

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

TÍTULO

Análisis de rendimiento de un sistema de transmisión óptica GPON-WDM utilizando diferentes formatos de modulación PSK y QAM basado en Python.

AUTOR

Carabajo Malavé, Javier Alfredo

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR

Novillo Parales, Francisco Vicente

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. Francisco Novillo Parales, Ph.D.
TUTOR

Ing. Diego Intriago Rodríguez, MSc.
DOCENTE ESPECIALISTA

Ing. Fernando Chamba Macas, Mgtr.
DOCENTE ESPECIALISTA

Abg. María Rivera González, Mgtr.
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 Javier Alfredo Carabajo Malavé, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Telecomunicaciones.

TUTOR

Ing. Francisco Novillo Parales, Ph.D.

Santa Elena, 27 de diciembre de 2024



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

Yo, **Javier Alfredo Carabajo Malavé**

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, Análisis de rendimiento de un sistema de transmisión óptica GPON-WDM utilizando diferentes formatos de modulación PSK y QAM basado en Python. 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, 27 de diciembre de 2024

EL AUTOR

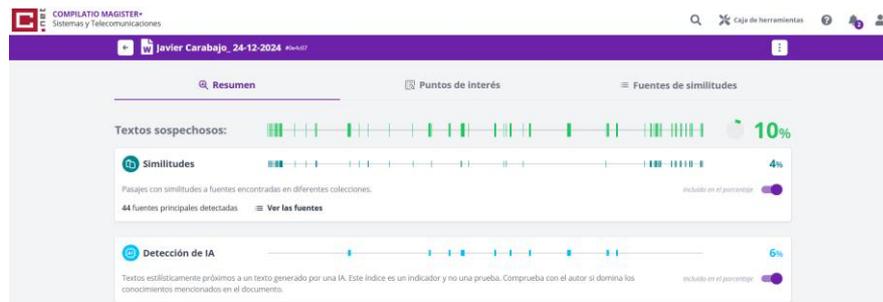
Javier Alfredo Carabajo Malavé



**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 Análisis de rendimiento de un sistema de transmisión óptica GPON-WDM utilizando diferentes formatos de modulación PSK y QAM basado en Python, presentado por el estudiante, Javier Alfredo Carabajo Malavé fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 10%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



TUTOR

Ing. Francisco Novillo Parales, Ph.D.



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

AUTORIZACIÓN

Yo, Javier Alfredo Carabajo Malavé

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 del trabajo 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, 27 de diciembre de 2024

EL AUTOR

Javier Alfredo Carabajo Malavé

AGRADECIMIENTO

Quiero dedicar estas palabras de agradecimiento a quienes han sido mis pilares durante este viaje hacia la culminación de mi maestría.

A Dios porque siempre me ha bendecido con unos padres extraordinarios, que siempre creyeron en mí inclusive cuando yo dudaba.

A mis amados padres, Alfredo Carabajo Ayala y Mercy Malavé Yagual, ya que con su amor y apoyo incondicional son la fuerza impulsora para superar cada obstáculo. Gracias por vuestro sacrificio, a cada palabra de aliento y porque me enseñaron a perseguir mis sueños con valentía.

A Diego Orlando Sánchez Pérez, un gran amigo que lo considero como un hermano, gracias a tus consejos y apoyo incondicional has sido un faro en los momentos de incertidumbre. Gracias por todo, con tú sabiduría y lealtad lo que siempre me ha motivado a seguir adelante.

A Solange Castro Ullauri, gracias al apoyo y dedicación que me brindaste para lograr la realización del presente trabajo de maestría.

A mis profesores, por compartir su conocimiento y ser una guía en mi crecimiento.

A todos, gracias por su apoyo incondicional en este proceso.

Javier Alfredo Carabajo Malavé

DEDICATORIA

Especialmente, a mis padres, Alfredo Carabajo Ayala y Mercy Malavé Yagual, ya que, con su amor incondicional, apoyo y valores que me han dado cuando niño hasta hoy. El cumplimiento de esta meta es el reflejo de vuestro sacrificio y esfuerzo, ya que con esto he podido culminar mis estudios de posgrado. Por eso y más, este trabajo va dedicado a ustedes con todo mi amor y agradecimiento.

A mis hijas, Doménica Carabajo Loor y Javiera Carabajo Guevara, por ser mi fuente de inspiración diaria. Que este logro les recuerde siempre que el esfuerzo y la dedicación abren el camino hacia cualquier meta. Siempre recordaré que este camino lo recorrí pensando en su futuro.

Javier Alfredo Carabajo Malavé

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	XV
ABSTRACT	XVI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	7
1.1. Introducción a las Redes Ópticas.....	7
1.1.1. Definición y Características de las Redes Ópticas	10
1.1.2. Importancia y aplicaciones en las comunicaciones modernas.....	13
1.2. Tecnologías de Acceso Óptico	16
1.2.1. Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit (GPON).....	18
1.2.2. Multiplexación por división de longitud de onda (WDM).....	23
1.3. Métodos de modulación en sistemas de comunicaciones ópticas	26

1.3.1. Técnica de modulación por desplazamiento de fase (PSK)	28
1.3.2. Técnica de modulación de amplitud en cuadratura (QAM)	30
1.4. Características, principios de funcionamiento y aplicaciones de los sistemas de transmisión óptica	33
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	37
2.1. Contexto de la investigación.....	37
2.2. Diseño y alcance de la investigación.....	37
2.3. Tipo y métodos de investigación	38
2.4. Introducción.....	38
2.5. Implementación de Simulaciones en Python	38
2.5.1. Descripción de los algoritmos de simulación	38
2.5.2. Modelo de Red GPON-WDM	40
2.5.3. Parámetros de Simulación	43
2.6. Población y muestra	44
2.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	44
2.8. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.	44
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
3.1. Resultados obtenidos en la simulación	46
3.1.1. Análisis de eficiencia espectral y capacidad de transmisión	46
3.1.2. Análisis de la tasa de error de bits (BER) frente SNR.....	47
3.1.3. Análisis del factor Q frente SNR.....	49
3.1.4. Análisis de la tasa de error de bits (BER) frente distancia de enlace óptico.	50
3.1.5. Análisis del factor Q frente distancia de enlace óptico.	52

CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES.....	55
REFERENCIAS	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1: Parámetros de simulación de GPON basado en WDM. 43

Tabla 3. 1: Resumen de la comparativa para la BER vs SNR. 48

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1. 1: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación óptico submarino.	8
Figura 1. 2: Representación de un sistema de comunicación óptico.	9
Figura 1. 3: Representación de la estructura de una fibra óptica.	11
Figura 1. 4: Representación del principio de funcionamiento de la tecnología WDM. .	11
Figura 1. 5: Representación esquemática de la arquitectura de una EON.	12
Figura 1. 6: Captura parcial de los cables submarinos de fibra óptica.	14
Figura 1. 7: Arquitectura de red de acceso radioeléctrico (CRAN) a la nube.	14
Figura 1. 8: Configuración para la interconexión de centros de datos para aplicaciones (a) P2P para enlaces de 40 km, y (b) DWDM para enlaces entre 80 y 120 km	15
Figura 1. 9: Diagrama de Arquitectura GPON.	19
Figura 1. 10: Asignación de longitudes de onda para enlaces descendentes, ascendentes y video (si es el caso).	20
Figura 1. 11: Asignación de ancho de banda en un ciclo DBA.	22
Figura 1. 12: Evolución de las redes ópticas pasivas (PON).	22
Figura 1. 13: Principio de la WDM en una PON.	24
Figura 1. 14: Técnicas (a) pre-compensación, (b) post-compensación, y (c) compensación simétrica.	26
Figura 1. 15: Evolución histórica de los formatos de modulación digital.	27
Figura 1. 16: Diagramas de constelación de los formatos de modulación (a) 2-PSK, (b) 4-PSK, (c) 8-PSK, (d) 16-PSK, (e) A2-PSK, y (f) A4PSK.	29
Figura 1. 17: Diagramas de constelación M-QAM cuadrada.	31

Capítulo 2

Figura 2. 1: Ubicación Geográfica Área de Estudio CNT EP.	37
Figura 2. 2: Estructura de los módulos del paquete OptiCommPy.....	39
Figura 2. 3: Diagrama de bloques del sistema GPON basado en WDM.....	40
Figura 2. 4: Algoritmo de simulación del rendimiento de GPON basado en WDM con diferentes formatos de modulación utilizando la librería OptiCommPy.	41
Figura 2. 5: Asignación de longitudes de onda en sistema GPON basado en WDM.	42

Capítulo 3

Figura 3. 1: Asignación de longitudes de onda en sistema GPON basado en WDM.	46
Figura 3. 2: Resultado obtenido de la BER frente a la SNR.....	47
Figura 3. 3: Resultado obtenido del Factor Q frente a la SNR.	49
Figura 3. 4: Resultado obtenido de la BER frente a la distancia del enlace óptico.	51
Figura 3. 5: Resultado obtenido del Factor Q frente a la SNR.	52

RESUMEN

En el presente documento se presenta el desarrollo del trabajo de maestría denominado “Análisis de rendimiento de un sistema de transmisión óptica GPON-WDM utilizando diferentes formatos de modulación PSK y QAM basado en Python”. Se centra en el análisis del rendimiento de los esquemas de modulación sobre GPON-WDM a través de las métricas, tasa de error de bits (BER), factor Q y relación señal a ruido (SNR). En la introducción se presenta la problemática, los objetivos tanto general como específicos. En el capítulo 1, se presenta una breve descripción teórica de las arquitecturas de redes ópticas pasivas que utilizan técnicas avanzadas de multiplexación por división de longitud de onda y de las técnicas de modulación. En el capítulo 2, se presente la metodología implementada en este trabajo. En el capítulo 3, se presenta la discusión de los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Palabras claves: GPON, WDM, PSK, QAM.

ABSTRACT

This paper presents the development of the master work called “Performance analysis of a GPON-WDM optical transmission system using different PSK and QAM modulation formats based on Python”. It focuses on the performance analysis of modulation schemes over GPON-WDM through the metrics, bit error rate (BER), Q factor and signal to noise ratio (SNR). The introduction presents the problem, the general and specific objectives. Chapter 1 presents a brief theoretical description of passive optical network architectures using advanced wavelength division multiplexing and modulation techniques. Chapter 2 presents the methodology implemented in this work. Chapter 3 presents the discussion of the results obtained. Finally, conclusions and recommendations are presented.

Keywords: GPON, WDM, PSK, QAM.

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la demanda de capacidad en las redes de acceso, impulsado por la creciente demanda de anchos de banda de servicio, la variedad de servicios y el número de proveedores de servicios, exige una penetración cada vez mayor de la fibra hacia los hogares de los usuarios finales (Nsaofo-Yeboah et al., 2022). Históricamente, la respuesta a la escasez de ancho de banda ha sido tender más fibra. Esto se debe, en parte, a un par de factores. En primer lugar, los operadores de redes han trabajado incansablemente durante décadas para ampliar su planta de fibra, con el objetivo final de disponer de una planta externa (OSP) totalmente FTTH capaz, en teoría, de suministrar tanta capacidad como necesitara un usuario final.

Es por eso, que la red óptica pasiva de gigabit (Gigabit Passive Optical Network, GPON) combinada con la técnica de multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM) resultan ser una tecnología prometedora en redes de acceso de fibra óptica de alta velocidad y capacidad (Singhal et al., 2017). Por ejemplo, Salleh et al., (2014) en su investigación propusieron una arquitectura nueva denominada red óptica pasiva mediante la multiplexación por división de longitud de onda en el tiempo (Time Wavelength Division Multiplexing, TWDM-PON)

Además, se debe elegir la técnica de modulación adecuada, ya sea, la modulación por desplazamiento de fase (Phase Shift Keying, PSK) y modulación por amplitud en cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation, QAM). Ambas modulaciones son relevantes a la hora de realizar el diseño y despliegue de una PON, que podría mejorar el rendimiento, aunque, podrían afectar directamente la: (1) eficiencia espectral, (2) tolerancia al ruido y (3) capacidad de transmisión de datos. También, en la revisión del estado del arte se han encontrado varios trabajos de investigación en los que han analizado el impacto que tiene emplear una de las dos técnicas de modulación en comunicaciones ópticas.

Por ejemplo, Sasai et al., (2020) y Vijayan et al., (2020) emplearon el esquema de modulación QAM en la que evaluaron la eficiencia espectral y la tolerancia al ruido en la

red de acceso óptico, con lo cual demostraron el potencial que tiene en la capacidad de transmisión de datos en corta y larga distancia. Mientras que, Chen et al., (2024) en su trabajo de investigación evaluaron el rendimiento de GPON mediante la técnica de modulación PSK en situaciones de perturbaciones, logrando así mantener la capacidad de transmisión y la calidad de la señal.

Mientras, que otras investigaciones realizadas por Ali et al., (2022) y Kobayashi et al., (2019) emplearon diferentes esquemas de modulación junto con la aplicación de técnicas procesamiento digital de señales, con lo que lograron mejorar el rendimiento en la transmisión de datos sobre la red de acceso óptico. Estos estudios han demostrado que la selección adecuada del formato de modulación puede mejorar la eficiencia y capacidad de transmisión de datos en redes ópticas.

Por otra parte, las investigaciones de Kumari & Mishra, (2024) y Yang et al., (2023) evaluaron la optimización de la calidad de la señal y la tasa de error de bits (Bits Error Rate, BER) en redes ópticas pasivas. Ambos, trabajos se destacaron en el análisis del comportamiento de las técnicas de modulación en la transmisión de datos.

El presente trabajo propone un análisis del rendimiento de un sistema de transmisión óptica GPON-WDM empleando diferentes técnicas de modulación, combinando la experiencia técnica adquirida en la implementación y operación de redes ópticas en la Zona CEIBOS con simulaciones basadas en Python. Este enfoque permitirá evaluar y proponer configuraciones óptimas que mejoren la capacidad de transmisión y la calidad del servicio, contribuyendo a la evolución de las redes GPON-FTTH en esta zona.

Planteamiento de la investigación

El desarrollo de GPON mediante la tecnología WDM (denominado WDM-PON) permite satisfacer la demanda de servicios de telecomunicaciones con prestaciones de alta velocidad y gran ancho de banda. Aunque, el rendimiento de WDM-PON depende de factores técnicos, para lo cual es importante elegir la técnica de modulación más apropiada. Por ejemplo, los esquemas de modulación, tales como PSK y QAM se encargan de codificar la información mediante una señal portadora para su transmisión,

pero la elección entre las técnicas, como PSK y QAM, provocaría determinadas incidencias en el rendimiento, eficiencia espectral y robustez frente al ruido.

La problemática será establecer cómo afectan las técnicas PSK y QAM frente a las métricas: relación señal ruido (Signal-to-Noise Ratio, SNR), el factor Q y la tasa de error de bits (Bits Error Rate, BER) en una red óptica. A pesar, de que la fibra óptica es el medio de transmisión (medio guiado) que tiene inmunidad frente a perturbaciones externas, tales como, imperfecciones intrínsecas propias del sistema, la dispersión cromática (Dubovan et al., 2020) y la no linealidad (Gao et al., 2023), los mismos que pueden degradar el rendimiento de una red de acceso óptico. El análisis de las variables Q y BER da una idea de cómo se comportan ambas técnicas de modulación en cuanto a eficiencia espectral y capacidad de transmisión en infraestructuras GPON-WDM. Más adelante, esto permitirá ver cuál de estas técnicas analizadas ofrece mejores prestaciones. (Martínez et al., 2023).

El análisis de las técnicas de modulación PSK y QAM tiene por objetivo comprender cómo afecta cada una de ellas a las métricas del sistema, tales como, la relación SNR, BER y eficiencia espectral. Estas métricas nos permiten evaluar el rendimiento de la transmisión, tales como, GPON-WDM. Además, si GPON-WDM resulta tener una alta eficiencia espectral se tendría transmisiones de datos masivos por canal óptico, mientras que una BER más pequeña se tendría una comunicación de calidad y eficiente.

En el presente trabajo de investigación se propone realizar el análisis y comparativa de las técnicas de modulación PSK y QAM en función del rendimiento en la transmisión de datos sobre GPON-WDM mediante la implementación de algoritmos en Python. El propósito principal es mejorar el rendimiento del sistemas de transmisión WDM-PON, con lo cual se pueda gestionar adecuadamente el incremento de paquetes de datos sin que se comprometa la calidad ni la capacidad de transmisión.

Este trabajo es relevante porque es capaz de aportar información práctica para el diseño y optimización de WDM-GPON, detallando el conocimiento de los beneficios y límites relativos a las técnicas de modulación PSK y QAM bajo diferentes escenarios de operación. Esto ayudará a mejorar aún más los conocimientos ya conocidos en el área de las comunicaciones ópticas y a aportar implicaciones prácticas a la implementación de

tecnologías de nueva generación que permitan satisfacer las crecientes demandas de velocidad y capacidad dentro de las comunicaciones modernas.

Para resolver estas necesidades y retos, el presente proyecto plantea un trabajo sobre el análisis de prestaciones de un sistema de transmisión óptica GPON-WDM utilizando diferentes modulaciones de PSK y QAM, principalmente a partir de un trabajo de simulación realizado con Python. El trabajo propuesto tratará, por tanto, de averiguar cómo un cambio en el formato de modulación impactará en el rendimiento de la red óptica desde el punto de vista de la eficiencia espectral, la tolerancia al ruido y la capacidad de transmisión. De hecho, esto se convierte en el punto principal de análisis a la hora de optimizar redes ópticas, más aún cuando la demanda de ancho de banda sigue multiplicándose exponencialmente. Sobre este hecho, la presente investigación intentará estimular el desarrollo de sistemas de transmisión óptica que sean capaces de satisfacer las crecientes demandas de los medios de comunicación actuales.

Formulación del problema de investigación

En la sector de Los Ceibos, las redes GPON-FTTH se han ido desplegando y a la vez se han convertido en una solución ante la creciente demanda de servicios de internet, aunque aún existen retos importantes, tales como, garantizar una transmisión de datos estable y eficiente en las diferentes aplicaciones que requieren de un gran ancho de banda. Por lo tanto, surge la necesidad de elegir la técnica de modulación apropiada y ver el impacto que tiene en el rendimiento del sistema de transmisión óptica GPON-WDM. De acuerdo con Kaushik & Saini, (2022) la elección del formato de modulación es un factor decisivo en el camino a la mejor eficiencia espectral, relación señal/ruido, factor de calidad Q y capacidad de transmisión de datos a través de GPONs..

Dicho esto, la complejidad asociada a los modernos sistemas de transmisión óptica como WDM-GPON exige que se evalúe adecuadamente cómo optimizar el rendimiento de la red utilizando diferentes formatos de modulación. Como afirman Feng et al., (2023) se plantea la cuestión de cuál es la mejor opción para maximizar la eficiencia y la capacidad de datos entre los formatos de modulación y las condiciones de la red óptica.

Por lo tanto, el enfoque durante la formulación del problema de investigación se centra en cómo los formatos de modulación PSK y QAM influyen en el rendimiento de un sistema de transmisión óptica WDM-GPON, para garantizar información útil a la hora de optimizar y diseñar redes ópticas de alta velocidad

Objetivo General:

Analizar el rendimiento de un sistema de transmisión óptica GPON-WDM utilizando las técnicas de modulación PSK y QAM con la finalidad de mejorar la capacidad de transmisión en una GPON.

Objetivos Específicos:

1. Realizar una revisión detallada de la literatura científica y técnica sobre redes ópticas pasivas y los formatos de modulación PSK y QAM, con el propósito de construir una base teórica sólida para el análisis y desarrollo del sistema de transmisión GPON-WDM de este proyecto.
2. Realizar simulaciones computacionales en Python para evaluar el rendimiento de la red GPON-WDM usando los formatos de modulación PSK y QAM, con el fin de mejorar la eficiencia espectral, la capacidad de transmisión y la calidad de la señal.
3. Evaluar la relación señal-ruido (SNR), el factor de calidad (Q) y la tasa de error de bits (BER) para los formatos de modulación PSK y QAM mediante simulaciones en diversas condiciones de red, con el fin de entender cómo cada formato de modulación influye en estas métricas clave del rendimiento.

Planteamiento hipotético

En esta investigación, defiende la idea de que la elección de la técnica de modulación ya sea PSK o QAM, influirá de forma significativa en el rendimiento del sistema de transmisión óptica GPON-WDM. Estas técnicas son muy usadas en comunicaciones ópticas debido a que ofrecen ventajas que las hacen atractivas según el escenario. Por ejemplo, la técnica PSK permite garantizar la calidad de la señal en escenarios con mucho

ruido, mientras que la técnica QAM permite maximizar el uso del ancho de banda, por lo tanto, transmitir más información.

