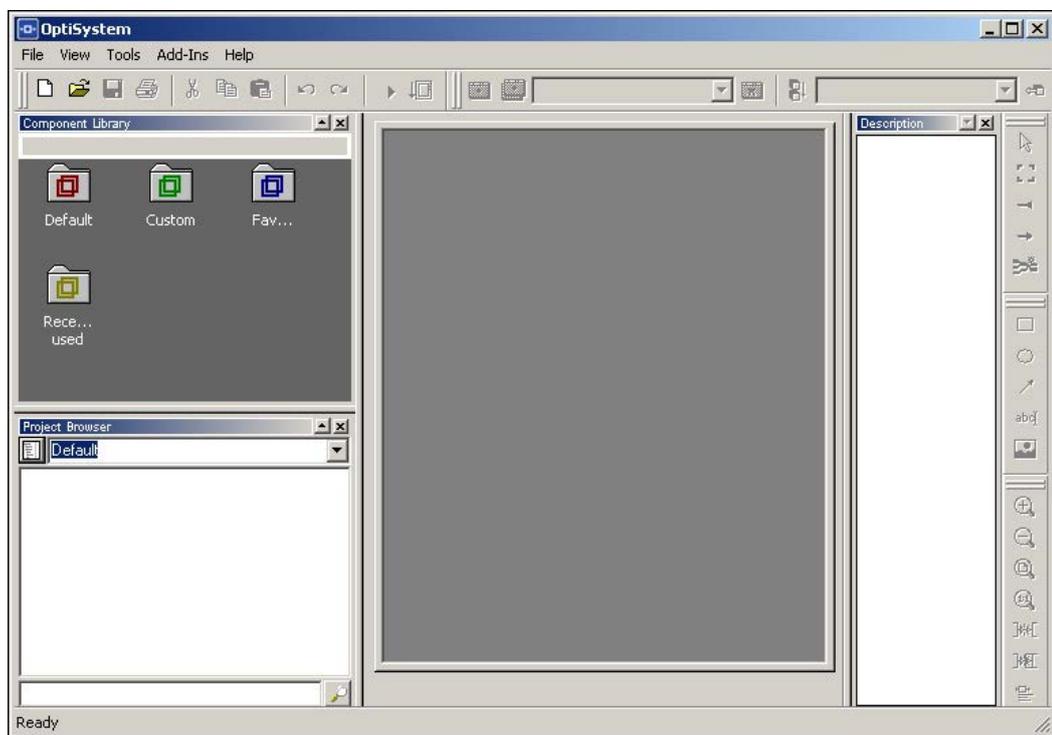


Figura 3. 1: Ventana principal de la interfaz de la plataforma de simulación OptiSystem.

Fuente: Elaboración propia

3.1.1. Funcionalidades de la plataforma de simulación OptiSystem

OptiSystem es una herramienta de simulación diseñada para la capacitación de ingenieros en el área de telecomunicaciones, así como para la investigación y el desarrollo en el ámbito de las comunicaciones ópticas. A continuación, se describen brevemente las funcionalidades más relevantes de OptiSystem:

1. **Component Library (Biblioteca de componentes):** esta incluye una librería completa de componentes ópticos activos y pasivos, tales como, transmisores LED o láser, moduladores, receptores o detectores ópticos, fibras (monomodo, multimodo, entre otras), amplificadores ópticos y filtros. Todos estos componentes se pueden configurar con parámetros predefinidos por cada usuario con el fin de ajustar su diseño a los requisitos específicos de cada caso. Por lo general, estos parámetros se pueden variar y pueden denominarse escenarios de simulación con la finalidad de evaluar el rendimiento.
2. **Características avanzadas de simulación:** adaptada a las necesidades de los usuarios, OptiSystem también permite modelar complejos sistemas de comunicaciones ópticas con alta fiabilidad. Se trata de una herramienta de simulación avanzada que puede modelar los efectos no lineales, interferencias de señal y ruido, lo que proporciona una evaluación realista de los resultados obtenidos del sistema.
3. **Análisis de la tasa de bits erróneos (BER):** Es un elemento que sirve para evaluar la calidad y eficacia de los sistemas de transmisión óptica.
4. **Multiplexación por división de longitud de onda (WDM):** Con este tipo de software puede simularse el funcionamiento de los sistemas WDM, por ejemplo, señales multiplexadas con distintos tipos de longitudes de onda, permitiendo de esta manera la evaluación del rendimiento de las redes ópticas.
5. **Integración:** Incorporación con otras herramientas como MATLAB y Python, OptiSystem permite la simulación conjunta y el procesamiento avanzado.

3.1.2. Ventajas de la plataforma OptiSystem

OptiSystem ofrece numerosas ventajas en el campo de las comunicaciones ópticas:

1. **Coste-eficiencia:** Reducción del costo de los prototipos físicos, lo que facilita el diseño, comprobación de redes y componentes ópticos de forma virtual.
2. **Optimización del tiempo:** Permite reducir los tiempos de desarrollo y optimización de los sistemas de comunicaciones ópticas.
3. **Mayor precisión:** Al representar de manera precisa los fenómenos ópticos, tales como la dispersión cromática, la dispersión de polarización y las no linealidades de la fibra, se obtienen resultados de simulación precisos y realistas.

4. Interfaz amigable: OptiSystem equipado de una interfaz gráfica permite un diseño y un proceso de simulación simplificados, por lo que está disponible para usuarios, novatos y profesionales experimentados.
5. Versatilidad: OptiSystem es capaz de diseñar y simular múltiples sistemas ópticos, desde un enlace punto a punto hasta otras arquitecturas de red avanzadas, convirtiéndose en una herramienta muy flexible para diversas aplicaciones.

3.1.3. Campos de aplicación del software OptiSystem

OptiSystem es un software utilizado en diversas aplicaciones, entre las que se incluyen:

1. En las comunicaciones por fibra óptica está implicado en el diseño y análisis de sistemas de transmisión por fibra óptica, que incluyen tecnología WDM, TDM y GPON.
2. Las redes ópticas pasivas (PON) es la parte de la optimización del rendimiento de arquitecturas PON, basadas en simulación y análisis, como GPON y EPON.
3. En las pruebas de componentes ópticos evalúa aspectos individuales, incluidos láseres, moduladores, fotodetectores y amplificadores ópticos, para comprender su impacto en el rendimiento general del sistema.
4. En la parte educativa OptiSystem es una herramienta ampliamente usada en universidades e institutos de investigación con fines formativos y para el desarrollo de innovadoras soluciones en el campo de las comunicaciones ópticas.

3.2. Modelado de un sistema GPON (Gigabit Passive Optical Network)

Aquí se describe la simulación de una red GPON a través de la plataforma OptiSystem 21.0. GPON está basada en componentes ópticos pasivos para la transmisión de datos con alta capacidad de transmisión de datos a largas distancias. En este caso, la simulación incorpora componentes de red y técnicas de transmisión/recepción IM/DD OFDM, así como las configuraciones de OLT (terminal de línea óptica) y ONT (terminal de red óptica). En la Tabla 3.1 se muestran los parámetros de simulación del sistema propuesto en OptiSystem.

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación del diseño propuesto.

Parámetro	Valor
Velocidad o tasa de bits (Gbps)	10
Longitud de SMF (km)	5 - 35
Potencia CW Laser (dBm)	10
Tipo de Modulación	QAM/OFDM
Número de Modulación (M)	4
Longitud de onda (nm)	1550

Fuente: Elaboración propia

3.2.1. Diseño de simulación de la OLT

Este esquema se ocupa de crear el modelo de la OLT, que representa el elemento central de una red GPON y tiene la función de enviar y recibir datos desde la red. En el diseño de la OLT que aparece en la Figura 3. 1, se incorpora un generador de secuencias pseudoaleatorias (PRBS), un láser de onda continua (CW Laser), y moduladores Mach-Zehnder para integrar diversos flujos de información.

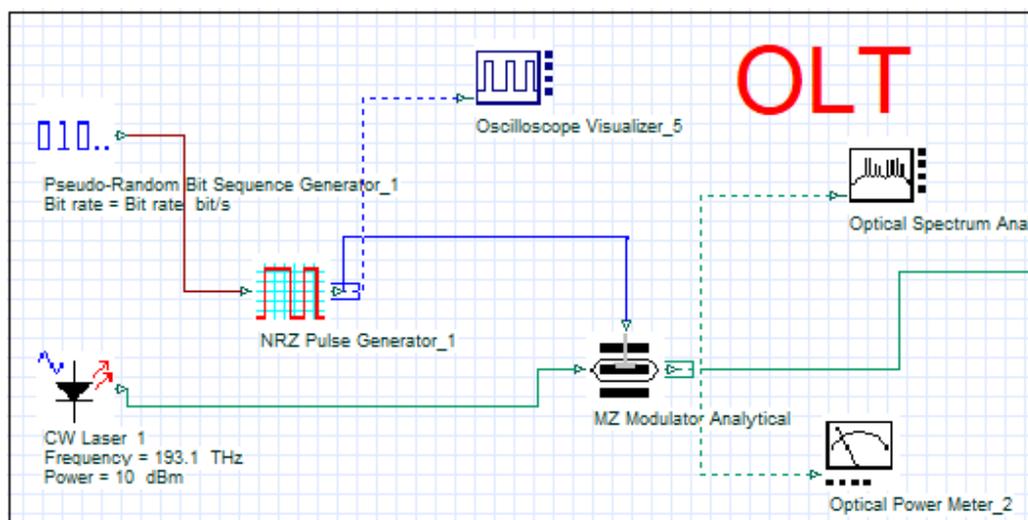


Figura 3. 2: Esquema de simulación para la OLT.

Fuente: Elaboración propia

El CW Laser es el dispositivo o componente responsable de generar continuamente señales ópticas a una frecuencia de 193.1 THz (aproximadamente 1550 nm de longitud de onda) con una salida de potencia de 10 dBm. Así, el láser de onda continua proporciona la portadora óptica para la transmisión de datos a través de la fibra óptica. Entre los parámetros de simulación se incluyen la longitud de onda del láser, la potencia, el formato de modulación (OFDM/QAM) y la tasa de bits de transmisión.

Mientras que, el generador de pulsos de no retorno a cero (NRZ) es un dispositivo que se encarga de convertir la secuencia de bits digitales en una señal eléctrica. Este tipo de modulación es muy utilizado en comunicaciones ópticas porque permite aprovechar el ancho de banda de forma sencilla y eficaz.

El modulador Mach-Zehnder (MZ Modulator) se encarga de la modulación de la señal óptica continua procedente del CW Laser. Para esta modulación se modifican tanto la fase como la amplitud del haz de luz, convirtiéndolo en una señal óptica apta para ser transmitida a través de la red de fibra óptica.

3.2.2. Diseño de simulación del transmisor por modulación de impulsos con formato QAM/OFDM

Para modelar la red GPON, el transmisor OFDM se utiliza para transmitir una señal a través de varias subportadoras con el objetivo de aumentar la eficiencia en términos de ancho de banda del sistema. La Figura 3.3 muestra el diseño del transmisor para un sistema OFDM en el que se incluyen los siguientes componentes:

- **OFDM Modulation:** Se trata del método que divide los datos en varias subportadoras ortogonales para alcanzar un alto rendimiento espectral. En este método de configuración se utiliza un máximo de 64 subportadoras, con una potencia media de símbolo OFDM de 0 dBm. También, la señal OFDM se divide en dos canales paralelos, uno para las componentes en fase (I) y otro para las componentes en cuadratura (Q), que son características de mucha importancia de la modulación IQ.
- **QAM Sequence Generator:** Es un generador de secuencias de QAM que envía la secuencia de bits al modulador OFDM. Para este caso se utiliza el formato de

modulación 4-QAM, donde cada símbolo lleva 2 bits, lo que permite una mayor eficiencia espectral con una complejidad relativamente baja.

