



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

**TÍTULO**

Implementación y Evaluación de Redes Ópticas Pasivas de Alta  
Velocidad Utilizando Formatos de Modulación Avanzados.

**AUTOR**

**Sánchez Pérez, Diego Orlando**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del grado académico en  
**MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**

**TUTOR**

**Llerena Guevara, Lucrecia Alejandrina**

**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. Lucrecia Llerena Guevara, Mgtr.  
TUTOR**

---

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

---

**Ing. Daniel Jaramillo Chamba, 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 Diego Orlando Sánchez Pérez, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Telecomunicaciones.

**TUTOR**

---

**Ing. Lucrecia Llerena Guevara, Ph.D.**

**Santa Elena, 19 de octubre de 2024**



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

**Yo, Diego Orlando Sánchez Pérez**

**DECLARO QUE:**

El trabajo de Titulación, Implementación y Evaluación de Redes Ópticas Pasivas de Alta Velocidad Utilizando Formatos de Modulación Avanzados 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, 19 de octubre de 2024

**EL AUTOR**

---

**Diego Orlando Sánchez Pérez**



**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 Implementación y Evaluación de Redes Ópticas Pasivas de Alta Velocidad Utilizando Formatos de Modulación Avanzados, presentado por el estudiante, Diego Orlando Sánchez Pérez fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 6%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



**TUTOR**

---

**Ing. Lucrecia Llerena Guevara, Ph.D.**



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

**AUTORIZACIÓN**

**Yo, Diego Orlando Sánchez Pérez**

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, 19 de octubre de 2024.

**EL AUTOR**

---

**Diego Orlando Sánchez Pérez**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios.

A mis padres Orlando y Gloria.

A mi familia. A mis amigos.

Diego Orlando Sánchez Pérez

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Gloria y Orlando, por su amor incondicional, su apoyo constante y por inculcarme los valores del esfuerzo y la perseverancia.

A mi esposa, Solange, por su paciencia, comprensión y por ser mi pilar fundamental durante todo este proceso.

Diego Orlando Sánchez Pérez

# ÍNDICE GENERAL

<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN</b> .....	<b>II</b>
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>III</b>
<b>DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>IV</b>
<b>CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO</b> .....	<b>V</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>VI</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>VII</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XVII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
Planteamiento de la investigación.....	3
Formulación del problema de investigación .....	4
Justificación:.....	6
Objetivo General:.....	7
Objetivos Específicos: .....	7
Planteamiento hipotético .....	8
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL</b> .....	<b>9</b>
1.1. Revisión de literatura .....	9
1.2. Fundamentos de Comunicaciones Ópticas .....	12
1.2.1. Principios básicos de transmisión óptica. ....	12

1.2.2.	Características y ventajas de las comunicaciones ópticas .....	14
1.2.3.	Tipos de redes ópticas (activas y pasivas) y sus diferencias .....	15
1.2.4.	Evolución de las redes ópticas pasivas .....	16
1.2.5.	Análisis comparativo con otras tecnologías de transmisión .....	17
1.3.	Formatos de Modulación Avanzados .....	18
1.3.1.	Modulación de amplitud en cuadratura (QAM) .....	20
1.3.1.1.	Principio de funcionamiento de QAM.....	20
1.3.1.2.	Ventajas de QAM .....	21
1.3.1.3.	Desafíos y limitaciones de QAM.....	22
1.3.1.4.	Aplicaciones de QAM en redes ópticas .....	22
1.3.2.	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con polarización dual (DP-QPSK).....	22
1.3.2.1.	Principio de funcionamiento de DP-QPSK .....	23
1.3.2.2.	Ventajas de DP-QPSK.....	24
1.3.2.3.	Retos y limitaciones de DP-QPSK .....	24
1.3.2.4.	Aplicaciones de DP-QPSK en redes ópticas.....	25
1.3.3.	Modulación de amplitud de impulsos (PAM) .....	25
1.3.3.1.	Principio de funcionamiento de PAM .....	25
1.3.3.2.	Ventajas de PAM .....	26
1.3.3.3.	Retos y limitaciones de PAM .....	27
1.3.3.4.	Aplicaciones de PAM en redes ópticas.....	28
1.3.4.	Análisis comparativo de las técnicas de modulación .....	28
1.4.	Redes Ópticas Pasivas (PON) .....	30

1.4.1.	Principio de funcionamiento de una PON .....	31
1.4.2.	Enlace descendente en una PON .....	31
1.4.3.	Enlace Ascendente en una PON .....	32
1.5.	Consideraciones técnicas sobre las redes ópticas pasivas (PON): Interferencia de señales y amplificación óptica .....	33
1.5.1.	Interferencia de señales en PONs .....	33
1.5.2.	Amplificadores ópticos en PONs .....	34
1.5.3.	Impacto en el rendimiento de la red .....	35
1.6.	Arquitecturas de redes ópticas pasivas .....	36
1.6.1.	Arquitectura Unidireccional de una PON .....	36
1.6.2.	Arquitectura Bidireccional de una PON .....	37
1.7.	Principales Elementos de una Red Óptica Pasiva (PON) .....	37
1.8.	Arquitecturas de las Redes Ópticas FTTx.....	39
1.8.1.	FTTH (Fiber To The Home).....	39
1.8.2.	FTTB (Fiber To The Building).....	41
1.8.3.	FTTC/FTTCab (Fiber To The Curb/Fiber To The Cabinet) .....	42
1.9.	Beneficios de las Redes Ópticas Pasivas en Términos de Costo y Eficiencia .....	44
1.10.	Análisis de la implementación práctica de tecnologías de modulación avanzada para contextos geográficos y económicos diversos .....	46
1.11.	Estudios comparativos entre diferentes tecnologías de modulación de las PON de alta velocidad.....	48
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA .....</b>		<b>50</b>
2.1.	Contexto de la investigación.....	50
2.2.	Diseño y alcance de la investigación.....	51
2.3.	Tipo y métodos de investigación .....	54
2.4.	Población y muestra .....	55
2.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	56

2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información .....	57
<b>CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>59</b>
3.1. Análisis Bibliográfico de las Tendencias Actuales en Redes Ópticas Pasivas y Modulación Avanzada.....	59
3.1.1. Tendencias en redes ópticas pasivas.....	59
3.1.2. Avances en formatos de modulación avanzados .....	61
3.1.3. Identificación de brechas y oportunidades de mejora .....	62
3.2. Simulación y Diseño de Redes Ópticas Pasivas de Alta Velocidad con Formatos de Modulación Avanzados .....	62
3.2.1. Metodología utilizada para la parte experimental mediante simulación ...	62
3.3. Descripción de la herramienta de simulación OptiSystem .....	63
3.3.1. Prestaciones principales de la plataforma OptiSystem.....	65
3.3.2. Configuración de parámetros de componentes en OptiSystem .....	65
3.3.3. Aplicaciones principales en OptiSystem .....	66
3.4. Diseño de modulación QAM y DP-QPSK.....	66
3.4.1. Parámetros de simulación para modulación QAM y DP-QPSK.....	70
3.5. Evaluación Comparativa del Rendimiento de la Transmisión de Datos con Técnicas de Modulación QAM y DP-QPSK .....	72
3.5.1. Discusión de resultados en la modulación QAM.....	72
3.5.2. Discusión de resultados en la modulación DP-QPSK.....	77
3.5.3. Discusión de resultados comparativos entre formatos de modulación QAM y DP-QPSK	82
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>88</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>89</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>90</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

## Capítulo 2.

Tabla 2. 1: Comparación de OptiSystem vs. OptSim .....	52
Tabla 2. 2: Comparativa entre herramientas Visual Studio Code, PyCharm y Jupyter Notebook.....	53

## Capítulo 3.

Tabla 3. 1: Comparación entre NG-PON2 y los sistemas PON tradicionales. ....	59
Tabla 3. 2: Artículos de investigación relacionados con el tema propuesto. ....	60
Tabla 3. 3: Comparación de formatos de modulación para PON de alta velocidad. ....	61
Tabla 3. 4: Parámetros de simulación de la modulación QAM. ....	71
Tabla 3. 5: Valores de Min. Log de BER/BER diferentes potencias del transmisor en QAM. ....	72
Tabla 3. 6: Resumen de Parámetros de Calidad de la Señal QAM. ....	74
Tabla 3. 7: Valores de Min. Log de BER/BER diferentes potencias del transmisor en DP-QPSK. ....	78
Tabla 3. 8: Resumen de Parámetros de Calidad de la Señal DP-QPSK. ....	80

# ÍNDICE DE FIGURAS

## Capítulo 1.

Figura 1. 1: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación óptico submarino. . .	13
Figura 1. 2: Diagrama de constelaciones para la modulación 16-QAM.....	21
Figura 1. 3: Diagrama de bloques para DP-QPSK. ....	23
Figura 1. 4: Topologías en PON (a) estrella, (b) bus, (c) anillo, y (d) árbol.....	30
Figura 1. 5: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación óptico submarino. . .	31
Figura 1. 6: Tráfico descendente en PON.....	32
Figura 1. 7: Tráfico ascendente en PON.....	33
Figura 1. 8: Arquitectura de acceso WDM unidireccional dual basada en anillo.....	36
Figura 1. 9: Arquitectura de acceso WDM bidireccional. ....	37
Figura 1. 10: Elementos principales en la arquitectura PON.....	38
Figura 1. 11: Arquitectura de las diferentes tecnologías FTTx. ....	39
Figura 1. 12: Arquitectura de la tecnología FTTH. ....	40
Figura 1. 13: Arquitectura pasiva (topología PON, esquema punto a multipunto (P2MP)) y arquitectura punto a punto (P2P) a la derecha. ....	41
Figura 1. 14: Arquitectura de la tecnología FTTB.....	41
Figura 1. 15: Arquitectura de la tecnología FTTC.....	43

## Capítulo 2.

Figura 2. 1: Ubicación Geográfica Área de Estudio CNT EP. ....	50
--	----

### Capítulo 3.

Figura 3. 1: Pantalla de inicio del software de diseño de sistemas ópticos. ....	63
Figura 3. 2: Estructura de la interfaz gráfica de la plataforma de simulación OptiSystem .....	64
Figura 3. 3: Representación de los componentes de la librería de receptores ópticos....	65
Figura 3. 4: Ventana de configuración de propiedades o parámetros de simulación del fotodetector PIN.....	66
Figura 3. 5: Esquemático del transmisor OLT.....	67
Figura 3. 6: Esquemático del bloque de transmisión óptica. ....	68
Figura 3. 7: Esquemático del bloque de multiplexación/demultiplexación del sistema WDM. ....	69
Figura 3. 8: Esquemático del bloque de recepción óptica. ....	71
Figura 3. 9: Resultado obtenido de la Potencia (dBm) vs BER usando modulación QAM. .....	73
Figura 3. 10: Resultados obtenidos del Factor Q para enlaces entre 30 y 70 km usando QAM.....	74
Figura 3. 11: Resultados obtenidos de la BER para enlaces entre 30 y 70 km usando QAM. .....	75
Figura 3. 12: Resultados obtenidos de la BER vs. Potencia recibida para diferentes potencias usando QAM.....	76
Figura 3. 13: Resultados obtenidos de la BER para enlaces entre 30 y 70 km usando QAM. .....	77
Figura 3. 14: Resultado obtenido de la Potencia (dBm) vs BER para DP-QPSK.....	78
Figura 3. 15: Resultados obtenidos del Factor Q para enlaces entre 30 y 70 km usando modulación DP-QPSK,.....	79

Figura 3. 16: Resultados obtenidos de la BER para enlaces entre 30 y 70 km usando modulación DP-QPSK.....	80
Figura 3. 17: Resultados obtenidos de la BER vs. Potencia recibida para diferentes potencias usando modulación DP-QPSK. ....	81
Figura 3. 18: Resultados obtenidos de la BER para enlaces entre 30 y 70 km usando QAM. ....	82
Figura 3. 19: Comparativa de la Potencia (dBm) vs BER en modulaciones QAM y DP-QPSK. ....	83
Figura 3. 20: Comparativa del Factor Q vs. Período de bits para enlaces entre 30 y 70 km. ....	84
Figura 3. 21: Comparativa de Min. Log de BER vs. Distancia de enlace QAM y DP-QPSK. ....	85
Figura 3. 22: Comparativa de BER vs Potencia entre formatos QAM y DP-QPSK. ....	86
Figura 3. 23: Comparativa Factor Q vs Distancia de enlace entre formatos QAM y DP-QPSK. ....	87

## **RESUMEN**

En este estudio se evalúan las redes ópticas pasivas (PON) de alta velocidad, resaltando su rentabilidad y eficiencia operativa. Usando simulaciones en OptiSystem, se analizaron los formatos de modulación QAM y DP-QPSK en términos de capacidad de transmisión y eficiencia espectral. Los resultados demuestran que DP-QPSK es superior a QAM, especialmente en escenarios de larga distancia y potencia reducida, mostrando menor tasa de error y mayor eficiencia, lo que lo convierte en la opción preferida para PON de alta demanda y transmisión a más de 50 km. Por su sencillez, QAM es eficaz en distancias cortas, pero carece de robustez para aplicaciones de alta capacidad. Con estas ventajas, las PON con DP-QPSK se posicionan como una tecnología clave para el futuro de las redes de acceso de banda ancha, ofreciendo una solución escalable y eficiente ante el crecimiento de la demanda.

Palabras claves: Modulación, Capacidad, Eficiencia y Transmisión.

## **ABSTRACT**

This study evaluates high-speed Passive Optical Networks (PON), highlighting their cost-effectiveness and operational efficiency. Using simulations in OptiSystem, the QAM and DP-QPSK modulation formats were analyzed in terms of transmission capacity and spectral efficiency. The results demonstrate that DP-QPSK is superior to QAM, especially in long-distance and low-power scenarios, showing a lower error rate and greater efficiency, making it the preferred option for high-demand PON and transmission over 50 km. Due to its simplicity, QAM is effective for short distances but lacks the robustness needed for high-capacity applications. With these advantages, PON with DP-QPSK positions itself as a key technology for the future of broadband access networks, offering a scalable and efficient solution in response to growing demand.

**Keywords:** Modulation, Capacity, Efficiency and Transmission.

# INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de las comunicaciones, el aumento constante en la demanda de ancho de banda y la necesidad de velocidades de transmisión más rápidas y confiables han llevado al desarrollo de tecnologías innovadoras en el campo de las redes ópticas (Nance Hall et al., 2021).

Las redes ópticas pasivas (Passive Optical Networks, PONs), en particular, han demostrado ser una solución efectiva para satisfacer estas demandas, ya que ofrecen una mayor capacidad de transmisión y una menor latencia en comparación con las redes tradicionales (Horvath, Munster, et al., 2020)

La implementación y evaluación de PONs de alta velocidad utilizando formatos de modulación avanzados se han convertido en un tema de gran relevancia en el campo de las comunicaciones ópticas. Con el aumento constante en la demanda de ancho de banda y la necesidad de redes más eficientes y rápidas, es crucial investigar y desarrollar nuevas tecnologías que puedan satisfacer estas demandas de manera efectiva (Bonk, 2021).

En los últimos años, se ha observado un crecimiento significativo en el uso de formatos de modulación avanzados, como Modulación por Amplitud en Cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) (Méndez et al., 2021) y Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) (Delgado M. et al., 2017; Ullah et al., 2023), en las redes ópticas.

Por otra parte, los formatos de modulación avanzados, como QAM y DP-QPSK, proporcionan soluciones para responder a los retos que plantean el aumento de la demanda de ancho de banda y la mejora de la eficiencia espectral, siendo esencial un análisis detallado de su implementación en redes ópticas pasivas de alta velocidad.

En ese sentido, el presente estudio propone evaluar el impacto de estos formatos de modulación en el rendimiento de las PON, empleando para ello el entorno de simulación OptiSystem. El desarrollo del estudio incluirá la simulación de escenarios de transmisión con diferentes configuraciones de modulación, evaluando parámetros clave como la tasa de error de bits (BER), el factor Q y la eficiencia espectral. Para cada configuración, se analizarán los resultados obtenidos para determinar la viabilidad y el rendimiento de los

formatos en diferentes condiciones de red. A través de esta evaluación, se busca comprobar hasta qué punto resultan eficientes tales formatos en la mejora de la capacidad de transmisión y la optimización de la eficiencia espectral, al tiempo que se abordan los retos actuales relacionados con la calidad de servicio.