Esto resultaría más conveniente ya que la modulación PSK es más robusta y eficiente en aspectos como la ocupación del ancho de banda para la modulación digital, inmunidad al ruido y calidad de la señal en comparación con la modulación QAM, la misma que presenta una mayor densidad espectral y, por tanto, una mayor capacidad de transmisión.

La hipótesis es que PSK, al utilizar cambios de fase para cifrar los bits de información, debería ser menos propensa a las influencias del ruido y las interferencias que QAM, que utiliza tanto la amplitud como la fase para transmitir datos. Se espera que la simplicidad de la modulación PSK permita una mejor recuperación de la señal en entornos de alta interferencia, lo que podría traducirse en una mayor calidad de la señal y una menor tasa de error de bit.

Además, se considera que la técnica QAM, al ofrecer una mayor densidad espectral y capacidad de transmisión, podría ser especialmente adecuada en entornos con altas demandas de ancho de banda y enlaces de gran alcance. La complejidad que tiene la técnica QAM podría traducirse en una mayor eficiencia en la transmisión de datos en redes ópticas de alta velocidad (por ejemplo, NG-PON). Finalmente, el presente trabajo explora cómo la eficiencia compensa los desafíos que plantea el ruido y la atenuación, aspectos que deben ser considerados en todo diseño de redes GPON-WDM.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Introducción a las Redes Ópticas

Las redes ópticas son siempre reconocidas como un nuevo paradigma en el mundo de las telecomunicaciones, que utiliza sin comparación la velocidad y eficacia de la luz para transportar grandes cantidades de información a través de largas distancias. Esto las ha colocado en el centro de la infraestructura moderna de telecomunicaciones y en la fuerza impulsora de un mundo cada vez más interdependiente de las transferencias de datos de alta velocidad y gran capacidad. (Chatterjee et al., 2015; J. Zhang et al., 2022).

Una red óptica es aquella que utiliza la luz como medio de transmisión y, como tal, será intrínsecamente superior a las redes basadas en el cobre en cuanto a capacidad de ancho de banda, latencia y degradación de la señal en largas distancias. La tecnología básica que permite las redes ópticas son las fibras ópticas, finos filamentos de vidrio o plástico que guían los pulsos de luz a distancias muy largas con pérdidas mínimas. (Thyagaturu et al., 2016).

La evolución de la tecnología de redes ópticas (ver Figura 1.1) ha sido impulsada por el crecimiento exponencial del tráfico de datos, así como el incremento de dispositivos conectados a internet y las aplicaciones intensivas en datos. A medida que la demanda de ancho de banda se incrementa, las redes ópticas han emergido como la solución más viable para satisfacer estos requisitos crecientes (Cisco Annual, 2020).

La Figura 1.1 muestra una línea de tiempo de la evolución de las GPONs aumentando su velocidad y capacidad de transmisión de datos desde 1980 hasta 2030.

- En 1990 se introduce las Redes Ópticas Pasivas de Modo de Transferencia Asíncrona (Asynchronous Transfer Mode PON, ATM PON)".
- En el año 2000 aparecen las Redes Ópticas Pasivas de Banda Ancha (Broadband PON, BPON), seguido de Redes Ópticas Pasivas Gigabit (Gigabit PON, GPON) y las Redes Ópticas Pasivas Ethernet (Ethernet PON, EPON).
- Para 2010, se desarrolla 10 Gigabit Ethernet PON (10G-EPON) y XG-PON.
- Para 2020, se implementan las Redes Ópticas Pasivas Multiplexadas por División de Tiempo y Longitud de Onda (Time and Wavelength Division Multiplexed

PON, TWDM-PON) y las Redes Ópticas Pasivas Simétricas de Próxima Generación (Next-Generation Symmetric PON, XGS-PON).

- Finalmente, se proyecta la llegada de 50 Gigabit PON (High-Speed PON, HS-PON) y 50 Gigabit Ethernet PON (Next Generation PON, NG-PON) para 2030.

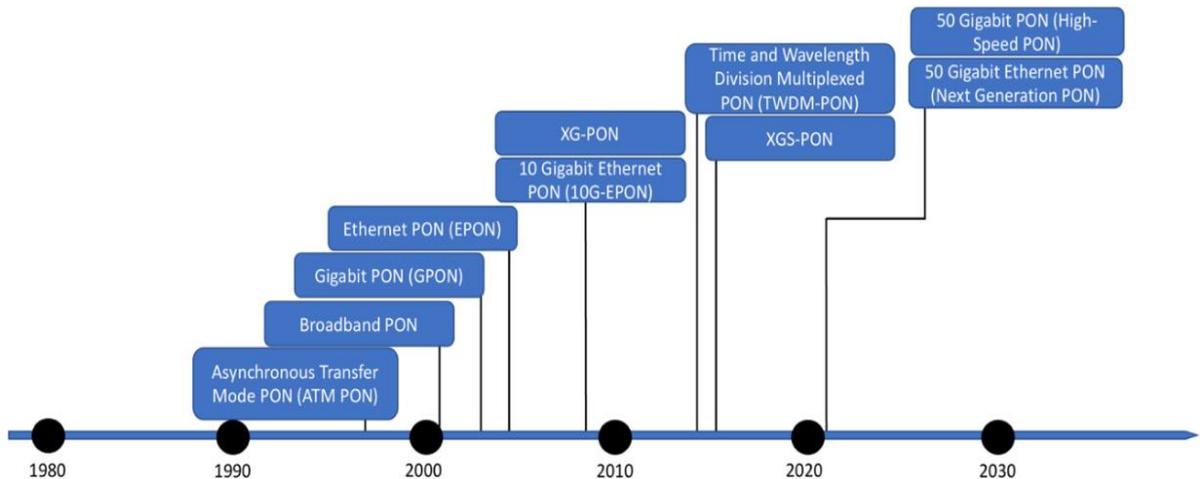


Figura 1. 1: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación óptico submarino.

Fuente: (Wong, 2022)

Las redes ópticas operan bajo el principio de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), una técnica que permite la transmisión de múltiples canales ópticos en una sola fibra utilizando diferentes longitudes de onda. Esta capacidad de multiplexación aumenta la capacidad de transporte de las fibras ópticas, permitiéndoles soportar capacidades de Tbps en una solo hilo de fibra óptica (Andriolli et al., 2022) .

La arquitectura de las redes ópticas (véase la Figura 1.2) tradicionales comprende de varios componentes: transmisores ópticos, fibras ópticas, amplificadores, receptores, conmutadores y enrutadores ópticos. Estos componentes trabajan en conjunto para la transmisión y enrutamiento de datos eficientes (Alferness, 2020). La implementación de redes ópticas ha revolucionado varios sectores de la industria de las telecomunicaciones. En las comunicaciones de larga distancia, las redes ópticas despliegan sistemas de cables submarinos que atraviesan océanos, conectando continentes con enlaces de datos de alta velocidad. En áreas metropolitanas, las redes ópticas proporcionan el ancho de banda necesario para soportar centros de población y distritos empresariales de alta densidad (Rapisarda et al., 2022).

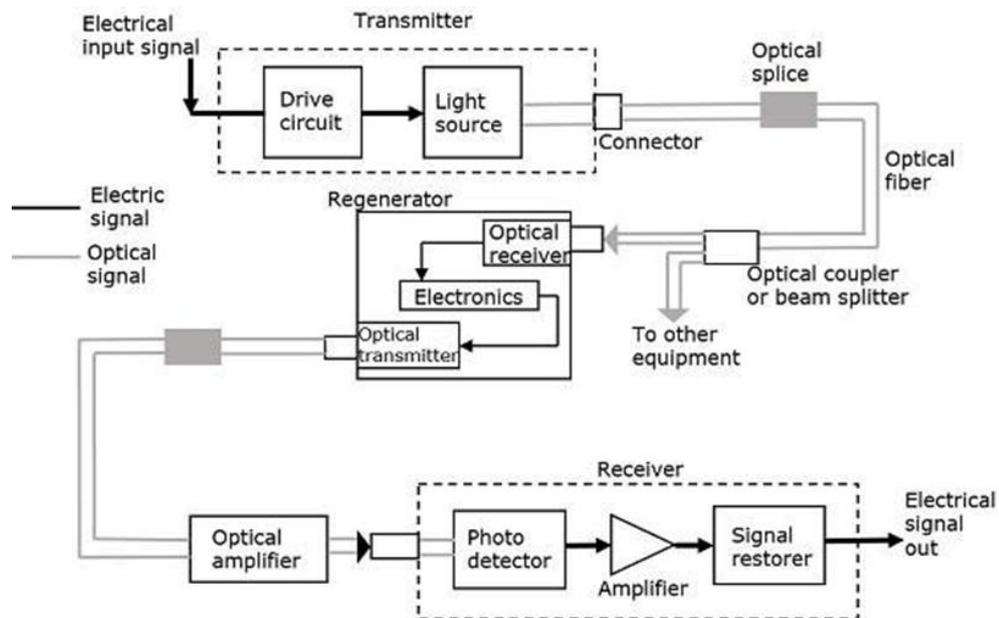


Figura 1. 2: Representación de un sistema de comunicación óptico.

Fuente: (Jude et al., 2017)

La importancia de las redes ópticas en las comunicaciones modernas no puede ser sobrestimada. Desempeñan un papel crucial en el soporte de la infraestructura global de internet, facilitando la operación de centros de datos, habilitando servicios de computación en la nube y potenciando redes móviles de próxima generación (Alwayn, 2009). Manias et al., (2023) coinciden con esta afirmación, indicando que el avance hacia la 5G, y a partir de ahí, plantea la necesidad de redes ópticas como base para mejorar la capacidad de backhaul, respaldando el aumento de los volúmenes de tráfico de datos móviles.

Por otra parte, tecnologías como el Internet de las cosas, la inteligencia artificial y las aplicaciones de “big data analytics” no pueden prescindir de las redes ópticas. Estas aplicaciones necesitan un gran ancho de banda, baja latencia y alta fiabilidad, características que describen perfectamente la tecnología de redes ópticas. (Duan et al., 2020).

Esta investigación aborda cómo influye la elección entre los formatos de modulación PSK y QAM en el rendimiento del sistema de transmisión óptica GPON-WDM. Con el aumento de la demanda de BW y una mayor complejidad de las redes de comunicaciones, resulta fundamental determinar de qué manera estos esquemas de modulación influyen en la eficiencia, capacidad y seguridad de las redes ópticas.

Esta investigación es pertinente en el escenario planteado para el desarrollo de las tecnologías de comunicación ópticas actuales, en lo que se refiere a la información de transmisión, eficiencia espectral, con el fin de garantizar la capacidad de la red con un rendimiento óptimo. Entre los trabajos de interés relacionados con la eficiencia espectral y energética en tecnologías cableadas y ópticas se encuentran los de (Elgorriaga et al., 2018; Guo et al., 2016).

En esta búsqueda de un rendimiento óptimo de redes, el análisis de las ventajas y desventajas de cada formato en un sistema óptico, atendiendo en mayor medida el comportamiento de la relación señal/ruido, la calidad de la señal y la tasa de bits erróneos con distintos formatos de modulación, permitirá encontrar un sistema óptimo. (Rahman et al., 2024).

Además, permitirá profundizar en el conocimiento de las comunicaciones ópticas al responder a la pregunta sobre el impacto de los formatos de modulación en el rendimiento de los sistemas de transmisión óptica. Para ello se cuenta con los trabajos de (Kanonakis et al., 2015; Luo et al., 2013). Los resultados obtenidos pueden aplicarse en el diseño y la optimización de las redes ópticas de próxima generación, que pueden aportar enormes avances a la capacidad y la eficiencia de los datos transportados en los entornos de comunicación modernos y satisfacer la demanda cada vez mayor de ancho de banda. (Shahpari et al., 2017; Yan et al., 2016).

1.1.1. Definición y Características de las Redes Ópticas

Las redes ópticas, que utilizan las propiedades de la luz como medio de transferencia de datos, constituyen un paradigma de la infraestructura de telecomunicaciones actual. En general, estas redes pueden definirse como sistemas de comunicación que utilizan señales ópticas, normalmente ondas de luz moduladas, para transmitir información a través de fibras ópticas especializadas (Alferness, 2020). Se trata de un gran conjunto de tecnologías y arquitecturas que aprovechan las ventajas de la transmisión óptica.

El elemento básico de cualquier red óptica es una fibra óptica (véase la Figura 1.3): la fibra óptica es un filamento fino de vidrio o plástico de gran pureza que actúa como guía de ondas para las señales luminosas. En la Figura 1.3 se muestra una fibra óptica. Estas fibras poseen una serie de excelentes características que las hacen ideales para la

transmisión de datos a alta velocidad y larga distancia. El diámetro del núcleo, por el que viaja la luz, (fibras de vidrio o plástico) puede transportar enormes cantidades de datos a cientos, incluso miles, de kilómetros (Sugumaran et al., 2021).

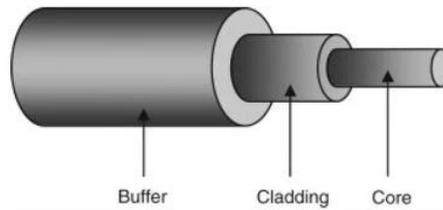


Figura 1. 3: Representación de la estructura de una fibra óptica.

Fuente: (Luhar et al., 2021)

Algunas de las características que realmente distinguen a las redes ópticas son su capacidad de ancho de banda. Las fibras ópticas proporcionan niveles de BW en los Tbps, dejando muy atrás a las redes tradicionales basadas en cobre. Esto es posible gracias a ciertos tipos de multiplexación, entre los que destaca WDM. Esta es la tecnología que permite que una sola fibra transporte más de un flujo de datos mediante el uso de diferentes longitudes de onda de luz ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$), creando más de una fibra virtual dentro de una única fibra (El-Nahal et al., 2022), tal como se muestra en la Figura 1.4.

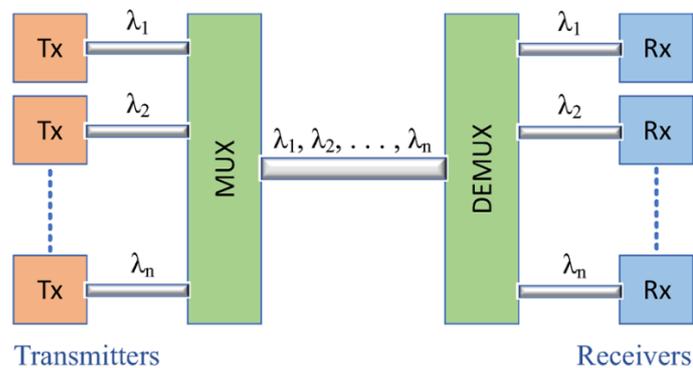


Figura 1. 4: Representación del principio de funcionamiento de la tecnología WDM.

Fuente: (Luhar et al., 2021)

La otra ventaja de las redes ópticas es su baja atenuación de la señal. Las señales ópticas viajan por fibra, que es eficiente en la transmisión de señales con una pérdida mínima de potencia en distancias más largas, en comparación con las señales eléctricas a través de cables de cobre. Esta característica permite transmitir datos a largas distancias sin necesidad de volver a regenerar las señales con frecuencia, lo que aumenta la rentabilidad y eficacia de la red óptica en general (Chatterjee et al., 2015).

Las redes ópticas, a su vez, ofrecen baja latencia, un parámetro considerado actualmente por muchas aplicaciones novedosas. Mientras tanto, la velocidad de la luz en la fibra, si bien es menor que en el vacío, es muy superior a la de las señales eléctricas en los cables de cobre. Debido a esta propiedad, junto con la menor necesidad de regeneración de la señal, se incurre en un menor retardo end-to-end en el reenvío de datos, lo que a su vez hace que las redes ópticas sean adecuadas para transportar aplicaciones sensibles a la baja latencia, entre otros servicios. (Andriolli et al., 2022).

Otra característica importante de las redes ópticas es su inmunidad a las interferencias electromagnéticas. Esta propiedad las hace inmunes a las interferencias de campos electromagnéticos externos (Ahamed, 2013), una característica de la tecnología que no sólo garantiza la eficacia y la calidad, sino que también mejora la seguridad de la red, ya que las señales son intrínsecamente muy difíciles de intervenir, en comparación con las eléctricas (Caputo, 2014).

Una característica por la que las redes ópticas se adoptan a gran escala es su escalabilidad. Sus capacidades se actualizan fácilmente con los crecientes anchos de banda de las redes, a menudo con cambios en el equipo terminal y no necesariamente con la sustitución de la infraestructura de fibra (Choudhury et al., 2019). Además, el desarrollo de redes ópticas de malla flexible y elásticamente escalables mejora aún más la eficiencia del espectro óptico (Hall et al., 2021). La arquitectura de la red óptica elástica (Elastic Optical Network, EON) se representa en la figura 1.5.

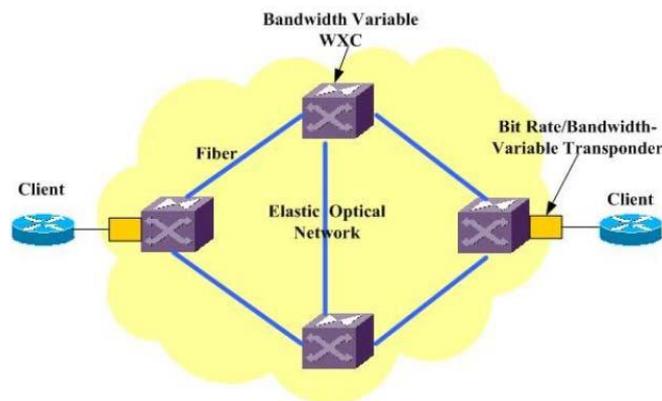


Figura 1. 5: Representación esquemática de la arquitectura de una EON.
Fuente: (D. Sharma & Kumar, 2017)

El término elástico en las EON hace referencia a tres propiedades clave de las redes ópticas: (a) Espectro óptico flexible, (b) Transpondedor de ancho de banda variable

(Bandwidth Variable Transponder, BVT), y (c) Conexiones cruzadas de ancho de banda y longitud de onda variables (BV-Wavelength Cross-Connects, BV-WXC). (D. Sharma & Kumar, 2017)

La eficiencia energética según Vetter et al., (2014) es una característica cada vez más importante de las redes ópticas. A pesar de su alta capacidad, estas redes consumen menos energía por bit de datos transmitido en comparación con sistemas electrónicos. Esta eficiencia se deriva de la baja atenuación de las señales ópticas, que reduce el uso de amplificadores y regeneradores que consumen energía, y del desarrollo de componentes y arquitecturas de red óptica más eficientes energéticamente (K. Sharma & Sehgal, 2020).

La fiabilidad y la tolerancia a fallos son características innatas a las redes ópticas con una amplia implantación en infraestructuras críticas. El diseño de las redes ópticas permite integrar métodos de redundancia y protección (Róka, 2022), por ejemplo la conmutación óptica con protección de capa y el enrutamiento diverso para garantizar la continuidad del servicio en caso de corte de la fibra o avería del equipo (Róka et al., 2022).

1.1.2. Importancia y aplicaciones en las comunicaciones modernas

La importancia de las redes ópticas es especialmente evidente en las comunicaciones de larga distancia. Los sistemas de cable óptico submarino (véase la Figura 1.6) forman el backbone de la transmisión intercontinental de datos, permitiendo interconexiones de alta velocidad a través de grandes distancias oceánicas. Se calcula que estas redes submarinas transportan el 99% del tráfico internacional de datos (Ganz et al., 2024).

Las velocidades de transmisión de datos de estos sistemas han experimentado un incremento extraordinario, y los cables modernos pueden soportar cientos de Tbps mediante el uso de tecnologías ópticas avanzadas, como la multiplexación por división espacial (SDM) y modulaciones avanzadas. Esta infraestructura que interconecta ciudades y puntos de centros de datos a nivel nacional y regional forma parte de la red troncal en las redes terrestres (Winzer et al., 2018). En las redes terrestres, la infraestructura de fibra óptica constituye la base de las redes troncales nacionales y regionales, interconectando ciudades y centros de datos. Según estudios recientes, se prevé que el tráfico mundial de los centros de datos alcance los 20.6 Zettabytes al año en

2025, y que una parte significativa de tráfico se transporte a través de redes ópticas (Kaur et al., 2020).