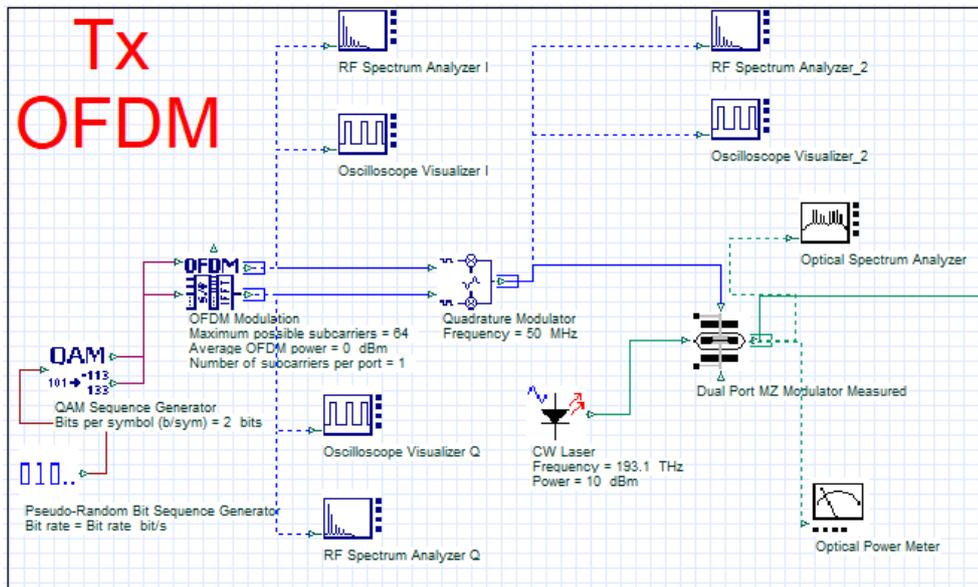


Figura 3. 3: Esquema de simulación para la transmisión usando la técnica OFDM.

Fuente: Elaboración propia

- Pseudo-Random Bit Sequence Generator: Se encarga de generar una secuencia de bits pseudoaleatoria que recrea un proceso sobre los datos del sistema. La velocidad de bits viene denotada como «bit/s», por lo que esta secuencia se utiliza como entrada para el generador de secuencias QAM.
- Quadrature Modulator: Este elemento se utiliza para mezclar señales en fase y en cuadratura del modulador OFDM, también nos permite crear un formato de modulación que funciona a una frecuencia de 50 MHz adecuado para la transmisión óptica.
- CW Laser: Se trata de un láser utilizado como portadora óptica del sistema. Para este tipo de evento se utilizó un láser CW (onda continua) con una potencia de 10 dBm y una frecuencia de 193.1 THz (correspondiente a una longitud de onda de la banda C, muy utilizada en comunicaciones ópticas), para que luego esta portadora óptica será tratada por el componente Dual Port Mach-Zehnder Modulator.

- **Dual Port Mach-Zehnder:** El modulador Mach-Zehnder se encarga de recibir las señales de cuadratura (IQ) eléctricas provenientes del modulador para luego modular sobre la portadora óptica generada por el láser. Con este tipo de modelado se convierte la señal eléctrica en óptica sin perder la información de fase y amplitud.
- **Monitoring and Analysis Components:** Para la visualización de la señal en distintas etapas se emplean varios visualizadores y analizadores:
 1. **RF Spectrum Analyzers:** este componente permite la visualización del espectro de la señal en las bandas I y Q antes de la modulación.
 2. **Oscilloscope Visualizers:** este componente permite la visualización de las señales en dominio del tiempo en los trayectos I y Q.
 3. **Optical Spectrum Analyzer:** este componente de medición se encarga de examinar el espectro de la señal óptica una vez modulada.
 4. **Optical Power Meter:** este componente se encarga de la medición de la potencia óptica total modulada, con lo que se garantiza que la salida esté dentro de los niveles recomendados.

Tabla 3. 2: Parámetros de simulación del transmisor óptico usando multiplexación OFDM.

Parámetro		Valor
Modulación OFDM	No. máximo de subportadoras	64
	Potencia promedio	0 dBm
Modulación QAM	Tipo de modulación	4-QAM
	Tasa de bits por símbolo	2 bits/símbolo
Modulador en Cuadratura (IQ)		
Frecuencia de portadora		50 MHz
Láser CW	Frecuencia óptica	193.1 THz

	Potencia óptica	10 dBm
--	-----------------	--------

Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Diseño de simulación del medio de transmisión óptica

El modelo de simulación mostrado en la Figura 3. 4 ilustra un medio de transmisión óptico que utiliza fibra monomodo (SMF), creado conforme al estándar ITU-T G. 652. Este estándar especifica las propiedades de la fibra monomodo que se aplica en las redes ópticas, abarcando una atenuación habitual de 0. 2 dB/km a 0. 4 dB/km para longitudes de onda de 1310 nm y 1550 nm, valores que son equivalentes a los empleados en el modelo de simulación. La fibra modelada tiene una longitud de 10 km, lo que resulta en una atenuación total de 2 dB debido a elementos como la dispersión cromática, la absorción y otras pérdidas inherentes del material. Para contrarrestar estas disminuciones y asegurar que la señal óptica alcance al receptor con la energía necesaria para una adecuada detección y decodificación, se incorpora un amplificador óptico con una ganancia de 10 dB. Esta configuración garantiza que se cumplan las condiciones requeridas para preservar la calidad de la transmisión, integrando componentes esenciales que definen tanto la propagación de la señal como la amplificación para mitigar las pérdidas.

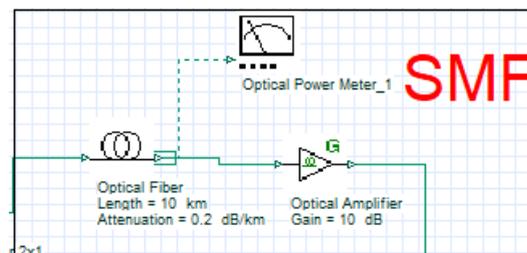


Figura 3. 4: Esquema de simulación para el medio de transmisión por fibra monomodo.

Fuente: Elaboración propia

El diseño incorpora además un dispositivo de amplificación óptica que tiene la función de contrarrestar la disminución de potencia de la fibra, lo cual ha causado una merma en la señal. Para lograr esto, dicho dispositivo eleva el nivel de la señal óptica en 10 dB, lo que ayuda a restaurar la fuerza de la señal afectada por la reducción de la fibra. Este aparato constituye un elemento crucial para redes ópticas que abarcan largas distancias,

particularmente en configuraciones que disponen de múltiples segmentos de fibra, a fin de mitigar la pérdida de calidad de la señal y asegurar un rendimiento óptimo.

3.2.4. Diseño de simulación del receptor óptico de detección directa para formatos QAM/OFDM

La Figura 3.5 muestra el esquema de recepción del sistema OFDM óptico, que permite la recuperación de datos transmitidos en redes de fibra óptica a alta velocidad. La señal óptica es detectada por el fotodiodo PIN, que se encarga de la conversión de la señal óptica a eléctrica. De este modo, la señal se demodula y puede seguir procesándose en el dominio eléctrico. El fotodetector PIN tiene una corriente residual de 10 nA , una responsividad de 1 A/W , una densidad de potencia térmica de $100 \times 10^{-23}\text{ W/Hz}$, y una frecuencia de 193.5 THz . Después de convertir la señal al dominio eléctrico, se envía a un demodulador de cuadratura con una frecuencia de 1 GHz . Mediante este demodulador, las señales son separadas en sus componentes en fase (I) y en cuadratura (Q), con lo que se puede construir o recuperar los datos originales modulados a partir de la señal OFDM.

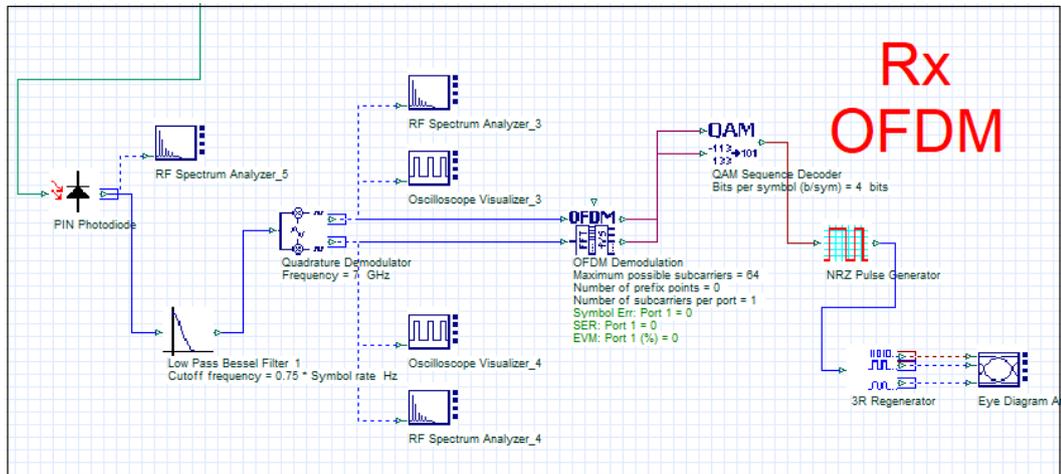


Figura 3. 5: Ventana principal de la interfaz de la plataforma de simulación OptiSystem.

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, la señal demodulada es filtrada a través del filtro de Bessel pasa bajos que elimina el ruido de alta frecuencia y los componentes no deseados de la señal, que pueden perturbar la calidad del procesamiento posterior. Este filtro, diseñado con una

frecuencia de corte de 0.75 veces la tasa de símbolos, se encarga de que la señal de banda base sea la única que pase a la siguiente etapa.

A continuación, se procesan los componentes I y Q filtrados mediante un demodulador OFDM, cuyo objetivo es invertir la multiplexación producida en la transmisión. La demodulación utiliza 64 subportadoras y genera datos de medición importantes, como la tasa de error de símbolo (SER) y la magnitud del vector de error (EVM), capaces de evaluar la calidad de la señal y la precisión del proceso de demodulación. Después, los datos se envían al decodificador QAM, que convierte la modulación 4-QAM (amplitud modulada en cuadratura) en un formato binario en el que cada símbolo representa 4 bits. Este proceso de decodificación es fundamental para lograr un alto rendimiento de los datos en sistemas que demandan un gran ancho de banda y bajas tasas de error. En la sección 3.3 se presentan los resultados obtenidos y la discusión de estos.

3.2.5. Diseño de simulación de la ONT

La Figura 3.6 muestra el diagrama esquemático de los componentes de la ONT en una PON basadas en IM/DD. Este diseño permite recibir las señales moduladas en QAM/OFDM (véase la Figura 3.5).

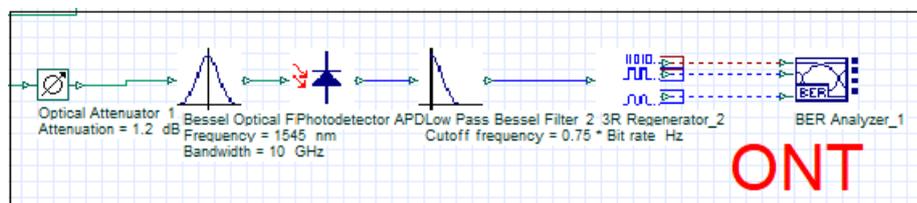


Figura 3. 6: Ventana principal de la interfaz de la plataforma de simulación OptiSystem.

Fuente: Elaboración propia

Las señales ópticas pasan por un atenuador óptico para reducir la potencia y así impedir la congestión del receptor. Posteriormente, se aplica un filtro óptico de Bessel eliminando las frecuencias no deseadas. Luego, el fotodetector APD convierte la señal óptica en eléctrica, gracias a la alta sensibilidad del APD, lo que resulta necesario para detectar señales débiles. A continuación, la señal es procesada por un filtro de Bessel pasa bajo para minimizar el ruido de alta frecuencia sin distorsionar la forma de la señal. Después, la señal se regenera mediante un regenerador 2R, que devuelve a la señal su intensidad y forma original, eliminando cualquier degradación producida durante la transmisión.

Finalmente, se utiliza el analizador de tasa de bits erróneos (BER), que evalúa la fiabilidad del sistema comparando el número de errores en los datos transmitidos con la señal recibida.

3.3. Discusión de los resultados obtenidos en el sistema IM/DD OFDM.

Los resultados obtenidos en la simulación del sistema OFDM se presentan y analizan en esta sección, para enlaces ópticos comprendidas entre 10 y 100 km.

En la Figura 3.7 se presenta el diagrama de constelación en el transmisor utilizando el formato de modulación 4-QAM.