Estos formatos de modulación permiten una transmisión de datos más eficiente y confiable, lo que los hace ideales para redes de alta velocidad. Sin embargo, la implementación práctica de estos formatos de modulación en redes ópticas pasivas presenta varios desafíos que deben abordarse.

Según Abdellaoui et al., (2021) uno de los principales desafíos en la implementación de PONs de alta velocidad es la capacidad de garantizar una calidad de servicio adecuada. A medida que aumenta la velocidad de transmisión de datos, factores como la dispersión cromática o el ruido, incluyendo el ruido térmico y de disparo, pueden incrementar la probabilidad de errores en la señal, afectando negativamente la calidad de la transmisión.

Por lo tanto, es fundamental evaluar y optimizar el rendimiento de la red para garantizar una transmisión de datos confiable y de alta calidad (Zamora R., 2022). Otro desafío importante en la implementación de redes ópticas pasivas de alta velocidad es la gestión eficiente de los recursos de red (Nsafoa-Yeboah et al., 2022).

Con el aumento en la demanda de ancho de banda, es crucial utilizar los recursos de manera efectiva para garantizar un rendimiento óptimo de la red (Sarigiannidis et al., 2015). Esto incluye la optimización de la asignación de recursos, la gestión de la congestión y la planificación adecuada de la capacidad de la red.

Además, es importante tener en cuenta los avances tecnológicos en el campo de las comunicaciones ópticas, como la introducción de redes de próxima generación y la adopción de tecnologías emergentes como la computación cuántica (Butt & Mateos, 2024). Estos avances están cambiando rápidamente el panorama de las comunicaciones ópticas y presentan nuevas oportunidades y desafíos para la implementación de redes ópticas pasivas de alta velocidad.

El presente trabajo de titulación tiene la siguiente estructura, en el Capítulo 1 se presenta el Marco Teórico Referencial en que se presenta el estado del arte y la descripción teórica

de las comunicaciones ópticas. A continuación, en el Capítulo 2 se describe la Metodología del trabajo en base a normativas de la maestría en telecomunicaciones en UPSE. Finalmente, se presenta el Capítulo 3 donde se realiza el diseño de simulación para obtener la data y generación de gráficas relacionadas al rendimiento del sistema propuesto para la discusión respectiva de los resultados obtenidos

### **Planteamiento de la investigación**

La implementación de redes ópticas pasivas de alta velocidad es crucial para garantizar un rendimiento óptimo. Estas redes son esenciales en aplicaciones modernas que demandan un alto ancho de banda, como el streaming de video en alta definición, la telemedicina, el IoT y la inteligencia artificial. Estas aplicaciones dependen de una infraestructura de red robusta y eficiente que pueda manejar grandes volúmenes de datos de manera rápida y confiable.

Los problemas técnicos que se abordan incluyen pérdidas y atenuación en la fibra óptica, dispersión cromática y modal, interferencia y ruido en la señal, capacidad de la red y ancho de banda, así como compatibilidad e interoperabilidad. En este contexto, se planea abordar estos desafíos mediante la implementación de formatos de modulación avanzados, como QAM y QPSK con polarización dual (Dual Polarization QPSK, DP-QPSK). Estas técnicas mejoran la capacidad y eficiencia de las redes ópticas pasivas al aumentar la densidad de transmisión de datos, reducir la sensibilidad a la dispersión cromática y modal, y minimizar el impacto del ruido y la interferencia. Como resultado, se logra un mayor ancho de banda y una señal más robusta y estable. Estos formatos permiten una transmisión de datos más rápida y confiable, lo que las hace ideales para aplicaciones que requieren altas velocidades de transmisión y baja latencia.

Además, la investigación en este campo es relevante debido a la necesidad de optimizar el uso de los recursos de red y garantizar una calidad de servicio adecuada. La implementación de redes ópticas pasivas de alta velocidad utilizando formatos de modulación avanzados puede ayudar a mejorar la gestión de los recursos de red, reducir la congestión y garantizar una transmisión de datos más eficiente y confiable.

Otra justificación para esta investigación es la necesidad de evaluar y comparar diferentes formatos de modulación avanzados en un entorno práctico. Si bien existen estudios teóricos sobre los beneficios de estos formatos de modulación, es importante llevar a cabo investigaciones prácticas para validar estas afirmaciones y comprender mejor su impacto en el rendimiento de la red.

Este proyecto se desarrollará en un entorno de simulación basado en el software OptiSystem, un programa de comunicaciones ópticas altamente reconocido por su capacidad de modelización y análisis de redes ópticas. El software OptiSystem ofrece un entorno de simulación que permite la evaluación práctica de formatos de modulación avanzados, como QAM y DP-QPSK, en redes ópticas pasivas de alta velocidad. OptiSystem permite una evaluación controlada pero realista de cómo estas técnicas de modulación pueden superar los retos técnicos identificados, como la dispersión cromática y modal, las interferencias de señal y el ruido. Mediante la simulación de condiciones reales, el presente estudio abordará estos desafíos optimizando la capacidad de transmisión y la eficiencia espectral de la red, para garantizar que las soluciones aplicadas sean viables y eficaces.

Por otro lado, esta investigación abordará los problemas detectados aplicando las técnicas de modulación que mejoran el rendimiento de la red. Con este enfoque práctico, los retos relacionados con la capacidad de la red, la calidad de la señal y la utilización eficiente del ancho de banda se abordarán de forma sistemática, de manera que los resultados ofrezcan ideas prácticas para su implementación y aplicación en condiciones reales.

### **Formulación del problema de investigación**

El problema científico que aborda esta investigación es la necesidad de implementar y evaluar PONs de alta velocidad utilizando formatos de modulación avanzados en un entorno práctico. A pesar de los avances en tecnología de comunicaciones ópticas, la implementación efectiva de redes ópticas pasivas de alta velocidad sigue siendo un desafío debido a varios factores.

Estos factores incluyen la pérdida y atenuación de la señal en largas distancias, así como la dispersión cromática y modal que afecta la integridad de la señal. Además, la interferencia y el ruido reducen la calidad de la transmisión, mientras que la capacidad limitada para manejar grandes volúmenes de datos puede comprometer la eficiencia de la red.

Uno de los principales desafíos es la capacidad de garantizar una transmisión de datos confiable y de alta calidad en redes de alta velocidad. Los formatos de modulación avanzados, como QAM y DP-QPSK, ofrecen una mayor eficiencia espectral y una mayor capacidad de transmisión, pero también introducen nuevos desafíos, como una mayor susceptibilidad al ruido y la distorsión. Por lo tanto, es crucial evaluar cómo estos formatos de modulación avanzados se comportan en un entorno práctico y cómo afectan la calidad de servicio de la red.

¿Qué impacto tiene la implementación de formatos de modulación avanzados en la eficiencia espectral y la capacidad de transmisión, considerando la sensibilidad al ruido y la complejidad de implementación, en comparación con los formatos de modulación tradicionales en redes ópticas pasivas?

Hay dos aspectos técnicos que deben evaluarse para responder a los retos que plantean los formatos de modulación avanzados, como QAM y DP-QPSK: la sensibilidad al ruido y la complejidad de la implementación. Aunque estos formatos ofrecen una mayor eficiencia espectral y una mayor capacidad de transmisión, resultan más sensibles al ruido, incluido el ruido térmico, el ruido de fase y las distorsiones no lineales. Tal sensibilidad puede afectar considerablemente a la calidad de la señal, especialmente en las transmisiones de larga distancia, lo que dificulta la integridad de los datos.

Esta problemática es muy relevante en el avance continuo de las redes ópticas, ya que resolver estos inconvenientes no sólo mejoraría la eficacia de las transmisiones de datos a alta velocidad, sino que también prepararía el camino para la próxima generación de tecnologías de la comunicación. Si se atenúa la sensibilidad al ruido y disminuye la complejidad de la implementación, la incorporación de formatos de modulación avanzados a las redes ópticas pasivas (PON) resultaría más factible para un despliegue comercial generalizado. Asimismo, la solución de estos problemas contribuirá de forma

directa a mejorar el rendimiento de las redes, minimizar la latencia e incrementar la eficiencia general de los sistemas de comunicación, requisitos fundamentales para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda en aplicaciones modernas como la telemedicina, computación en la nube, los servicios de streaming y el Internet de las Cosas (IoT).

### **Justificación:**

Las aplicaciones actuales, tales como servicios de streaming, telemedicina, IoT e inteligencia artificial, demandan cada vez más redes de comunicación de alta velocidad y disponibilidad, las cuales requieren una infraestructura robusta que permita soportar grandes cantidades de datos con una latencia mínima. Las redes ópticas pasivas (PON) son una solución potencialmente eficiente debido a su gran ancho de banda y baja latencia respecto a las tecnologías de comunicación tradicionales.

Ahora bien, conforme aumenten las necesidades de la red, será necesario explorar y aplicar técnicas avanzadas para optimizar aún más el rendimiento de las PON, sobre todo utilizando formatos de modulación avanzados como la modulación de amplitud en cuadratura (QAM) y la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con polarización dual (DP-QPSK). Estas técnicas permiten no solo mejorar la capacidad de transmisión de las PON, sino también garantizar que aplicaciones críticas como la telemedicina y el IoT mantengan un funcionamiento eficiente y confiable, clave para operaciones en tiempo real.

La justificación de esta investigación es que, si bien los formatos de modulación avanzados tienen un gran potencial para mejorar la eficiencia espectral y la capacidad de transmisión de datos, también presentan problemas técnicos, como mayor sensibilidad al ruido y mayor complejidad de implementación. La superación de estos retos es decisiva para la adopción generalizada de PON de alta velocidad en entornos comerciales e industriales. Este estudio no solo contribuirá al avance teórico en la optimización de redes ópticas, sino que proporcionará una base práctica para su implementación en dichos entornos.

En condiciones reales, sin una evaluación del rendimiento de estas técnicas de modulación, incluido su comportamiento en presencia de ruido e interferencias, resulta imposible aprovechar plenamente sus ventajas. Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo contribuir a mejorar la eficacia de estos formatos para mejorar el rendimiento de las redes.

### **Objetivo General:**

Evaluar el impacto de la implementación de redes ópticas pasivas de alta velocidad utilizando formatos de modulación avanzados, como QAM y DP-QPSK en el entorno de simulación OptiSystem, para determinar su efectividad en mejorar la capacidad de transmisión y la eficiencia espectral.

### **Objetivos Específicos:**

1. Revisar la literatura existente sobre redes ópticas pasivas y formatos de modulación avanzados utilizando análisis exhaustivos de publicaciones científicas y técnicas, para identificar las tendencias actuales y fundamentar el desarrollo del estudio.
2. Diseñar y simular una red óptica pasiva de alta velocidad utilizando formatos de modulación avanzados para evaluar el rendimiento de la transmisión de datos.
3. Evaluar el rendimiento de la red en términos de capacidad de transmisión de datos, eficiencia espectral y calidad de servicio a través de escenarios de simulación de las técnicas de modulación como QAM y DP-QPSK para analizar cómo estas técnicas mejoran el rendimiento de la red y validar su eficacia en entornos simulados
4. Comparar los resultados obtenidos con diferentes formatos de modulación y mediante análisis detallado para discutir las ventajas y desventajas de cada uno.

## **Planteamiento hipotético**

La implementación de redes ópticas pasivas de alta velocidad, utilizando formatos de modulación avanzados, tiene el potencial de mejorar significativamente el rendimiento de las redes ópticas y satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda (Calvo-Salcedo et al., 2023; Sharma et al., 2022). Se hipotetiza que el uso de formatos de modulación avanzados, como QAM y DP-QPSK, puede aumentar tanto la capacidad de transmisión como la eficiencia espectral de las redes ópticas pasivas, resultando en una transmisión de datos más rápida y confiable (Ogawa, 2024).

Además, se plantea que la adopción de estos formatos de modulación avanzados en redes ópticas pasivas de alta velocidad puede mejorar la calidad del servicio (Hamza et al., 2021) al reducir la probabilidad de errores y la degradación de la señal. Esta mejora en la calidad del servicio debería traducirse en una experiencia del usuario más satisfactoria y en un mayor nivel de satisfacción con el uso de las redes ópticas.

En esta investigación se trata de contribuir a la solución de retos técnicos clave mediante la evaluación analítica de cómo los formatos avanzados de modulación permiten resolver problemas específicos de rendimiento de las redes. Por ejemplo, estos formatos pueden mitigar la degradación de la señal provocada por la dispersión cromática y la dispersión modal, que son habituales en las transmisiones ópticas de alta velocidad. Además, al mejorar la eficiencia espectral, estos formatos permiten un mayor rendimiento de los datos sin necesidad de incrementar significativamente el ancho de banda, lo cual es fundamental para incrementar la capacidad de la red y satisfacer la demanda futura.

Con esta investigación no sólo se pretende mejorar el rendimiento de las redes, sino también la experiencia de los usuarios, ya que se garantizan servicios más rápidos y eficaces, con menos interrupciones y una mayor conectividad general. Además, los resultados de la investigación permitirán proponer soluciones prácticas para mejorar el despliegue y la escalabilidad de las redes ópticas pasivas, lo que facilitará la adopción de estas tecnologías para satisfacer las futuras necesidades de comunicación.

# CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

## 1.1. Revisión de literatura

Las PONs han surgido como una tecnología fundamental en el ámbito de las comunicaciones por fibra óptica, ofreciendo conectividad de alta velocidad y soluciones rentables para las redes de acceso de banda ancha (Dias et al., 2022). A medida que la demanda de ancho de banda continúa aumentando, impulsada por aplicaciones emergentes como 5G, Internet de las Cosas (IoT) y computación en la nube (Chang, 2019), la necesidad de sistemas PON más eficientes y de mayor capacidad se ha vuelto primordial.

Esta revisión de literatura tiene como objetivo explorar el estado actual de la investigación y el desarrollo en PON de alta velocidad, con un enfoque particular en los formatos de modulación avanzados que permiten un rendimiento mejorado y mayores tasas de datos. La evolución de las tecnologías PON ha estado marcada por avances significativos en las velocidades de transmisión y las arquitecturas de red.

Los sistemas PON tradicionales, como Gigabit PON (GPON) y Ethernet PON (EPON), han allanado el camino para las PON de próxima generación que ofrecen capacidades de varios gigabits. Los investigadores han estado explorando varias técnicas para expandir los límites del rendimiento de las PON, incluyendo esquemas de modulación avanzados, multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y nuevos algoritmos de procesamiento de señales.

Una de las áreas clave de enfoque en la literatura reciente ha sido el desarrollo e implementación de formatos de modulación avanzados para PON de alta velocidad. Xie et al., (2023) realizaron un estudio exhaustivo sobre la aplicación de la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM) en sistemas PON. Su investigación demostró que el esquema QAM de orden superior, como 64-QAM, puede aumentar significativamente la eficiencia espectral y las tasas de datos en comparación con la modulación tradicional de Encendido-Apagado (OOK). Sin embargo, también destacaron los desafíos asociados con

la implementación de estos formatos, incluyendo una mayor sensibilidad al ruido y los efectos no lineales en la fibra óptica.

Basándose en este trabajo, Zhang et al. (2021) propusieron muestra un novedoso codificador/decodificador adaptativo de modulación de amplitud en cuadratura (QAM) para carga de bits y potencia basado en multiplexación por división de frecuencia ortogonal con modulación adaptativa (AM-OFDM). Su enfoque combina QAM con Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) para lograr un rendimiento mejorado en entornos de transmisión variables. Los autores reportaron una mejora en la capacidad del sistema en comparación con los esquemas de modulación fija, demostrando el potencial de las técnicas adaptativas para mejorar la eficiencia de las PON.

Otra vía prometedora de investigación ha sido la exploración de OFDM Óptico Coherente (CO-OFDM) para PON de alta velocidad. Un estudio de Haider et al., (2021) investigó la viabilidad de implementar CO-OFDM en sistemas PON de próxima generación. Sus resultados experimentales mostraron que CO-OFDM podría alcanzar tasas de datos de hasta 100 Gbps en un tramo de fibra de 400 km, que puede emplearse eficazmente en la red backhaul 5G.