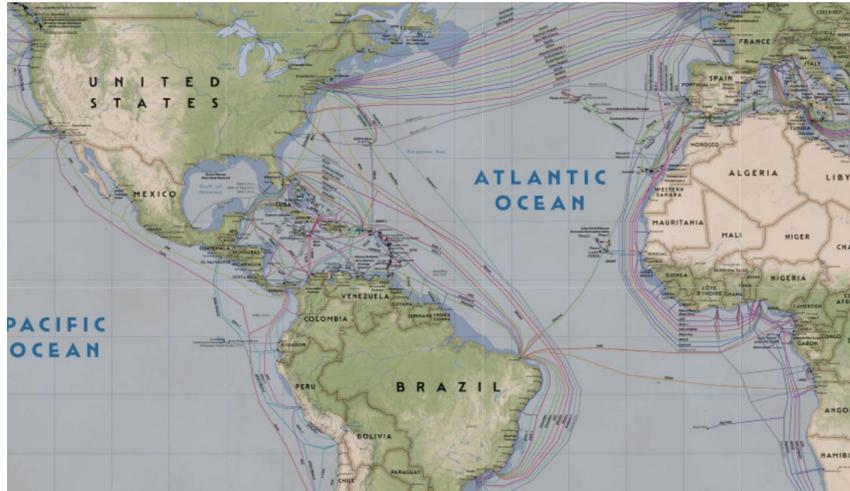


Figura 1. 6: Captura parcial de los cables submarinos de fibra óptica.
Fuente: (TeleGeography, 2024)

La llegada de las tecnologías inalámbricas de próxima generación (redes móviles 5G y futura 6G) subraya aún más la importancia de las redes ópticas backhaul para satisfacer sus requisitos de gran ancho de banda y baja latencia (Choudhury et al., 2019). La figura 1.7 muestra la arquitectura C-RAN 5G (Fayad et al., 2022).

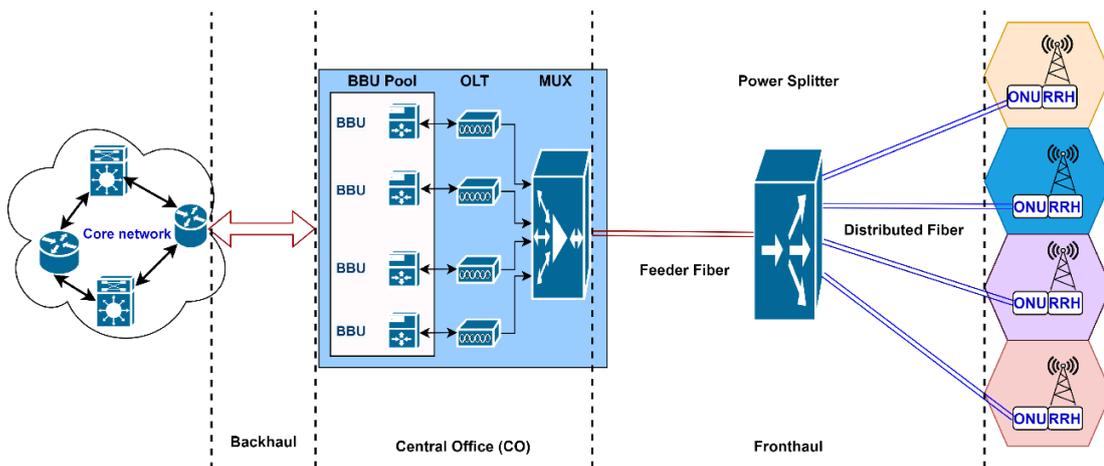


Figura 1. 7: Arquitectura de red de acceso radioeléctrico (CRAN) a la nube.
Fuente: (Fayad et al., 2022)

Las redes ópticas desempeñan un papel fundamental dentro de las áreas metropolitanas para dar soporte a la alta densidad de empresas, instituciones y usuarios residenciales. Las redes ópticas metropolitanas suministran el ancho de banda necesario y proporcionan la

flexibilidad requerida para hacer frente a la variedad de requisitos de tráfico y servicios (Thyagaturu et al., 2016). Esta importancia de las redes ópticas se extiende aún más a las zonas de acceso, donde se están desplegando tecnologías como FTTH (Fiber To The Home) y FTTP para ofrecer servicios de banda ancha de alta velocidad a los usuarios finales (Neeraj et al., 2019). Se prevé que FTTH alcance los 158 millones de usuarios en América Latina en 2026 (Rooney & Beltrán, 2022), lo que evidencia la importancia cada vez mayor de las redes de acceso óptico avanzadas (Ahamed, 2013).

En los centros de datos, las redes ópticas son indispensables para la conectividad intra e intercentros de datos (véase la Figura 1.8). La enorme escala de los modernos centros de datos a hiperescala requiere interconexiones ópticas de gran ancho de banda y baja latencia para soportar grandes tasas de datos entre servidores y sistemas de almacenamiento. Las interconexiones ópticas también son cruciales para conectar centros de datos distribuidos geográficamente, permitiendo servicios en la nube, redes de entrega de contenido y soluciones de recuperación de desastres (Pitwon et al., 2022).

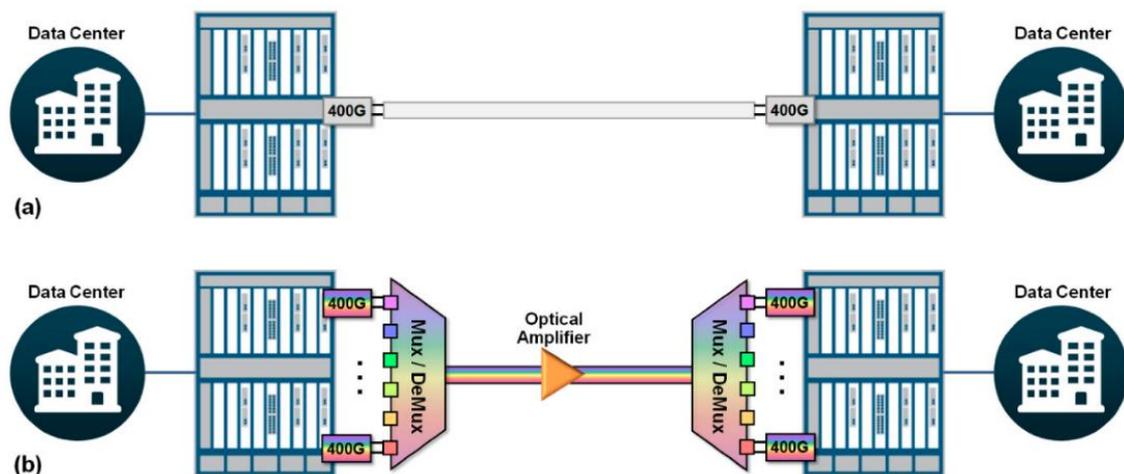


Figura 1. 8: Configuración para la interconexión de centros de datos para aplicaciones (a) P2P para enlaces de 40 km, y (b) DWDM para enlaces entre 80 y 120 km

Fuente: (Yue et al., 2019)

La infraestructura de las comunicaciones modernas está basada en las redes ópticas, una tecnología que proporciona una conectividad de alta velocidad y gran capacidad, un aspecto necesario en el actual mundo de los datos. Por ejemplo, en la transmisión intercontinental de datos, las redes troncales metropolitanas y la interconectividad de los centros de datos. En la tabla siguiente se resumen las aplicaciones principales de las redes ópticas, con sus fines y ejemplos correspondientes.

Tabla 1. 1: Aplicaciones de las redes ópticas, usos y beneficios.

Aplicación	Propósito	Ejemplo
Sistemas de Cable Submarino	Permiten la transmisión de datos de alta velocidad entre continentes	99% del tráfico internacional de datos, apoyando la conectividad global a través de los océanos (Ganz et al., 2024).
Redes Metropolitanas	Proporcionan gran ancho de banda para centros urbanos, apoyando a empresas, gobierno y usuarios residenciales	Gestión flexible del tráfico y optimización de recursos mediante SDN/NFV (Thyagaturu et al., 2016)
Centros de Datos	Aseguran conectividad rápida dentro y entre centros de datos para computación en la nube y entrega de contenido	Conexiones de gran ancho de banda y baja latencia entre centros de datos de hiperescala (Pitwon et al., 2022).
Redes 5G y futuras 6G	Ofrecen backhaul de fibra para soportar alto ancho de banda y baja latencia en servicios inalámbricos	Red de Acceso Radioeléctrico a la Nube (CRAN) para manejo eficiente de datos en infraestructuras 5G (Fayad et al., 2022)
Acceso FTTH y FTTP	Llevan banda ancha de alta velocidad directamente a hogares y empresas	Se espera que alcance los 158 millones de hogares en América Latina para 2026 (Rooney & Beltrán, 2022)
Industria del Entretenimiento	Facilitan streaming, juegos en línea y VR con conexiones de alta definición y baja latencia	Transmisión de video en 4K a millones de usuarios, mejorando la experiencia de entretenimiento digital (Astori, 2023)
Tecnologías Emergentes	Gestionan IoT, Smart Cities y vehículos autónomos que dependen de la transferencia de datos segura.	Fundamental para aplicaciones en tiempo real, como apoyo a infraestructuras urbanas y de movilidad futura (Singh et al., 2023)

Elaborado por Autor.

1.2. Tecnologías de Acceso Óptico

Como destacan Shahbaz et al., (2023), las tecnologías de acceso óptico han revolucionado el sector de las telecomunicaciones al permitir la transmisión de datos a alta velocidad con una capacidad significativa a través de enlaces ópticos, ya sea de corto o largo alcance. Una de sus ventajas más significativas es que utilizan fotones, en vez de electrones, para transmitir datos, ya que con eso se reduce considerablemente la pérdida

de señal en enlace de largo alcance (Kazanskiy et al., 2022). Gracias, a estas características técnicas, estos sistemas son capaces de transmitir datos a grandes distancias con una degradación mínima de la señal. Además, la transmisión de datos se realiza a través de varias longitudes de onda simultáneamente, con lo que se mejora el rendimiento de las comunicaciones ópticas (W. Chen et al., 2024).

Los sistemas de acceso óptico más utilizados son la Red Óptica Pasiva Gigabit (GPON) y la Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM). Sin embargo, GPON y WDM son totalmente compatibles y desempeñan funciones complementarias en las redes de acceso óptico (Escallón-Portilla et al., 2020). Sus funciones y características técnicas se describen en la sección 1.2.1. Un factor importante de GPON es su infraestructura pasiva, que minimiza los costes de mantenimiento y reduce significativamente el consumo de energía. Esto se traduce en menores costes operativos, lo que convierte a GPON-WDM en una solución rentable para los proveedores de servicios de internet (ISP) que despliegan redes de fibra hasta el hogar (FTTH) seguras y eficientes. (Lorincz et al., 2023).

Por otro lado, la tecnología WDM ha revolucionado la capacidad de las redes de acceso óptico al permitir la transmisión simultánea de múltiples canales de datos a través de una sola fibra óptica, ya que WDM aborda de forma eficiente el incremento de la demanda mundial del ancho de banda, con lo que la convierte en una tecnología que permite la evolución en las redes de acceso óptico actuales (A. H. Ali & Farhood, 2019).

Como tal, las tecnologías GPON y WDM continúan evolucionando, con la investigación y el desarrollo en curso para aumentar la velocidad de transmisión, la eficiencia del espectro y reducir costos. En particular, los trabajos actuales se centran en técnicas de modulación avanzadas, métodos de detección coherente y enfoques de SDN para mejorar aún más el rendimiento de la red óptica.

A medida que la demanda de datos continúa creciendo exponencialmente impulsada por el 5G, IoT y las aplicaciones en la nube, el papel de las tecnologías de acceso óptico de conectar de forma segura y confiable será más crítico. Por lo tanto, las tecnologías de acceso como GPON y WDM son el backbone de la conectividad a altas velocidades.

1.2.1. Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit (GPON)

La tecnología de acceso óptico punto a multipunto de alta capacidad, GPON, fue estandarizada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en la serie de recomendaciones ITU-T G.984. Desde ese momento, GPON ha ocupado una parte considerable del espacio de implementación FTTH debido a su capacidad para permitir la prestación de servicios de ancho de banda de alta velocidad de una manera eficiente y rentable. (Martínez et al., 2023).

GPON distribuye la señal óptica a través de splitters en la red de distribución óptica (ODN), lo que permite que una sola fibra dé servicio a varios abonados residenciales o corporativos. Esta arquitectura de red es la más adecuada para prestar servicios de banda ancha de alta velocidad a hogares y pequeñas empresas. Los primeros sistemas GPON admitían tasas de transmisión downstream de 2.488 Gbps y upstream de 1.244 Gbps. Sin embargo, las implementaciones recientes han superado estos límites, alcanzando velocidades de datos aún mayores para satisfacer las demandas de servicios. (Fernández, 2023).

La falta de equipos alimentados en la red de distribución y el uso de divisores ópticos pasivos reducen la necesidad de un componente activo entre la OLT y el usuario final. En general, esta es la principal razón de los bajos costos operativos y la mayor confiabilidad de GPON (Quisnancela & Espinosa, 2016). La Figura 1.9 ilustra la arquitectura de GPON, mediante la topología ramificada en la OLT se interconecta a múltiples ONUs a través de los splitters ópticos.

La arquitectura GPON consta de tres elementos principales

1. Terminal de Línea Óptica (OLT): situado en la central del proveedor de servicios, este OLT actúa como extremo de la red del proveedor y se encarga de gestionar la distribución de datos a las ONU conectadas.
2. Terminales de Red Óptica (ONTs) o Unidades de Red Óptica (ONUs): están instalados en el domicilio del abonado final, y terminan la línea de fibra óptica proporcionando una interfaz de servicio al abonado.
3. Red de Distribución Óptica (ODN): infraestructura pasiva encargada de conectar la OLT a las ONUs. Esta red incluye cables de fibra óptica y splitters para garantizar una distribución eficiente de la señal a través de varios dispositivos.

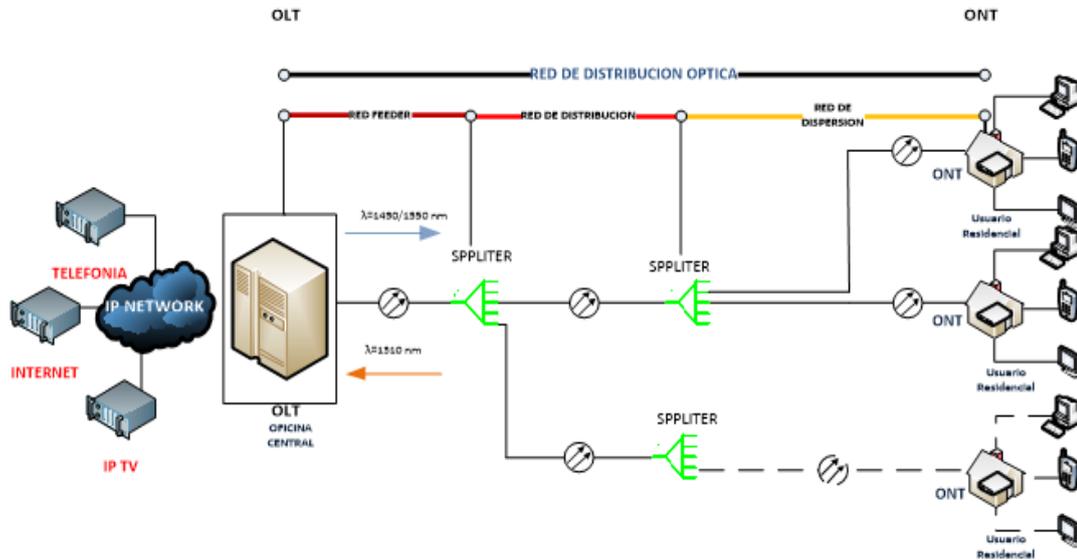


Figura 1. 9: Diagrama de Arquitectura GPON.
Fuente: (Quisnancela & Espinosa, 2016)

En términos de velocidades de transmisión, GPON es asimétrica; ofrece velocidades de bajada (de OLT a la ONU) de 2.488 Gbps, y de subida (de la ONU a OLT) de 1.244 Gbps. En la transmisión descendente se utiliza la multiplexación por división de tiempo (TDM), mientras que en la ascendente se emplea el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA). En GPON, el tiempo de trama (T_{trama}) downstream es:

$$T_{trama} = 125 \mu s$$

El número de bytes (N_{bytes}) para T_{trama} esta dada por:

$$N_{bytes} = \frac{\left(2.488 \times 10^9 \frac{bits}{s}\right) (125 \times 10^{-6} s)}{8 \text{ bits/byte}} = 38875 \text{ bytes}$$

Mientras, que para el canal upstream, la tasa de transmisión es 1.244 Gbps, por lo tanto:

$$N_{bytes} = \frac{\left(1.244 \times 10^9 \frac{bits}{s}\right) (125 \times 10^{-6} s)}{8 \text{ bits/byte}} = 19437.5 \text{ bytes}$$

GPON-WDM divide en diferentes longitudes de onda tanto para transmisiones downstream como upstream, para evitar solapamientos. Este es el desglose típico de longitudes de onda:

- Descendente: 1490 nm
- Ascendente: 1310 nm

- Superposición de vídeo opcional: 1550 nm

La Figura 1.10 muestra cómo se asignan las longitudes de onda en un sistema FTTH. Se puede ver cómo se separan las señales downstream (azul), las upstream (rojo) y las señales de vídeo superpuestas opcionales (amarillo). (Ab-Rahman et al., 2022)

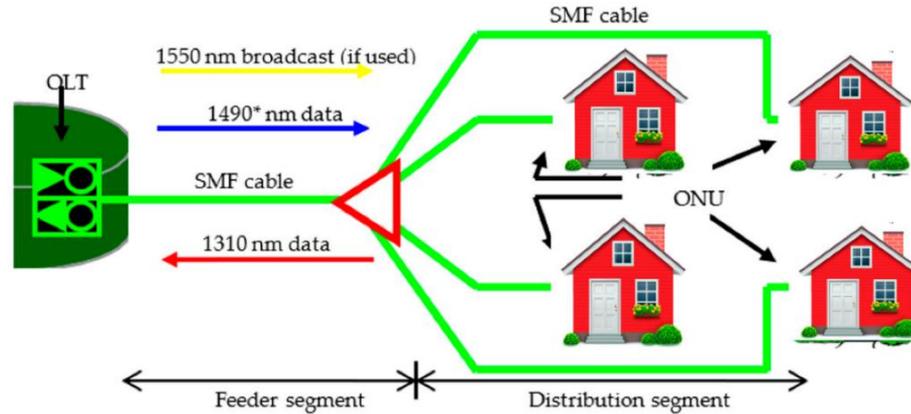


Figura 1. 10: Asignación de longitudes de onda para enlaces descendentes, ascendentes y video (si es el caso).

Fuente: (Ab-Rahman et al., 2022)

Una gran ventaja de GPON es su elevado ratio de división: un solo puerto OLT puede dar servicio a muchas ONU. Las relaciones típicas oscilan entre 1:32 y 1:128, lo que la convierte en una solución eficiente. Sin embargo, el balance de potencia del sistema (básicamente, la pérdida de señal máxima permitida entre la OLT y la ONU) determina hasta dónde puede llegar la señal. A continuación, se presenta la fórmula para calcular el presupuesto óptico:

$$B_P = P_{Tx-OLT}(dBm) - S_{Rx-ONU}(dBm)$$

donde, B_P representa el presupuesto de potencia óptica en dB, P_{Tx-OLT} es la potencia del transmisor (Tx) en la OLT en dBm, y S_{Rx-ONU} es la sensibilidad del receptor en la ONU en dBm.