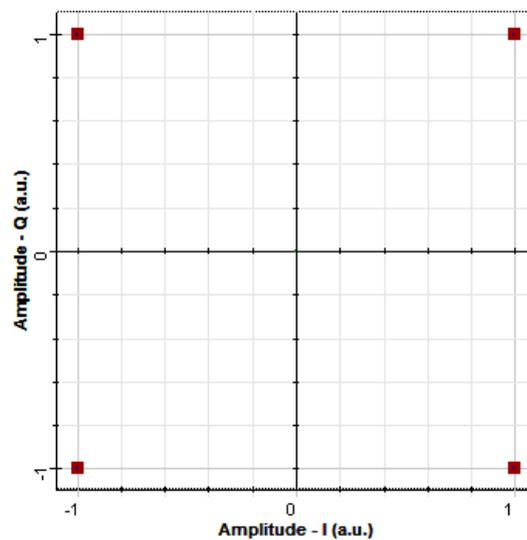


Figura 3. 7: Resultado obtenido del diagrama de constelaciones del formato de modulación 4-QAM para un enlace de 10 km.

Fuente: Elaboración propia

El diagrama representa la calidad de la modulación y la integridad de la señal en el transmisor, específicamente para sistemas que emplean enlaces PON basados en IM/DD y modulación OFDM. Se observa la disposición de los componentes I (en fase) y Q (en cuadratura) de la señal modulada, representados como cuatro símbolos posibles en un esquema de modulación 4-QAM. Estos símbolos están idealmente situados en las coordenadas $(\pm 1, \pm 1)$, distribuidos de forma equidistante respecto al origen. La representación refleja la variación controlada en amplitud y fase de la señal transmitida, que es característica de la modulación OFDM. Este análisis proporciona una referencia visual de la calidad y precisión de la modulación en el sistema.

La separación nítida y bien definida de los puntos en el diagrama de constelación demuestra que las interferencias, ruido o distorsión en el transmisor son mínimos. Por tanto, el transmisor OFDM es un sistema óptico de alta calidad con una distorsión o degradación mínimas de la señal. Por ejemplo, en una PON basada en IM/DD, las distorsiones de la señal se producen por la dispersión cromática, las no linealidades de la fibra o el ruido del proceso de detección.

Sin embargo, el transmisor OFDM suministra una señal limpia para su transmisión a través del enlace óptico. OFDM utiliza varias subportadoras para la transmisión de datos simultáneamente. Si la constelación del transmisor es nítida, significa que cada subportadora mantiene una alta eficiencia espectral sin solapamientos ni interferencias, condición necesaria para mantener altas velocidades de datos en una PON.

Para la evaluación del rendimiento de PON basada en IM/DD y OFDM, es necesario estudiar el diagrama de constelación (ver Figura 3.7) y la tasa de bits erróneos (BER). Además, la constelación bien definida se correlaciona con una BER mínima (pequeña), lo que significa una transmisión de información de calidad a través del enlace óptico sin errores significativos. Conforme la señal se propaga por la fibra, el diagrama de constelación puede sufrir distorsiones causadas por las deficiencias del canal, lo que afectará directamente a la BER y al rendimiento del sistema.

La figura 3.8 representa el espectro de RF de los componentes I/Q, con una potencia de RF de -7 dBm aproximadamente. Con este espectro se puede observar la distribución de la energía de la señal entre las distintas subportadoras del sistema OFDM. Este espectro de RF, combinado con el diagrama de constelación, confirman la eficiencia del sistema de transmisión y modulación de datos mediante la técnica OFDM.

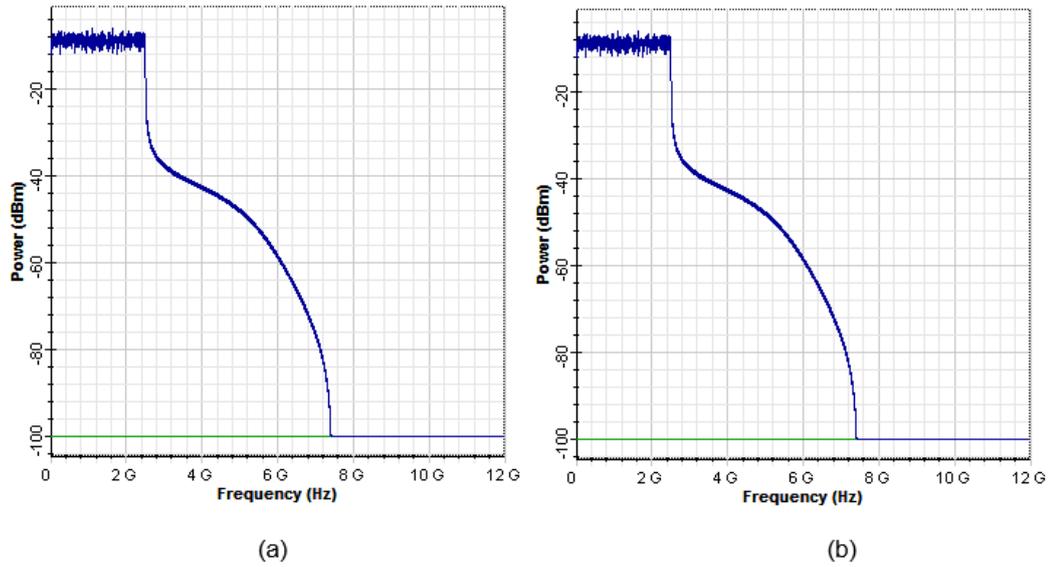


Figura 3. 8: Resultado de componentes (a) en fase y (b) cuadratura del espectro de frecuencias.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3.9 describe el espectro de la señal óptica modulada a través del modulador Mach-Zehnder (MZM) sobre una portadora óptica. Como resultado de esto se obtiene un espectro nítido con una frecuencia central de 193.5 THz, correspondiente a la frecuencia de la portadora óptica. Se observa un espectro nítido con transiciones definidas en los bordes, lo que demuestra una modulación eficaz con mínimas fugas espectrales.

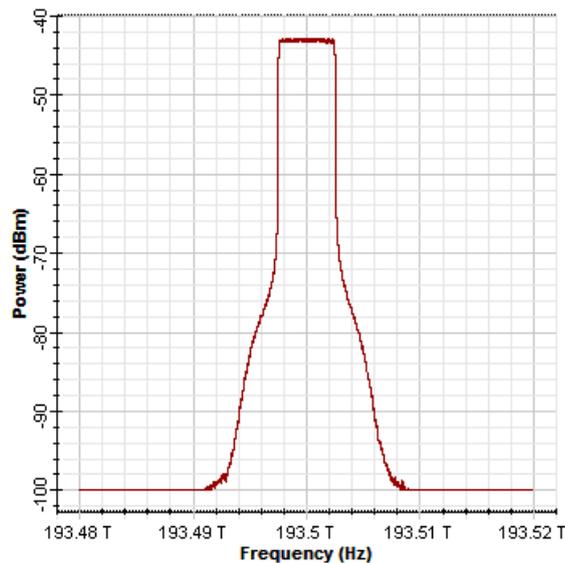


Figura 3. 9: Resultado del espectro óptico del transmisor OFDM tras la modulación de Mach-Zehnder.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.10 se ilustra el diagrama de constelación del sistema OFDM en el receptor para un enlace óptico de 50 km (fibra monomodo–SMF), empleándose un amplificador EDFA de 25.13 dB para intensificar la señal en el receptor.

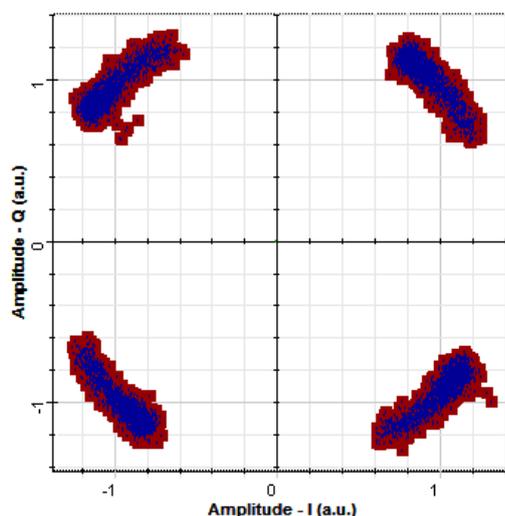


Figura 3. 10: Resultado obtenido del diagrama de constelaciones del formato de modulación 4-QAM en el transmisor OFDM para un enlace de 50 km.

Fuente: Elaboración propia

El transmisor es un componente muy importante en la evaluación del diagrama de constelación, ya que permite analizar y evaluar la calidad inicial de la señal modulada antes de enfrentar las reducciones causadas por la transmisión en la fibra óptica. En la Figura 3.10, perteneciente al enlace de 50 km, se observa una degradación considerable respecto a la constelación ideal. Este tipo de distribución en los puntos representa la influencia de factores como atenuación, dispersión cromática y ruido óptico, lo que permite la disminución de la OSNR a 24.4 dB. Este tipo de análisis justifica el enfoque en el elemento transmisor, debido a que permite observar cómo los efectos acumulativos de la transmisión influyen de manera progresiva la calidad de la señal. Para el caso del enlace de 100 km (Figura 3.11), la distorsión y dispersión aumentan aún más, reduciendo la OSNR a 23.58 dB. En consecuencia, el transmisor ofrece una base de comparación fundamental para poder evaluar la integridad de la señal a medida que se incrementa la distancia de transmisión.

Comparándolo con el diagrama de constelación de la Figura 3.6, se visualiza que la señal ha experimentado una disminución significativa, los puntos de la constelación están más

esparcidos y menos definidos, lo que significa que este tipo de relación señal/ruido ha empeorado. En este sentido, la relación señal/ruido óptico (OSNR) se ha reducido a 24.4 dB, como resultado de los efectos de la atenuación, la dispersión cromática y las diversas fuentes de ruido detectadas durante la transmisión.

En la Figura 3.11 se visualiza la constelación en el receptor después de una transmisión de 100 km de fibra monomodo (SMF). En relación con los resultados obtenidos a 50 km en la figura 3.10 4.5, se puede observar un incremento significativo de la distorsión de la señal. Además, se puede observar que se han esparcidos aún más los puntos de constelación previamente definidos, lo que da como resultado una mayor degradación de la calidad de la señal. Por otra parte se observa que la señal OSNR ha disminuido hasta 23.58 dB, lo que demuestra que el aumento de la distancia de transmisión y las perturbaciones acumuladas, como la dispersión cromática y diversas fuentes de ruido, contribuyen a degradar la integridad de la señal.

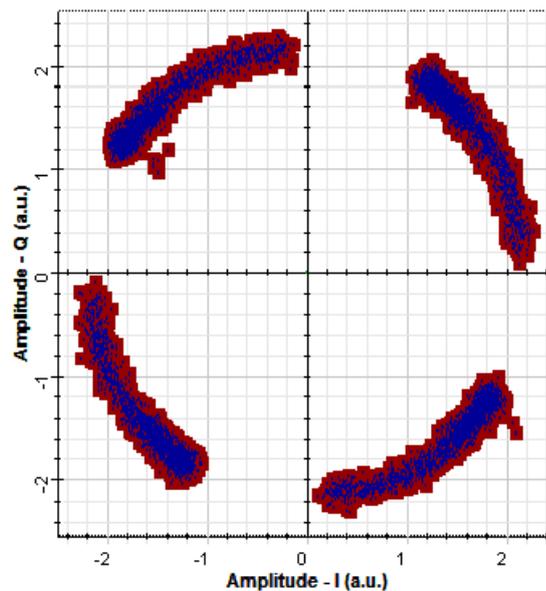


Figura 3. 11: Resultado obtenido del diagrama de constelaciones del formato de modulación 4-QAM en el transmisor OFDM para un enlace de 100 km.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3.12 representa la constelación del sistema OFDM para un enlace óptico de 200 km. El sistema experimenta problemas considerables para conservar los niveles de calidad de la señal a esta distancia. La OSNR se ha deteriorado hasta 22.03 dB, lo que

junto con el incremento de la distorsión refleja un deterioro significativo de la calidad de la señal.

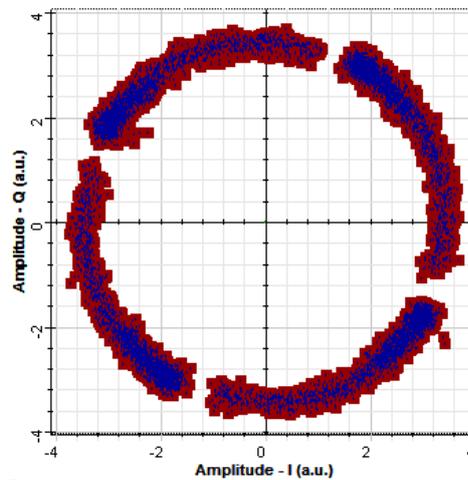


Figura 3. 12: Resultado obtenido del diagrama de constelaciones del formato de modulación 4-QAM en el transmisor OFDM para un enlace de 200 km.