La integración de la tecnología WDM con formatos de modulación avanzados también ha captado una atención significativa en la literatura. Shi et al., (2023) propusieron una arquitectura híbrida WDM-PON que combina la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) y modulación QAM de alto orden. Sus resultados de simulación demostraron que el modelo presentado se estima con éxito para una longitud FSO de 600 m y un alcance SMF de 30 km en función de diferentes condiciones meteorológicas y de atenuación.

A medida que las tecnologías PON continúan evolucionando, los investigadores también están abordando los desafíos asociados con la implementación de estos sistemas avanzados en escenarios del mundo real. Abejide et al., (2024) revisaron la evolución de las PON hasta las PON actuales y futuras para estudiar diferentes enfoques de modulación, sus limitaciones y complejidades. Sus hallazgos enfatizaron la necesidad de

un enfoque holístico en el diseño de PON que equilibre las mejoras de rendimiento con las limitaciones prácticas de implementación.

El desarrollo de algoritmos eficientes de Procesamiento de Señales Digitales (DSP) ha sido crucial para permitir la implementación de formatos de modulación avanzados en PON. Wei et al., (2021) presentaron una nueva arquitectura DSP diseñada específicamente para receptores PON de alta velocidad. El diseño incluye una arquitectura de procesamiento digital de señales (DSP) de baja complejidad y alto rendimiento para modulación por amplitud de pulsos (PAM-4), reutiliza componentes comerciales económicos de 10 G y elimina la necesidad de un componente de radiofrecuencia (RF) de alto consumo en el transmisor.

A medida que avanza la investigación en PON de alta velocidad, hay un creciente interés en explorar el potencial del aprendizaje automático y la inteligencia artificial para optimizar el rendimiento de la red. Por ejemplo, Chou & Kahn, (2020) en su trabajo introducen la codificación y modulación adaptativa (ACM) en redes ópticas pasivas (PONs) de detección directa operando más allá de 10 Gbps por longitud de onda para permitir que cada usuario transmita a la mayor tasa de bits posible y mejorar la fiabilidad de la red.

Mirando hacia el futuro, varias tendencias emergentes en la investigación de PON son dignas de mención. El concepto de Redes Definidas por Software (SDN) se está explorando como un medio para mejorar la flexibilidad y la gestión de los sistemas PON. Wu et al. (2023) propusieron un algoritmo de asignación dinámica de recursos (DRA) aplicable a todas las redes de acceso basadas en múltiples OLT que soportan tecnología de SDN. Por lo tanto, el DRA propuesto tiene un significado positivo para aliviar la presión del tráfico en los recursos de ancho de banda cada vez más limitados.

Además, la integración de tecnologías PON con otros paradigmas de comunicación emergentes, como la comunicación óptica en espacio libre (FSO) y la comunicación por luz visible (VLC), está ganando terreno. Estos enfoques híbridos ofrecen soluciones prometedoras para extender la conectividad de alta velocidad a escenarios de implementación desafiantes y redes de acceso de última milla.

En conclusión, el campo de las PON de alta velocidad que utilizan formatos de modulación avanzados está evolucionando rápidamente, impulsado por la creciente demanda de ancho de banda y la necesidad de redes de acceso óptico más eficientes. La revisión de literatura ha destacado varias áreas clave de investigación, incluyendo el desarrollo de nuevos esquemas de modulación, la integración de tecnologías WDM y la exploración de enfoques adaptativos y basados en IA para la optimización de la red. A medida que la investigación en este campo continúa progresando, se espera que estos avances jueguen un papel crucial en la configuración del futuro de las redes de acceso de banda ancha y en la habilitación de la próxima generación de servicios de comunicación de alta velocidad.

## **1.2. Fundamentos de Comunicaciones Ópticas**

Las posibilidades que brindan los sistemas de transmisión por fibra óptica, especialmente su capacidad mucho mayor en comparación con otros sistemas, junto con la aparición de nuevos conceptos y jerarquías de red, han provocado una transformación completa en la estructura de las redes de telecomunicaciones existentes. Esta sección explora los fundamentos de los sistemas ópticos, abordando sus componentes esenciales y cómo contribuyen a una transmisión de datos efectiva.

### **1.2.1. Principios básicos de transmisión óptica.**

Los sistemas de comunicación óptica utilizan la luz para transmitir información a largas distancias a través de fibras ópticas. El principio fundamental que subyace a esta tecnología es la reflexión interna total de la luz dentro de un medio dieléctrico. En las fibras ópticas, este medio consiste en un núcleo con un índice de refracción más alto rodeado por un revestimiento con un índice de refracción más bajo. (G. P. Agrawal, 2016; Sugumaran et al., 2021)

La transmisión de datos en sistemas ópticos comienza con la conversión de señales eléctricas en señales ópticas utilizando fuentes de luz como diodos láser o diodos emisores de luz (LED). Estas señales ópticas son luego guiadas a través del núcleo de la fibra, donde experimentan una atenuación y dispersión mínimas. En el extremo receptor, los

fotodetectores convierten las señales ópticas de vuelta en señales eléctricas para su procesamiento.

Como todos los sistemas de comunicaciones, las conexiones ópticas se basan en tres bloques fundamentales (véase la Figura 1.1) para realizar la transferencia de información: el elemento de emisión o transmisión, el canal de comunicación y el receptor. La particularidad de este sistema radica en los elementos utilizados para transportar la información. El bloque de emisión consiste en un dispositivo (el diodo láser) que convierte una señal eléctrica sinusoidal en una señal óptica. El canal de transmisión (la fibra óptica) transporta una portadora óptica modulada que contiene la información. Finalmente, el receptor (el fotodetector) recupera la señal eléctrica transmitida mediante una conversión óptica/eléctrica.

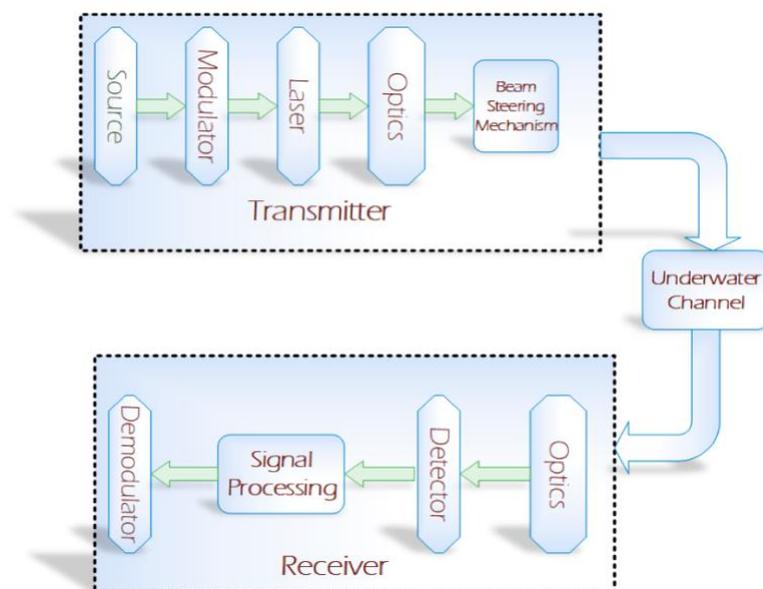


Figura 1. 1: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación óptico submarino.

Fuente: (Kataria et al., 2020)

El comportamiento de la luz en las fibras ópticas está gobernado por las ecuaciones de Maxwell, que describen la propagación de las ondas electromagnéticas. En las fibras monomodo, ampliamente utilizadas en comunicaciones de larga distancia, solo se admite un modo de propagación de la luz, reduciendo la dispersión intermodal y permitiendo mayores tasas de datos en distancias más largas. (Fischer et al., 2021)

### 1.2.2. Características y ventajas de las comunicaciones ópticas

Los sistemas de comunicación óptica ofrecen varias ventajas clave sobre los sistemas tradicionales basados en cobre:

- Alto ancho de banda: las fibras ópticas pueden soportar tasas de datos extremadamente altas, con sistemas comerciales actuales capaces de transmitir cientos de terabits por segundo a través de una sola fibra (Winzer et al., 2018).
- Baja atenuación: las fibras ópticas modernas exhiben una pérdida de señal muy baja, típicamente alrededor de 0.2 dB/km a una longitud de onda de 1550 nm, lo que permite la transmisión a larga distancia sin necesidad de regeneración frecuente de la señal (Keiser, 2021).
- Inmunidad a la interferencia electromagnética: como las señales ópticas no se ven afectadas por campos electromagnéticos, los sistemas de fibra óptica son inmunes a la interferencia electromagnética y la diafonía (Agrawal, 2021).
- Tamaño y peso reducidos: las fibras ópticas son mucho más pequeñas y ligeras que los cables de cobre, lo que facilita su instalación y gestión en diversos entornos (Keiser, 2021).
- Seguridad: las señales de luz en las fibras ópticas son difíciles de interceptar sin detección, proporcionando una mayor seguridad en la transmisión de datos (Agrawal, 2021).
- Escalabilidad: las técnicas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) permiten transmitir múltiples señales simultáneamente a través de una sola fibra, aumentando significativamente la capacidad del sistema (Winzer et al., 2018).

Estas características hacen que los sistemas de comunicación óptica sean ideales para una amplia gama de aplicaciones, desde telecomunicaciones de larga distancia hasta centros de datos de alta velocidad y redes de acceso de última milla.

### 1.2.3. Tipos de redes ópticas (activas y pasivas) y sus diferencias

Las redes ópticas se pueden categorizar ampliamente en dos tipos principales: redes ópticas activas (AON) y redes ópticas pasivas (PON). La diferencia clave entre estos tipos de redes radica en la naturaleza de los componentes utilizados en sus redes de distribución.

1. **Redes Ópticas Activas (AON):** Las AON utilizan equipos de conmutación alimentados eléctricamente, como enrutadores o conmutadores, para gestionar la distribución de señales y dirigir los datos a clientes específicos. Estas redes típicamente emplean una arquitectura punto a punto, donde cada usuario tiene una conexión de fibra dedicada a la oficina central (Effenberger, 2016).

#### **Características de las AON:**

- Mayor consumo de energía debido a los componentes activos
- Mayor flexibilidad en la gestión y reconfiguración de la red
- Potencialmente mayor ancho de banda por usuario
- Mayores requisitos de mantenimiento y costos operativos

2. **Redes Ópticas Pasivas (PON):** las PON utilizan divisores ópticos sin alimentación para distribuir señales desde una sola fibra a múltiples usuarios finales. Estas redes típicamente emplean una arquitectura punto a multipunto, donde una sola fibra de la oficina central es compartida entre múltiples usuarios (Effenberger, 2016).

#### **Características de las PON:**

- Menor consumo de energía y costos operativos
- Arquitectura de red simplificada y mantenimiento más sencillo
- Despliegue rentable para acceso de última milla
- Flexibilidad limitada en comparación con las AON

La elección entre AON y PON depende de varios factores, incluyendo costos de despliegue, ancho de banda requerido y complejidad de gestión de la red. Las PON han ganado una popularidad significativa en los despliegues de fibra hasta el hogar (FTTH) debido a su rentabilidad y facilidad de mantenimiento (Nesset, 2017).

Avances recientes en tecnologías PON, como XG-PON (10 Gbps) y NG-PON2 (40 Gbps), han aumentado aún más el atractivo de las redes ópticas pasivas para el acceso a banda ancha de alta velocidad (Nesset, 2017).

#### **1.2.4. Evolución de las redes ópticas pasivas**

La evolución de las PONs desde su aparición ha sido notable, como consecuencia de los significativos avances tecnológicos en el campo de las telecomunicaciones. Las PONs se han convertido en una solución para la distribución de servicios de fibra óptica en zonas residenciales como comerciales, y su crecimiento se ha visto motivado por las exigencias cada vez mayores de mayor ancho de banda y mejor calidad en la transmisión de datos.

En la década de 1990 aparecieron por primera vez los sistemas de transmisión óptica pasiva destinados a proporcionar acceso de fibra óptica a los abonados o usuarios finales con independencia de la presencia de equipos activos en la red de distribución. Dichas redes utilizaron dispositivos básicos de división de longitudes de onda y divisores ópticos que permitieron conectar varios usuarios a una única línea de fibra, lo que proporcionó a la transmisión de datos una solución económica y eficaz.

Los componentes de las PON fueron perfeccionándose e incorporando nuevas tecnologías. Así, a mediados de la década de 2000, apareció la GPON (Gigabit Passive Optical Network, red óptica pasiva Gigabit), una tecnología que permitió incrementar la capacidad de transmisión, alcanzando velocidades de hasta 2,5 Gbps en sentido descendente y 1,25 Gbps en sentido ascendente. Esto permitió soportar aplicaciones de mayor demanda, como vídeo de alta definición y servicios de datos de alta velocidad.

Sin embargo, la evolución no se detuvo hasta la adopción de las tecnologías XG-PON (Red Óptica Pasiva de 10 Gigabits) y NG-PON2 (Red Óptica Pasiva de Nueva Generación 2), que alcanzan velocidades de hasta 10 Gbps y admiten múltiples longitudes

de onda en la misma fibra. Ambas tecnologías incrementaron de forma significativa la capacidad y flexibilidad de las PONs, gracias a lo cual los prestadores de servicios ahora ofrecen banda ancha ultrarrápida y servicios integrados como IPTV, telefonía e Internet. En la actualidad, esta tecnología evoluciona con la investigación y el desarrollo de tecnologías como TWDM-PON (PON multiplexadas por división de tiempo y longitud de onda) y PONs de alta capacidad que buscan aumentar aún más la capacidad y la eficiencia de la red. La finalidad de estas innovaciones es responder a la creciente demanda de datos y ofrecer una infraestructura robusta para el desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios emergentes.

### 1.2.5. Análisis comparativo con otras tecnologías de transmisión

En la Tabla 1.1 se comparan las principales tecnologías de transmisión presentes en las redes de telecomunicaciones actuales: redes ópticas pasivas (PON), redes de cobre (DSL) y redes inalámbricas (4G/5G). Mediante la comparación, se pretende explicar las principales diferencias entre ellas en cuanto a capacidad de ancho de banda, atenuación, inmunidad a perturbaciones, rentabilidad y escalabilidad.

Tabla 1. 1: Comparativa entre tecnologías de transmisión contra PONs.

<b>Aspecto</b>	<b>Redes Ópticas Pasivas (PON)</b>	<b>Redes de Cobre (DSL)</b>	<b>Redes Inalámbricas (4G/5G)</b>
<b>Capacidad de Ancho de Banda</b>	Alta, con opciones para gigabits por segundo	Limitada, generalmente megabits por segundo	Variable, puede alcanzar gigabits por segundo
<b>Atenuación</b>	Baja, adecuada para largas distancias	Alta, afecta la calidad de la señal en largas distancias	Variable, afecta la cobertura y calidad de la señal
<b>Resistencia a Interferencias</b>	Alta, menos susceptible a interferencias electromagnéticas	Baja, susceptible a interferencias eléctricas	Moderada, puede verse afectada por obstrucciones y interferencias

<b>Costo de Implementación</b>	Moderado a alto, pero sin costos operativos continuos significativos	Bajo a moderado, con costos operativos continuos	Alto, especialmente para la infraestructura 5G
<b>Escalabilidad</b>	Alta, permite actualizaciones y expansión sin grandes cambios en la infraestructura	Limitada, requiere actualizaciones de infraestructura para mayores velocidades	Alta, con capacidades para futuras expansiones y mejoras tecnológicas

Fuente: (Horvath, Munster, et al., 2020; Ma & Jia, 2017; Yazbeck & Belyaev, 2019)

### 1.3. Formatos de Modulación Avanzados

Los formatos de modulación avanzados han transformado significativamente el panorama de los sistemas de comunicación óptica, permitiendo velocidades de datos sin precedentes y mejorando la eficiencia de la utilización del ancho de banda (Liu, 2019). Estas sofisticadas técnicas codifican la información en ondas de luz variando la amplitud, la fase y la polarización, lo que permite una transmisión robusta incluso en presencia de ruido y otras degradaciones de la señal. Esta sección ofrece una visión en profundidad de los formatos de modulación avanzados y su papel vital en la mejora del rendimiento de las PONs de alta velocidad.