Además, es importante considerar que (1) la atenuación total en la ODN sea considerada dentro de los cálculos del presupuesto óptico, (2) la longitud de la fibra óptica, así como las pérdidas de inserción en splitters y las pérdidas de conectores, son parámetros que contribuyen a la atenuación. Esta se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A_T = \alpha L + \sum (\text{Pérdida de inserción divisores}) + \sum (\text{Pérdida de conectores})$$

donde, α es el coeficiente de atenuación de la fibra (normalmente 0.3-0.4 dB/km a 1310 nm y 0.2-0.3 dB/km a 1490 nm), y L es la longitud de la fibra en km. Por ejemplo, tomemos como ejemplo un hipotético sistema GPON con estos parámetros:

- Potencia Tx OLT: +3 dBm
- Sensibilidad Rx ONU: -28 dBm
- Longitud de la fibra: 20 km
- Un divisor 1:32 (17 dB de pérdida)
- 4 conectores (0.5 dB de pérdida cada uno)

El presupuesto de potencia sería:

$$B_p = 3 \text{ dBm} - (-28 \text{ dBm}) = 31 \text{ dB}$$

Y la atenuación total es:

$$A_T = \left(0.3 \frac{\text{dB}}{\text{km}}\right) (20 \text{ km}) + 17 \text{ dB} + (4 \times 0.5 \text{ dB}) = 25 \text{ dB}$$

En este caso, el sistema tiene un margen de 6 dB, lo cual es aceptable para una operación fiable (Fernández y Gómez, 2024).

Para una ocupación eficiente del BW en el canal upstream, GPON utiliza método de asignación dinámica de ancho de banda (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA) entre varias ONUs. En otras palabras, DBA ajusta el BW asignado a cada ONU de acuerdo con la demanda de tráfico y según los requerimientos de la calidad de servicio (Quality of Service, QoS) (Sánchez et al., 2023). En la Figura 1.11 se muestra el funcionamiento teórico del algoritmo de DBA, en la que se observa cómo es asignada dinámicamente el BW a diferentes ONUs según las demandas a lo largo del tiempo.

Los estándares GPON siempre evolucionan tecnológicamente por la demanda de más abonados y del incremento de nuevos servicios en la nube. Por eso, los estándares más recientes, como XG-PON (10 Gbps) y NG-PON2 (40 Gbps), disponen de un mayor ancho de banda. Y la mejor parte, es que son compatibles con GPON, lo que facilita su actualización y permite satisfacer la creciente demanda de capacidad (Hernández y Morales, 2023). En la Figura 1.12 se observa la evolución de las redes ópticas pasivas (PON), desde la primera APON hasta la innovadora 100G-EPON, en la que se muestra su creciente capacidad de ancho de banda. (Horvath et al., 2020)

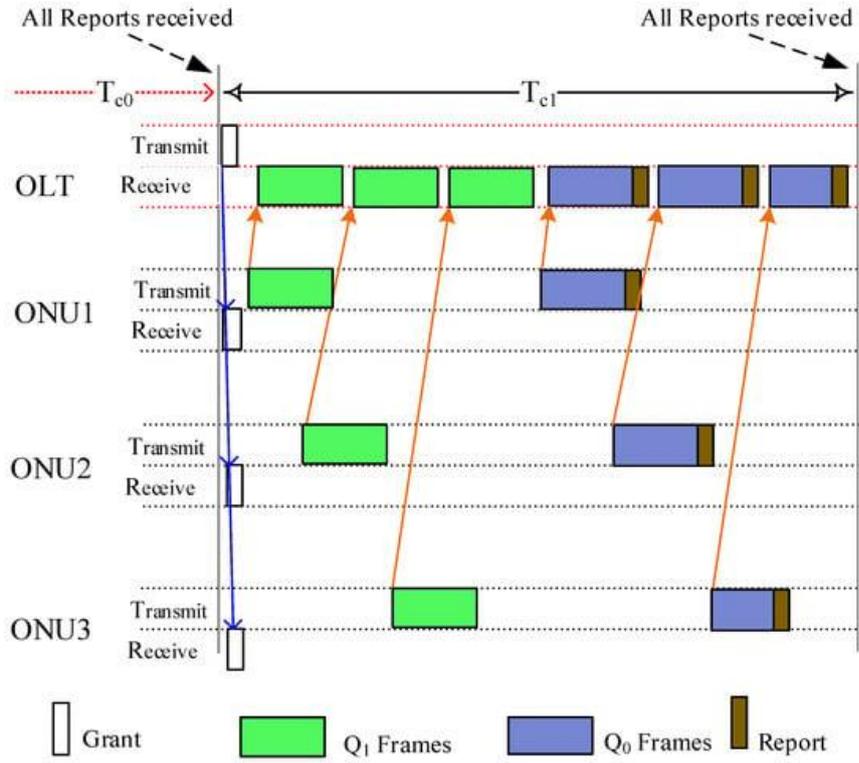


Figura 1. 11: Asignación de ancho de banda en un ciclo DBA.

Fuente: (Mohammed et al., 2024)

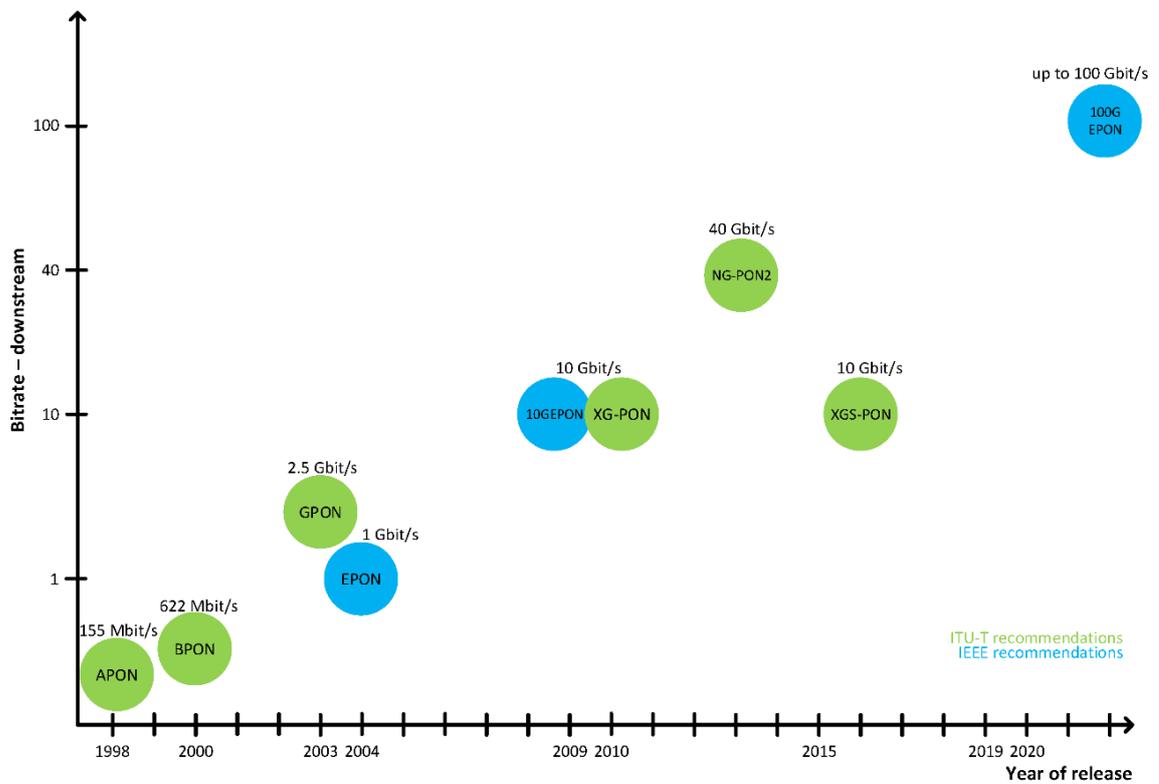


Figura 1. 12: Evolución de las redes ópticas pasivas (PON).

Fuente: (Horvath et al., 2020)

En resumen, GPON es una tecnología robusta y de alto rendimiento que proporciona banda ancha a través de redes de fibra óptica. Por este motivo, es la opción más utilizada para los despliegues de FTTH en todo el mundo. Dado que la demanda de ancho de banda sigue creciendo, la evolución de GPON nos garantiza que seguirá siendo relevante y que estará preparada para el futuro de las redes de acceso óptico. (Martínez y Rodríguez, 2024).

1.2.2. Multiplexación por división de longitud de onda (WDM).

WDM es una tecnología de comunicaciones ópticas basada en la multiplexación por división de longitud de onda (WDM). Esta técnica permite que varias señales ópticas viajen a través de una única fibra asignando a cada una de ellas una longitud de onda láser diferente. Este enfoque permite gestionar la creciente demanda de BW de manera eficiente y sin necesidad de instalar más infraestructura física. (Martínez et al., 2023)

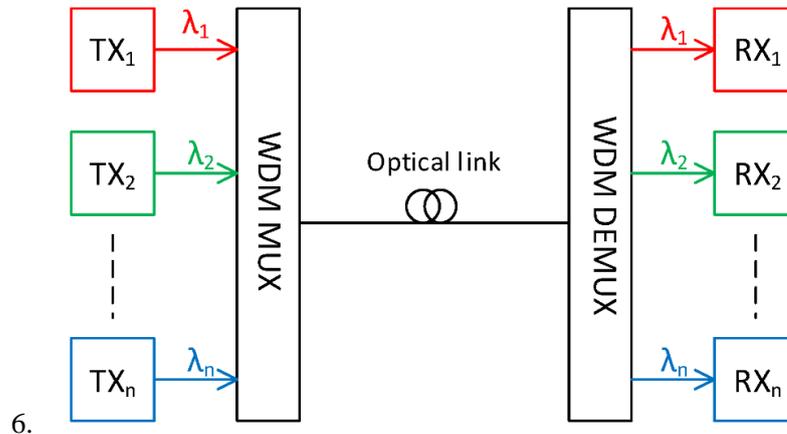
La multiplexación WDM funciona dividiendo la fibra óptica en varios canales independientes, cada uno con una longitud de onda de luz distinta. De este modo, cada canal puede transportar su propio tráfico de datos sin interferencias, lo que maximiza la capacidad de transmisión. Con la siguiente expresión o fórmula matemática, se obtiene la capacidad de transmisión:

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i$$

donde, C_T representa la capacidad total de la fibra óptica, C_i se refiere a la capacidad del canal de longitud de onda i -ésimo, y n es el número de canales de longitud de onda del sistema. En la Figura 1.13 se muestra el principio de funcionamiento básico de la tecnología WDM. En ella se combinan (multiplexan) varias longitudes de onda de luz en una fibra óptica y luego se separan (demultiplexan) en el receptor. Un sistema WDM convencional se compone de los siguiente dispositivos:

1. Transmisores: son dispositivos láser que crean señales ópticas en longitudes de onda diferentes.
2. Multiplexor: es un combinador que mezcla varias longitudes de onda en una sola fibra.
3. Fibra Óptica: es el medio de transmisión por el que viajan las señales.

4. Demultiplexor: separa las longitudes de onda combinadas en señales individuales, ubicado del lado del receptor.
5. Receptores: estos dispositivos detectan las señales ópticas y las convierte en señales eléctricas.



7. Figura 1. 13: Principio de la WDM en una PON.

8. Fuente: (Horvath et al., 2020)

La tecnología WDM se clasifican en:

1. Multiplexación por División de Longitud de Onda Gruesa (CWDM)
2. Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM)

La tecnología CWDM utiliza una mayor separación entre canales -normalmente unos 20 nm- y puede manejar hasta 18 canales dentro de la gama de longitudes de onda de 1270 nm a 1610 nm. La tecnología DWDM, es más avanzado, utiliza un espaciado mucho más estrecho (normalmente 0,8 nm o menos) y admite 40, 80 o incluso más canales dentro de la banda C (1530-1565 nm) y la banda L (1565-1625 nm) (García y López, 2024) (García y López, 2024).

En los sistemas DWDM, el espaciado entre canales está normalizado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), como se indica en ITU-T G.694.1. Mediante esta fórmula se puede calcular la frecuencia de cada canal:

$$f = 193.1 + n \cdot \Delta f$$

donde, f es la frecuencia del canal (en THz), n es el número de canal (puede ser positivo, negativo o cero), y Δf es la separación entre canales (normalmente 50 GHz o 100 GHz). Para hallar la longitud de onda correspondiente, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

donde, λ es la longitud de onda (en nm), c es la velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente 3×10^8 m/s), y f es la frecuencia del canal (en Hz). Para que los sistemas WDM funcionen óptimamente, es necesario mantener una gran potencia de señal y una buena SNR óptica (OSNR). La OSNR puede calcularse mediante esta ecuación:

$$OSNR = \frac{P_{\text{señal}}}{N \cdot B_{\text{ref}}}$$

donde, $P_{\text{señal}}$ representa la potencia óptica de la señal, N es la densidad espectral de potencia del ruido, y B_{ref} es el ancho de banda referencial (normalmente 0.1 nm o 12.5 GHz), Otro problema de los sistemas WDM es la dispersión cromática, que se produce porque las distintas longitudes de onda de la luz viajan por la fibra a velocidades ligeramente diferentes. Esto puede hacer que los pulsos se dispersen en el tiempo. La cantidad de dispersión (D) suele medirse en ps/(nm-km) y puede calcularse con:

$$D = \frac{\Delta t}{L \cdot \Delta \lambda}$$

donde, Δt es el ensanchamiento del pulso (en ps), L es la longitud de la fibra (en km), y $\Delta \lambda$ es el anchura espectral de la fuente de luz (en nm). Para compensar la dispersión cromática, se emplean varias técnicas, incluyendo: (Hussein et al., 2019)

1. Fibras Compensadoras de Dispersión (DCF)
2. Redes de Bragg en Fibra (FBG)
3. Compensación Electrónica de Dispersión (EDC)

La Figura 1.14 muestra la configuración de 3 técnicas DCF, tales como (a) pre-compensación, (b) post-compensación, y (c) compensación simétrica para implementarse en un sistema WDM.

Las tecnologías WDM y redes de transmisión óptica han avanzado enormemente en las últimas décadas hacia una infraestructura de red de gran capacidad, alto rendimiento y flexibilidad. Últimamente han surgido muchas tecnologías y conceptos de red nuevos. A futuro, la demanda de ancho banda a nivel mundial sigue evolucionando exponencialmente, impulsada por tecnologías 5G, el IoT y la computación en la nube. Unas infraestructuras y servicios en la nube fiables y de alto rendimiento son elementos

que facilitan el desarrollo del IoT y las infraestructuras en ciudades inteligentes. Los emocionantes avances en áreas como los formatos de modulación avanzados, las técnicas de mitigación no lineal y las arquitecturas de red flexibles mantienen a WDM a la vanguardia de la tecnología de comunicación óptica y garantizan su relevancia en los próximos años (Rodríguez et al., 2023).

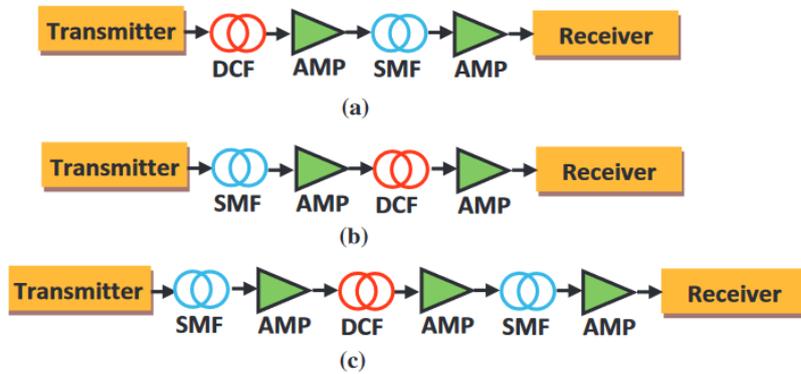


Figura 1. 14: Técnicas (a) pre-compensación, (b) post-compensación, y (c) compensación simétrica.

Fuente: (Sarangal et al., 2019)

1.3. Métodos de modulación en sistemas de comunicaciones ópticas

Las tecnologías de transmisión óptica han transformado la manera en que compartimos y procesamos información. Con anchos de banda sin precedentes y la posibilidad de transmitir datos a grandes distancias con una pérdida mínima, lo que los convierte en la piedra angular de las comunicaciones modernas. El mecanismo que los hace eficaces reside en las técnicas avanzadas de modulación, que resultan fundamentales para mejorar la eficiencia y la capacidad de las redes ópticas (Winzer & Essiambre, 2006).

¿Qué es la modulación en las comunicaciones ópticas? Se trata de codificar datos en una onda portadora óptica. Para ello, se modifican ciertas propiedades de la onda luminosa, como su amplitud, fase, frecuencia o polarización. La elección del formato de modulación influye directamente en el rendimiento del sistema, ya que afecta a aspectos como la cantidad de datos que se pueden empaquetar en un solo canal (eficiencia espectral), la distancia que puede recorrer la señal sin degradarse y su resistencia al ruido o las interferencias (Kikuchi, 2016).

En sus inicios, los sistemas de comunicación óptica utilizaban la modulación On-Off Keying (OOK), un método básico de modulación que funciona encendiendo y apagando la señal luminosa para representar los datos. Con el aumento en la demanda de mayores

velocidades de transmisión y una mayor eficiencia espectral, se desarrollaron técnicas de modulación más avanzadas. La Figura 1.15 ilustra como han evolucionado los formatos de modulación y su adaptación para satisfacer las necesidades de redes ópticas cada vez más complejas.

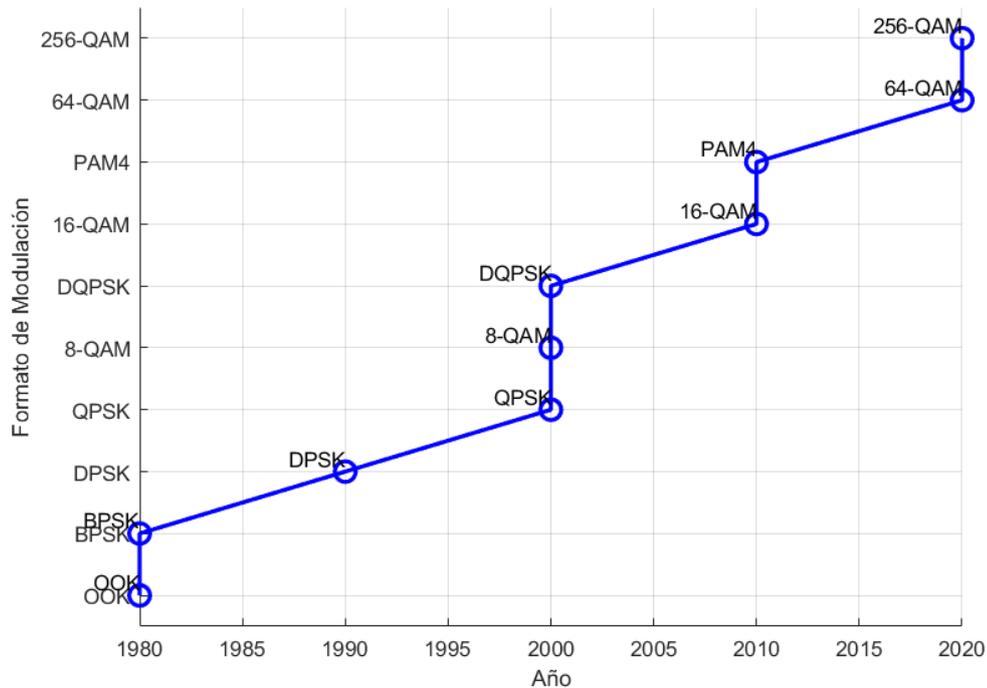


Figura 1. 15: Evolución histórica de los formatos de modulación digital.

Fuente: Elaboración propia

Existen otros formatos avanzados categorizados ampliamente en formatos de modulación de (a) intensidad y (b) coherente (Ip et al., 2008). Los formatos de modulación de intensidad, como la modulación de amplitud de pulso (Pulse-Amplitude Modulation, PAM), codifican principalmente la información en la amplitud de la señal óptica. Algunos formatos de modulación son relativamente sencillos de implementar, pero no son suficientes para afrontar la eficiencia espectral, así como la dispersión cromática y del modo de polarización (Olsson et al., 2018).

Por otra parte, las técnicas de modulación coherente mejoran significativamente el rendimiento debido a que utilizan la amplitud, así como la fase de la portadora en la codificación de los datos. Por ejemplo, las técnicas de modulación PSK y QAM no solamente ofrecen una mayor eficiencia espectral, sino que también muestran una mayor resistencia a las degradaciones que ocurren durante la transmisión de información. Con la llegada de receptores coherentes, ha permitido que dichas técnicas de modulación sean

muy prácticas para las redes de acceso óptico avanzadas de alta capacidad y gran alcance (Savory, 2010).