Fuente: Elaboración propia

Las redes de fibra óptica pasivas (PON) están orientadas fundamentalmente para distancias cortas, comúnmente hasta 20 kilómetros, debido a limitaciones inherentes tales como la pérdida de señal y la dispersión del espectro. No obstante, en contextos de investigación o en aplicaciones específicas, se consideran conexiones de mayor longitud, como la de 200 kilómetros referida, para analizar cómo funciona el sistema y los obstáculos que presenta. A longitudes tan amplias, la señal sufre una pérdida notable a causa de la acumulación de pérdida y dispersión, resultando en una dispersión significativa en la constelación y una reducción de la relación señal/ruido óptico (OSNR). Estas circunstancias aumentan la tasa de errores de bits (BER), lo que complica la transmisión segura de información. Para aliviar estos problemas y hacer viable una conexión de 200 kilómetros, es crucial aplicar métodos avanzados como la amplificación óptica, la corrección de dispersión y la utilización de modulación coherente, que facilitan la expansión del alcance de las redes PON más allá de sus limitaciones habituales.

Se ha observado una gran dispersión en los puntos de la constelación, debido a que el ruido los aleja de su ubicación óptima. Este fenómeno revela la complejidad que enfrenta el sistema para identificar con exactitud los símbolos que se envían. El aumento de la dispersión de color y el ruido a una distancia de 200 kilómetros afecta de manera adversa la señal, lo que resulta en interferencias entre los símbolos y ruido de fase que perjudican

la calidad de la transmisión en general. Además, el sistema se está acercando a sus límites y, sin intervenciones compensatorias, la tasa de error de bits verá un aumento significativo, lo que dificultará el envío de datos confiables.

La Figura 3.13 muestra la constelación del sistema OFDM después de un enlace óptico de 300 km. La señal está muy distorsionada y prácticamente deteriorada. Como consecuencia de la dispersión cromática y del aumento de la atenuación a gran distancia, los puntos de la constelación están muy dispersos. La dispersión cromática de la señal provocó una pérdida drástica de la integridad de la señal, tal y como se aprecia en la distribución irregular y dispersa de los puntos del diagrama, porque el ruido y las no linealidades del sistema afectan la amplitud de las señales transmitidas, mientras que la fase se mantiene relativamente estable. Esto es típico en sistemas ópticos con modulación QAM, donde los errores tienden a distribirse de manera uniforme alrededor de los puntos ideales debido al ruido y la dispersión. Este fenómeno denota una grave interferencia entre símbolos y la degradación de la OSNR, que ha llegado a un nivel aceptable de 20.48 dB, pero crítico.

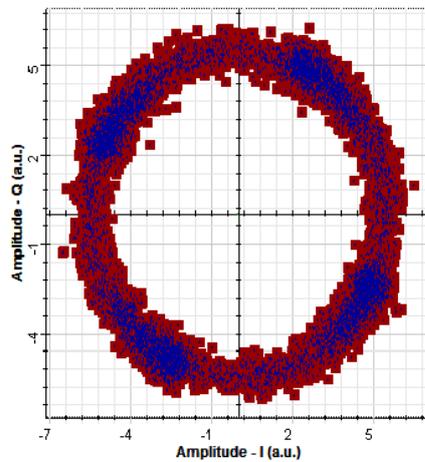


Figura 3. 13: Resultado obtenido del diagrama de constelaciones del formato de modulación 4-QAM en el transmisor OFDM para un enlace de 300 km.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, las Figuras 3.14 y 3.15 muestran los diagramas de ojo para el sistema propuesto para enlaces ópticos de 10 km y 300 km.

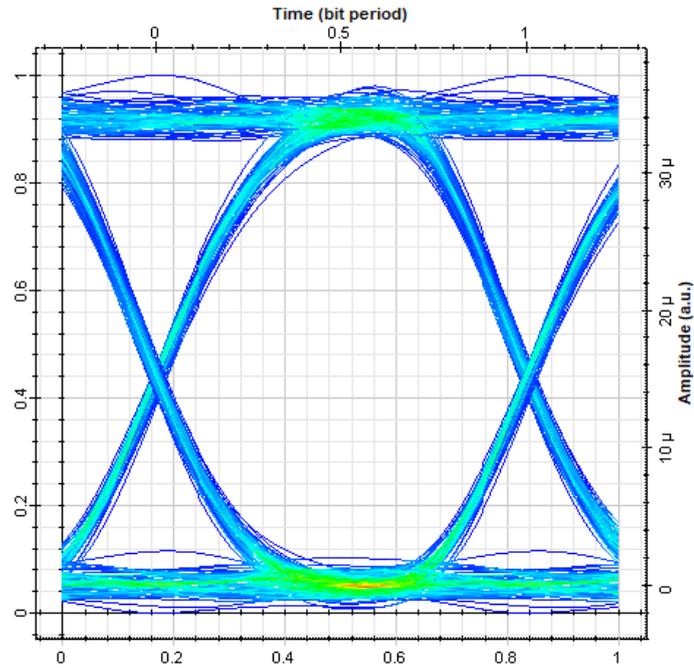


Figura 3. 14: Diagrama de ojo obtenido del analizador BER para un enlace de 10 km.

Fuente: Elaboración propia

El diagrama de ojo de la Figura 3.14 corresponde a un enlace de fibra óptica de 10 km, en la que una amplia apertura ocular indica que la señal mantiene una calidad excelente, con distorsión y ruido mínimos. Los impulsos de datos están bien separados, lo que indica que los símbolos (ISI mínimo) no se solapan significativamente de un periodo de bits al siguiente. Además, las variaciones de amplitud son pequeñas y la forma de onda de la señal se mantiene constante durante todo el periodo de bits. También, el bajo nivel de ruido y la clara separación entre “1” y “0” lógicos garantizan una detección fiable de la señal $BER = 6.50 \times 10^{-97}$ calculada para un enlace de 10 km.

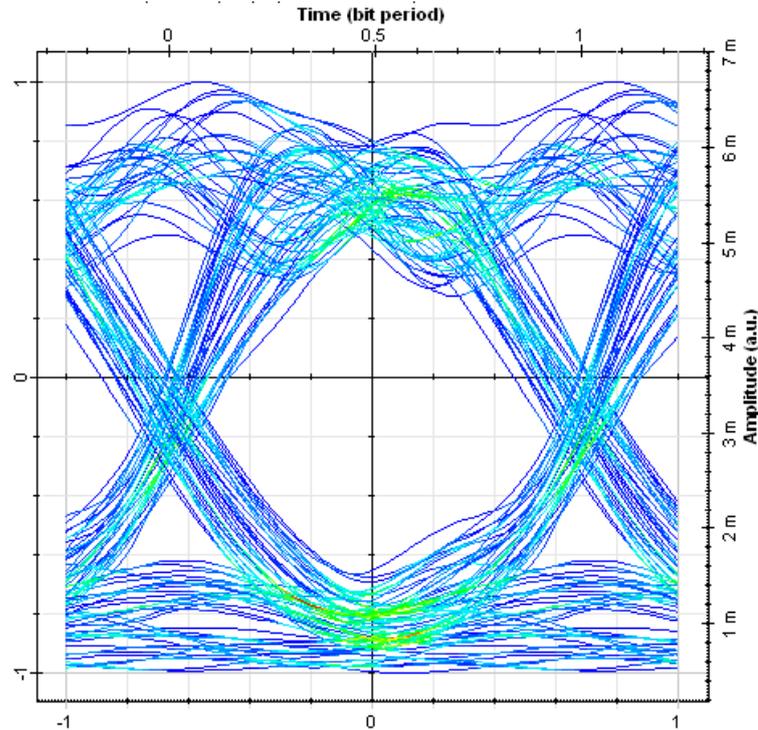


Figura 3. 15: Diagrama de ojo obtenido del analizador BER para un enlace de 300 km.

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, el otro diagrama de ojo (ver Figura 3.15) se refiere a un enlace de fibra óptica de 300 km. En este caso, se observa una notable degradación de la calidad de la señal en comparación con el enlace de 10 km. Se observa un solapamiento mayor de los símbolos, reduciendo la claridad de la abertura ocular. Esta situación es el resultado directo de la dispersión cromática y la atenuación acumuladas a lo largo de la fibra. Además, la apertura del diagrama de ojo es más estrecha, lo que limita el porcentaje de error, es decir, que es más vulnerable a los errores. Aunque para valores de larga distancia la BER aumenta, pero es aceptable, lo que indica que si el enlace es superior a 300 km estos valores se irán degradando aún más.

En la tabla 3.3 se muestran el resumen de los resultados obtenidos de las métricas, tales como, tasa de error de bits (BER) y factor Q (calidad) en el receptor.

Tabla 3. 3: Resumen de los datos obtenidos en la simulación del GPON basados en OFDM.

Distancia EO (km)	OSNR (dB)	BER	Q-Factor
10	26.45	6.50×10^{-97}	20.86
50	25.13	8.80×10^{-72}	17.88
100	23.58	1.52×10^{-50}	14.91
200	22.03	1.11×10^{-35}	12.41
300	20.48	2.80×10^{-25}	10.32

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.16 se representa gráficamente el comportamiento de la OSNR en función de la distancia de transmisión.

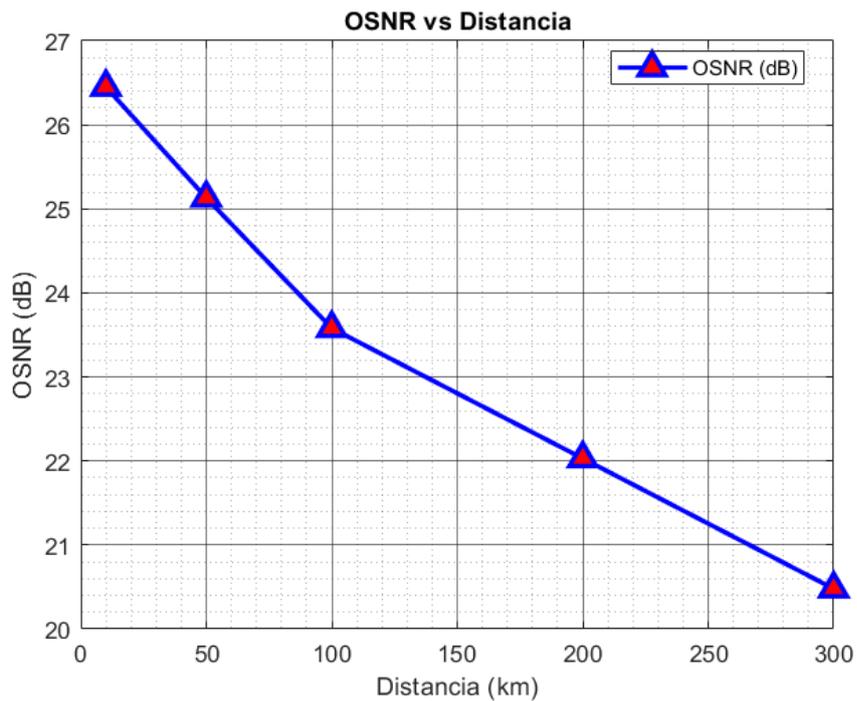


Figura 3. 16: Resumen de los datos obtenidos de la OSNR frente a la distancia del enlace óptico entre 10 y 300 km.

Fuente: Elaboración propia

Para un enlace de 10 km la OSNR es 26.45 dB (corta distancia) lo que significa que la calidad de la señal es excelente y las interferencias son mínimas. Pero a medida que la señal se propaga por la fibra, la OSNR disminuye hasta alcanzar los 20.48 dB a una

distancia de 300 km. Este comportamiento evidencia el impacto de las atenuaciones, la dispersión cromática y el ruido sobre la señal, que se agrava con la distancia.

La degradación de la OSNR responde a lo observado en los diagramas de constelación anteriores. Si la OSNR disminuye, la calidad de la señal transmitida se reduce, lo que causa una distorsión de la señal y aumenta la tasa de error de bits (BER). Para distancias mayores, como 300 km, la señal se vuelve tan débil que la detección precisa resulta casi imposible. Esta situación demuestra las limitaciones de GPON basados en IM/DD para enlaces a larga distancia, en los que ni siquiera los esquemas de modulación avanzados, como OFDM, pueden mitigar totalmente los efectos de la dispersión y el ruido.