La incesante demanda de mayores velocidades de transmisión de datos y mayor eficiencia espectral ha impulsado el desarrollo y la adopción de formatos de modulación avanzados (Welch et al., 2023). Los esquemas de modulación binaria tradicionales, como la modulación On-Off (OOK), aunque sencillos y eficaces para velocidades de datos más bajas, se quedan cortos cuando se requiere mayor capacidad y eficiencia. Los formatos de modulación avanzados, como QAM y DP-QPSK, responden a estas necesidades utilizando esquemas de señalización más complejos.

#### 1. Modulación de amplitud en cuadratura (QAM):

QAM es un esquema de modulación que transmite datos cambiando la amplitud de dos ondas portadoras que están desfasadas entre sí  $90^\circ$  (cuadratura). Los datos se

codifican tanto en la amplitud como en fase de la señal (Wu et al., 2019), lo que permite aumentar considerablemente la cantidad de información transmitida por símbolo. Este aumento se consigue asignando múltiples bits a cada símbolo, representados como puntos en un diagrama de constelación.

En aplicaciones prácticas, QAM puede encontrarse en varios órdenes, como 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM, donde el número indica los distintos estados que puede ocupar la señal. Los formatos QAM de orden superior, según (Li et al., 2023) ofrecen mayores velocidades de transmisión de datos gracias al mayor número de bits por símbolo, también requieren una mayor relación señal/ruido (SNR) y técnicas de corrección de errores más sofisticadas. Esto convierte a QAM en un esquema de modulación muy eficaz para sistemas de comunicación óptica de alta capacidad, aunque con una mayor complejidad de implementación y procesamiento.

## **2. Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con polarización dual (DP-QPSK):**

DP-QPSK es un formato de modulación avanzado que mejora aún más la capacidad de transmisión de datos utilizando la polarización de la luz (Muhammad et al., 2020). Combina dos señales QPSK independientes en polarizaciones ortogonales de la misma onda portadora. La propia QPSK modula la fase de la portadora en cuatro estados posibles (0, 90, 180 y 270 grados), cada uno de los cuales representa 2 bits de información.

Al transmitir dos de estas señales QPSK en polarizaciones ortogonales, DP-QPSK duplica la velocidad de transmisión de datos en comparación con QPSK de polarización única. Este enfoque de multiplexación por polarización no sólo aumenta la eficiencia espectral, sino que también mejora la robustez del sistema frente a la dispersión del modo de polarización (PMD) y otras deficiencias relacionadas con la polarización. DP-QPSK es especialmente ventajoso para los sistemas de transmisión de larga distancia y alta capacidad debido a su resistencia y capacidad para mantener un alto rendimiento a grandes distancias.

Los formatos de modulación avanzados como QAM y DP-QPSK son cruciales en la comunicación óptica moderna, ya que permiten al sector seguir el ritmo de la creciente demanda de ancho de banda e Internet de alta velocidad. Las siguientes secciones profundizarán en las características, ventajas y aplicaciones específicas de estos formatos de modulación, ilustrando su importancia en el ámbito de las redes ópticas.

### **1.3.1. Modulación de amplitud en cuadratura (QAM)**

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM) es una sofisticada técnica de modulación muy utilizada en los sistemas de comunicación digital (Grami, 2016), incluidas las redes ópticas. La QAM combina la modulación de amplitud y fase, lo que permite transmitir más información por símbolo que otros esquemas de modulación más sencillos, como la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) o la modulación por desplazamiento de fase (PSK).

#### **1.3.1.1. Principio de funcionamiento de QAM**

QAM funciona modulando dos ondas portadoras que están  $90^\circ$  desfasadas entre sí (en cuadratura). Estas portadoras se denominan componentes en fase (I) y en cuadratura (Q). Variando la amplitud y la fase de estos dos componentes, QAM puede representar múltiples bits por símbolo. La combinación de estas variaciones se representa como puntos en un diagrama de constelación, donde cada punto corresponde a un símbolo único.

Por ejemplo, en 16-QAM, el diagrama de constelación contiene 16 puntos distintos (ver Figura 1.2), cada uno de los cuales representa una combinación de cuatro bits. En este diagrama, todos los estados tienen la misma distancia ( $D$ ) entre ellos, lo que proporciona una Protección Equivalente al Error (EEP), asegurando que todos los bits se transmitan con la misma prioridad. Esta característica garantiza que la probabilidad de error sea uniforme tanto para los bits más significativos como para los menos significativos.

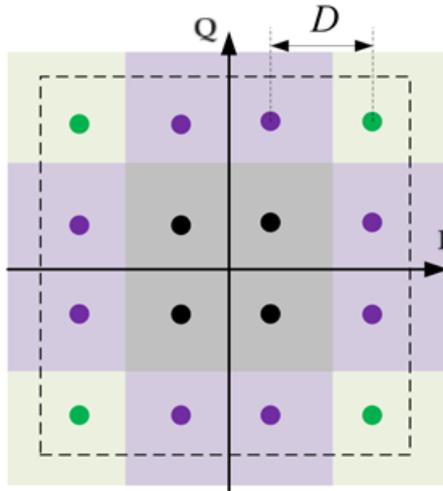


Figura 1. 2: Diagrama de constelaciones para la modulación 16-QAM.

Fuente: (Rouwet, 2022)

Los formatos QAM de orden superior, como 64-QAM o 256-QAM, tienen más puntos en el diagrama de constelación, que representan más bits por símbolo (6 bits para 64-QAM y 8 bits para 256-QAM).

La señal QAM puede expresarse matemáticamente como:

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

donde  $I(t)$  y  $Q(t)$  son las componentes en fase y cuadratura, respectivamente, y  $f_c$  es la frecuencia portadora. La amplitud y la fase de la señal vienen determinadas por los valores de  $I(t)$  y  $Q(t)$ , que se modulan para codificar los datos.

### 1.3.1.2. Ventajas de QAM

- Alta eficiencia espectral: QAM es muy eficiente en términos de utilización del ancho de banda. Al codificar varios bits por símbolo, permite obtener altas velocidades de datos con un ancho de banda limitado.
- Flexibilidad: QAM puede adaptarse a diferentes condiciones de canal ajustando el orden de modulación. La QAM de orden inferior (por ejemplo, 16-QAM) es más resistente al ruido, mientras que la QAM de orden superior (por ejemplo, 256-QAM) proporciona mayores velocidades de datos.

- **Compatibilidad:** QAM se utiliza ampliamente en varios estándares de comunicación digital, incluidos los módems por cable, Wi-Fi y redes celulares, lo que lo convierte en un esquema de modulación versátil.

#### **1.3.1.3. Desafíos y limitaciones de QAM**

- **Sensibilidad al ruido:** Los formatos QAM de orden superior son más susceptibles al ruido y requieren una mayor relación señal/ruido (SNR) para mantener su rendimiento. Esto dificulta su aplicación en entornos ruidosos.
- **Complejidad:** La implementación y demodulación de señales QAM requiere complejas técnicas de procesamiento digital de señales (DSP), lo que aumenta la complejidad y el coste global del sistema.
- **Consumo de energía:** Los formatos QAM de orden superior requieren mayores niveles de potencia para mantener la integridad de la señal, lo que puede aumentar el consumo de energía en el transmisor y el receptor.

#### **1.3.1.4. Aplicaciones de QAM en redes ópticas**

La tecnología QAM se utiliza mucho en redes ópticas para conseguir altas velocidades de transmisión de datos y una utilización eficaz del ancho de banda. En los sistemas de multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM), QAM permite transmitir varios canales de alta velocidad por una sola fibra óptica, lo que aumenta considerablemente la capacidad de la red. QAM también se emplea en sistemas ópticos coherentes, donde se utilizan técnicas DSP avanzadas para mitigar deficiencias como la dispersión cromática y la dispersión del modo de polarización (PMD).

#### **1.3.2. Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con polarización dual (DP-QPSK)**

La modulación por desplazamiento de fase en cuadratura y polarización dual (DP-QPSK) es un formato de modulación avanzado que aprovecha las propiedades de fase y polarización de la luz para mejorar la capacidad de transmisión de datos. Combina dos

señales QPSK en polarizaciones ortogonales, duplicando la velocidad de transmisión de datos en comparación con la QPSK de polarización única.

### 1.3.2.1. Principio de funcionamiento de DP-QPSK

DP-QPSK funciona modulando la fase de la onda luminosa en cuatro estados distintos ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ ) para cada polarización. Cada estado de fase representa dos bits de información. Al utilizar dos polarizaciones ortogonales, DP-QPSK transmite cuatro bits por símbolo, duplicando así la eficiencia espectral.

En los sistemas DP-QPSK (véase la Figura 1.3), la señal óptica se divide en dos componentes de polarización (TE y TM). Cada componente se modula independientemente mediante QPSK y, a continuación, las dos señales polarizadas se combinan para la transmisión. En el receptor, la señal se divide de nuevo y cada componente de polarización se demodula para recuperar los datos transmitidos.

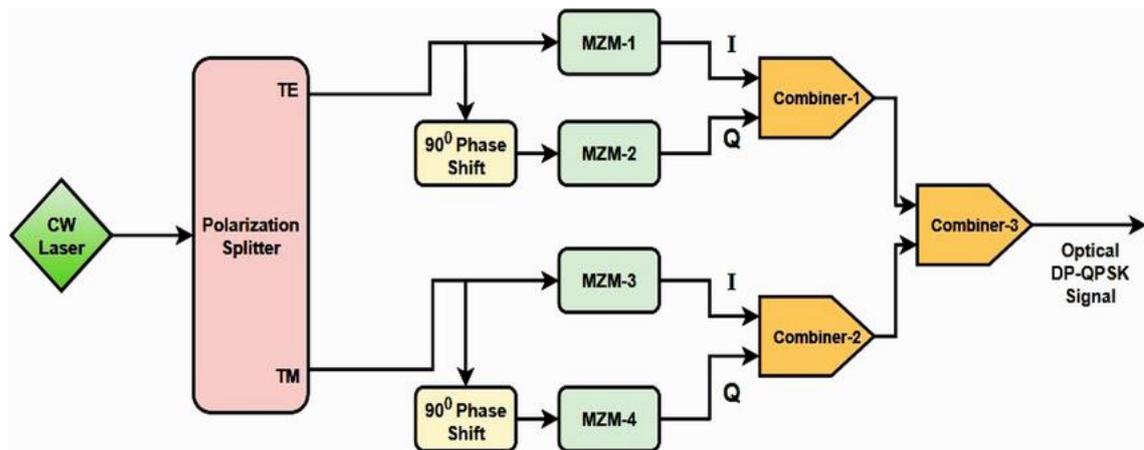


Figura 1. 3: Diagrama de bloques para DP-QPSK.

Fuente: (Rajeev & Kumar, 2024)

La señal DP-QPSK puede expresarse como:

$$s(t) = I_X(t) \cos(2\pi f_c t) - Q_X(t) \sin(2\pi f_c t) + I_X(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi) - Q_X(t) \sin(2\pi f_c t + \varphi)$$

donde  $I_X(t)$  y  $Q_X(t)$  son las componentes en fase y en cuadratura de la polarización TE,  $I_Y(t)$  y  $Q_Y(t)$  son las componentes de la polarización TM, y  $\varphi$  es el desplazamiento de fase entre las polarizaciones.

### 1.3.2.2. Ventajas de DP-QPSK

- Mayor eficiencia espectral: Al utilizar polarizaciones duales, DP-QPSK duplica efectivamente la velocidad de transmisión de datos en comparación con QPSK de polarización única, lo que la hace muy eficiente en términos de utilización del ancho de banda.
- Robustez frente a deficiencias: La DP-QPSK es intrínsecamente más robusta frente a deficiencias como la dispersión cromática y la PMD, que son retos importantes en la transmisión óptica de larga distancia.
- Rendimiento mejorado: El uso de técnicas DSP avanzadas en los receptores DP-QPSK permite compensar eficazmente las deficiencias de transmisión, lo que mejora el rendimiento y aumenta la velocidad de transmisión de datos.

### 1.3.2.3. Retos y limitaciones de DP-QPSK

- Complejidad: La implementación de DP-QPSK requiere sofisticadas técnicas de gestión de polarización y DSP, lo que aumenta la complejidad y el coste global del sistema.
- Dependencia de la polarización: El rendimiento de DP-QPSK puede verse afectado por la dispersión del modo de polarización, lo que requiere métodos avanzados de compensación para mantener la integridad de la señal.
- Requisitos de hardware: Los sistemas DP-QPSK requieren hardware especializado para la multiplexación y demultiplexación por polarización, lo que contribuye a aumentar los costes de implementación.

#### **1.3.2.4. Aplicaciones de DP-QPSK en redes ópticas**

DP-QPSK se utiliza ampliamente en redes ópticas metropolitanas y de larga distancia, donde son cruciales su alta eficiencia espectral y su robustez frente a las deficiencias de transmisión. Resulta especialmente ventajosa en sistemas de cable submarino, donde es primordial maximizar la capacidad de transmisión de datos y garantizar la integridad de la señal a largas distancias. DP-QPSK también se emplea en sistemas ópticos coherentes, donde se utilizan técnicas DSP avanzadas para mejorar el rendimiento y mitigar las deficiencias.

#### **1.3.3. Modulación de amplitud de impulsos (PAM)**

La modulación de amplitud de pulsos (PAM) consiste en hacer variar la amplitud de una señal de impulsos en función de la información transmitida. Pero, a diferencia de los sistemas de modulación digital, donde la información se codifica en fase o frecuencia, la PAM es una representación de los datos mediante niveles discretos de amplitud. Este método es fundamental en sistemas de comunicación ópticos y eléctricos (Che & Chen, 2022). Por lo general, PAM se utiliza en la transmisión de datos a alta velocidad en redes ópticas, principalmente en trayectos cortos y data centers (Pan et al., 2020). Gracias a su implementación relativamente sencilla y a la capacidad de soportar altas velocidades de datos, resulta un método de modulación muy interesante en los sistemas de comunicación modernos.

##### **1.3.3.1. Principio de funcionamiento de PAM**

PAM permite transmitir información cambiando la amplitud de una secuencia de impulsos. Por lo general, PAM utiliza niveles de amplitud discretos (Martinez-Curipoma & Arévalo, 2023), que corresponden cada uno a un símbolo único que representa un conjunto específico de bits de datos. Por ejemplo, en la tecnología PAM de 2 niveles (PAM-2), denominada también PAM binaria, los pulsos pueden tener uno de los dos niveles de amplitud posibles, es decir, un «0» o un «1» binario. A mayor número de

niveles, el esquema puede codificar más bits por símbolo, como ocurre en la PAM-4, es decir, dos bits por pulso (Arie & Katz, 2022).

La tecnología PAM funciona a partir de los datos digitales que se van a transmitir. Para ello, los datos se dividen en grupos de bits y a cada uno de ellos se le asigna un nivel de amplitud (Hung et al., 2023). Después, la señal PAM es generada por la modulación de la amplitud de un impulso de la portadora de acuerdo con la asignación de estos niveles. En las redes de fibra óptica, la señal modulada viaja a través de una fibra óptica donde cada impulso equivale a un determinado nivel de intensidad luminosa.

Otro aspecto decisivo de PAM es su dependencia con respecto a la linealidad del medio de transmisión. Dado que la información se codifica a través de la amplitud de impulsos, cualquier no linealidad de la fibra óptica o de los componentes electrónicos puede distorsionar la señal y provocar errores. Los sistemas PAM suelen incorporar técnicas de compensación de las distorsiones lineales y no lineales en el receptor (Che & Chen, 2022). Para demodular la señal, se muestrean los impulsos recibidos y se asignan a los grupos de bits correspondientes, de modo que se reconstruyen los datos originales.

### **1.3.3.2. Ventajas de PAM**

El sistema PAM proporciona varias ventajas que lo convierten en una técnica ampliamente aceptada en las comunicaciones ópticas. La principal ventaja de la PAM es su aplicación relativamente sencilla (Beguni et al., 2021). Este proceso de modulación de la amplitud de los impulsos es sencillo, lo que supone una menor complejidad en los circuitos del transmisor y el receptor. Además, esta simplificación contribuye a reducir los costos de diseño y fabricación del sistema, haciendo de PAM una propuesta atractiva para el despliegue en el mercado.