Seleccionar la técnica de modulación óptima es una decisión no tan sencilla de tomar, ya que esta influenciada por factores, tales como, la velocidad de transmisión de datos requerida, el alcance del enlace, el BW disponible y la complejidad del sistema. Además, hay que considerar que para la técnicas de modulación de orden superior permiten codificar más bits por símbolo, logrando incrementar la eficiencia espectral. Sin embargo, estos esquemas de modulación son más susceptibles al ruido, por lo que requieren una OSNR más alta que permita mantener una BER en niveles aceptables (Zhuge et al., 2012).

1.3.1. Técnica de modulación por desplazamiento de fase (PSK)

La modulación PSK es un método de modulación coherente que codifica los datos mediante la variación de la señal portadora óptica. A diferencia de otros métodos, la amplitud de la portadora permanece constante, mientras que su fase cambia para representar cada símbolo. Esta característica hace que PSK sea una técnica ideal para las comunicaciones ópticas, ya que mejora la eficiencia espectral y ofrece una mayor robustez en comparación con las técnicas de modulación basadas en intensidad (Proakis & Salehi, 2008).

El método más sencillo de PSK es la modulación binaria por desplazamiento de fase (BPSK). En esta técnica, sólo se utilizan dos estados de fase para representar datos binarios: un desplazamiento de fase de 0° significa '0', mientras que un desplazamiento de 180° significa '1'. En la Figura 1.16(a) se muestra el funcionamiento. BPSK transmite 1 bit por símbolo, lo que ofrece una mejor inmunidad al ruido que el método OOK, pero no mejora la eficiencia espectral (Seimetz, 2009).

Para mejorar la eficiencia espectral, se han desarrollado técnicas de modulación PSK más avanzadas, por ejemplo, la modulación PSK en cuadratura (QPSK) o también conocido como 4-PSK. La técnica QPSK utiliza cuatro estados de fase 0° , 90° , 180° y 270° para codificar 2 bits por símbolo (véase la Figura 1.16(b)). A través de este método se logra duplicar la eficiencia espectral de BPSK, pero con un diseño e implementación sencilla. Por este motivo, QPSK es el método más utilizado en las comunicaciones ópticas

coherentes, ya que proporciona un equilibrio óptimo entre rendimiento y complejidad (Ip et al., 2008).

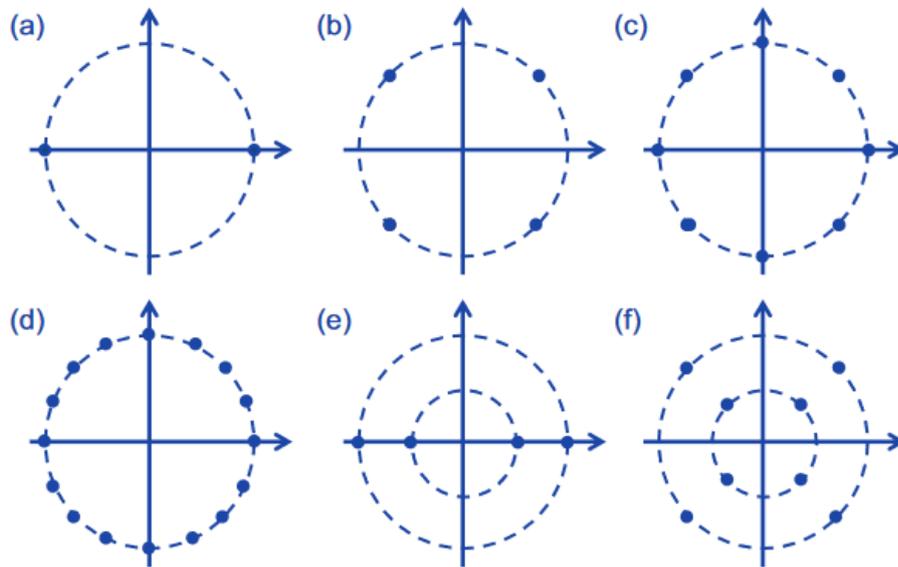


Figura 1. 16: Diagramas de constelación de los formatos de modulación (a) 2-PSK, (b) 4-PSK, (c) 8-PSK, (d) 16-PSK, (e) A2-PSK, y (f) A4PSK.

Fuente: (You & Panoiu, 2017)

Los formatos PSK de orden superior llevan este concepto aún más lejos. Por ejemplo, 8-PSK (véase la Figura 1.16(c)) utiliza ocho estados de fase para codificar 3 bits por símbolo; y 16-PSK (véase la Figura 1.16(d)) utiliza dieciséis estados de fase para codificar 4 bits por símbolo. Y la tendencia continúa con formatos aún más avanzados. Aunque estos formatos de orden superior ofrecen una mayor eficiencia espectral, también tienen un inconveniente: son menos tolerantes al ruido. A medida que aumenta el número de estados de fase, la separación angular entre símbolos se reduce, lo que hace que la señal sea más sensible al ruido de fase y a otras deficiencias (Kikuchi, 2016).

En las comunicaciones ópticas, la implementación de la modulación PSK requiere detección coherente en el receptor. Esto implica mezclar la señal recibida con un oscilador local y detectar el patrón de interferencia resultante. El advenimiento de los receptores coherentes digitales ha facilitado en gran medida el uso de PSK en sistemas ópticos al permitir técnicas de procesamiento de señales digitales (Digital Signal Processing, DSP) para compensar varios deterioros de transmisión (Savory, 2010).

Una de las principales ventajas de PSK en comunicaciones ópticas es que mantiene constante la amplitud de la señal. Esta característica hace que sea mucho menos

susceptible a las no linealidades de la fibra en comparación con los formatos de modulación que se basan en variaciones de amplitud. En los sistemas de larga distancia, donde los efectos no lineales pueden perjudicar seriamente la calidad de la señal, esta propiedad convierte a PSK en la mejor opción (Winzer & Essiambre, 2006).

Pero sin olvidarnos de los inconvenientes. Uno de los mayores problemas de PSK es la ambigüedad de fase en el receptor. Sin información adicional, es difícil averiguar la fase exacta de la señal recibida. Para solucionar este problema, un ingeniero suele recurrir a la codificación diferencial o utilizar secuencias de entrenamiento y símbolos piloto para resolver la ambigüedad (Seimetz, 2009).

Otro problema a tener en cuenta es el ruido de fase del láser. En los sistemas ópticos, uno de los problemas es la calidad de la fuente láser. Puesto que el láser tiene un ancho de línea finito, este introduce ruido de fase, el cual genera errores, en especial en las técnicas PSK de orden superior. Se han desarrollado técnicas de estimación de fase y algoritmos diseñados para minimizar el impacto del ruido de fase en el rendimiento de las redes de acceso óptico (Ip & Kahn, 2007).

En este caso, el formato PSK elegido dependerá de las necesidades del sistema, como la velocidad de datos deseada, la distancia de transmisión y la relación señal/ruido óptica (OSNR, Optical Signal-to-Noise Ratio) disponible (Winzer, 2010). BPSK y QPSK, por ejemplo, son ideales para transmisiones de larga distancia porque son robustos y pueden soportar los retos de los trayectos de largo alcance. En cambio, los formatos PSK de orden superior son mejores para sistemas de corto alcance en los que la eficiencia espectral es prioritaria (Zhuge et al., 2012).

1.3.2. Técnica de modulación de amplitud en cuadratura (QAM)

QAM es un formato de modulación avanzado e importante en redes de comunicaciones ópticas. Es una tecnología muy utilizada porque mejora la eficacia espectral y la velocidad de transmisión de datos. Esta técnica, denominada QAM, es la combinación de las técnicas de modulaciones AM y PSK para codificar información tanto en la amplitud como en la fase de la señal portadora, utilizando dos portadoras ortogonales (en fase y en cuadratura) para transmitir datos (Seimetz, 2009).

El principio fundamental de QAM reside en su diagrama de constelación, donde cada punto representa una combinación única de amplitud y fase, correspondiente a un símbolo específico. El número de puntos en la constelación determina el orden de QAM, típicamente expresado como M-QAM, donde M es el número de símbolos distintos. Las implementaciones comunes incluyen 4-QAM (equivalente a QPSK), 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM (ver Figura 1.17) (Winzer & Essiambre, 2006).

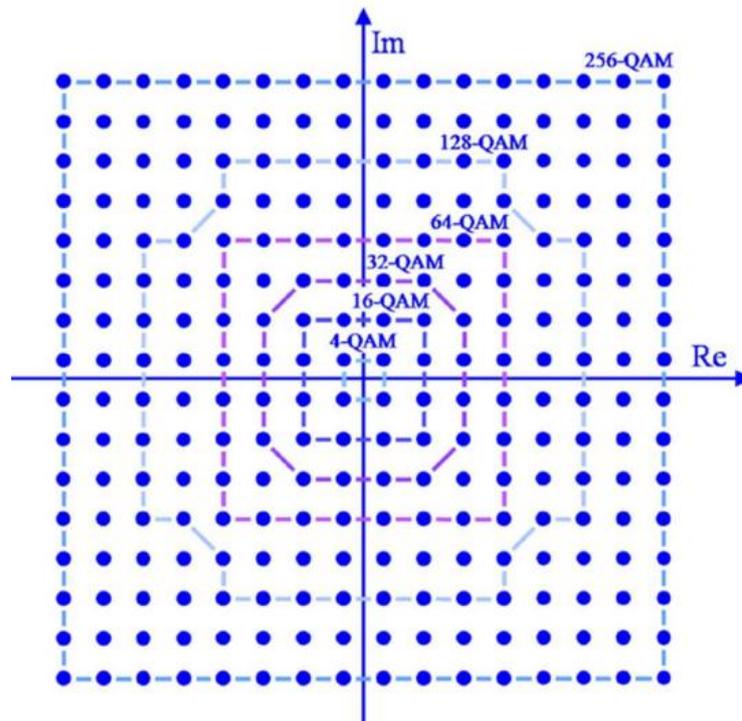


Figura 1. 17: Diagramas de constelación M-QAM cuadrada.

Fuente: (Riadi et al., 2021)

En las comunicaciones ópticas, la implementación de QAM requiere técnicas de detección coherente. El advenimiento de los receptores coherentes digitales ha sido fundamental para permitir el uso práctico de QAM en sistemas ópticos. Estos receptores mezclan la señal óptica entrante con un oscilador local y emplean algoritmos de DSP para recuperar los datos transmitidos, compensando diversos deterioros del canal (Savory, 2010).

Otra ventaja importante de QAM en redes ópticas pasivas (PON) es su eficiencia espectral en comparación con otras técnicas de modulación. Por ejemplo, la técnica de modulación 16-QAM codifica 4 bits por símbolo, duplicando la eficiencia espectral de la modulación QPSK. Este mejoramiento permite tener tasas de datos más altas con el mismo ancho de

banda, para lo cual QAM es una modulación digital atractiva para sistemas con limitaciones de capacidad (Kikuchi, 2016).

Por otra parte, el rendimiento espectral mejorado que ofrece la modulación QAM de orden superior tiene como desventaja una mayor sensibilidad al ruido y a las perturbaciones del canal. A medida que aumentan los puntos de constelación de QAM de orden superior se vuelven más densamente empaquetados, el sistema necesita de una mayor SNR para mantener las BER aceptables. Esta relación entre eficiencia espectral y robustez es un parámetro crítico en el diseño del sistema de comunicación óptica (Ip et al., 2008).

Con el despliegue de la modulación QAM en una GPON-WDM se presentan inconvenientes a considerar, por ejemplo, su naturaleza no lineal en la fibra óptica, con lo que se distorsiona la señal, siempre que la potencia en el transmisor sea muy alta. Por ese motivo, los puntos del diagrama de constelación en QAM se dispersan (Mizuochi, 2006). Aunque, otros métodos de modulación, como automodulación de fase (SPM) y la modulación de fase cruzada (XPM) aumentan la probabilidad de errores de símbolo (Essiambre et al., 2010).

La multiplexación por polarización se emplea a menudo en conjunto con QAM para aumentar aún más la eficiencia espectral. En QAM multiplexado por polarización (PM-QAM), dos señales QAM independientes se transmiten en estados de polarización ortogonales de la luz, duplicando efectivamente la tasa de datos. PM-16QAM, por ejemplo, se ha convertido en un formato estándar para sistemas de transmisión óptica de 400 Gbps y 800 Gbps (Zhang et al., 2017).

Para elegir el orden de la modulación QAM, esto depende de varios factores, tales como, la velocidad de los datos, del alcance del enlace de transmisión y de la OSNR. Los esquemas de modulación en QAM, por ejemplo, la modulación 16-QAM (orden inferior) es la más utilizada en transmisiones de larga distancia porque tiene mayor tolerancia al ruido, lo que no sucede con los esquemas de modulación de orden superior, como 64-QAM o 256-QAM que son recomendadas para transmisiones de corto alcance debido a que tienen una mayor eficiencia espectral (Zhuge et al., 2012).

Estudios recientes sobre la modulación QAM en comunicaciones ópticas indican que es necesario incrementar el orden de modulación y la búsqueda de formatos híbridos. De

hecho, Chen et al., (2019), demostraron en pruebas de laboratorio que la modulación 1024-QAM produce una eficiencia espectral muy alta, pero con un nivel de OSNR alto. Por ejemplo, el formato de modulación híbrido, como 8QAM-QPSK, pretende aprovechar las ventajas de los diferentes órdenes de modulación en una sola transmisión (Kojima et al., 2017).

En conclusión, QAM es un formato de modulación versátil y eficiente para las comunicaciones ópticas, permitiendo un aumento significativo en la eficiencia espectral y las tasas de datos. Si bien persisten los desafíos, particularmente en términos de tolerancia no lineal y complejidad de implementación, la investigación en curso y los avances tecnológicos continúan expandiendo las posibilidades de QAM para satisfacer las crecientes demandas del tráfico de datos global.

1.4. Características, principios de funcionamiento y aplicaciones de los sistemas de transmisión óptica

Los sistemas de transmisión óptica han transformado las comunicaciones a nivel mundial al permitir un ancho de banda por encima de los anteriores, con una latencia mínima y una transmisión de datos segura a larga distancia. Estos sistemas se basan en las propiedades de la luz que viaja a través de fibras ópticas para transferir una gran cantidad de información a grandes distancias (Agrawal, 2019).

Características:

Una de las características que identifican a los sistemas de transmisión óptica es por su capacidad de ancho de banda superior. De hecho, con una sola fibra óptica se pueden transmitir varios Terabits por segundo, lo que supera ampliamente los límites de los sistemas de transmisión de datos tradicionales (Winzer et al., 2018). Este rendimiento se debe a la reducida pérdida de señal, a una dispersión mínima y a la capacidad de utilizar la tecnología WDM.

Las fibras ópticas se destacan sobre todo por su atenuación relativamente baja, con un promedio de solo 0.2 dB/km a una longitud de onda de 1550 nm . Esta pérdida mínima de señal permite que los datos viajen a grandes distancias sin necesidad de regenerar la señal frecuentemente (Chesnoy, 2015). Esto, en combinación con técnicas avanzadas de

amplificación, por ejemplo, el amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA), permite transmitir datos transoceánicos con una regeneración mínima.

Otra ventaja de las fibras ópticas es la baja sensibilidad a las interferencias electromagnéticas, lo cual las hace ideales para aplicaciones con mucho ruido eléctrico. Por otra parte, su diseño ligero y compacto, en comparación con los cables de cobre, resulta muy ventajoso desde el punto de vista de la instalación y el mantenimiento (Hui & O'Sullivan, 2009).

Principios de Funcionamiento:

El principio de funcionamiento de los sistemas de transmisión óptica consiste en convertir las señales eléctricas en ópticas, transmitir las a través de fibras ópticas y reconvertirlas en señales eléctricas en el receptor.

En el transmisor, los datos se codifican y se envían a un transmisor LED o láser. Este transmisor se combina con algún esquema de modulación, ya sea QAM o PSK. A continuación, la señal de luz modulada se inyecta en la fibra óptica. Durante la transmisión, la luz experimenta diversas formas de degradación, como atenuación, dispersión cromática y efectos no lineales (Kikuchi, 2016).

Por este motivo, los sistemas de comunicaciones ópticas, como GPON-WDM emplean una serie de técnicas, como amplificadores, fibras compensadoras, entre otras para afrontar los desafíos técnicos. Por ejemplo, los amplificadores como los EDFA incrementan la potencia de la señal a lo largo del trayecto de transmisión. La dispersión cromática, por la cual se ensanchan los impulsos, es atenuada mediante fibras compensadoras de dispersión o procesamiento digital de señales (DSP) (Savory, 2010).

En el lado del receptor, las técnicas de detección coherente ganan protagonismo, sobre todo en los sistemas de alta velocidad y larga distancia. Estos receptores mezclan la señal óptica emitida junto con un oscilador local, con lo que se recupera la información tanto de la amplitud como de la fase. A continuación, se aplica el procesamiento digital de señales (DSP) para compensar las perturbaciones del canal y reconstruir los datos transmitidos (Ip et al., 2008).

La multiplexación WDM se ha convertido en la principal tecnología de los sistemas ópticos. Esta técnica transmite múltiples señales ópticas, cada una a una longitud de onda

diferente, a través de una fibra óptica. De este modo, aumenta notablemente la capacidad de transmisión del sistema sin necesidad de infraestructuras físicas adicionales (Sveningsson, 2020). Los sistemas de transmisión óptica se utilizan en un amplio espectro que va desde los cables submarinos intercontinentales hasta las redes de fibra hasta el hogar (FTTH) de última milla.

En el caso de las conexiones submarinas y de larga distancia, la transmisión óptica es la columna vertebral de la conectividad mundial a Internet. Estos dispositivos se basan en técnicas avanzadas de transmisión coherente, robustas técnicas de corrección de errores y sofisticados equipos terminales de líneas submarinas (SLTE) para ofrecer capacidades de varios terabits a miles de kilómetros (Pilipetskii et al., 2020).

Las redes metropolitanas y locales también dependen de la transmisión óptica para la interconexión de centros de datos, empresas y sistemas de backhaul móvil. Estas redes utilizan multiplexores ópticos de adición/descarga reconfigurables (ROADM) para facilitar un direccionamiento flexible de las longitudes de onda y una gestión eficiente de la red (Gringeri et al., 2010).

En las redes de acceso, por ejemplo, las redes ópticas pasivas (PON) llevan la conectividad de fibra directamente a los hogares y empresas. Las normas más recientes, como XGS-PON y NG-PON2, están permitiendo alcanzar velocidades de acceso a la fibra de 10 Gbps y más, con lo que se satisface la creciente demanda de ancho de banda de los usuarios residenciales y las pequeñas empresas (Effenberger, 2016).

Otra área de aplicación es la de las interconexiones de centros de datos (DCI). El intercambio masivo de datos entre centros de datos geográficamente dispersos requiere enlaces ópticos de alta capacidad y baja latencia. Estos sistemas suelen utilizar transceptores ópticos enlazables y tecnologías coherentes de corto alcance para optimizar la densidad del ancho de banda e incrementar la eficiencia energética (Zhong et al., 2018).

Los sistemas de transmisión óptica también se utilizan en campos especializados. Entre sus aplicaciones se encuentran desde las tecnologías de radio por fibra para comunicaciones móviles hasta la detección óptica para monitorización medioambiental y estructural, así como la distribución de claves cuánticas en protocolos de comunicación seguros (Xie et al., 2018).

Por último, estos sistemas de transmisión óptica, que se caracterizan por su gran ancho de banda, bajas pérdidas y gran capacidad de adaptación, están basados en técnicas avanzadas de modulación, detección coherente y multiplexación por división de longitudes de onda. Estos sistemas cumplen una función importante en todo el espectro de las telecomunicaciones modernas, desde las redes submarinas mundiales hasta las conexiones residenciales de fibra, y constituyen un componente importante de un mundo cada vez más interconectado.

...

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Contexto de la investigación

Este estudio se llevará a cabo en la empresa de telecomunicaciones CNT EP, concretamente dentro del rol de Jefe Integral de Zona. Este escenario es pertinente ya que proporciona acceso a la información y recursos necesarios para la investigación, a la vez que facilita la interactividad con los empleados y responsables involucrados en el sistema de transmisión óptica GPON-WDM.



Figura 2. 1: Ubicación Geográfica Área de Estudio CNT EP.