Las Figuras 3.17 y 3.18 muestran el rendimiento de la BER frente a diferentes distancias del enlace óptico, y la BER frente a la OSNR, respectivamente.

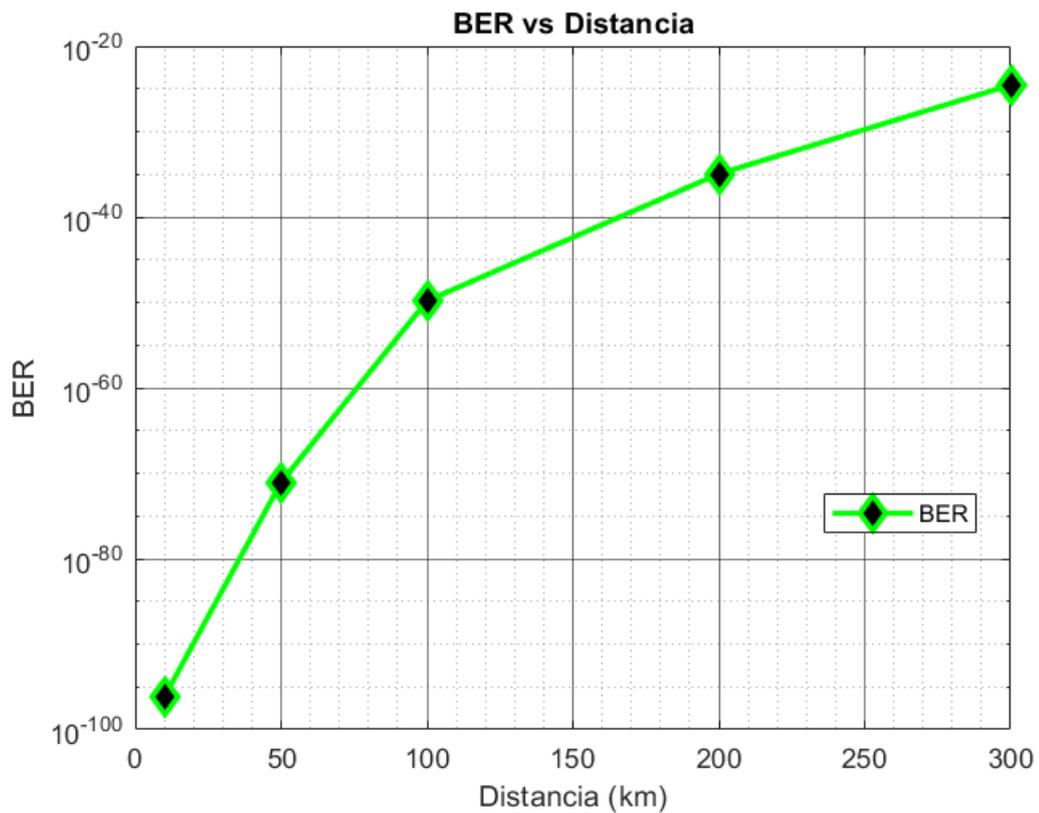


Figura 3. 17: Resumen de los datos obtenidos de la BER frente a la distancia del enlace óptico entre 10 y 300 km.

Fuente: Elaboración propia

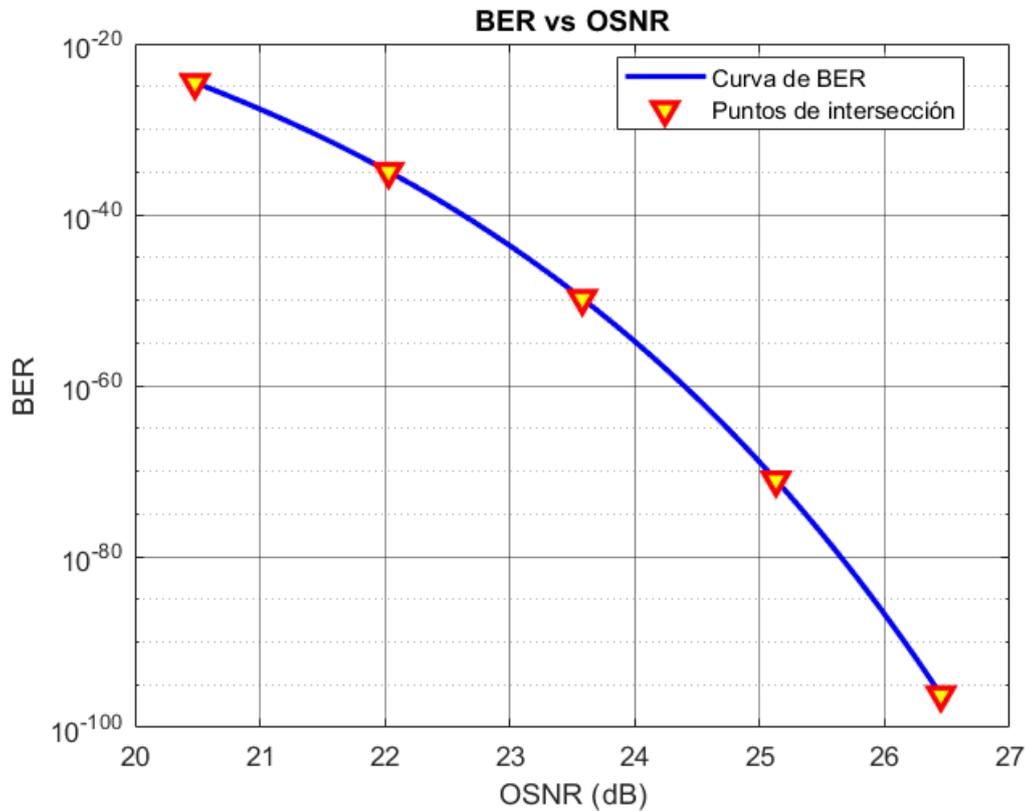


Figura 3. 18: Resumen de los datos obtenidos de la BER vs. OSNR para enlaces ópticos entre 10 y 300 km.

Fuente: Elaboración propia

La figura 3.18 muestra la relación entre la Tasa de Error de Bit (BER) y la Relación Señal-Ruido Óptica (OSNR) para enlaces ópticos de longitudes que varían entre 10 y 300 km. Cada línea en la gráfica se relaciona con una longitud particular en este intervalo. Las intersecciones de las líneas reflejan los niveles de OSNR necesarios para conseguir una BER específica en una longitud determinada. Por ilustrar, para obtener una BER de 10^{-9} en un trayecto de 100 km, es imprescindible contar con un OSNR cercano a 17 dB. Este estudio es esencial para entender de qué manera la calidad de la señal se ve influenciada por la longitud de la transmisión y para desarrollar Sistemas ópticos que satisfagan los estándares de rendimiento requeridos.

Con la finalidad de contrarrestar la pérdida de señal en enlaces ópticos a largas distancias, se suelen utilizar amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA) para intensificar la señal óptica. No obstante, el gráfico de la Figura 3.16 permite ver que no sería suficiente con incrementar la potencia del amplificador. Es decir, que la eficacia de los EDFA es

mayor cuando la pérdida de señal es moderada ya que conforme se incrementa la longitud de transmisión, el ruido y la dispersión se van acumulando, y la OSNR disminuye más allá de lo que la amplificación puede restituir. Entonces, la amplificación de una señal deficiente no hace sino incrementar el ruido, con lo que la mejora del rendimiento es mínima o nula.

3.3.1. Validación de Resultados

Para llevar a cabo la validación de los resultados, se realizó una comparación entre los gráficos obtenidos en el proyecto y aquellos presentados en un trabajo titulado: “Análisis del desempeño de transmisión de datos en banda base y RF sobre redes PON de largo alcance”(Torres, Guerrero, Imbett, Durán, & González, 2022) (Anexo 1).

En esta validación se centró en evaluar el comportamiento de los diagramas de ojo en función de la distancia en sistemas ópticos, considerando específicamente los efectos de la dispersión cromática como principal factor de degradación de la señal.

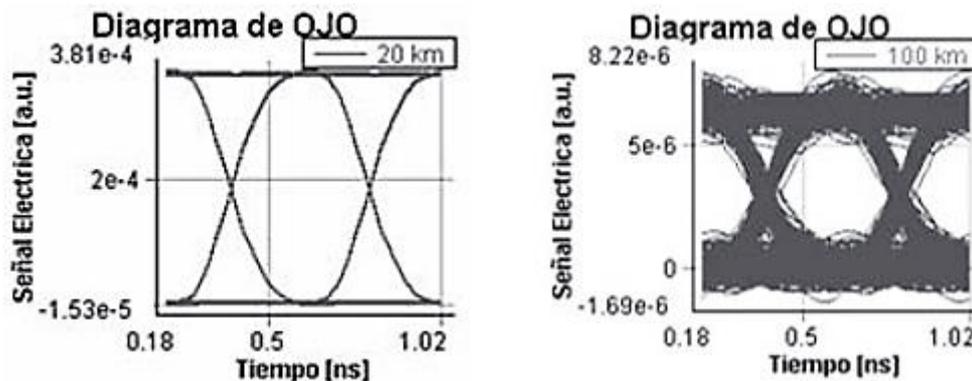


Figura 3. 19: Diagrama de ojo obtenido de la revista científica del análisis de transmisión

Fuente: (Torres, Guerrero, Imbett, Durán, & González, 2022).

- **Condiciones del sistema:**
 - Sistema evaluado con velocidad: 2.5 Gbps
 - SMF dispersión de 17,5 ps/nm
 - Distancias: 1km,100km

- **Resultados**

- A una distancia de 1km, el diagrama de ojo se observa totalmente abierto, lo que muestra una mínima degradación producida por la dispersión.
- A una distancia de 100km el diagrama de ojo está totalmente cerrado, evidenciando una degradación rigurosa que dificulta la recuperación de la señal.

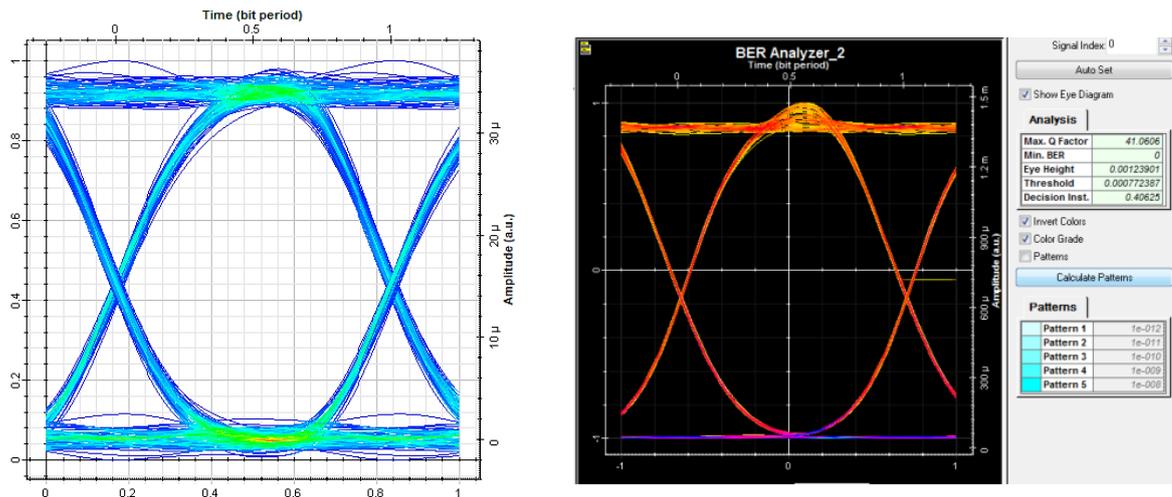


Figura 3. 20: Diagramas de ojo obtenido del analizador BER para un enlace de 10 km y 10.3km

Fuente: Elaboración propia

Al comparar los diagramas de ojo obtenidos para un enlace de 10 km en dos trabajos distintos, uno correspondiente a una investigación previa (*UPS - ST003103.pdf*, s/f), y otro del trabajo propuesto, se observan comparaciones significativas que destacan las mejoras logradas en el estudio actual.

Condiciones del sistema:

- Sistema propuesto
- Distancia: 10km

Apertura del Ojo:

Trabajo de referencia (10.3 km): El diagrama de ojo muestra una apertura bien definida, lo que indica que la señal puede ser recuperada con alta fidelidad y mínima distorsión.