Otro aspecto positivo de PAM es que permite altas velocidades de transmisión de datos. Si se incrementa el número de niveles de amplitud (por ejemplo, PAM-4, PAM-8), se podrán transmitir más bits por pulso, lo cual permite optimizar el ancho de banda disponible. Así, la técnica PAM de acuerdo con Pan et al., (2020) es idónea para aplicaciones de alta velocidad de corto alcance, por ejemplo, en data centers, donde la demanda de ancho de banda es elevada. Por otra parte, PAM es compatible con la

infraestructura existente, con lo que se facilita su adopción sin que sea necesaria una amplia remodelación de la red.

La robustez de PAM con respecto a ciertos tipos de ruido, especialmente el ruido de fase, lo convierte en una opción sólida en entornos en los que es difícil mantener la estabilidad de fase. Esto aumenta la calidad de la transmisión de datos, sobre todo en redes ópticas de corta distancia.

### **1.3.3.3. Retos y limitaciones de PAM**

A pesar de sus ventajas, el sistema PAM presenta varios retos y desventajas que hay que gestionar con sumo cuidado en las aplicaciones prácticas. El principal problema de PAM es su sensibilidad al ruido, en especial al ruido de amplitud (Hung et al., 2023). En efecto, como la información es codificada en la amplitud de los impulsos, los errores en los datos recibidos pueden deberse a cualquier ruido que afecte a la amplitud (Zhu et al., 2019). Este problema afecta en particular a los sistemas con altos niveles de atenuación de la señal o en los que la relación señal/ruido es baja.

Además, PAM puede causar interferencias entre símbolos (ISI). Este fenómeno se produce cuando la dispersión ensancha los pulsos, causando la superposición de pulsos adyacentes, provocando errores en la interpretación de la señal transmitida. Este fenómeno se acentúa a medida que se incrementa la velocidad de transmisión de datos o crece la distancia de transmisión, por lo que se requieren sofisticadas técnicas de compensación en el receptor para mitigar la ISI.

Por otra parte, el nivel de eficacia de PAM decrece a medida que se incrementa el número de niveles de amplitud. Así, por ejemplo, PAM-4 permite mayores velocidades de datos, aunque también disminuye la distancia entre niveles de amplitud, provocando que el sistema sea más susceptible al ruido y se requiera una mayor calidad de señal que permita una demodulación adecuada. Estos desafíos tienen que ser resueltos con técnicas adecuadas de diseño de sistemas y procesamiento de señales.

#### **1.3.3.4. Aplicaciones de PAM en redes ópticas**

Cada vez es más conocido el uso de PAM en redes ópticas debido a su equilibrio entre sencillez y rendimiento. Las interconexiones de data centers son una de las aplicaciones más destacadas de PAM, en concreto PAM-4. Los data centers necesitan enlaces ópticos de alta velocidad y corto alcance que puedan hacer frente a la creciente demanda de cloud computing y redes ópticas. Estos últimos necesitan comunicaciones de alta velocidad y corto alcance para satisfacer la creciente demanda de computación en nube y almacenamiento de datos. Se ha generalizado la modulación PAM-4 porque permite una buena relación entre velocidad de transmisión de datos y consumo de energía, lo que la hace adecuada para componentes ópticos de alta densidad y bajo consumo.

La tecnología PAM no sólo se utiliza en data centers, sino también en redes de área metropolitana (MAN), que requieren enlaces rentables y de gran capacidad. PAM es una solución práctica para estas redes, ya que admite altas velocidades de transmisión de datos sin necesidad de complejos bucles de enganche de fase ni procesamiento digital avanzado de señales. Además, la menor complejidad de los transmisores y receptores PAM contribuye a reducir los costes totales del sistema, lo que supone una ventaja significativa en las aplicaciones metropolitanas, donde la escalabilidad y la rentabilidad son esenciales.

#### **1.3.4. Análisis comparativo de las técnicas de modulación**

En las comunicaciones ópticas, las técnicas de modulación son fundamentales para determinar la eficacia, capacidad y alcance del sistema. Tres métodos de modulación muy utilizados son la modulación de amplitud en cuadratura (QAM), la modulación de fase en cuadratura con polarización dual (DP-QPSK) y la modulación de amplitud de impulsos (PAM). Cada técnica ofrece ventajas distintas, lo que las hace idóneas para diferentes aplicaciones, pero también presentan retos específicos.

QAM es famosa por su alta eficacia espectral, ya que combina la modulación de fase y amplitud para transmitir más bits por símbolo. Por eso es ideal para aplicaciones de gran capacidad, como los enlaces de larga distancia. Sin embargo, su complejidad y susceptibilidad al ruido pueden complicar su implantación y mantenimiento.

Por otro lado, DP-QPSK se utiliza habitualmente en sistemas de transmisión de larga distancia por su robustez frente al ruido y la dispersión cromática. Al emplear dos polarizaciones y modulación de fase, DP-QPSK logra un equilibrio entre eficacia espectral y resistencia al ruido. A pesar de estas ventajas, exige un hardware más complejo y costoso.

PAM, especialmente PAM-4, se aplica con frecuencia en redes de corta distancia, como las interconexiones de centros de datos. Su sencillez y compatibilidad con la infraestructura existente la convierten en una opción rentable. Sin embargo, la PAM es más propensa a la atenuación y el ruido, lo que limita su alcance y eficacia en comparación con la QAM y la DP-QPSK.

La Tabla 1.2 ofrece un análisis comparativo de QAM, DP-QPSK y PAM, destacando sus características clave, ventajas y limitaciones en el contexto de las redes ópticas.

Tabla 1. 2: Comparativa entre tecnologías de modulación avanzadas.

<b>Características</b>	<b>QAM</b>	<b>DP-QPSK</b>	<b>PAM</b>
<b>Eficiencia Espectral</b>	Alta (más bits por símbolo)	Moderada (equilibrio entre espectro y ruido)	Moderada a baja (menor en PAM-4)
<b>Resistencia al Ruido</b>	Moderada (sensibilidad al ruido)	Alta (robusto frente al ruido)	Baja (muy susceptible al ruido)
<b>Complejidad de Implementación</b>	Alta (requiere procesamiento complejo)	Alta (hardware avanzado)	Baja (simple implementación)
<b>Aplicaciones Comunes</b>	Enlaces de larga distancia, DWDM	Transmisión de larga distancia	Interconexiones de centros de datos, PONs
<b>Costo de Implementación</b>	Alto	Alto	Bajo
<b>Alcance</b>	Largo (en redes de larga distancia)	Largo (ideal para largas distancias)	Corto (limitado por ruido y atenuación)

Fuente: (Dutta et al., 2022; Hamadamin et al., 2019; A. Kaur & Dewra, 2015;

Sivakumar et al., 2020)

#### 1.4. Redes Ópticas Pasivas (PON)

Una PON es una arquitectura de red de telecomunicaciones basada en fibra óptica que opera bajo el principio de utilizar solo componentes pasivos, es decir, aquellos que no requieren energía externa para funcionar. En una PON, el término "pasivo" se refiere específicamente a los divisores de fibra óptica que se utilizan para distribuir las señales ópticas desde una única fuente a múltiples destinos, sin la necesidad de dispositivos electrónicos activos. Este tipo de red, a menudo denominada también como red punto a multipunto (P2MP), permite una distribución eficiente y económica de servicios de alta velocidad como Internet, televisión y telefonía a múltiples usuarios finales.

Las arquitecturas de PON pueden configurarse en diversas topologías según las necesidades y el diseño de la red. Como se ilustra en la Figura 1.4, estas arquitecturas pueden organizarse en forma de estrella, árbol o bus. La topología en estrella conecta directamente cada nodo final a un nodo central, la topología en árbol utiliza divisores pasivos para ramificar la señal óptica a múltiples nodos finales, y la topología en bus comparte una única fibra óptica entre varios nodos en secuencia.

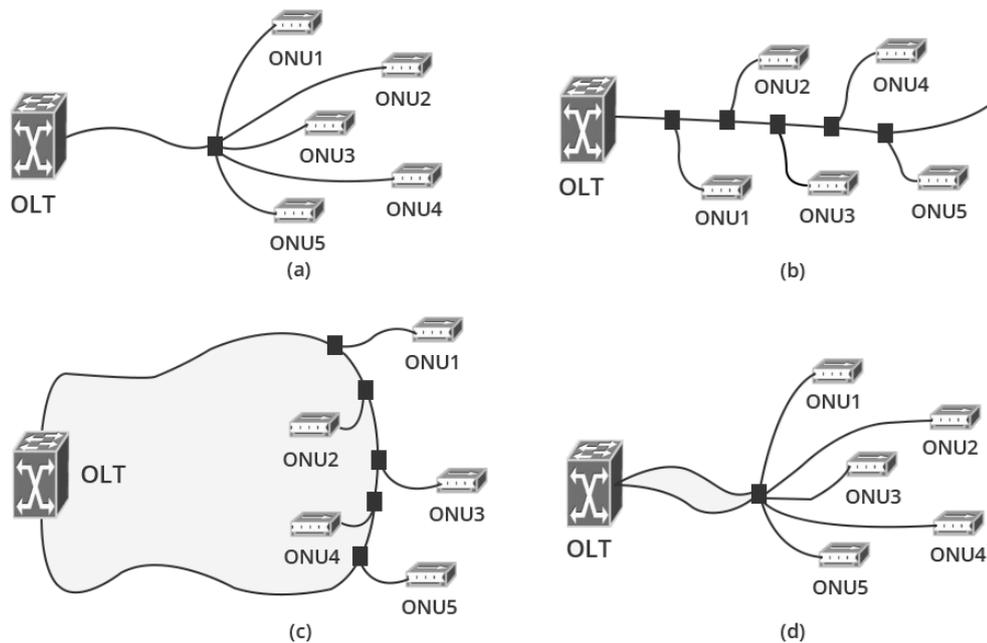


Figura 1. 4: Topologías en PON (a) estrella, (b) bus, (c) anillo, y (d) árbol.

Fuente: (Maamoun & Mouftah, 2011)

### 1.4.1. Principio de funcionamiento de una PON

En una PON, la transmisión de datos se realiza a través de una única fibra óptica utilizando la técnica de multiplexación por división de longitud de onda (WDM). Una PON utiliza componentes ópticos pasivos y cableado, lo que aporta flexibilidad y beneficios económicos en su despliegue. Generalmente, una PON se divide en dos segmentos principales: el segmento de alimentación y el segmento de distribución.

El segmento de alimentación se extiende desde la OLT hasta un Nodo Remoto (RN), donde se instala un divisor óptico pasivo. Este divisor es esencial para dividir la señal óptica entre múltiples rutas. El segmento de distribución va desde el RN hasta las instalaciones de los suscriptores, llevando la señal óptica a los usuarios finales. Una representación conceptual de una red de Fibra hasta el Hogar (FTTH), que es un tipo de PON, se muestra en la Figura 1.5. (Ab-Rahman et al., 2022)

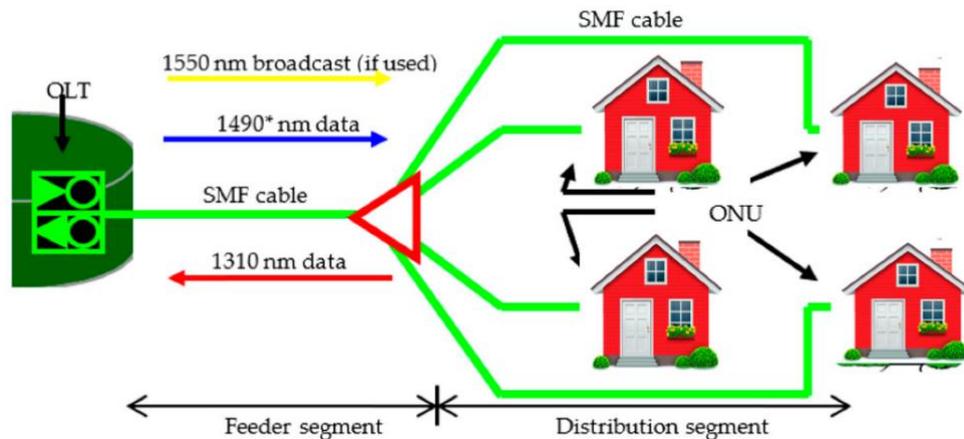


Figura 1. 5: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación óptico submarino.

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

### 1.4.2. Enlace descendente en una PON

En el sentido descendente de una PON (ver Figura 1.6), se utiliza una longitud de onda portadora de 1.49 o 1.55  $\mu\text{m}$  para la transmisión de datos a los usuarios finales. La elección de estas longitudes de onda se basa en su capacidad para ofrecer mayores velocidades de transmisión y un presupuesto de potencia más eficiente.

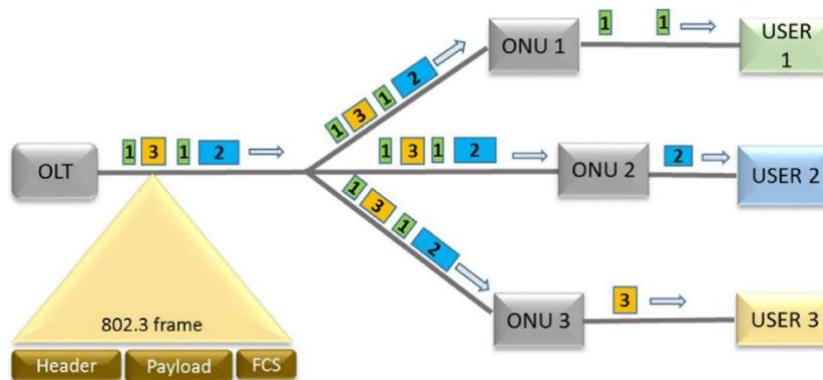


Figura 1. 6: Tráfico descendente en PON.

Fuente: (Obite et al., 2018)

En este sentido, cada abonado recibe únicamente la información dirigida a él. Aunque todos los terminales de red ópticos (Optical Network Terminal, ONT) captan la señal completa, solo el ONT correspondiente retransmite los datos específicos al sistema interno del abonado. El ancho de banda disponible se comparte entre todos los abonados, quienes acceden a los datos según el recurso compartido.

### 1.4.3. Enlace Ascendente en una PON

En el sentido ascendente de una PON (ver Figura 1.7), dado que el acoplador es pasivo y todos los ONT emiten en la misma longitud de onda, si las señales de dos ONT llegaran simultáneamente al acoplador, se mezclarían y resultarían en una señal que no podría ser interpretada por el terminal de línea óptica (Optical Line Terminal, OLT). Para evitar esta interferencia, se utiliza un esquema de multiplexación por división de tiempo (Time Division Multiplexing, TDM).

En este sentido, se emplea una longitud de onda de  $1.31 \mu\text{m}$ , que permite velocidades de transmisión más bajas y utiliza equipos menos costosos, como los láseres de Fabry-Perot. Los usuarios se multiplexan temporalmente en el divisor para gestionar las señales de manera que cada una sea transmitida sin interferencia en el tiempo asignado.

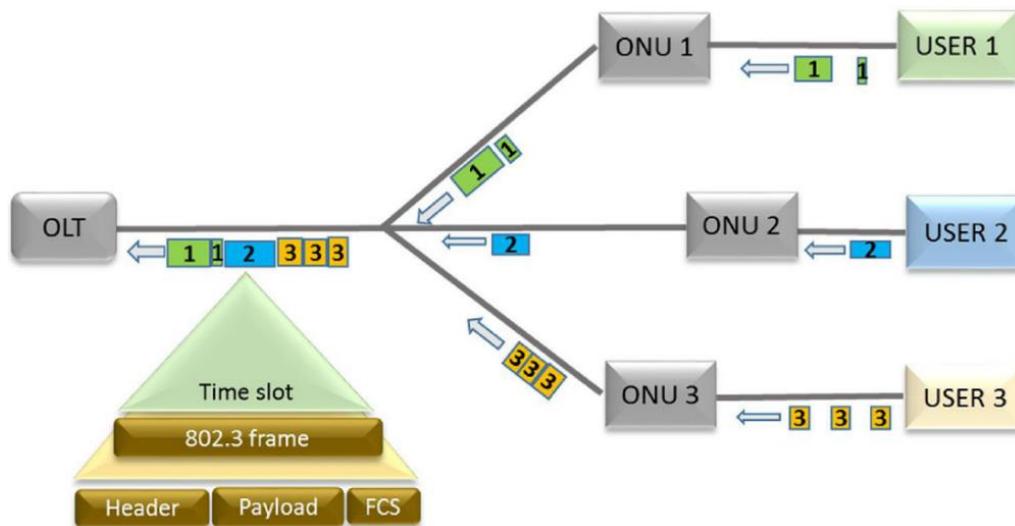


Figura 1. 7: Tráfico ascendente en PON.