Fuente: Elaboración propia

2.2. Diseño y alcance de la investigación

Este trabajo de investigación se basa en un diseño experimental que incluye el análisis y la realización de pruebas de rendimiento controladas sobre un sistema de transmisión óptica GPON-WDM. Las variables de análisis son: la BER, el factor Q y la SNR, parámetros necesarios para evaluar la eficiencia y la calidad de transmisión del sistema. Las técnicas de modulación que se evalúan son los formatos PSK y QAM, y el análisis del impacto de cada uno de ellos en los parámetros de rendimiento en función de las condiciones de transmisión. Este estudio es a la vez analítico y explicativo. Se pretende proporcionar una visión completa de cómo las técnicas de modulación influyen en el

rendimiento del sistema, y al mismo tiempo determinar las relaciones entre las variables evaluadas.

2.3. Tipo y métodos de investigación

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo, puesto que los datos numéricos obtenidos se evaluarán estadísticamente para extraer conclusiones sobre el rendimiento del sistema de transmisión óptica. La metodología de investigación se basa en un esquema hipotético-deductivo, que parte de la formulación de hipótesis definidas previamente. A partir de ellas, la investigación se orienta hacia el diseño de experimentos y la recogida de datos, que permitirán validar o refutar las hipótesis propuestas.

En resumen, esta investigación de tipo experimental desarrollada en CNT EP y en el puesto de Jefe de Zona, está basada en un diseño empírico, con un alcance analítico y explicativo, mediante un enfoque cuantitativo y un método hipotético-deductivo. Su finalidad es evaluar las prestaciones técnicas de sistema de transmisión óptica GPON-WDM utilizando diferentes esquemas de modulación PSK y QAM.

2.4. Introducción

En el presente capítulo se aborda el diseño y la evaluación del rendimiento de GPON-WDM utilizando las técnicas de modulación PSK y QAM. El análisis se enfoca en los parámetros, tales como, eficiencia espectral, capacidad de transmisión y calidad de la señal. A través de simulaciones realizadas en Python con la librería de comunicaciones ópticas “OptiCommPy” se evalúan las métricas, como SNR, factor Q y BER. Los resultados de este análisis, nos permitirá identificar qué método de modulación ofrece un mejor desempeño en GPON-WDM.

2.5. Implementación de Simulaciones en Python

2.5.1. Descripción de los algoritmos de simulación

En este trabajo de tesis, se ha utilizado OptiCommPy, una librería desarrollada en Python que ha sido creada específicamente para simular sistemas de comunicaciones ópticas, como GPON-WDM. OptiCommPy es una herramienta modular (modela componentes de

una GPON) que permiten modelar con precisión la transmisión de señales, técnicas de modulación, la propagación a través de la fibra y los efectos del ruido en GPON-WDM. Entre las características más relevantes de OptiCommPy destaca su capacidad para simular diversas técnicas de modulación, tales como BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM, que han sido consideradas para la ejecución y evaluación de este proyecto.

Además, la biblioteca de OptiCommPy dispone de herramientas avanzadas para el modelamiento de fenómenos que afectan a las señales ópticas, por ejemplo, la dispersión, atenuación y efectos no lineales presente en las fibras ópticas. Asimismo, el software permite incorporar ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN), lo que hace posible simulaciones con mayor precisión al considerar perturbaciones que son propias del canal óptico. Por lo tanto, esto convierte a OptiCommPy en una herramienta poderosa para análisis más reales en sistemas GPON-WDM.

La biblioteca también incluye un potente conjunto de herramientas analíticas que permiten la medición de los parámetros de rendimiento, como la BER, SNR y factor Q de las señales recibidas en el receptor. Estas funcionalidades son fundamentales para evaluar y optimizar el rendimiento de los sistemas GPON-WDM, lo que confirma a OptiCommPy como un recurso de análisis de redes de acceso óptico indispensable.

Como se muestra en la Figura 2.2, OptiCommPy tiene una estructura modular y se organiza en un paquete principal denominado `optic`, que está dividido en 5 subpaquetes: `comm`, `models`, `dsp`, `utils` y `plot`.

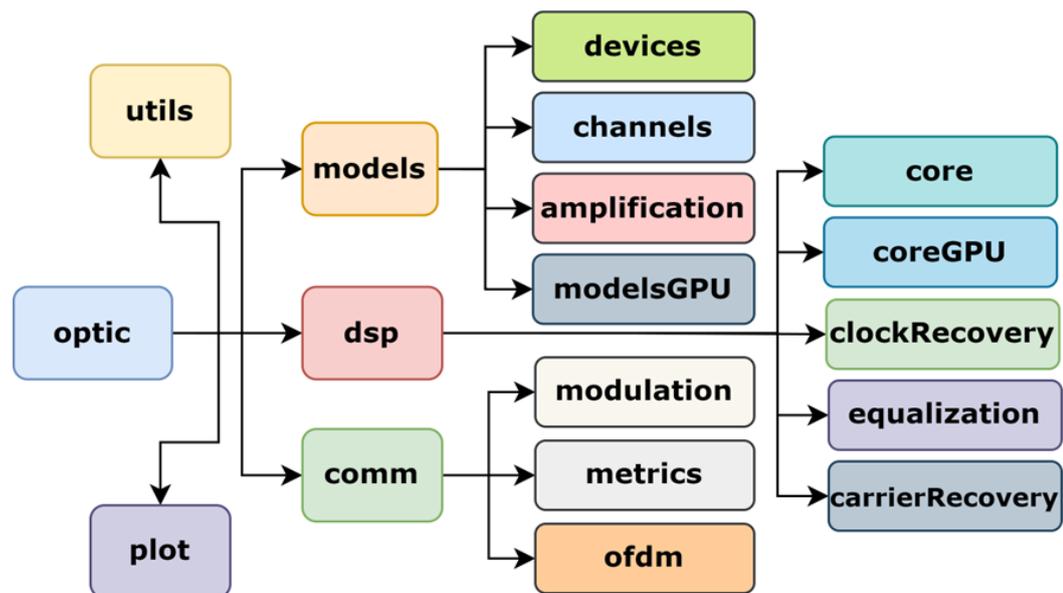


Figura 2. 2: Estructura de los módulos del paquete OptiCommPy.

Fuente: (Da Silva & Herbster, 2024)

2.5.2. Modelo de Red GPON-WDM

La Figura 2.3 muestra el esquema de transmisión óptica GPON-WDM usado en este trabajo se basa en la simulación del multiplexado por división de longitud de onda (WDM) sobre una red óptica pasiva Gigabit (GPON). Con esta arquitectura se simula la red de distribución con divisores ópticos y diferentes dispositivos de usuario final. También se utiliza un emisor continuo de luz para el envío de las señales a través de las fibras ópticas, considerando los efectos tanto de las pérdidas ópticas como de la dispersión cromática y la no linealidad de las fibras.

En esta sección, se simuló inicialmente el funcionamiento de un sistema GPON basado en WDM (GPON-WDM) básico que permite demostrar cómo son asignadas las longitudes de onda en la red a múltiples usuarios. Así, por ejemplo, GPON-WDM asignan longitudes de onda (canales) diferentes a cada usuario, de modo que los usuarios pueden compartir simultáneamente el mismo medio físico (fibra óptica). Este método consigue que la red aumente su ancho de banda manteniendo una infraestructura de bajo coste.

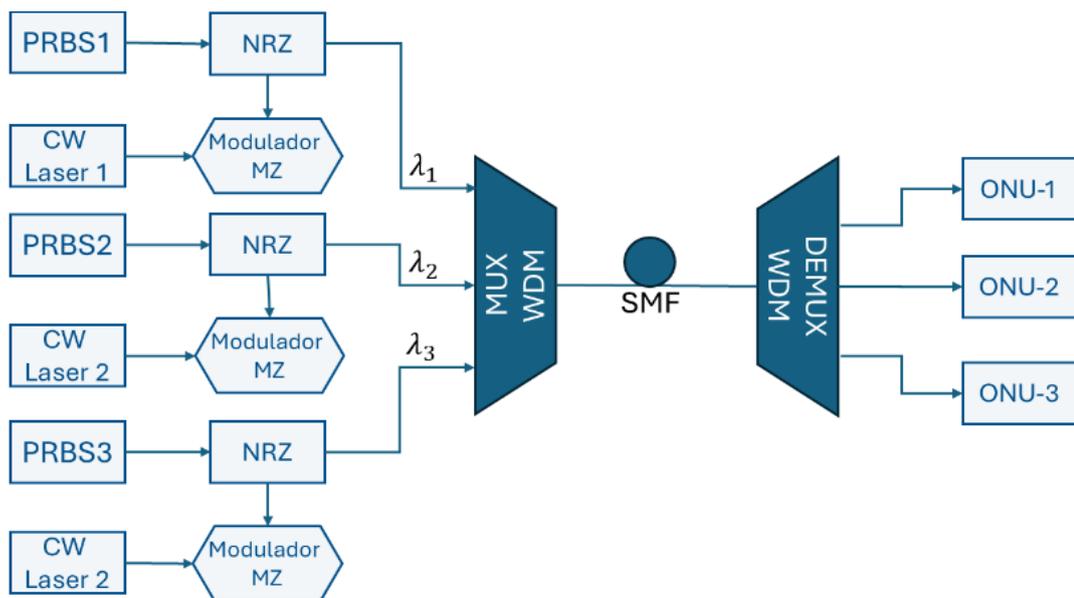


Figura 2. 3: Diagrama de bloques del sistema GPON basado en WDM.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.4 se presenta el algoritmo de simulación usado con la biblioteca OptiCommPy para la simulación del sistema GPON basado en la multiplexación WDM. Este algoritmo nos permite analizar el rendimiento de las técnicas de modulación BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Además, en él se simula la propagación de señales ópticas a través de la fibra, teniendo en consideración dos factores, tales como, atenuación y

dispersión. Para evaluar la eficacia de cada técnica de modulación, se analizaron las métricas de rendimiento, como la BER y factor Q.

Algorithm 1 Simulación del Rendimiento de GPON-WDM utilizando OptiCommPy

- 1: **Inicialización de Parámetros del Sistema:**
- 2: Definir la tasa de bits (*bit_rate*), longitud de la fibra (*fiber_length*), potencia de transmisión (*tx_power*)
- 3: Definir los 8 canales WDM con longitudes de onda entre 1550 nm y 1620 nm
- 4: Seleccionar formatos de modulación: **BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM**
- 5: Generar secuencia de bits aleatoria para transmisión (*data_sequence*)
- 6: **Simulación para Cada Formato de Modulación:** formato de modulación en {BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM}
- 7: **Modulación de la Señal:**
- 8: Utilizar `opticommpy.modulate()` para aplicar el formato seleccionado a la secuencia de bits
- 9: *señal_modulada* \leftarrow `opticommpy.modulate(data_sequence, modulation_type)`
- 10: **Transmisión a través de la Fibra Óptica:**
- 11: Simular la propagación a través de la fibra utilizando la función de transmisión de fibra óptica de OptiCommPy
- 12: Aplicar atenuación y dispersión cromática:
- 13: *señal_propagada* \leftarrow `opticommpy.fiber.transmission(señal_modulada, fiber_length)`
- 14: **Canal con Ruido: Agregar AWGN:**
- 15: Añadir Ruido Gaussiano Aditivo (AWGN) utilizando la función de canal de OptiCommPy
- 16: *señal_con_ruido* \leftarrow `opticommpy.add_awgn(señal_propagada, snr)`
- 17: **Nota:** El ruido simula las imperfecciones del canal y degradación de la señal
- 18: **Recepción y Demodulación:**
- 19: Demodular la señal utilizando `opticommpy.demodulate()`
- 20: *bits_recibidos* \leftarrow `opticommpy.demodulate(señal_con_ruido, modulation_type)`
- 21: **Cálculo de Métricas de Rendimiento:**
- 22: **Tasa de Error de Bits (BER):** Calcular utilizando `opticommpy.ber()`
- 23: *BER* \leftarrow `opticommpy.ber(data_sequence, bits_recibidos)`
- 24: **Factor Q:** Calcular utilizando la relación señal-ruido en el receptor
- 25: *Factor Q* \leftarrow `opticommpy.q_factor(señal_con_ruido)`
- 26: **Evaluación del Rendimiento:**
- 27: **if** BER \leq umbral predefinido **then**
- 28: El formato de modulación es **aceptable**
- 29: **else**
- 30: El formato de modulación es **no aceptable**
- 31: **end if**
- 32:
- 33: **Presentación de Resultados:** formato de modulación en {BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM}
- 34: Mostrar los valores de **BER** y **Factor Q** para cada canal WDM
- 35:

Figura 2. 4: Algoritmo de simulación del rendimiento de GPON basado en WDM con diferentes formatos de modulación utilizando la librería OptiCommPy.

Fuente: Elaboración propia

Para empezar esta simulación, hay que establecer el número de usuarios, así como la longitud de onda de base y los canales de separación en nanómetros (nm). Los canales de

longitud de onda se asignan a cada usuario. La separación o espaciado entre las longitudes de onda es de 10 nm a intervalos regulares, empezando por 1550 nm. Por ejemplo, para el primer canal se asigna 1550 nm, para el segundo 1560 nm, y así sucesivamente. De esta manera, se asegura que cada usuario tenga un canal de comunicación independiente y así reducir las interferencias entre usuarios. Después, se generó una secuencia aleatoria de bits para simular los datos que se transmiten por la red.

Además, permite evaluar el rendimiento de un sistema GPON-WDM con diferentes esquemas de modulación. Con ayuda de la biblioteca OptiCommPy, se modelizan las principales características de los sistemas de comunicaciones ópticas, tales como la modulación, transmisión por fibra e interferencia de ruido. Una vez obtenidos los datos de estas simulaciones, es posible seleccionar el formato de modulación más eficiente en función de la BER y el factor Q, con lo que es posible mejorar el rendimiento de los sistemas GPON en aplicaciones reales.

La figura 2.5 muestra la distribución de longitudes de onda entre los usuarios del sistema GPON-WDM.

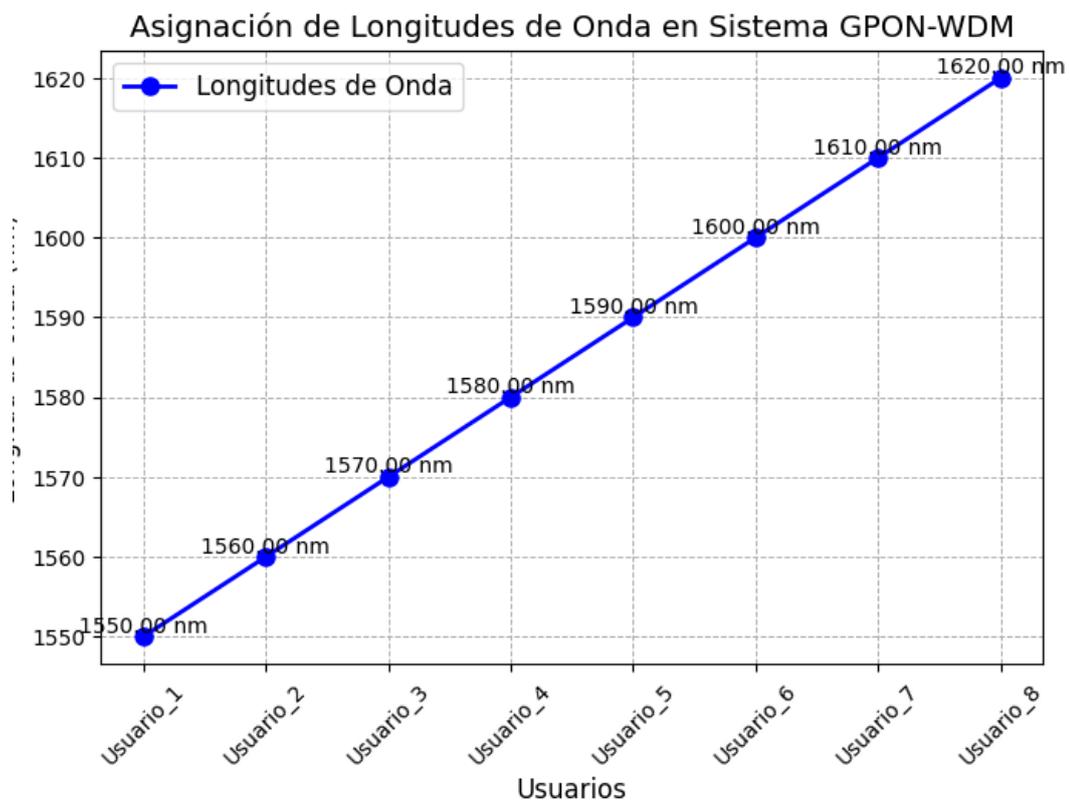


Figura 2. 5: Asignación de longitudes de onda en sistema GPON basado en WDM.

Fuente: Elaboración propia

Además, esta simulación incorpora otros parámetros de simulación, tales como, longitud de onda, potencia de transmisión, dispersión de la fibra y atenuación. Por otra parte, este estudio evalúa dos diferentes ordenes de modulación para PSK y QAM. Por ejemplo, para PSK, el análisis incluye los esquemas BPSK y QPSK, mientras que para QAM se incluyen los esquemas 4-QAM y 16-QAM. El objetivo es evaluar la relación entre la eficiencia espectral, complejidad del sistema y resistencia al ruido que deben afrontar las técnicas de modulación ya mencionadas.

2.5.3. Parámetros de Simulación

La simulación considera varios parámetros del sistema óptico, incluyendo la longitud de onda, la potencia de transmisión, la dispersión y atenuación de la fibra, así como las técnicas de modulación PSK y QAM con diferentes órdenes de modulación, tal como se detallan en la Tabla 2.1. Estas técnicas de modulación fueron seleccionadas para evaluar la eficiencia espectral, complejidad del sistema y robustez frente al ruido.

Tabla 2. 1: Parámetros de simulación de GPON basado en WDM.

Parámetros	Valores
Formatos de modulación	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Tasa de Bits	10 Gbps
Canales de longitud de onda	8
Espaciado entre canales	10 nm
Longitud de la SMF	10 - 100 km
Atenuación de la SMF	0.2 dB/km
Dispersión	17 ps/nm/km
Sensibilidad del Receptor	-20 dBm
Potencia de la señal	0 dBm
Número de Símbolos	10,000

Fuente: Elaboración propia

2.6. Población y muestra

En esta investigación, al tratarse de una simulación del sistema de transmisión óptica GPON-WDM en Python, no se define una población ni muestra de personas. En consecuencia, el objeto de estudio es el sistema de transmisión óptica y su rendimiento variando los parámetros de simulación. La población se refiere al conjunto de todas las configuraciones del sistema, en el que se incluyen diferentes técnicas de modulación (PSK y QAM), así como la cantidad de clientes conectados a la red. La muestra estará formada por los diferentes escenarios de simulación basados en la infraestructura de una GPON en la Zonal CEIBOS, donde se evalúan los resultados de rendimiento en función de estos parámetros. De esta forma, cada escenario simulado permitirá analizar el impacto de la modulación y la cantidad de clientes sobre el sistema.

2.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recogida de datos se lleva a cabo mediante simulaciones computacionales en Python. A partir del modelo de simulación se configura diversos parámetros del sistema de transmisión óptica, como la disposición de la red, los formatos de modulación y por último sus condiciones operativas.

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

La validación de la herramienta de simulación dependerá de la revisión y validación del código en Python efectuado sobre el proyecto por experimentados profesionales de las comunicaciones ópticas. De este modo se confirma que el modelo de simulación representa con precisión los principios teóricos y técnicas del sistema de transmisión óptica GPON-WDM.

Para garantizar que los resultados de la simulación son válidos, se llevarán a cabo varias simulaciones con diferentes parámetros del sistema. Estos resultados se verificarán con datos referenciales y modelos teóricos para validar su exactitud. Siempre que sea posible, estos resultados obtenidos en la simulación son comparados con datos referenciales o modelos teóricos para validar la eficacia de los parámetros.

En resumen, la metodología propuesta hace hincapié en las simulaciones computacionales de sistemas GPON-WDM, evaluando las técnicas de modulación PSK y QAM para analizar y optimizar el rendimiento del sistema.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados obtenidos en la simulación

3.1.1. Análisis de eficiencia espectral y capacidad de transmisión

Los resultados demostraron que los esquemas de modulación de n-orden, como 16-QAM y 64-QAM, proporcionaron una mayor eficiencia espectral en comparación con los esquemas de modulación PSK, tal como se observa en la Figura 3.1. Sin embargo, estos formatos también son más sensibles al ruido, lo que afecta negativamente la calidad de la señal y la BER en la GPON-WDM. Con todo, estos esquemas de modulación de orden superior son más vulnerables, en concreto la técnica 64-QAM muestra una BER más alta para una baja SNR, lo que la hace menos apropiada para transmisiones ópticas de larga distancia.