Trabajo Propuesto (10 km): También presenta una apertura bien definida, sugiriendo una recuperación de señal igualmente eficiente.

Factor de Calidad (Q):

Trabajo de referencia: Se observa un factor de calidad excelente relación señal-ruido y una alta integridad de la señal.

Trabajo Propuesto: La claridad del diagrama de ojo sugiere una calidad de señal comparable y de alta integridad.

Desfase:

Trabajo de referencia: Se observa una sincronización precisa entre la señal transmitida y recibida.

Trabajo Propuesto: La nitidez del diagrama de ojo implica una sincronización adecuada.

Resultados y Conclusión:

Estos trabajos demuestran una alta calidad en la transmisión de señales ópticas para enlaces de aproximadamente 10 km, visualizadas por diagramas de ojo con aperturas muy bien definidas y con la cantidad mínima de errores de bit, que confirman la integridad de la señal. La claridad de su diagrama de ojo indica un desempeño similar o equivalente.

En conclusión, el análisis comparativo demuestra que el trabajo propuesto mantiene una calidad de señal y eficiencia de transmisión similares a las del trabajo de referencia, garantizando una comunicación óptica fiable en enlaces de este tipo de longitud.

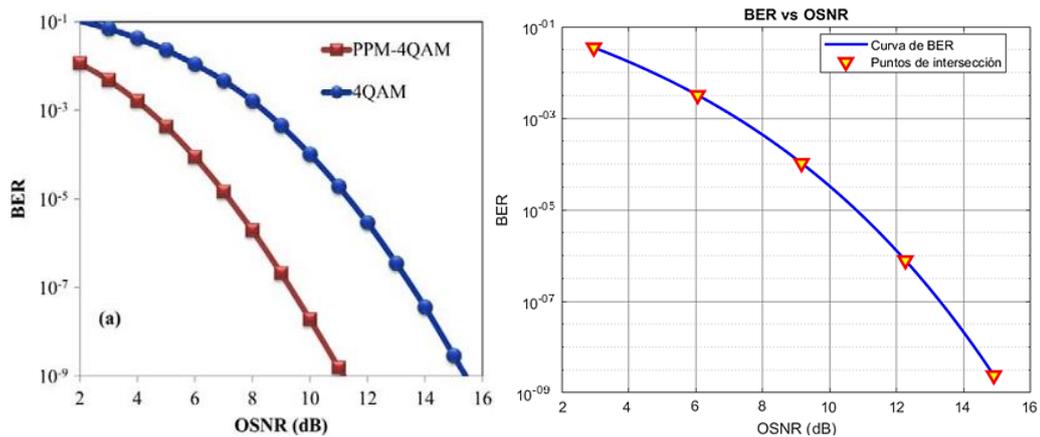


Figura 3. 21: Comparación del factor de dispersión por las curvas BER VS. OSNR dis.100km

Fuente: (“(PDF) Performance Analysis of All-Optical PPM-mQAM Communication Systems”, 2024)

La Figura 3.21, representa las curvas de BER (Tasa de Error de Bit) frente a OSNR (Relación Señal a Ruido Óptica) para un enlace de 100 km, se observan diferencias significativas entre el estudio "Performance Analysis of All-Optical PPM-mQAM Communication Systems" (2024) y el sistema propuesto en el trabajo de investigación actual.

Al examinar las dos gráficas que ilustran la conexión entre la Tasa de Error de Bit y la Relación Señal-Ruido Óptica en conexiones ópticas de 100 km, se pueden obtener conclusiones importantes respecto al funcionamiento de los sistemas analizados.

Estudio de 2024:

Este tipo de análisis analiza la integración de la modulación por posición de pulso con la modulación de amplitud en cuadratura multinivel en sistemas ópticos de comunicación. Los resultados obtenidos sugieren que para lograr una tasa de error de bit de 10^{-4} , las distancias de transmisión utilizando PPM-4QAM se incrementan aproximadamente en un 33% en comparación con aquellos que solo utilizan 4QAM. De este modo los niveles de relación señal a ruido necesarios para alcanzar una tasa de error de 1×10^{-4} se reducen en 4.7 dB y 7.5 dB para los sistemas PPM-4QAM y PPM-16QAM, en el mismo orden.

Sistema Propuesto:

En el modelo planteado, se puede observar que un enlace de 100 kilómetros requiere una OSNR cercana a 17 dB para alcanzar una BER de 10^{-9} . Este análisis es esencial para

comprender de qué manera la calidad de la señal se ve alterada o afectada por la distancia de transmisión y para diseñar sistemas ópticos que satisfagan las exigencias de rendimiento. Para reducir la atenuación de la señal en conexiones ópticas de larga distancia, es necesario utilizar frecuentemente amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA) para reforzar la señal óptica. Asimismo, el gráfico demuestra que aumentar la potencia del amplificador no sería adecuado, ya que los EDFA funcionan mejor cuando la pérdida de señal es moderada. A medida que se expande la longitud de transmisión, el ruido y la dispersión se combinan, y la OSNR se reduce más allá de lo que puede recuperar la amplificación. Potenciar una señal débil aumenta el ruido, lo que significa que la mejora en el rendimiento es mínima o incluso inexistente.

Resultados Positivos y Conclusiones:

- **Eficiencia Espectral Mejorada:** El sistema propuesto logra una mayor eficiencia espectral sin la necesidad de combinar múltiples técnicas de modulación, lo que simplifica el diseño y reduce la complejidad del sistema.
- **Resiliencia a la Dispersión:** Las técnicas implementadas en el sistema propuesto demuestran una mayor resiliencia a la dispersión cromática, manteniendo una BER baja incluso en enlaces de 100 km.
- **Optimización del OSNR:** Las curvas comparativas indican que, para alcanzar una BER específica, el sistema propuesto requiere un OSNR menor en comparación con el estudio de 2024, lo que refleja una mayor eficiencia en el uso del presupuesto de potencia.

En conclusión, aunque el análisis titulado "Análisis del Rendimiento de Sistemas de Comunicación PPM-mQAM Ópticos Totales" (2024) sugiere un método de modulación híbrido para optimizar la eficiencia y disminuir las exigencias de OSNR, el sistema planteado en la presente investigación presenta beneficios notables en cuanto a rendimiento y eficiencia. Estas mejoras subrayan la efectividad de las tácticas empleadas para enfrentar los obstáculos vinculados con la transmisión óptica en conexiones de 100 km. Ambos métodos brindan perspectivas significativas para el desarrollo de sistemas de comunicación óptica altamente eficaces y de gran rendimiento.

Conclusiones Obtenidas

Después de realizar la evaluación comparativa y validar los resultados, se pueden destacar u obtener las siguientes conclusiones generales:

- **Eficiencia Espectral Mejorada:** La implementación de OFDM en sistemas PON basados en IM/DD permite una mejora considerable en la eficiencia espectral en comparación con aquellos sistemas que no lo utilizan. Esto se debe a la capacidad de OFDM de gestionar múltiples subportadoras de forma ortogonal, optimizando o aprovechando el ancho de banda disponible.
- **Desempeño en Tasa de Error de Bit (BER):** Aunque la mejora en BER puede no ser significativa, el aumento en la eficiencia espectral y la resistencia frente a interferencias y dispersión hacen que la implementación de OFDM sea una opción viable para aplicaciones que requieren altas tasas de transmisión de datos.
- **Robustez Frente a Efectos Adversos:** Los sistemas OFDM muestran una mayor resiliencia ante efectos adversos como la dispersión y el ruido lo que permite mantener un desempeño estable en distintas condiciones de la red.

CONCLUSIONES

Se ha establecido un marco teórico estructurado que analiza los aspectos fundamentales de las redes PON con enlaces de modulación directa (IM) y detección directa (DD), sumado a la incorporación de la técnica OFDM (Multiplexión por División de Frecuencia Ortogonal). Este conocimiento teórico ha permitido entender de cómo la modulación OFDM potencia la capacidad de transmisión al segmentar o dividir la información en múltiples subportadoras ortogonales, reduciendo las interferencias y optimizando el uso del ancho de banda. De este modo se ha demostrado que las redes PON que emplean o utilizan IM/DD y OFDM representan una solución eficiente y económica para cubrir las necesidades actuales y futuras de la comunicación óptica de alta velocidad.

Mediante simulaciones realizadas en la plataforma OptiSystem 21. 0, se ha comprobado que los sistemas PON que emplean modulación OFDM superan significativamente a los sistemas tradicionales con modulación NRZ en cuanto a la eficiencia espectral. La capacidad del OFDM para combinar múltiples subportadoras permiten un uso más eficiente del espectro disponible, logrando velocidades de transmisión de hasta 10 Gbps con un uso óptimo del ancho de banda. En cambio, los sistemas tradicionales enfrentan limitaciones de capacidad debido a un uso menos efectivo de las frecuencias. Estos resultados demuestran que la modulación OFDM no solo optimiza la eficiencia espectral, sino que también proporciona la flexibilidad requerida para incrementar las tasas de transmisión en redes PON.

El análisis de los sistemas PON que emplean OFDM ha mostrado que esta técnica de modulación contribuye a mitigar los efectos negativos del ruido, la dispersión de longitud de onda, las no linealidades ópticas y otros factores como el desvanecimiento en frecuencia. La transmisión de datos mediante múltiples subportadoras distribuye las interferencias de manera más uniforme y optimiza la relación entre señal-ruido. De igual manera los gráficos de constelación y el análisis de la tasa de error de bits muestran que los sistemas OFDM mantienen una transmisión estable, incluso en situaciones de alta atenuación e interferencia. En consecuencia, se concluye que los sistemas PON basados en IM/DD y OFDM ofrecen una solución sólida y efectiva para redes de alta demanda.

RECOMENDACIONES

Debido a su destacada eficiencia en la utilización del espectro y su resistencia al ruido, se recomienda priorizar la técnica OFDM en las redes ópticas pasivas para satisfacer la creciente necesidad de transmisión de datos en aplicaciones de alta velocidad, tales como servicios de banda ancha, Internet de las Cosas y redes móviles de última generación (5G y 6G).

Es fundamental ajustar aspectos como la cantidad de subportadoras, los tipos de modulación (como QAM) y los niveles de energía del emisor láser para garantizar un funcionamiento eficiente, especialmente en condiciones de largas distancias y alta interferencia. Además, se debe incorporar el uso de métodos sofisticados de corrección de errores para reducir los efectos negativos del ruido.

Además de su aplicación en redes de conexión, se propone explorar la implementación de OFDM en nuevos ámbitos, como en redes de centros de datos, ciudades inteligentes y sistemas de comunicación en tiempo real, donde su capacidad para procesar grandes cantidades de información con alta calidad resulta especialmente valiosa.

Se recomienda realizar estudios sobre costos y eficiencia energética para garantizar que la implementación de sistemas OFDM sea viable o factible, buscando optimizar mejorar el uso de componentes clave como moduladores ópticos y amplificadores, lo que disminuiría el impacto ambiental como los costos operativos.

REFERENCIAS

- Ajewole, B. D., Odeyemi, K. O., Owolawi, P. A., & Srivastava, V. M. (2019). Performance of OFDM-FSO Communication System with Different Modulation Schemes over Gamma-Gamma Turbulence Channel. *Journal of Communications*, 14(6), 490–497. <https://doi.org/10.12720/jcm.14.6.490-497>
- Akintoye, N. O., Adesina, A. A., Salami, S. A., Alabi, T. I., & Ojo, S. I. (2020). Comparative Analysis of Higher Constellation in Intercarrier Interference Self-cancellation Orthogonal Frequency Division Multiplexing. *International Journal of Networks and Communications*, 10(2), 47–53.
- Alarcón, C. R. (2022). *Estudio tecno-económico del despliegue del estándar 50G-PON sobre infraestructura óptica heredada* [Trabajo Final de Maestría, Universitat Oberta de Catalunya]. <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/145907/7/crabanoaTFM0622memoria.pdf>
- Alimonti, G., Ammendola, R., Andreatza, A., Badoni, D., Bonaiuto, V., Casalboni, M., De Matteis, F., Mai, A., Paoluzzi, G., Proposito, P., Salamon, A., Salina, G., Santovetti, E., Sargeni, F., Satta, A., Schrader, S., & Steglich, P. (2019). Use of silicon photonics wavelength multiplexing techniques for fast parallel readout in high energy physics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 936, 601–603. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.088>
- Belete, M. (2018). *Performance Analysis of TDM-GPON System using Different Parameters* [Thesis, Bahir Dar University].

http://ir.bdu.edu.et/bitstream/handle/123456789/10551/Molla_Belete_July_2018_Final_Thesis.pdf

- Dai, L., Zhang, C., Xu, Z., & Wang, Z. (2013). Spectrum-Efficient Coherent Optical OFDM for Transport Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 31(1), 62–74. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2013.130107>
- De Sousa, L. S., & Drummond, A. C. (2023). Metropolitan optical networks: A survey on single-layer architectures. *Optical Switching and Networking*, 47, 100719. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2022.100719>
- Dhingra, A., Kumar, S., Payal, Dr., Sharma, D., & Dahiya, S. (2018). A Comprehensive Review of QAM-OFDM Optical Networks. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 6(11), 811–817. <https://doi.org/10.26438/ijcse/v6i11.811817>
- Domathoti, B., Ch, C., Madala, S., Berhanu, A. A., & Rao, Y. N. (2022). Simulation Analysis of 4G/5G OFDM Systems by Optimal Wavelets with BPSK Modulator. *Journal of Sensors*, 2022, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2022/8070428>
- Eldeeb, H. B., Elamassie, M., Sait, S. M., & Uysal, M. (2022). Infrastructure-to-Vehicle Visible Light Communications: Channel Modelling and Performance Analysis. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(3), 2240–2250. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3142991>
- Escallón P., A. F., & Ruiz G., V. H. (2018). *Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play al integrar un módulo RoF* [Tesis de Maestría]. Universidad del Cauca.