Fuente: (Obite et al., 2018)

## 1.5. Consideraciones técnicas sobre las redes ópticas pasivas (PON): Interferencia de señales y amplificación óptica

La implementación de las redes ópticas pasivas (PON) depende de la gestión eficaz de varios desafíos técnicos, tales como las interferencias en la señal y la amplificación óptica. Ambos factores son determinantes para el rendimiento y la eficacia de la red, sobre todo cuando las velocidades de transmisión de datos y la demanda de ancho de banda se incrementan (Horvath, Radil, et al., 2020; Luo et al., 2013).

### 1.5.1. Interferencia de señales en PONs

En una PON, el problema principal está relacionado con interferencias, derivadas de diversos factores, como el solapamiento (perturbaciones cruzadas), las interferencias multitrayecto y el ruido externo. El solapamiento de las señales de canales o trayectos adyacentes produce una degradación de la calidad de la señal (Manchay et al., 2024). Por ejemplo, en las PON basadas en multiplexación por división de longitud de onda (WDM-PON), resulta fundamental aislar los canales para evitar estas interferencias (Yeh et al., 2022).

Otra problemática que se presenta en los divisores ópticos utilizados en PONs, para distribuir la señal a varios usuarios, está relacionada con las interferencias multitrayecto (Vinita, 2018). Por ejemplo, las reflexiones y la dispersión que se producen en el interior del divisor provocan señales no deseadas solapándose con la transmisión original. Tales interferencias pueden mitigarse mediante técnicas de filtrado avanzadas y una distribución precisa de la longitud de onda (Agalliu et al., 2018). Por otra parte, un buen montaje del divisor permite minimizar el impacto de los efectos multitrayecto (Horvath, Radil, et al., 2020)

Asimismo, las interferencias electromagnéticas (EMI) y el ruido térmico (ambas consideradas como ruido externo) pueden introducir errores en la transmisión y así reducir la relación señal/ruido (SNR). Las técnicas como la codificación de corrección de errores y la optimización del formato de modulación (por ejemplo, QAM y DP-QPSK) son adecuadas para mejorar la robustez frente a las interferencias y el ruido (Abbas & Gregory, 2016; Strecker et al., 2021).

### **1.5.2. Amplificadores ópticos en PONs**

El crecimiento de la demanda de datos conlleva la necesidad de mayores distancias de transmisión en los sistemas PON. El principal desafío al que se enfrentan las PON es la degradación de la señal en largas distancias como consecuencia de la atenuación. Por ello, se recurre en estos casos al uso de amplificadores ópticos, que permiten intensificar la potencia de la señal y extender el alcance de la transmisión evitando la necesidad de costosos equipos activos en puntos intermedios (Tang et al., 2024).

Generalmente, en una red óptica conmutada (PON) se emplean amplificadores ópticos, por ejemplo, amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA), que permiten mejorar la señal hasta el receptor (Horvath, Radil, et al., 2020). Además, los EDFA son realmente útiles ya que amplifican la señal directamente en el dominio óptico sin que sea necesario convertirla en señales eléctricas, manteniendo así una alta eficiencia (Sirleto & Ferrara, 2020). No obstante, es necesario utilizar amplificadores ópticos con cuidado, porque

pueden introducir ruido de emisión espontánea amplificada (ASE), que puede degradar la señal si no se filtra correctamente (Raj et al., 2023).

Otra técnica para minimizar la atenuación de la señal en las PON es emplear un amplificador Raman, donde la señal se amplifica a medida que viaja por la fibra (Feng et al., 2024). Con esta técnica, se consigue una amplificación distribuida que amplía aún más la distancia de transmisión al tiempo que mantiene la integridad de la señal. Pero la aplicación de la amplificación Raman necesita un control riguroso del láser de bombeo a fin de evitar la introducción de ruido adicional en el sistema (Sirleto, 2020).

### **1.5.3. Impacto en el rendimiento de la red**

Para optimizar el rendimiento de los sistemas PON hay que optimizar la gestión de las interferencias de la señal y utilizar la amplificación óptica (Brestas et al., 2024). Sin control, las interferencias pueden provocar importantes pérdidas de datos, un aumento de las tasas de error y una disminución de la calidad del servicio. Las PONs, por su parte, al integrar técnicas avanzadas de modulación y filtrado, corrección de errores y asignación óptima de longitudes de onda, son capaces de mantener una transmisión de alta calidad incluso en condiciones de alta demanda (Horvath, Munster, et al., 2020).

Mientras que el uso de amplificadores ópticos (por ejemplo, EDFA y Raman) permiten una mayor escalabilidad de la red, permitiendo que los sistemas PONs transmitan datos a mayor distancia y a tasas más elevadas. Sin embargo, hay que tener muy en cuenta el ruido generado por los procesos de amplificación para no comprometer la calidad de la señal.

Por último, una gestión adecuada de las interferencias y la aplicación de técnicas de amplificación óptica resultan fundamentales para que los sistemas PON puedan satisfacer la creciente demanda de transmisión de datos a alta velocidad y de modo eficiente en las redes de comunicaciones actuales. Dichas estrategias permiten optimizar el rendimiento de las redes y consolidar las infraestructuras de comunicaciones ópticas a largo plazo.

## 1.6. Arquitecturas de redes ópticas pasivas

### 1.6.1. Arquitectura Unidireccional de una PON

La arquitectura unidireccional de una PON se utiliza para simplificar la red, ahorrar fibra y reducir el número de puntos de conexión. Esta configuración incluye un transmisor (OLT), un acoplador óptico y un receptor (ONT). En esta arquitectura, cada ONT recibe únicamente los datos destinados a él.

Para evitar interferencias entre los usuarios, se emplea un intervalo de tiempo específico para la transmisión de datos. Es necesario utilizar un duplexor para gestionar la transmisión y recepción de señales. Este dispositivo puede ser un acoplador, un conmutador o un multiplexor/demultiplexor de longitud de onda (WDM), y generalmente se integra en los módulos de transmisión y recepción.

Por ejemplo, Yeh et al., (2023) propusieron una PON con arquitectura de acceso WDM unidireccional dual basada en anillo. La Figura 1.8 muestra la arquitectura WDM-PON unidireccional dual en anillo para tráfico de señales de enlace descendente y ascendente a través de una única red troncal de fibra en sentido horario y antihorario, respectivamente.

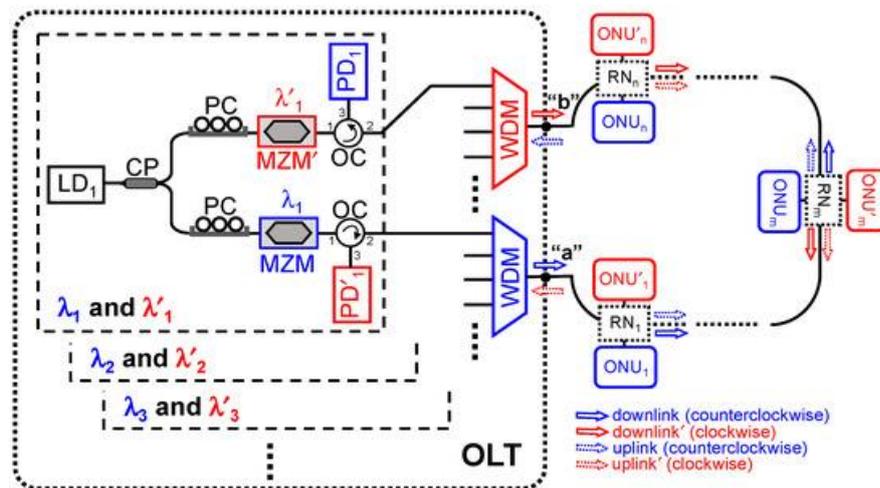


Figura 1. 8: Arquitectura de acceso WDM unidireccional dual basada en anillo.

Fuente: (Yeh et al., 2023)

En esta arquitectura, la longitud de onda de la señal descendente es de 1.49 μm, mientras que la de la señal ascendente es de 1.31 μm. El principal inconveniente de esta

configuración es la necesidad de utilizar dos fibras ópticas: una para la conexión ascendente y otra para la conexión descendente.

### 1.6.2. Arquitectura Bidireccional de una PON

La arquitectura de una PON bidireccional es similar a la del anterior (red óptica unidireccional). La principal diferencia radica en el uso de la fibra óptica. La red óptica bidireccional emplea una fibra óptica bidireccional para ambas conexiones: la conexión ascendente y la conexión descendente. En la Figura 1.9 se muestra un ejemplo de comunicación bidireccional dentro del estándar NG-PON2. (Horvath, Munster, et al., 2020)

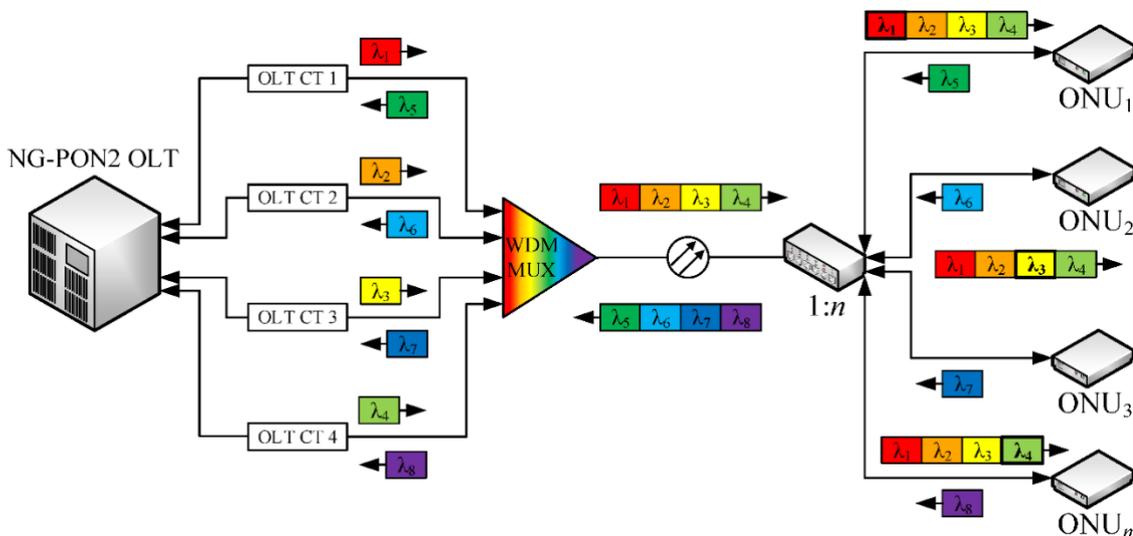


Figura 1. 9: Arquitectura de acceso WDM bidireccional.

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

### 1.7. Principales Elementos de una Red Óptica Pasiva (PON)

La arquitectura de una PON (véase la Figura 1.10) se basa en tres elementos principales:

- Terminal de Línea Óptica (OLT): es el punto de partida de cualquier red óptica pasiva (PON), que está ubicado en la central de la red. Se encarga de gestionar y controlar la transmisión y recepción de datos a través de la red PON. Está conectado a un conmutador central mediante conectores Ethernet enchufables. La función principal del OLT es convertir, enmarcar y transmitir señales al resto de

la red PON, además de coordinar el multiplexado de los terminales de red óptica (ONT, según ITU-T) para la transmisión ascendente compartida. Los dispositivos del usuario final a veces se denominan unidades de red óptica (ONU, según IEEE).

- b. Terminación de Red Óptica (ONT): este es el terminal de red óptica situado en las instalaciones del usuario final. Su función es recibir las señales ópticas y convertirlas en señales eléctricas que puedan ser utilizadas por los dispositivos del usuario. Puede considerarse como un módem óptico al que el cliente conecta su pasarela de acceso de alta velocidad. Es un elemento terminal de la red óptica. El ONT está compuesto por un módulo, un emisor óptico basado en un diodo láser y un fotorreceptor. El ONT es el interlocutor directo de la OLT. Los ONT emiten en una misma longitud de onda por razones de costo y gestión de los equipos.
- c. Acoplador Óptico: es un componente que se integra en la línea y realiza la función de divisor o concentrador de la transmisión. Es un equipo pasivo que no requiere alimentación eléctrica, ya que su funcionamiento se basa únicamente en la propagación de la luz dentro de la fibra óptica. En la transmisión ascendente, el acoplador permite combinar sumando las señales ópticas. En cambio, en la transmisión descendente, divide la señal óptica proveniente de la OLT.

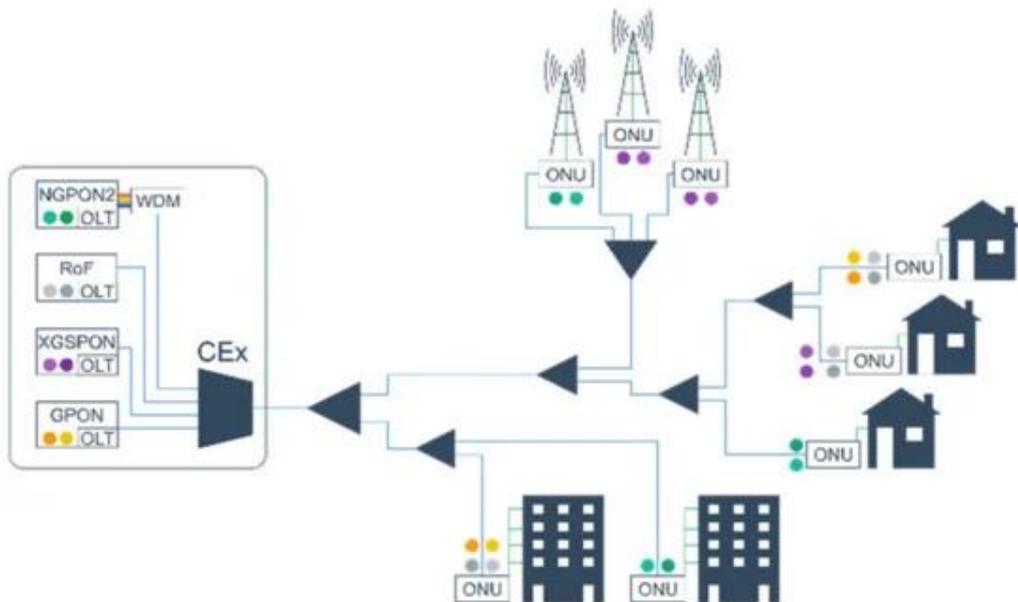


Figura 1. 10: Elementos principales en la arquitectura PON.

Fuente: (Rodrigues et al., 2023)

## 1.8. Arquitecturas de las Redes Ópticas FTTx

FTTx (Fibre To The x) es la tecnología de vanguardia utilizada para el transporte de datos a muy alta velocidad. Esta tecnología ofrece un rendimiento teórico máximo de 100 MBps y presenta un nivel de atenuación muy bajo. Para lograr esto, utiliza como soporte físico la fibra óptica. Existen varios acrónimos para esta tecnología, cada uno indicando hasta qué nivel de la conexión se utiliza la fibra óptica. En las siguientes subsecciones se describen las diferentes variantes de FTTx (véase la Figura 1.11) que incluyen: FTTH, FTTC, FTTB, FTTA y FTTP.