A medida que aumenta el orden de modulación, los requisitos de la SNR para mantener una BER aceptable, crecen significativamente. Por ejemplo, conseguir un factor Q por encima del umbral mínimo de calidad para GPON-WDM usando la técnica 64-QAM exige una SNR más alta. Por el contrario, las técnicas de modulación de orden superior, como BPSK y QPSK, demostraron una mayor robustez ante el ruido, con lo que se obtuvo una BER más pequeña bajo una SNR moderada.

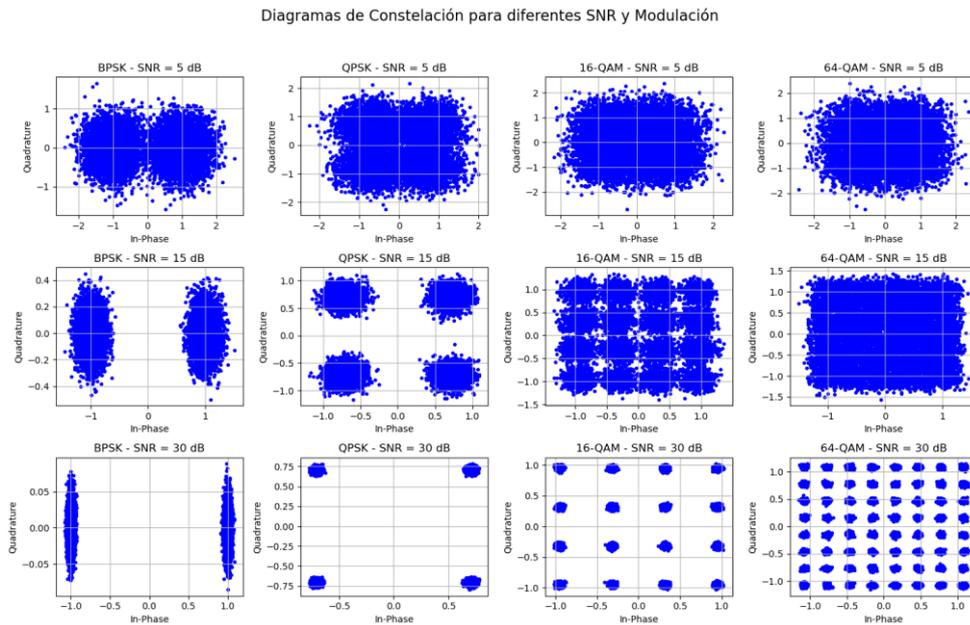


Figura 3. 1: Asignación de longitudes de onda en sistema GPON basado en WDM.

Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Análisis de la tasa de error de bits (BER) frente SNR.

A continuación, se analizan los resultados obtenidos de la influencia de la relación señal/ruido (SNR) frente a la BER de un sistema GPON basado en WDM usando los formatos de modulación PSK y QAM, tal como se muestra en la Figura 3.2. La SNR se define como la relación de la potencia de la señal frente a la potencia del ruido en el sistema y está definida por:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{señal}}{P_{noise}} \right)$$

Cuando la SNR se incrementa, la BER disminuye en todos los formatos de modulación, pero el nivel depende del esquema de modulación utilizado. En la Tabla 3.1 se muestra la comparativa de la BER frente SNR para cada técnica de modulación

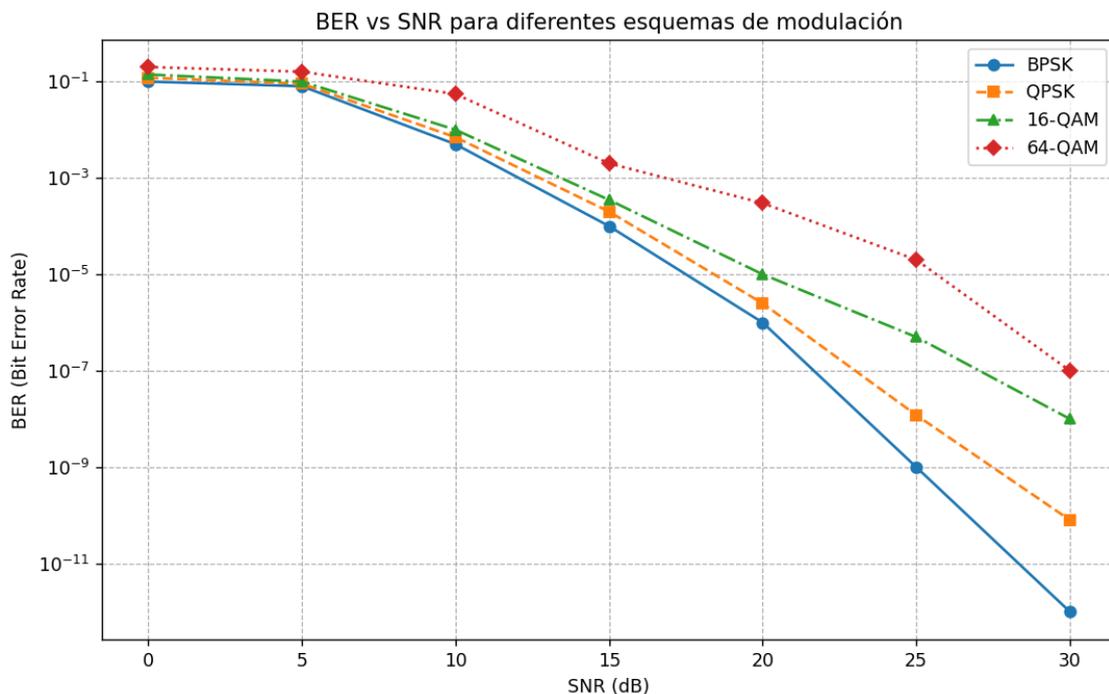


Figura 3. 2: Resultado obtenido de la BER frente a la SNR.

Fuente: Elaboración propia

- BPSK: con esta técnica se consigue un rendimiento óptimo con una SNR relativamente baja, lo que demuestra su robustez frente al ruido. Con una SNR de 30 dB, la técnica BPSK tiene un rendimiento casi perfecto, con una BER inferior a 10^{-11} , lo que demuestra una transmisión muy eficiente.

- QPSK: aunque es ligeramente menos robusto que BPSK, este sistema reduce considerablemente la BER a medida que se incrementa la SNR. Con una SNR de 30 dB, QPSK consigue una BER de alrededor de 10^{-10} , es decir, un nivel aceptable para sistemas como GPON.
- 16-QAM: tiene un comportamiento próximo a QPSK, pues, según lo esperado, los dos formatos de modulación codifican el mismo número de bits por símbolo. No obstante, los valores de BER son levemente inferiores a SNR bajas. Para SNR altas (25-30 dB), el formato 16-QAM registra niveles de BER de 10^{-7} a 10^{-8} , lo cual puede resultar aceptable bajo ciertas condiciones, pero es claramente más inestable que QPSK y BPSK.
- 64-QAM: permite obtener la BER más baja. Como su eficiencia espectral es mayor, es más sensible al ruido, lo que resulta en valores de BER más altos, sobre todo en SNR bajas. Aunque la transmisión de los demás formatos de modulación sea prácticamente sin errores a 30 dB, 64-QAM sigue presentando una BER de alrededor de 10^{-7} . Esto supone sin duda una mejora respecto a SNR más bajas, pero es evidente que 16-QAM requiere condiciones de canal muy favorables (SNR alta, ruido bajo) para funcionar de forma óptima.

Tabla 3. 1: Resumen de la comparativa para la BER vs SNR.

Comparativa de Modulación	Nivel de BER Analizado	SNR Necesario (Modulación 1)	SNR Necesario (Modulación 2)	Mejora en dB (Modulación 1 sobre Modulación 2)
BPSK vs QPSK	10^{-10}	25 dB	30 dB	5 dB
QPSK vs 16-QAM	10^{-7}	20 dB	25 dB	5 dB
16-QAM vs 64-QAM	10^{-7}	25 dB	30 dB	5 dB
BPSK vs 64-QAM	10^{-11} vs 10^{-7}	30 dB (BPSK, casi sin errores)	30 dB (64-QAM)	>15 dB (BPSK ofrece mayor estabilidad)

Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Análisis del factor Q frente SNR.

La Figura 3.3 muestra los valores del factor Q en función de la relación señal/ruido (SNR) para diferentes esquemas de modulación (BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM). Es una métrica de gran importancia en los sistemas de comunicación que proporciona datos precisos sobre la calidad y robustez de la señal, y que está definida por:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0}$$

Mientras mayor sea el factor Q, mejor calidad tendrá la señal y menor susceptibilidad al ruido, por el contrario, un factor Q más bajo indica mayores niveles de ruido y tasas de error más elevadas. Aunque, el factor Q se puede determinar a partir de la BER y está definida por:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right)$$

donde erfc es la función de error complementaria.

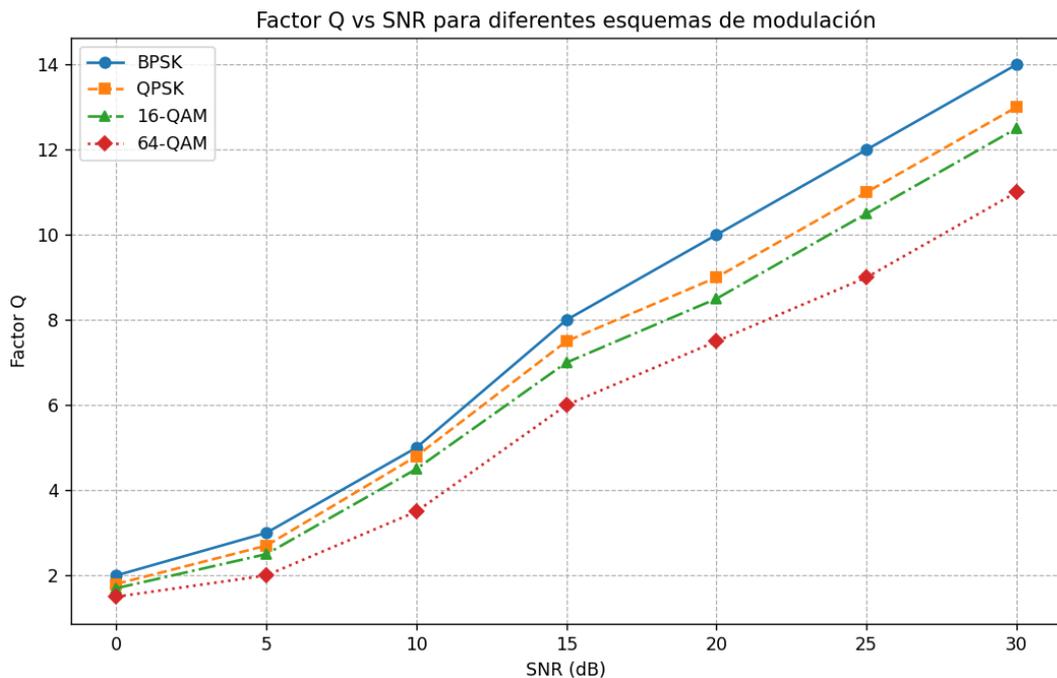


Figura 3. 3: Resultado obtenido del Factor Q frente a la SNR.

Fuente: Elaboración propia

- BPSK: como era de esperarse, la técnica BPSK logra los valores más altos del factor Q en todos los niveles de SNR. Por ejemplo, con una $SNR = 30 \text{ dB}$, BPSK alcanza un factor $Q = 14$, lo que demuestra su excelente resistencia al ruido y la calidad de la señal que ofrece. Incluso en condiciones de SNR bajas,

como 5 dB, la técnica BPSK mantiene un factor Q considerablemente alto en comparación con las otras técnicas de modulación. Estos resultados coinciden con las mediciones de la BER, donde BPSK presenta las BERs más bajas.

- QPSK: en este caso, el factor Q es comparable al de BPSK, aunque ligeramente inferior, situándose en un valor de 13 con una $SNR = 30 \text{ dB}$. QPSK demuestra ser una técnica eficiente en niveles de ruido intermedio. Sin embargo, conforme disminuye la SNR, el rendimiento de QPSK cae más rápidamente que QPSK, lo que indica una mayor sensibilidad al ruido.
- 16-QAM: tiene un comportamiento similar a QPSK, ya que ambos codifican la misma cantidad de bits por símbolo. No obstante, el factor Q para 16-QAM es inferior al de QPSK, lo que corresponde a su mayor BER con valores de SNR más bajos. Cuando el SNR es de 30 dB, la modulación 16-QAM logra un factor Q que supera por poco los 12, lo cual es muy bueno, aunque ligeramente inferior al de los esquemas de modulación más robustos.
- 64-QAM: es el esquema más complejo y presenta el factor Q más bajo de los niveles de SNR. Para una SNR de 30 dB, el factor Q se aproxima a 11, lo que, si bien sigue siendo aceptable, denota que 64-QAM es más susceptible al ruido. Para valores de SNR más bajos, el factor Q para 64-QAM decrece rápidamente, lo que refleja que es más sensible al ruido por tener una constelación de símbolos más densa, lo que incrementa las probabilidades de errores del símbolo.

3.1.4. Análisis de la tasa de error de bits (BER) frente distancia de enlace óptico.

La Figura 3.4 muestra la relación entre la BER y la distancia del enlace para los diferentes esquemas de modulación BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. El alcance de los enlaces ópticos es entre 0 y 100 km (representada gráficamente en el eje “x”), mientras que la BER en escala logarítmica entre 10^{-12} y 10^{-3} (representada gráficamente en el eje “y”).

- BPSK: se observa que, para enlaces de corta distancia (10 km), la BER da el mejor resultado de casi 10^{-12} y para un enlace de larga distancia (100 km) se obtiene una BER de 10^{-8} . Lo que confirma su alta tolerancia al ruido, ya sea para alcances de enlaces ópticos de cortas y largas distancias.

- QPSK: aquí se observa que la BER es más alta en comparación con la técnica BPSK, casi de 10^{-9} para un enlace de corta distancia, y se incrementa gradualmente hasta un valor de 10^{-7} cuando el alcance del enlace es de 100 km. En comparación con la técnica BPSK, la modulación QPSK ofrece mayor eficiencia espectral, pero es más vulnerable a la degradación del rendimiento de GPON-WDM en enlaces de larga distancia.
- 16-QAM: en este caso, la BER del esquema de modulación 16-QAM es superior al esquema de QPSK, y este valor varía entre 10^{-7} y 10^{-5} (para 100 km). Esta técnica de modulación demuestra que el esquema 16-QAM, con un rendimiento espectral mayor, es más vulnerable al ruido y otras interferencias de transmisión en distancias más largas.
- 64-QAM: esta modulación demuestra un rendimiento aceptable de GPON-WDM para una BER inicial de 10^{-5} para enlaces de corta distancia, y aumenta rápidamente hasta 10^{-3} en un enlace de larga distancia (100 km). El incremento de la pendiente de la BER indica la vulnerabilidad al ruido de 64-QAM, que se ve compensada por su alta eficiencia espectral.

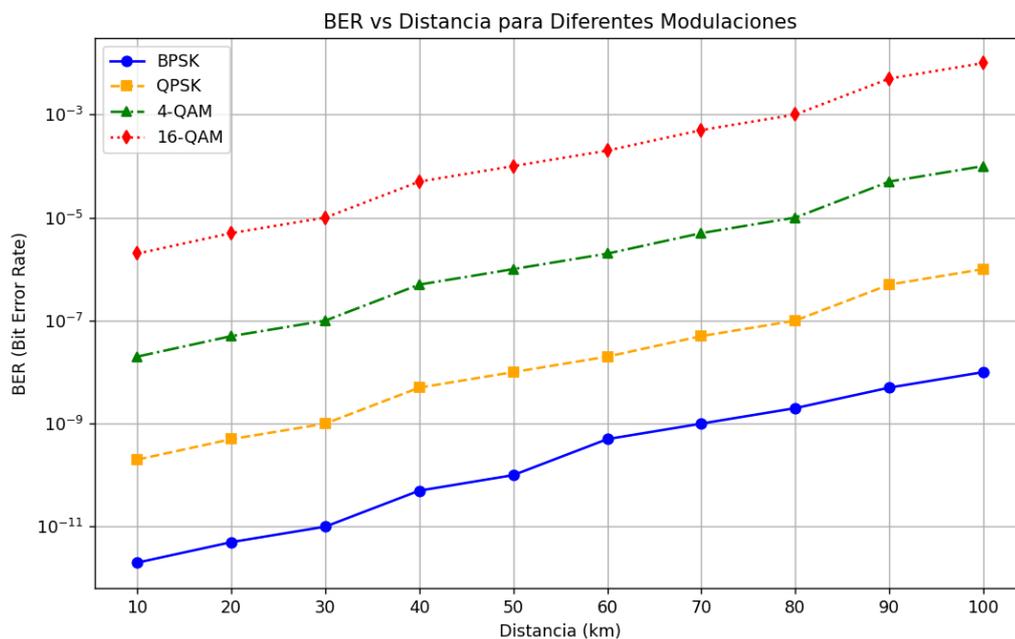


Figura 3. 4: Resultado obtenido de la BER frente a la distancia del enlace óptico.

Fuente: Elaboración propia

3.1.5. Análisis del factor Q frente distancia de enlace óptico.

En la Figura 3.5 se muestran la gráfica comparativa del factor Q frente a la distancia utilizando las técnicas de modulación BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

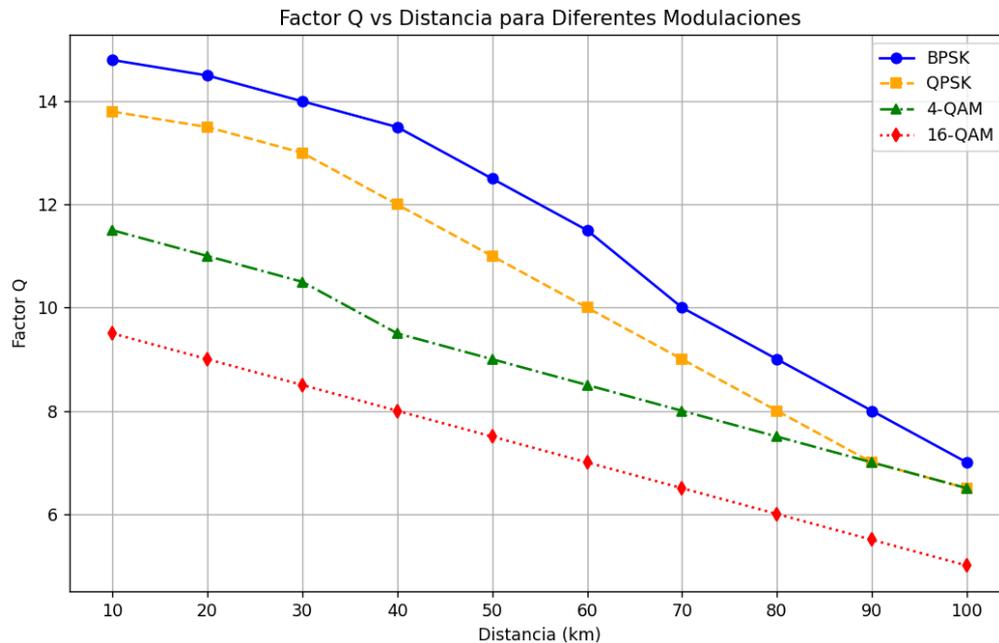


Figura 3. 5: Resultado obtenido del Factor Q frente a la SNR.

Fuente: Elaboración propia

- BPSK: se observa un factor $Q=14.8$ para un enlace óptico de 10 km y posteriormente disminuye gradualmente hasta 7 para un valor máximo de alcance de 100 km. Esto indica, que la técnica BPSK tiene los mejores resultados en función de la calidad de señal, especialmente para enlaces de largo alcance.
- QPSK: se observa que el factor $Q=13.8$ para un enlace de 10 km y disminuye hasta llegar un valor de $Q=6.5$ a 100 km. A pesar de que esta técnica ha mostrado mayor robustez, sin embargo, experimentó una caída más rápida de la calidad de señal que la técnica BPSK.
- 16-QAM: el factor Q para el formato 16-QAM es de 11.5 a 10 km y disminuye a 6.5 a 100 km. Además, esta modulación tiene una calidad de señal inicial inferior a la de los formatos BPSK y QPSK, y su señal se degrada más rápidamente con la distancia.
- 64-QAM: el factor Q para 64-QAM es el más bajo, con 9.5 a 10 km y 5 a 100 km. Por tanto, el formato 64-QAM es el sistema de transmisión más vulnerable

al ruido, con una degradación significativa de la calidad de la señal a medida que aumenta la distancia.