- Fàbrega, J. M. (s/f). *Sistemas ópticos de transmisión*.
- Goma, J. P., VALADEZ, I. C., & BLANCO, M. C. S. (2019). *Método para reducir la interferencia óptica en las redes ópticas pasivas* (World Intellectual Property Organization Patent No. WO2013124516A1).
<https://patents.google.com/patent/WO2013124516A1/es>
- Hajduczenia, M., Silva, H. J. da, & Monteiro, P. P. (2006). EPON versus APON and GPON: A detailed performance comparison. *Journal of Optical Networking*, 5(4), 298–319. <https://doi.org/10.1364/JON.5.000298>
- Haro García, J. (2020). *Análisis de Factores Limitantes en la Escalabilidad de Redes ópticas legadas y de nueva generación: Propuesta de soluciones basadas en la gestión de la polarización* [PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid].
<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.65781>
- Hosseini, M. M. (2023). *Cost-Effective and Optimized Optical Networks Based on Point to Multipoint Transceivers* [Phd, Aston University].
<https://publications.aston.ac.uk/id/eprint/46238/>
- Huawei Technologies Co., Ltd. (2023). Network Basics in Cloud Computing. En Huawei Technologies Co., Ltd., *Cloud Computing Technology* (pp. 145–195). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3026-3_4
- Hussein Ali, A., Jasim Alhmdane, H., & Salih Hassen, B. (2019). Design analysis and performance evaluation of the WDM integration with CO-OFDM system for radio over fiber System. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 15(2), 870. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v15.i2.pp870-878>

- ITU-T. (2005). *G.983.2: ONT management and control interface specification for B-PON*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.2/en>
- ITU-T. (2008, marzo). *G.984.1 : Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/en>
- Kebede, T., Wondie, Y., Steinbrunn, J., Kassa, H. B., & Kornegay, K. T. (2022). Multi-Carrier Waveforms and Multiple Access Strategies in Wireless Networks: Performance, Applications, and Challenges. *IEEE Access*, *10*, 21120–21140. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3151360>
- Kelly, R. (2022). *Let's get to the point: Your FTTH architecture is a strategic choice*. <https://www.blog.adtran.com/en/lets-get-to-the-point-your-ftth-architecture-is-a-strategic-choice>
- Konstadinidis, C., Sarigiannidis, P., Chatzimisios, P., Raptis, P., & Lagkas, T. D. (2018). *A Multilayer Comparative Study of XG-PON and 10G-EPON Standards* (No. arXiv:1804.08007). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.08007>
- Kumari, M., Banawan, M., Arya, V., & Mishra, S. K. (2023). Investigation of OFDM-Based HS-PON Using Front-End LiFiSystem for 5G Networks. *Photonics*, *10*(12), 1384. <https://doi.org/10.3390/photonics10121384>
- Kumari, M., Sheetal, A., & Sharma, R. (2021). Performance analysis of symmetrical and bidirectional 40 Gbps TWDM-PON employing m-QAM-OFDM modulation with multi-color LDs based VLC system. *Optical and Quantum Electronics*, *53*(8), 455. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03108-2>

- Livadariu, I., Elmokashfi, A., & Smaragdakis, G. (2024). Tracking submarine cables in the wild. *Computer Networks*, 242, 110234.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110234>
- López R., J. H. (2018). *Sensores distribuidos de fibra óptica basados en reflectometría de correlación de dos canales* [Tesis Doctoral]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Luzón C., Y. G. (2023). *Red 5G-PON para el sector de Cutuglagua del Cantón Mejía, en escenario de demanda de ultra banda ancha por cada usuario* [Trabajo de Titulación de Maestría]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Mane, S. (2023). Fiber Optics in Communication Networks: Trends, Challenges, and Future Directions. *International Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM)*, 11(7), 607–612.
- Memon, K. A., Mohammadani, K. H., Ain, N. U., Shaikh, A., Ullah, S., Zhang, Q., Das, B., Ullah, R., Tian, F., & Xin, X. (2019). Demand Forecasting DBA Algorithm for Reducing Packet Delay with Efficient Bandwidth Allocation in XG-PON. *Electronics*, 8(2), 147. <https://doi.org/10.3390/electronics8020147>
- Miao, P., Yin, W., Peng, H., & Yao, Y. (2021). Study of the Performance of Deep Learning-Based Channel Equalization for Indoor Visible Light Communication Systems. *Photonics*, 8(10), 453. <https://doi.org/10.3390/photonics8100453>
- Ministerio de Telecomunicaciones, T. (2025). *Data Center de la CNT EP*.
<https://www.telecomunicaciones.gob.ec/vicepresidente-inaugurara-data-center-de-la-cnt-ep-megaconstruccion-del-sector-tics/>

- Miriampally, V. R. (2016). 2D Optical Fiber Wave Guide Design for Multi Haul Applications. *International Journal of Informatics and Communication Technology (IJ-ICT)*, 5(3), 94. <https://doi.org/10.11591/ijict.v5i3.pp94-105>
- Molina L., J. (2023). *Diseño de un Enlace de Comunicaciones Óptico utilizando un SOA modulado directamente y Procesamiento Digital de Señales* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://odin.fi-b.unam.mx/labdsp/files/Tesis/Tesis_JML_2023.pdf
- (PDF) Performance Analysis of All-optical PPM-mQAM Communication Systems. (2024). *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/350151471_Performance_Analysis_of_All-optical_PPM-mQAM_Communication_Systems
- Pérez Soler, J. (2009). *Coexistencia e integración de comunicaciones inalámbricas en sistemas de transmisión ópticos*. [Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/6476>
- Raj, A. A. B., Krishnan, P., Darusalam, U., Kaddoum, G., Ghassemlooy, Z., Abadi, M. M., Majumdar, A. K., & Ijaz, M. (2023). A Review–Unguided Optical Communications: Developments, Technology Evolution, and Challenges. *Electronics*, 12(8), 1922. <https://doi.org/10.3390/electronics12081922>
- Rajalakshmi, S., & Shankar, T. (2020). Comparative Analysis of Different NG-PON2 Protection Types Based on FDM. *Journal of Communications*, 45–57. <https://doi.org/10.12720/jcm.15.1.45-57>
- Rodríguez L., J. F. (2022). *Diseño de red SCM/DWDM con detección coherente para aplicaciones 5G en banda milimétrica* [Tesis de Maestría, Universidad Distrital

Francisco José De Caldas].

<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/29345>

Sai, T. R., Asha, Ch., Manasa, S., & Nalanda, C. (2020). *Inter Carrier Interference Cancellation in Space Frequency Block Code MIMO-OFDM System* [Project, Anil Neerukonda Institute of Technology and Sciences].

https://ece.anits.edu.in/Dr.BSS_2019-20_Project%201.pdf

Saliou, F. (2010). *Study of solutions to extend the reach of optical access networks* [PhD Thesis, Télécom ParisTech]. <https://pastel.hal.science/pastel-00566249>

Sayed, A., Khatun, M., Ahmed, T., Piya, A. A., Chakraborty, P., & Choudhury, T.

(2022). Performance Analysis of OFDM System on Multipath Fading and Inter Symbol Interference (ISI) Using AWGN. En A. K. Das, J. Nayak, B. Naik, S.

Dutta, & D. Pelusi (Eds.), *Computational Intelligence in Pattern Recognition*

(Vol. 1349, pp. 25–36). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2543-5_3

Shaddad, R. Q., Mohammad, A., Idrus, S. M., Al-hetar, A., & Al-geelani, N. A. (2012, noviembre 12). *Emerging optical broadband access networks from TDM PON*

to OFDM PON. [https://www.semanticscholar.org/paper/Emerging-optical-broadband-access-networks-from-TDM-Shaddad-](https://www.semanticscholar.org/paper/Emerging-optical-broadband-access-networks-from-TDM-Shaddad-Mohammad/8a6569a0f0ca2b4b1569fd9e1ee9f20a82692759)

[Mohammad/8a6569a0f0ca2b4b1569fd9e1ee9f20a82692759](https://www.semanticscholar.org/paper/Emerging-optical-broadband-access-networks-from-TDM-Shaddad-Mohammad/8a6569a0f0ca2b4b1569fd9e1ee9f20a82692759)

Shariati, M. B. (2014). *Optimum Carrier to Signal Power Ratio Evaluation for*

Spectrally Efficient Systems in the Context of OFDM-PONs [Trabajo Fin de Máster]. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Shirvani M., S. (2024). The Past, Present, and Future of the Internet: A Statistical, Technical, and Functional Comparison of Wired/Wireless Fixed/Mobile Internet. *Electronics*, 13(10), 1986. <https://doi.org/10.3390/electronics13101986>
- Singh, D. K., & Chouksey, A. (2018). ICI Cancellation in OFDM Using Windowing Method in Time Varying Channel. *International Journal for Scientific Research & Development (IJSRD)*, 6(07), 202–207.
- Soumplis, P., Christodoulopoulos, K., Kokkinos, P., Napoli, A., Hosseini, M., Ouagliotti, M., Riccardi, E., Pagano, A., Yiannopoulos, K., & Varvarigos, E. (2024). Techno-Economic and Feasibility Study of Point-to-Multipoint Communications in the Metro-Core. *2024 14th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 575–580. <https://doi.org/10.1109/CSNDSP60683.2024.10636373>
- Umair, M. A., Meucci, M., & Catani, J. (2023). Strong Noise Rejection in VLC Links under Realistic Conditions through a Real-Time SDR Front-End. *Sensors*, 23(3), 1594. <https://doi.org/10.3390/s23031594>
- UPS - ST003103.pdf*. (s/f). Recuperado el 25 de enero de 2025, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14135/1/UPS%20-%20ST003103.pdf>
- van der Linden, R. (2018). *Adaptive modulation techniques for passive optical networks* [PhD Thesis, Eindhoven University of Technology]. https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/93929754/20180417_van_der_Linden.pdf

- Welch, D., Napoli, A., Bäck, J., Sande, W., Pedro, J., Masoud, F., Fludger, C., Duthel, T., Sun, H., Hand, S. J., Chiang, T.-K., Chase, A., Mathur, A., Eriksson, T. A., Plantare, M., Olson, M., Voll, S., & Wu, K.-T. (2021). Point-to-Multipoint Optical Networks Using Coherent Digital Subcarriers. *Journal of Lightwave Technology*, 39(16), 5232–5247.
- Zenhom, Y. A., Hamad, E. K. I., Alghassab, M., & M. Elnabawy, M. (2024). Optical-OFDM VLC System: Peak-to-Average Power Ratio Enhancement and Performance Evaluation. *Sensors*, 24(10), 2965.
<https://doi.org/10.3390/s24102965>
- Zeydan, E., Dedeoglu, O., & Turk, Y. (2021). Performance monitoring and evaluation of FTTx networks for 5G backhauling. *Telecommunication Systems*, 77(2), 399–412. <https://doi.org/10.1007/s11235-021-00767-0>
- Zhang, J., Hong, X., Liu, J., & Guo, C. (2018). Experimental demonstration of an OFDM based visible light communication system using inter-block precoding and superimposed pilots. *Optics Communications*, 412, 219–225.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.12.020>

ANEXOS

Anexo 1: Artículo de revista científica relacionado, empleado como referencia comparativa para analizar y validar los resultados obtenidos en el proyecto propuesto.