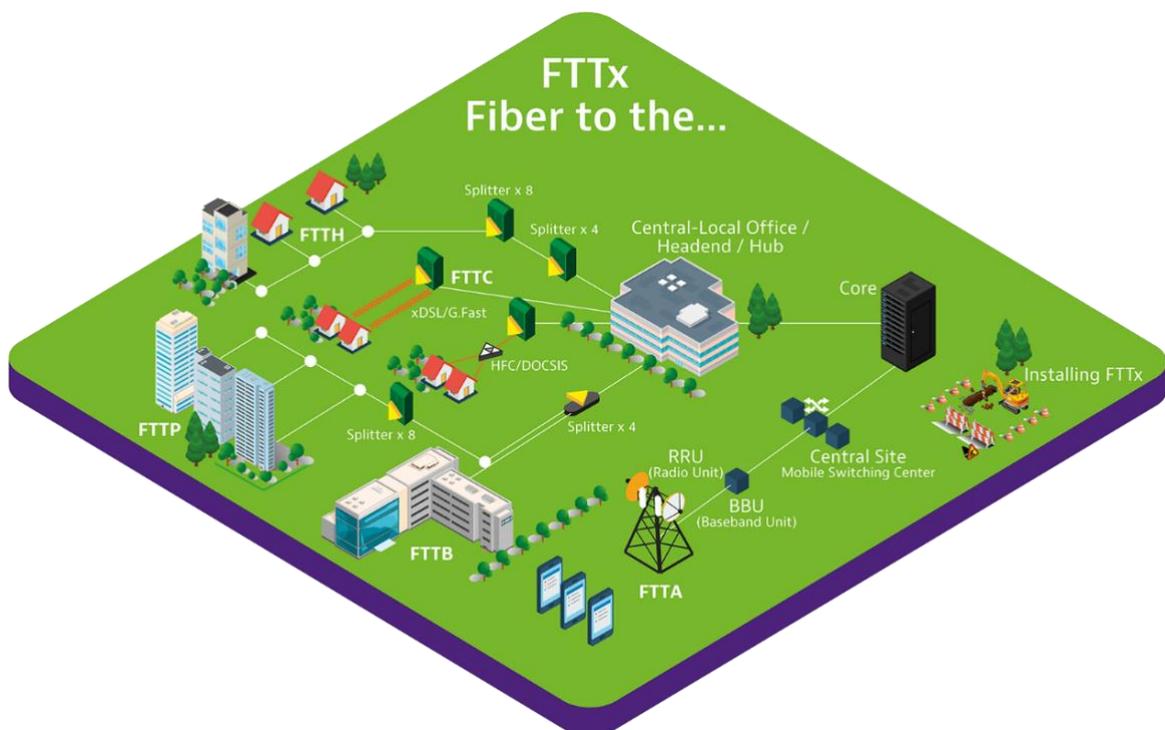


Figura 1. 11: Arquitectura de las diferentes tecnologías FTTx.

Fuente: (Viavi, 2024)

### 1.8.1. FTTH (Fiber To The Home)

La arquitectura FTTH, que literalmente significa "fibra hasta el hogar", se refiere a una tecnología que lleva la fibra óptica directamente hasta el domicilio del abonado, tal como se observa en la Figura 1.12. Esta tecnología permite el acceso a internet y servicios asociados con velocidades simétricas que van desde 10 Mbps hasta 1 Gbps, lo que

representa una mejora significativa en comparación con los servicios tradicionales basados en pares de cobre.

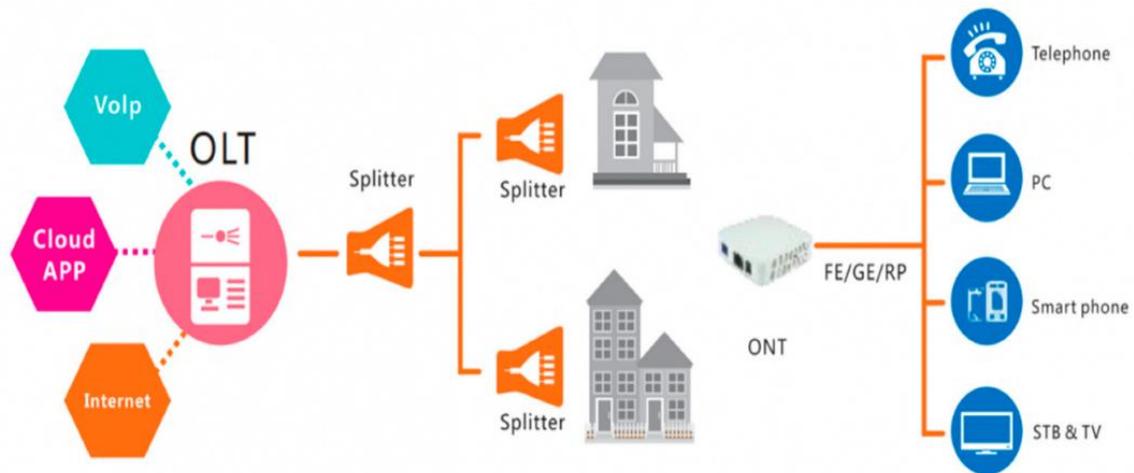


Figura 1. 12: Arquitectura de la tecnología FTTH.

Fuente: (Ab-Rahman et al., 2023)

Existen dos tipos principales de topologías físicas utilizadas para el despliegue de la fibra hasta el cliente:

- Arquitectura activa, también conocida como punto a punto (P2P): en esta configuración, cada abonado está conectado directamente a la central mediante una fibra óptica dedicada. Este método ofrece alta capacidad de transmisión y baja latencia, pero puede resultar más costoso debido a la cantidad de fibra requerida y la necesidad de equipos activos en cada extremo de la conexión.
- Arquitectura pasiva, comúnmente denominada punto a multipunto (P2PM): en esta topología, una única fibra óptica desde la central se divide mediante divisores ópticos pasivos para conectar a múltiples abonados. Esta configuración es más económica y simplifica el despliegue al reducir la cantidad de fibra necesaria y eliminar la necesidad de equipos activos intermedios. Sin embargo, la capacidad de transmisión compartida entre los abonados puede ser una limitación en comparación con la arquitectura P2P.

La figura 1.13 ilustra cómo estas dos arquitecturas se implementan en la práctica. La elección entre una arquitectura activa o pasiva depende de diversos factores, incluyendo

la densidad de abonados, la distancia de transmisión y los requerimientos de ancho de banda.

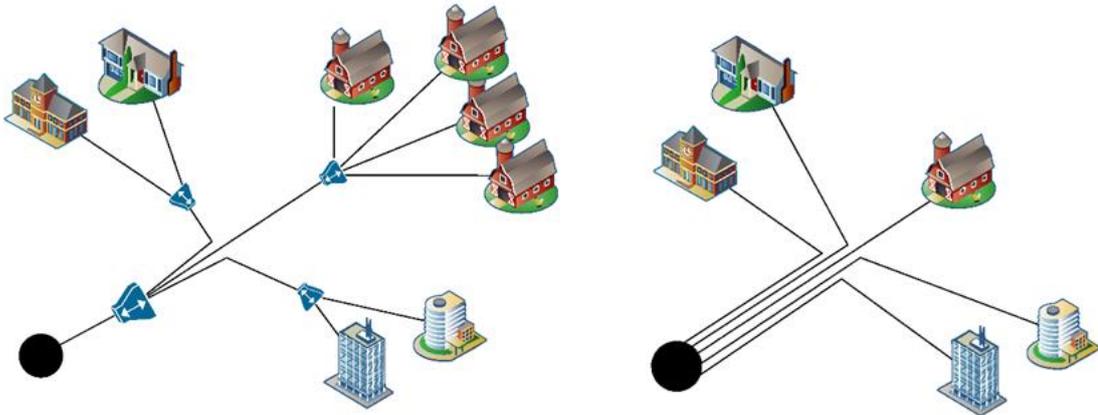


Figura 1. 13: Arquitectura pasiva (topología PON, esquema punto a multipunto (P2MP)) y arquitectura punto a punto (P2P) a la derecha.

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

### 1.8.2. FTTB (Fiber To The Building)

La arquitectura FTTB (véase la Figura 1.14) es una configuración de red en la cual la fibra óptica se extiende hasta un punto central dentro de un edificio, como una base o un armario de distribución. Desde este punto, la señal se distribuye a los usuarios finales a través de cables de cobre. Esta tecnología es una variante de la familia de arquitecturas FTTx, diseñada para proporcionar una solución intermedia entre la fibra óptica pura “FTTH” y las tecnologías más tradicionales basadas en cobre.

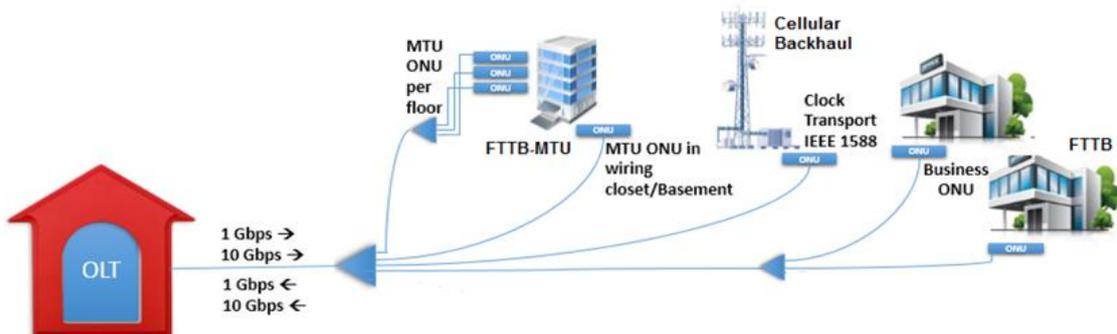


Figura 1. 14: Arquitectura de la tecnología FTTB.

Fuente: (Rafiq & Hayat, 2019)

En una arquitectura FTTB, la fibra óptica se utiliza para la transmisión de datos hasta un punto muy cercano al usuario final, lo que minimiza las pérdidas de señal y la interferencia, permitiendo altas velocidades de transmisión y mayor capacidad de ancho de banda. El cobre se emplea para la distribución final de la señal dentro del edificio, aprovechando la infraestructura ya existente, lo cual puede reducir significativamente los costos de instalación.

Los componentes esenciales de una red FTTB incluyen:

1. **Fibra Óptica:** la fibra óptica se extiende desde el proveedor de servicios hasta el punto de distribución dentro del edificio.
2. **Armario de Distribución:** ubicado en la base del edificio, contiene los equipos necesarios para convertir las señales ópticas en eléctricas y distribuir las a través de cables de cobre.
3. **Cables de Cobre:** utilizados para la conexión final a los clientes, pueden ser par trenzado o coaxial, dependiendo de la infraestructura existente.

### 1.8.3. FTTC/FTTCab (Fiber To The Curb/Fiber To The Cabinet)

La arquitectura FTTC/FTTCab representa una configuración de red en la cual la fibra óptica se extiende hasta un punto cercano al usuario final, como el borde de la acera o una cabina de distribución en la calle. Desde este punto, la señal se distribuye a los usuarios finales a través de cables de cobre.

En la arquitectura FTTC (véase la Figura 1.15), la fibra óptica llega hasta el borde de la acera, proporcionando una conexión de alta velocidad hasta un punto muy cercano a los hogares. Esto reduce las pérdidas de señal y la interferencia en comparación con las conexiones de cobre puras, mejorando la calidad del servicio y la velocidad de transmisión de datos.

Por otro lado, la arquitectura FTTCab lleva la fibra óptica hasta una cabina de distribución ubicada en la calle. Desde esta cabina, la señal se distribuye a los usuarios finales mediante cables de cobre. Este tipo de configuración es similar a FTTC, pero con la

diferencia de que el punto de distribución está en una cabina, lo que puede ofrecer una mayor protección y capacidad de gestión de la red.

La arquitectura FTTC/FTTCab ofrece varios beneficios:

1. **Reducción de la Atenuación:** al llevar la fibra óptica más cerca del cliente, se reduce la atenuación de la señal y la interferencia, mejorando la calidad de la transmisión.
2. **Mayor Velocidad de Conexión:** permite ofrecer velocidades de conexión más altas en comparación con las conexiones tradicionales de cobre.
3. **Mejora de la Fiabilidad:** es menos susceptible a las interferencias electromagnéticas y a condiciones ambientales adversas, lo que mejora la fiabilidad de la conexión.
4. **Flexibilidad en la Implementación:** FTTC/FTTCab puede ser una solución intermedia rentable entre las redes puras de fibra (FTTH) y las redes tradicionales de cobre, aprovechando la infraestructura existente.

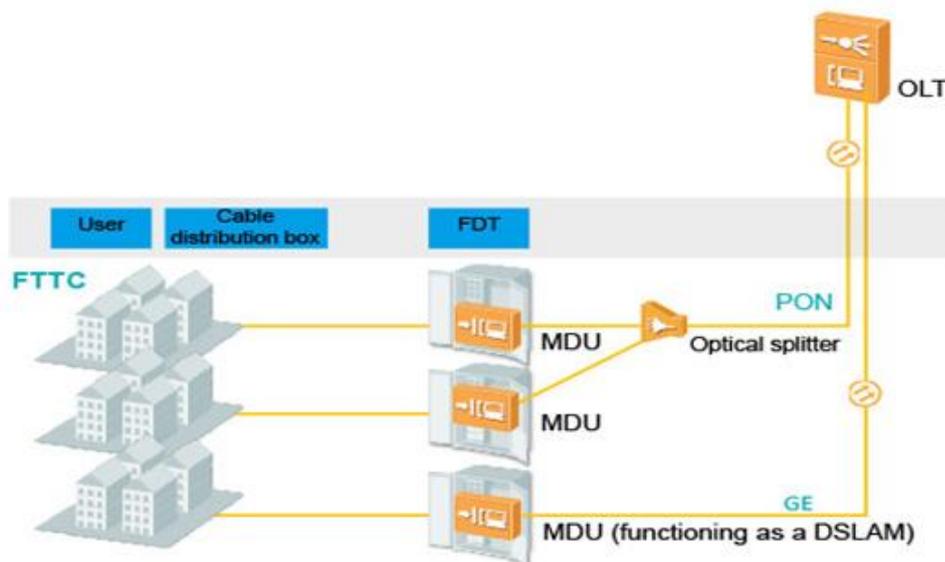


Figura 1. 15: Arquitectura de la tecnología FTTC.

Fuente: (Fyshop, 2024)

### **1.9. Beneficios de las Redes Ópticas Pasivas en Términos de Costo y Eficiencia**

Las PONs han emergido como una tecnología fundamental en el panorama de las telecomunicaciones, ofreciendo numerosos beneficios en términos de rentabilidad y eficiencia operativa. Esta sección profundiza en las diversas ventajas que proporcionan las PONs, destacando su impacto tanto en los proveedores de servicios como en los usuarios finales.

Uno de los principales beneficios de las PON es su rentabilidad en el despliegue de redes. La naturaleza pasiva de la red de distribución óptica (ODN) reduce significativamente la necesidad de componentes activos entre la oficina central y las instalaciones del usuario final. Esto se traduce en menores costos de instalación y mantenimiento en comparación con las redes tradicionales basadas en cobre o las redes ópticas activas (F. J. Effenberger, 2017).

La reducción de componentes activos no solo disminuye el gasto inicial de capital (CAPEX), sino que también conduce a un menor gasto operativo (OPEX) debido a la reducción del consumo de energía y los requisitos de mantenimiento (Nesset, 2015). La infraestructura de fibra compartida en las PON contribuye sustancialmente al ahorro de costos.

Una sola fibra desde el terminal de línea óptica (OLT) puede atender a múltiples usuarios finales a través de divisores pasivos, optimizando la utilización de la fibra y reduciendo los costos generales de despliegue de fibra. Este aspecto es particularmente beneficioso en escenarios de fibra hasta el hogar (FTTH), donde la conectividad de última milla a menudo representa una parte significativa de los gastos de despliegue de la red (Lam, 2007).

Los estudios han demostrado que los despliegues FTTH basados en PON pueden resultar en ahorros de costos de hasta un 20% en comparación con las arquitecturas de fibra punto a punto (Hoernig et al., 2012). La eficiencia energética es otro beneficio crucial de las PON. La ausencia de elementos activos en la ODN conduce a ahorros sustanciales de energía.