CONCLUSIONES

Los fundamentos teóricos de las redes ópticas pasivas (PON) y los formatos de modulación digital, como PSK y QAM, han sido estudiados en detalle con el fin de establecer una estructura sólida para diseñar y analizar el sistema de transmisión GPON-WDM. Este estudio ha permitido comprender las principales características y principios de los sistemas PON, tales como su arquitectura, rentabilidad y escalabilidad, por lo que resultan idóneos para la transmisión de banda ancha de alta velocidad.

Se evaluó el rendimiento del sistema GPON-WDM mediante simulaciones numéricas basadas Python utilizando las técnicas de modulación, como BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Se demostró que la técnica QPSK lograba el mejor rendimiento entre la eficiencia espectral, capacidad de transmisión y calidad de la señal, para una $BER = 10^{-10}$ frente a una $SNR = 30$ dB. Pero, la técnica BPSK consiguió $BER = 10^{-11}$ inferior a QPSK con la misma $SNR = 30$ dB, lo que significa que es más robusta, a pesar de tener una eficiencia espectral por debajo del 20%. A pesar de esa diferencia, la técnica QPSK resultó ser la más adecuada.

En cuanto a las necesidades de mayor velocidad de datos, se analizó las técnicas 16-QAM y 64-QAM. A una SNR de 30 dB, 16-QAM alcanzó una BER de aproximadamente 10^{-7} , mientras que 64-QAM tuvo una BER de alrededor de 10^{-5} .

RECOMENDACIONES

A partir del presente trabajo de investigación y en base a la tecnología GPON-WDM se presentan las siguientes recomendaciones como trabajos futuros que se pueden investigar:

1. Diseño y evaluación del rendimiento de WDM-PON mediante arquitectura FTTx utilizando herramienta de simulación OptiSystem.
2. Evaluación de la capacidad de radio sobre fibra en arquitectura GPON WDM/TDM
3. Supresión de efectos ópticos no lineales en WDM-GPON mediante detección no coherente por modulación de frecuencia.
4. Comunicación óptica bidireccional en espacio libre (FSO) mediante una red de acceso WDM.

REFERENCIAS

- Ab-Rahman, M. S., Manaf, Z. A., Kaharudin, I. H., & Hwang, I.-S. (2022). Customer Edge Downstream Detection for Automatic Restoration Scheme in FTTH-PON Distribution Network. *Photonics*, 9(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/photonics9080560>
- Ahamed, S. V. (2013). Optical Fiber in Modern Networks. En *Intelligent Networks* (pp. 93–106). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416630-1.00005-4>
- Alferness, R. C. (2020). The Evolution of Optical Transport Networks. En B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. Winzer, & Y. Zhao (Eds.), *Springer Handbook of Optical Networks* (pp. 1–19). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16250-4_1
- Ali, A. H., & Farhood, A. D. (2019). Design and Performance Analysis of the WDM Schemes for Radio over Fiber System With Different Fiber Propagation Losses. *Fibers*, 7(3), 19. <https://doi.org/10.3390/fib7030019>
- Ali, F., Khan, Y., & Shafique Qureshi, S. (2022). Transmission Performance Comparison of 16*100 Gbps Dense Wavelength Division Multiplexed Long Haul Optical Networks at Different Advance Modulation Formats under the Influence of Nonlinear Impairments. *Journal of Optical Communications*, 43(1), 63–72. <https://doi.org/10.1515/joc-2018-0185>
- Alwaysn, V. (2009). *Optical network design and implementation*. Cisco Press.
- Andriolli, N., Giorgetti, A., Castoldi, P., Cecchetti, G., Cerutti, I., Sambo, N., Sgambelluri, A., Valcarenghi, L., Cugini, F., Martini, B., & Paolucci, F. (2022). Optical networks management and control: A review and recent challenges. *Optical Switching and Networking*, 44, 100652. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2021.100652>

- Astori, W. (2023). *Towards the Opening of Optical Networks: Horizons and Ongoing Standardization* [Master's Degree Thesis, Politecnico Di Torino]. <https://webthesis.biblio.polito.it/26657/1/tesi.pdf>
- Caputo, A. C. (2014). Wireless Networked Video. En *Digital Video Surveillance and Security* (pp. 145–204). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420042-5.00005-8>
- Chatterjee, B. C., Sarma, N., & Oki, E. (2015). Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(3), 1776–1800. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2431731>
- Chen, W., Yuan, L., Zhang, B., Yu, Q., Lian, Z., Pi, Y., Shan, C., & Shum, P. P. (2024). Applications and Development of Multi-Core Optical Fibers. *Photonics*, 11(3), 270. <https://doi.org/10.3390/photonics11030270>
- Chen, Y., Ming, C., Xie, K., Gao, S., Jiang, Q., Liu, Z., Yao, H., & Dong, K. (2024). All-in-One BPSK/QPSK Switchable Transmission and Reception for Adaptive Free-Space Optical Communication Links. *Photonics*, 11(4), 326. <https://doi.org/10.3390/photonics11040326>
- Choudhury, P. D., Bhadra, S., & De, T. (2019). A brief review of protection based routing and spectrum assignment in elastic optical networks and a novel p-cycle based protection approach for multicast traffic demands. *Optical Switching and Networking*, 32, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2018.12.001>
- Cisco Annual. (2020). *Cisco Annual Internet Report—Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper*. Cisco. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- Da Silva, E. P., & Herbster, A. F. (2024). OptiCommPy: Open-source Simulation of Fiber Optic Communications with Python. *Journal of Open Source Software*, 9(98), 6600. <https://doi.org/10.21105/joss.06600>

- Duan, Q., Wang, S., & Ansari, N. (2020). Convergence of Networking and Cloud/Edge Computing: Status, Challenges, and Opportunities. *IEEE Network*, 34(6), 148–155. <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000089>
- Dubovan, J., Litvik, J., Benedikovic, D., Mullerova, J., Glesk, I., Veselovsky, A., & Dado, M. (2020). Impact of Wind Gust on High-Speed Characteristics of Polarization Mode Dispersion in Optical Power Ground Wire Cables. *Sensors*, 20(24), 7110. <https://doi.org/10.3390/s20247110>
- El-Nahal, F., Xu, T., AlQahtani, D., & Leeson, M. (2022). A Bidirectional Wavelength Division Multiplexed (WDM) Free Space Optical Communication (FSO) System for Deployment in Data Center Networks (DCNs). *Sensors*, 22(24), 9703. <https://doi.org/10.3390/s22249703>
- Escallón-Portilla, A. F., Ruiz-Guachetá, V. H., & López-Perafán, J. G. (2020). Evaluación del desempeño físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play después de la incorporación de un módulo RoF. *TecnoLógicas*, 23(47), 23–61. <https://doi.org/10.22430/22565337.1391>
- Fayad, A., Cinkler, T., Rak, J., & Jha, M. (2022). Design of Cost-Efficient Optical Fronthaul for 5G/6G Networks: An Optimization Perspective. *Sensors*, 22(23), 9394. <https://doi.org/10.3390/s22239394>
- Feng, N., Ma, M., Zhang, Y., Tan, X., Li, Z., & Li, S. (2023). Key Technologies for a Beyond-100G Next-Generation Passive Optical Network. *Photonics*, 10(10), 1128. <https://doi.org/10.3390/photonics10101128>
- Ganz, A., Camellini, M., Hine, E., Novelli, C., Roberts, H., & Floridi, L. (2024). Submarine Cables and the Risks to Digital Sovereignty. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4693206>
- Gao, J., Zhang, L., Jiao, D., Xu, G., Bu, J., Wu, M., Zang, Q., Zhang, X., Dong, R., Liu, T., & Zhang, S. (2023). Analysis and Reduction of Nonlinear Effects in Optical

- Fiber Frequency Transfer. *Applied Sciences*, 13(23), 12762. <https://doi.org/10.3390/app132312762>
- Hall, M. N., Foerster, K.-T., Schmid, S., & Durairajan, R. (2021). A Survey of Reconfigurable Optical Networks. *Optical Switching and Networking*, 41, 100621. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2021.100621>
- Horvath, T., Munster, P., & Bao, N.-H. (2020). Lasers in Passive Optical Networks and the Activation Process of an End Unit: A Tutorial. *Electronics*, 9(7), 1114. <https://doi.org/10.3390/electronics9071114>
- Hussein, T. F., Rizk, M. R. M., & Aly, M. H. (2019). A hybrid DCF/FBG scheme for dispersion compensation over a 300 km SMF. *Optical and Quantum Electronics*, 51(4), 103. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-1823-y>
- Jude, I. I., Adamu, Y., Onoja, O. D., & Andrew, B. (2017). Efficient Chromatic and Residual Dispersion Post compensation for Coherent Optical OFDM. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 6(12), 372–381. <https://doi.org/10.7753/IJSEA0612.1004>
- Kantor, M., State, R., Engel, T., & Ormazabal, G. (2015). A policy-based per-flow mobility management system design. *Proceedings of the Principles, Systems and Applications on IP Telecommunications*, 35–42. <https://doi.org/10.1145/2843491.2843835>
- Kaur, K., Garg, S., Kaddoum, G., Bou-Harb, E., & Choo, K.-K. R. (2020). A Big Data-Enabled Consolidated Framework for Energy Efficient Software Defined Data Centers in IoT Setups. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(4), 2687–2697. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2939573>
- Kaushik, V., & Saini, H. (2022). *Investigations on applicability of modulation formats in coherent optical transmission*. 020005. <https://doi.org/10.1063/5.0105709>

- Kazanskiy, N. L., Butt, M. A., & Khonina, S. N. (2022). Optical Computing: Status and Perspectives. *Nanomaterials*, *12*(13), 2171. <https://doi.org/10.3390/nano12132171>
- Kobayashi, T., Hamaoka, F., Nakamura, M., Yamazaki, H., Nagatani, M., & Miyamoto, Y. (2019). Ultrahigh-speed Optical Communications Technology Combining Digital Signal Processing and Circuit Technology. *NTT Technical Review*, *17*(5), 12–19. <https://doi.org/10.53829/ntr201905fa2>
- Kumari, M., & Mishra, S. K. (2024). Realization of 4×200 Gbps 4-QAM OFDM-OWC System Using Higher Order OAM Modes for HAP-to-Satellites Scenario. *Photonics*, *11*(4), 294. <https://doi.org/10.3390/photonics11040294>
- Lorincz, J., Klarin, Z., & Begusic, D. (2023). Advances in Improving Energy Efficiency of Fiber–Wireless Access Networks: A Comprehensive Overview. *Sensors*, *23*(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/s23042239>
- Luhar, I., Luhar, S., Savva, P., Theodosiou, A., Petrou, M., & Nicolaides, D. (2021). Light Transmitting Concrete: A Review. *Buildings*, *11*(10), 480. <https://doi.org/10.3390/buildings11100480>
- Manias, D. M., Javadtalab, A., Naoum-Sawaya, J., & Shami, A. (2023). The Role of Optical Transport Networks in 6G and Beyond: A Vision and Call to Action. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, *12*(3), 43. <https://doi.org/10.3390/jsan12030043>
- Mohammed, A. F. Y., Lee, J., & Park, S. (2024). Dynamic Bandwidth Slicing in Passive Optical Networks to Empower Federated Learning. *Sensors*, *24*(15), 5000. <https://doi.org/10.3390/s24155000>
- Neeraj, S., Sanjay, K., Manoj, S., & Atulkumar, S. (2019). *Introduction of Fiber To The Home Technology*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23634.20169>
- Nsafoa-Yeboah, K., Tchao, E. T., Yeboah-Akouwah, B., Kommey, B., Agbemenu, A. S., Keelson, E., & Monirujjaman Khan, M. (2022). Software-Defined Networks for

Optical Networks Using Flexible Orchestration: Advances, Challenges, and Opportunities. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2022, 1–40. <https://doi.org/10.1155/2022/5037702>

Papavassiliou, S. (2020). Software Defined Networking (SDN) and Network Function Virtualization (NFV). *Future Internet*, 12(1), 7. <https://doi.org/10.3390/fi12010007>

Pitwon, R., Reddy, A., Jain, A., Gomez, K., Schulz, S. A., O’Faolain, L., Wang, K., Miller, A., & Davies, V. (2022). Evolution of System Embedded Optical Interconnect in Sub-Top-of-Rack Data Center Systems. *Applied Sciences*, 12(3), 1565. <https://doi.org/10.3390/app12031565>

Quisnancela, E., & Espinosa, N. (2016). Certificación de redes GPON, normativa ITU G.984.x. *Enfoque UTE*, 7(4), 16–30. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n4.111>

Rahman, H. M. U., Hanif, R., Ghafoor, S., & Ahmad, A. (2024). Open Networking Engine (ONE): An Orchestration Tool for Open Optical Line System. *IEEE Access*, 12, 8940–8956. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3354172>

Rapisarda, M., Hernández, J. A., Gatto, A., Parolari, P., Boffi, P., Svaluto Moreolo, M., Fábrega, J. M., Nadal, L., Martínez, R., López, V., Fernández-Palacios, J.-P., Otero, G., & Larrabeiti, D. (2022). All-optical aggregation and distribution of traffic in large metropolitan area networks using multi-Tb/s S-BVTs. *Journal of Optical Communications and Networking*, 14(5), 316. <https://doi.org/10.1364/JOCN.448115>

Riadi, A., Boulouird, M., & Hassani, M. M. (2021). ZF and MMSE Detectors Performances of a Massive MIMO System Combined with OFDM and M-QAM Modulation. *Wireless Personal Communications*, 116(4), 3261–3276. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07848-4>

- Róka, R. (2022). Performance Analysis of Wavelength Division Multiplexing-Based Passive Optical Network Protection Schemes by Means of the Network Availability Evaluator. *Applied Sciences*, 12(15), 7911. <https://doi.org/10.3390/app12157911>
- Róka, R., Fujdiak, R., Holasova, E., Kuchar, K., Orgon, M., & Misurec, J. (2022). Protection Schemes in HPON Networks Based on the PWFBA Algorithm. *Sensors*, 22(24), 9885. <https://doi.org/10.3390/s22249885>
- Rooney, D. R., & Beltrán, S. (2022, noviembre 10). El desafío de los despliegues de fibra en América Latina. *Prensario Zone*. <https://digitaltv.prensariozone.com/el-desafio-de-los-despliegues-de-fibra-en-america-latina/>
- Salleh, M. S., Supa'at, A. S. M., Idrus, S. M., Yaakob, S., & Yusof, Z. M. (2014). Wavelength Tuning Free Transceiver Module in OLT Downstream Multicasting $4 \lambda \times 10$ Gb/s TWDM-PON System. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2014, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2014/483249>
- Sarangal, H., Singh, A., & Malhotra, J. (2019). Construction and Analysis of a Novel SAC-OCDMA System with EDW Coding using Direct Detection Technique. *Journal of Optical Communications*, 40(3), 265–271. <https://doi.org/10.1515/joc-2017-0061>
- Sasai, T., Matsushita, A., Nakamura, M., Okamoto, S., Hamaoka, F., & Kisaka, Y. (2020). Laser Phase Noise Tolerance of Uniform and Probabilistically Shaped QAM Signals for High Spectral Efficiency Systems. *Journal of Lightwave Technology*, 38(2), 439–446. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2945470>
- Shahbaz, M., Butt, M. A., & Piramidowicz, R. (2023). Breakthrough in Silicon Photonics Technology in Telecommunications, Biosensing, and Gas Sensing. *Micromachines*, 14(8), 1637. <https://doi.org/10.3390/mi14081637>

- Sharma, D., & Kumar, Dr. (Col) S. (2017). An Overview of Elastic Optical Networks and its Enabling Technologies. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(3), 1643–1649. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i3/170903022>
- Sharma, K., & Sehgal, V. K. (2020). Energy-efficient and sustainable communication in optical networks on chip. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28, 100426. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100426>
- Sharma, P., Choi, K., Krejcar, O., Blazek, P., Bhatia, V., & Prakash, S. (2023). Securing Optical Networks Using Quantum-Secured Blockchain: An Overview. *Sensors*, 23(3), 1228. <https://doi.org/10.3390/s23031228>
- Singh, P. R., Singh, V. K., Yadav, R., & Chaurasia, S. N. (2023). 6G networks for artificial intelligence-enabled smart cities applications: A scoping review. *Telematics and Informatics Reports*, 9, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.teler.2023.100044>
- Singhal, A., Department of Electronics and Communication Engineering, I.K. Gujral Punjab Technicial University, Jalandhar – 144603, Punjab, India, Singh, C., & Department of Electronics and Communication Engineering, Rayat - Bahra Institute of Engineering and Nano-Technology, V.P.O Bohan, Hoshiarpur – 146104, Punjab, India. (2017). Performance Enhancement for Hybrid WDM-TDM Passive Optical Networks. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(18), 1–7. <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i18/112519>
- Sugumaran, S., Lakshmi, D. N., & Choudhary, S. (2021). An Overview of FTTH for Optical Network. En R. Agrawal, C. Kishore Singh, & A. Goyal (Eds.), *Advances in Smart Communication and Imaging Systems* (Vol. 721, pp. 41–51). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9938-5_6
- TeleGeography. (2024). *Submarine Cable Map 2024*. Telegeography. <https://submarine-cable-map-2024.telegeography.com/>

- Thyagaturu, A. S., Mercian, A., McGarry, M. P., Reisslein, M., & Kellerer, W. (2016). Software Defined Optical Networks (SDONs): A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2738–2786. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2586999>
- Van Rossem, S., Tavernier, W., Colle, D., Pickavet, M., & Demeester, P. (2018). Introducing Development Features for Virtualized Network Services. *IEEE Communications Magazine*, 56(8), 184–192. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1600104>
- Vetter, P., Suvakovic, D., Chow, H., Anthapadmanabhan, P., Kanonakis, K., Lee, K., Saliou, F., Yin, X., & Lannoo, B. (2014). Energy-efficiency improvements for optical access. *IEEE Communications Magazine*, 52(4), 136–144. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6807958>
- Vijayan, K., He, Z., Foo, B., Karlsson, M., & Andrekson, P. A. (2020). Modulation format dependence on transmission reach in phase-sensitively amplified fiber links. *Optics Express*, 28(23), 34623. <https://doi.org/10.1364/OE.403475>
- Willner, A. E., Pang, K., Song, H., Zou, K., & Zhou, H. (2021). Orbital angular momentum of light for communications. *Applied Physics Reviews*, 8(4), 041312. <https://doi.org/10.1063/5.0054885>
- Winzer, P. J., Neilson, D. T., & Chraplyvy, A. R. (2018). Fiber-optic transmission and networking: The previous 20 and the next 20 years [Invited]. *Optics Express*, 26(18), 24190. <https://doi.org/10.1364/OE.26.024190>
- Wong, E. (2022). Towards 6G: The Evolution of Passive Optical Networks. *2022 IEEE Photonics Conference (IPC)*, 1–2. <https://doi.org/10.1109/IPC53466.2022.9975774>
- Yang, X., Wang, X., Wang, D., Zhang, L., Yang, Z., Zhu, H., & Wu, B. (2023). Combined Optical Fiber Transmission System Based on QNSC and BER-LM. *Photonics*, 10(2), 154. <https://doi.org/10.3390/photonics10020154>

- You, J., & Panoiu, N. C. (2017). Exploiting high-order phase-shift keying modulation and direct-detection in silicon photonic systems. *Optics Express*, 25(8), 8611. <https://doi.org/10.1364/OE.25.008611>
- Yue, Y., Wang, Q., & Anderson, J. (2019). Experimental Investigation of 400 Gb/s Data Center Interconnect Using Unamplified High-Baud-Rate and High-Order QAM Single-Carrier Signal. *Applied Sciences*, 9(12), 2455. <https://doi.org/10.3390/app9122455>
- Zhang, J., Qian, F., & Yang, J. (2022). Online routing and spectrum allocation in elastic optical networks based on dueling Deep Q-network. *Computers & Industrial Engineering*, 173, 108663. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108663>
- Zhang, Q., Liu, Y., Yu, X., Zhao, Y., & Zhang, J. (2022). Topology-Abstraction-Based Protection Scheme in Quantum Key Distribution Networks with Partially Trusted Relays. *Photonics*, 9(4), 239. <https://doi.org/10.3390/photonics9040239>