Análisis del desempeño de la transmisión de datos en banda base y RF sobre redes PON de largo alcance

Jhon James Granada Torres
M.Sc(c) Ingeniería de Telecomunicaciones,
Universidad Nacional de Colombia (UNAL)
Investigador Grupo CMUN, UNAL
Bogotá, Colombia
jjgranadato@unal.edu.co

Jesús Álvarez Guerrero
Ing. Electrónico,
Universidad Francisco de Paula Santander
Cúcuta, Colombia
Jesus1216@gmail.com

Claudia Milena Serpa Imbett
Estudiante Ph.D Ingeniería,
Universidad Pontificia Bolivariana (UPB)
Medellín, Colombia
clauaiseimbett@gmail.com

Gloria Margarita Varón Durán
Ph. D Optoelectronique et hyperfréquence,
Université de Toulouse, ISAE, Francia
Docente Tiempo Completo, Investigador Grupo CMUN,
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
gmvarond@unal.edu.co

Neil Guerrero González
Ph. D Fotónica,
Universidad Tecnológica de Dinamarca
Docente Tiempo Completo, Investigador Grupo GITA,
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
neguego@gmail.com

Resumen— En este trabajo se analiza el desempeño de una red óptica pasiva de largo alcance en función de la dispersión y la relación señal a ruido óptica. Hoy en día, las redes ópticas pasivas con capacidad de Gbps están estandarizadas a una distancia de transmisión de 20 km y velocidades de transmisión en el canal descendente de 155 Mbps, 1 y 2,5 Gbps. Sin embargo, la tendencia de unir los niveles de metro y acceso sugiere la extensión de las redes ópticas pasivas hasta alcanzar distancias alrededor de los 100 km. En este trabajo se estudia a través de simulaciones en Virtual Photonics®(VPI), el desempeño de una red óptica pasiva de largo alcance, la cual transmite señales ópticas en banda base hasta una distancia de 100 km y de Radiofrecuencia hasta los 70 km. El análisis cualitativo de la transmisión de datos a través de la red PON se realiza basado en la calidad del diagrama de ojo. Asimismo, se calculan las curvas de bits erróneos en función de la relación señal a ruido óptica, para hacer un análisis cuantitativo respecto a las distancias y velocidades de transmisión. Las redes simuladas exhiben un mejor desempeño a distancias inferiores a 40 km para velocidades de 2,5 Gbps con fibras monomodo estándar y hasta los 70 km a 155 Mbps en banda base y radiofrecuencia con portadora de 60 GHz.

Palabras clave— banda base (BB), dispersión cromática (CD), fibra monomodo (SMF), radiofrecuencia (RF), relación señal a ruido óptica (OSNR), tasa de error de bit (BER).

Abstract— In this paper, the performance of long-reach passive optical network is analyzed in function of the dispersion and the optical-to-signal noise ratio. Nowadays, capable gigabits passive optical networks are standar-

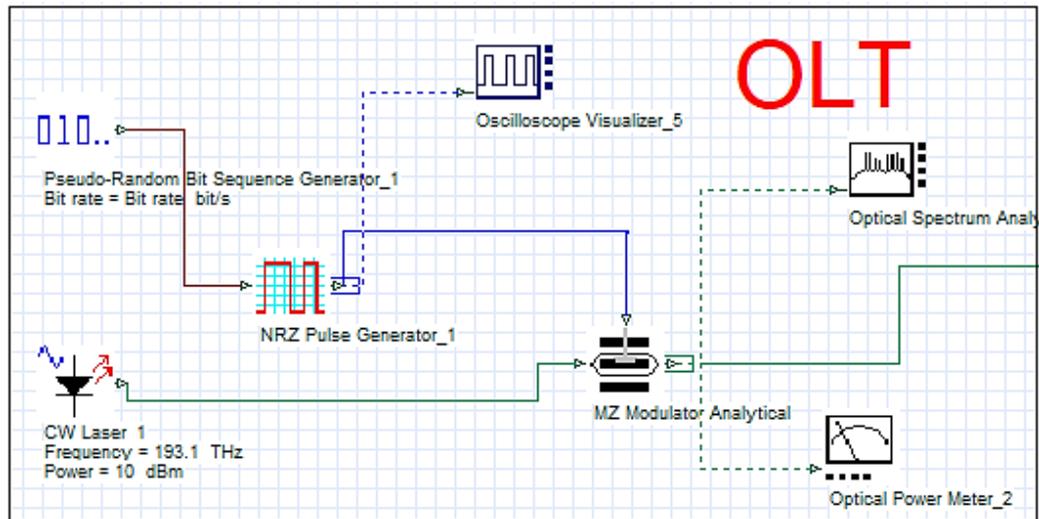
dized to a transmission distance of 20 km, and downstream transmission speed of 155 Mbps, 1 and 2,5 Gbps. However, tendency to unite the metro and access levels suggests the extension of the passive optical networks up to distances around 100 km and in radiofrequency up to 70 km. In this work is studied the performance of long-reach passive optical network through simulations in Virtual Photonics®(VPI). This network transmits optical signals in baseband to a distance of 100 km. The qualitative analysis of data transmission through the passive optical network is made based on the quality of the eye diagram. Also, the bit-error rate is calculated according to the optical-to-signal noise ratio to make a quantitative analysis regarding the transmission distance and speed. The simulated networks exhibits a better performance at distances below 40 km at speeds to 2,5 Gbps with standard single-mode fiber and up to 70 km to 155 Mbps in baseband and radiofrequency at 60 GHz.

Keywords— baseband (BB) bit error rate (BER), chromatic dispersion (CD), optical signal to noise ratio (OSNR), single mode fiber (SMF), radiofrequency (RF).

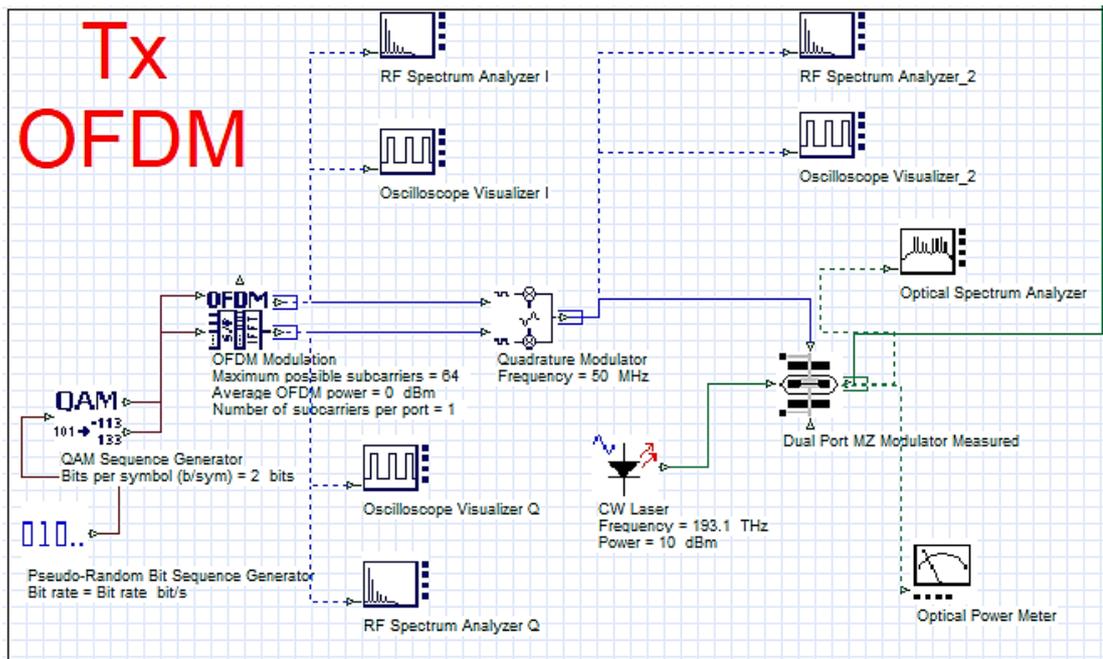
INTRODUCCIÓN

Actualmente las redes troncales de telecomunicaciones (*backbone*) se implementan en fibra óptica, debido a las grandes ventajas de la fibra como canal de transmisión con respecto a los cables de cobre, entre ellas una mayor capacidad de transmisión y la inmunidad al ruido electromagnético [1]. El gran crecimiento en la demanda de an-

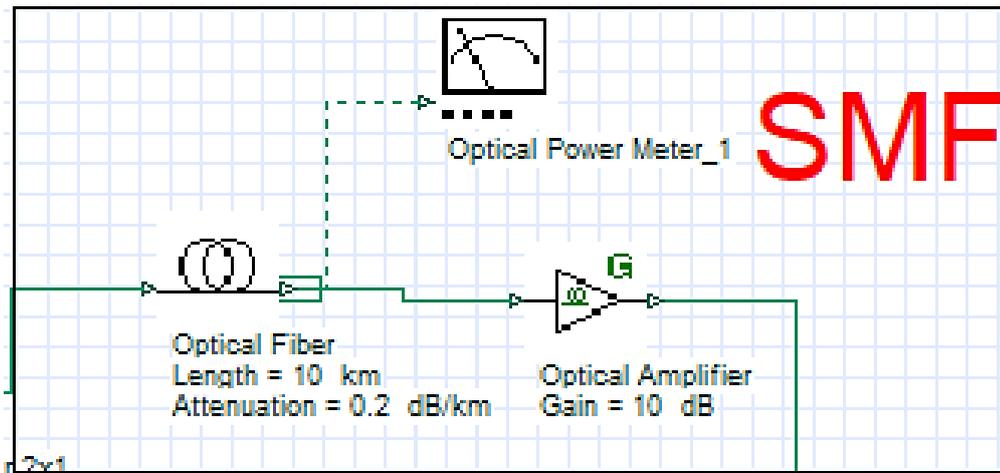
Anexo 2: Esquema del modelo de simulación para la OLT desarrollado en la plataforma OptiSystem.



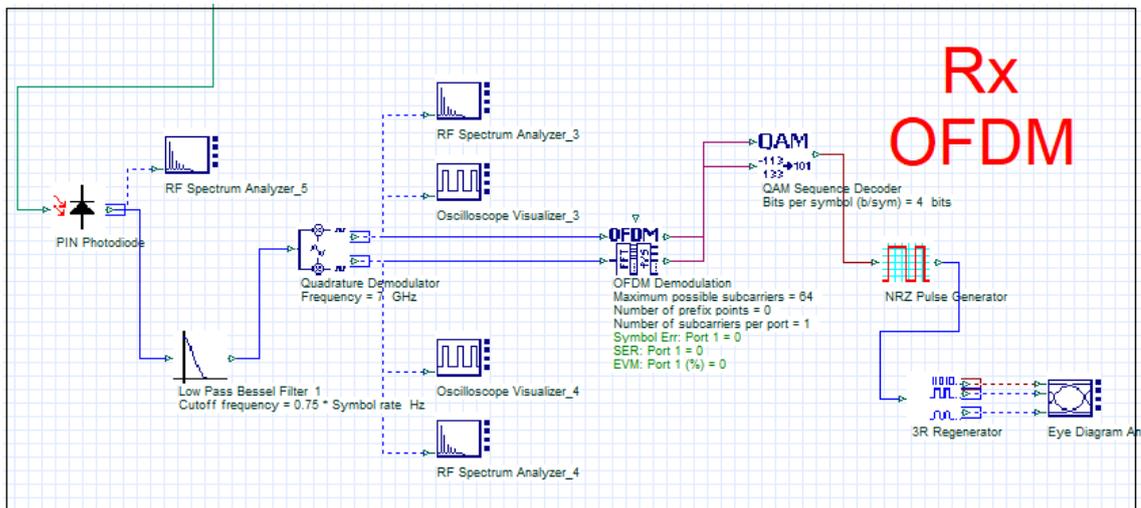
Anexo 3: Esquema de simulación para la transmisión usando la técnica OFDM.



Anexo 4: Esquema de simulación para el medio de transmisión por fibra monomodo.



Anexo 5: Ventana principal de la interfaz de la plataforma de simulación OptiSystem.



Anexo 6: Ventana principal de la interfaz de la plataforma de simulación