Las investigaciones indican que las PON pueden lograr mejoras en la eficiencia energética de hasta un 30% en comparación con las soluciones Ethernet activas (Baliga et al., 2009). Esta eficiencia energética no solo reduce los costos operativos para los proveedores de servicios, sino que también se alinea con las iniciativas globales para despliegues de redes sostenibles y respetuosos con el medio ambiente (Mahloo et al., 2013).

La escalabilidad de las arquitecturas PON ofrece beneficios de costos a largo plazo. A medida que crecen las demandas de ancho de banda, las PON pueden actualizarse a capacidades más altas sin cambios significativos en la infraestructura de planta externa. Este enfoque evolutivo permite a los proveedores de servicios proteger sus inversiones iniciales mientras mejoran gradualmente las capacidades de la red. (Ulloa et al., 2020)

Por ejemplo, la transición de GPON a XG-PON o NG-PON2 se puede lograr con cambios mínimos en la ODN, aprovechando la planta de fibra existente (F. Effenberger, 2012). Esta ruta de actualización asegura que las PON sigan siendo rentables incluso a medida que aumentan los requisitos de ancho de banda con el tiempo. La eficiencia operativa se mejora significativamente en los despliegues PON.

La gestión centralizada de los OLT simplifica las operaciones de la red y reduce la complejidad de la resolución de problemas. Las capacidades de monitoreo remoto y diagnóstico inherentes a los sistemas PON permiten un mantenimiento proactivo y una rápida detección de fallos, minimizando las interrupciones del servicio y mejorando la satisfacción del cliente (Hood & Trojer, 2012). Estos factores contribuyen a menores costos operativos y una asignación de recursos más eficiente para los proveedores de servicios.

La alta capacidad de ancho de banda de las PON permite la entrega de múltiples servicios sobre una sola infraestructura, un concepto conocido como servicios triple-play o quad-play. Esta convergencia de servicios de voz, datos, vídeo y móviles sobre una infraestructura PON unificada conduce a eficiencias operativas y ahorros de costos para los proveedores de servicios. Elimina la necesidad de redes separadas para diferentes servicios, reduciendo tanto el CAPEX como el OPEX (Chowdhury et al., 2010).

Las redes ópticas pasivas también están demostrando su valor en aplicaciones industriales avanzadas, especialmente cuando se combinan con tecnologías inalámbricas en configuraciones de redes fibra-inalámbricas (FiWi). Un estudio reciente de Zhou et al., (2022) explora cómo estas redes híbridas, cuando se implementan con arquitecturas de redes definidas por software (SDN), pueden ofrecer beneficios significativos en términos de eficiencia y tolerancia a fallos. Los autores proponen un mecanismo adaptativo que combina la codificación de red lineal aleatoria dispersa con transmisión paralela (SNC-PT), lo que mejora significativamente la tolerancia a fallos frente a altas tasas de pérdida de paquetes y mal funcionamiento de los componentes de la red.

En áreas rurales y desatendidas, las PON presentan una solución rentable para cerrar la brecha digital (Horvath, Radil, et al., 2020). La capacidad de atender a múltiples usuarios a largas distancias con una sola fibra hace que las PON sean particularmente adecuadas para áreas de población dispersa donde los despliegues de banda ancha tradicionales pueden no ser económicamente viables. Las iniciativas gubernamentales y las asociaciones público-privadas han aprovechado la tecnología PON para proporcionar acceso de banda ancha de alta velocidad en comunidades rurales, demostrando su rentabilidad en escenarios de despliegue desafiantes (Jain et al., 2018).

Mirando hacia el futuro, las tecnologías PON emergentes como NG-PON2 y más allá prometen aún mayores eficiencias de costos. La introducción de la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) en las PON permite la coexistencia de múltiples generaciones de tecnologías PON en la misma ODN, maximizando la utilización de la infraestructura existente y proporcionando una ruta de migración fluida hacia capacidades más altas (Nesset, 2015).

#### **1.10. Análisis de la implementación práctica de tecnologías de modulación avanzada para contextos geográficos y económicos diversos**

En la práctica, la implementación de redes ópticas pasivas (PON) así como de innovadoras tecnologías de modulación presentan grandes variantes en función de factores geográficos y económicos. Por ejemplo, en algunas regiones económicamente desarrolladas, como Estados Unidos, Canadá (Hambly & Rajabiun, 2021), Europa y

partes de Asia, la infraestructura de las redes ópticas de alta velocidad se encuentra consolidada, lo que posibilita la adopción generalizada de los formatos de modulación QAM, DP-QPSK y PAM (Horvath, Radil, et al., 2020). Además, disponen de mano de obra especializada, equipos avanzados e importantes inversiones en infraestructuras de red. En este sentido, el despliegue de PON con formatos de modulación de alta eficiencia es más factible, ya que permite incrementar el rendimiento de los datos, así como reducir la latencia y mejorar las prestaciones generales (Van der Linden, 2018).

Por el contrario, la adopción de estas tecnologías en las regiones en desarrollo se enfrenta a varios retos. La falta de acceso a la infraestructura necesaria, los altos costes de despliegue y la falta de conocimientos técnicos pueden dificultar la implementación de PON de alta velocidad equipados con técnicas de modulación avanzadas. Así, por ejemplo, en zonas rurales o remotas, el costo de instalar cables de fibra óptica puede resultar muy elevado, lo cual hace más interesantes las alternativas inalámbricas tradicionales (Pavez Bravo, 2021; Uzunidis et al., 2022), así como otros formatos de modulación de menor coste (Flores A. et al., 2021). Además, debido a las limitaciones económicas, es posible que se opte por formatos de modulación más sencillos, como PAM, o por sistemas tradicionales que requieren una inversión menor, tanto en capital como en gastos operativos (Abdellaoui et al., 2021; Khatiwoda & Dawadi, 2021).

Por otro lado, la aplicación de estas tecnologías se ha visto condicionada por las políticas gubernamentales y las instituciones reguladoras. En aquellos países que priorizan la transformación digital y la expansión de la banda ancha mediante asociaciones público-privadas o subvenciones, el despliegue de redes ópticas avanzadas ha tenido más éxito. Por ejemplo, en Corea del Sur y Japón, donde los gobiernos financian programas para extender las redes de fibra óptica, han conseguido implementar PON de alta velocidad con formatos de modulación avanzados incluso en regiones rurales o menos prósperas económicamente (Montalvo et al., 2021; Żukowski et al., 2021).

Sin embargo, en las regiones que no cuentan con este tipo de apoyo, estos avances son más lentos y los despliegues dependen en mayor medida de la inversión privada, priorizando las zonas urbanas en detrimento de las rurales o marginadas. (Faruk et al., 2021; Sizer et al., 2022)

### **1.11. Estudios comparativos entre diferentes tecnologías de modulación de las PON de alta velocidad**

Entre las investigaciones actuales sobre redes ópticas pasivas (PON) de alta velocidad se destaca que, si bien existen diversos estudios enfocados en tecnologías de modulación específicas, como la modulación de amplitud en cuadratura (QAM), la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura con polarización dual (DP-QPSK) y la modulación de amplitud de impulsos (PAM), existe un limitado esfuerzo por realizar estudios comparativos para evaluar el rendimiento de estas tecnologías en condiciones similares en entornos PON de alta velocidad (Horvath, Radil, et al., 2020; Saber et al., 2019)

La tecnología QAM, por ejemplo, se caracteriza por su alta eficiencia espectral, aunque es más sensible al ruido, lo cual limita su aplicación en redes de larga distancia sin corrección avanzada de errores (Kherici & Kandouci, 2020; Saber et al., 2019). En cambio, la tecnología DP-QPSK es más resistente al ruido y se utiliza a menudo en comunicaciones ópticas de larga distancia, aunque tiene la desventaja de una mayor complejidad de implementación (Yousif et al., 2024). La tecnología PAM, si bien es más sencilla y rentable, no ofrece la eficiencia espectral necesaria cuando se trata de redes de alta velocidad en zonas densamente pobladas (Dutta et al., 2022; Shah et al., 2021).

En un entorno caracterizado por factores como la atenuación, la dispersión y las interferencias, que afectan significativamente al rendimiento de la modulación, la comparación de estos formatos en diferentes escenarios tanto geográficos como infraestructurales es un factor de gran importancia para lograr una mejor comprensión de su aplicabilidad práctica (Faruk et al., 2021; Saber et al., 2019). Ahora bien, la mayoría de la bibliografía existente se centra en estudios aislados realizados en laboratorios o en casos de uso específicos, por lo que se limita la capacidad de establecer conclusiones para estrategias de despliegue más amplias (Horvath, Radil, et al., 2020; Ullah et al., 2024).

Un mayor énfasis en estudios comparativos directos que no sólo tengan en cuenta el rendimiento del sistema, sino también las limitaciones económicas y geográficas, permitirá a los futuros investigadores proporcionar una mejor orientación a los ingenieros de telecomunicaciones y a los responsables políticos sobre los formatos de modulación

más adecuados para los distintos escenarios de despliegue de PON (Mirza et al., 2020; Shah et al., 2021). Esta información puede resultar especialmente importante para optimizar el despliegue de redes ópticas de alta velocidad en entornos tanto metropolitanos como rurales, donde la demanda y la infraestructura varían significativamente.

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Contexto de la investigación

La investigación se realizó en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, específicamente en el sector de Guayacanes. Este (ver Figura 2.1) ha sido seleccionada debido a su creciente demanda de servicios de telecomunicaciones y la necesidad de mejorar la infraestructura de red existente. El sector de Guayacanes es una zona urbana que cuenta con una mezcla de usuarios residenciales y comerciales que utilizan servicios de internet de alta velocidad, lo que lo convierte en un escenario ideal para la implementación y evaluación de redes ópticas pasivas de alta velocidad.

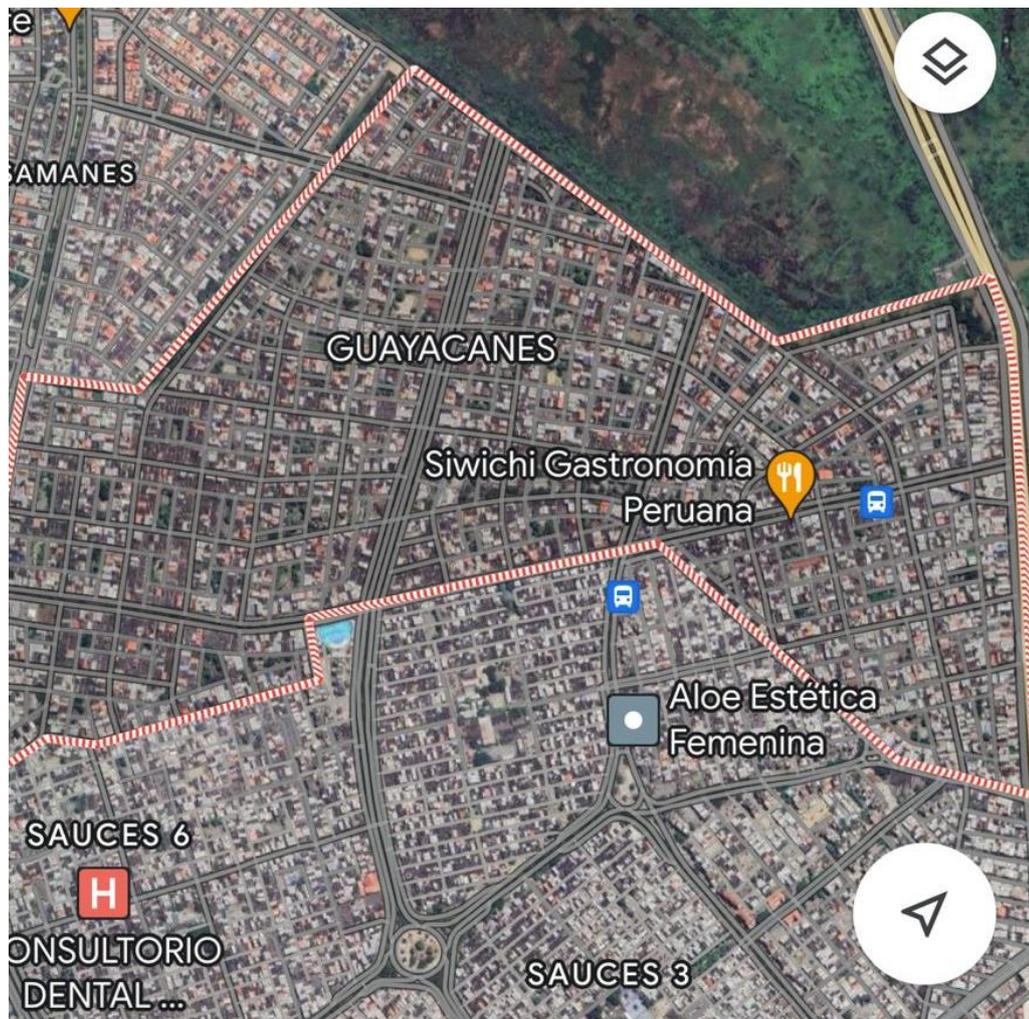


Figura 2. 1: Ubicación Geográfica Área de Estudio CNT EP.

Fuente: (Fyshop, 2024)

La infraestructura actual de telecomunicaciones en Guayacanes presenta varios desafíos, incluyendo la congestión de red y la necesidad de una mayor capacidad de transmisión de datos. Este estudio se enfocó en la integración de tecnologías de redes ópticas pasivas utilizando formatos de modulación avanzados como QAM y DP-QPSK, con el objetivo de mejorar la eficiencia y la calidad del servicio.

Para la recolección de datos, se utilizaron fuentes secundarias disponibles en internet debido a la imposibilidad de realizar un muestreo directo. Se accederá a bases de datos públicas, artículos científicos, informes técnicos de empresas de telecomunicaciones y documentos de estándares y regulaciones para obtener la información necesaria.

## **2.2. Diseño y alcance de la investigación**

Esta investigación es de carácter experimental y su alcance es descriptivo y correlacional. Se llevaron a cabo una serie de pruebas de implementación de redes ópticas pasivas utilizando formatos de modulación avanzados en el entorno de simulación OptiSystem 7.0, y se describieron los resultados obtenidos (que fueron generadas las gráficas a través de Visual Studio Code de Python) en términos de eficiencia y capacidad de transmisión.

OptiSystem y OptiSim son las herramientas de simulación más destacadas en el campo de las comunicaciones ópticas, y cada una de ellas tiene capacidades y características específicas. OptiSystem fue desarrollada por Optiwave Systems, mientras OptiSim es un componente del conjunto de programas de Synopsys. Si bien ambas herramientas son adecuadas para simular y analizar redes ópticas de alta velocidad, se diferencian en las librerías de componentes, la interfaz de usuario, la escalabilidad y la flexibilidad, por lo que OptiSystem resulta la opción idónea para este proyecto.

OptiSystem es un programa de simulación óptica avanzada diseñado por Optiwave Systems y mundialmente reconocido por sus herramientas de diseño, simulación y optimización de sistemas de comunicaciones ópticas. Se trata de una herramienta muy útil para el modelado de PONs, sistemas de transmisión por fibra óptica y formatos de modulación avanzados. Además, está equipado con una amplia variedad de componentes

ópticos y eléctricos con el objetivo de que los usuarios puedan simular redes ópticas completas de extremo a extremo lo que resulta ideal en el campo de la investigación y el desarrollo de redes ópticas. Entre sus características destacan su capacidad de análisis de modulaciones (por ejemplo, QAM, DP-QPSK y otros formatos), detección coherente y asignación dinámica de ancho de banda, que resultan idóneas para diseñar sistemas PON de alta velocidad.

OptSim, por el contrario, resulta muy útil para modelar sistemas de transmisión óptica a nivel de componentes, por lo que es una herramienta ideal para diseñar y probar elementos individuales como fuentes láser, amplificadores y tipos de fibra. Aunque OptSim es muy conocido por su precisión en las simulaciones de la capa física, su alcance es menor que el de OptiSystem en el diseño y escalado a nivel de red. La Tabla 2.1 muestra una comparativa entre los entornos de simulación OptiSystem y OptSim.

Tabla 2. 1: Comparación de OptiSystem vs. OptSim

<b>Característica</b>	<b>OptiSystem</b>	<b>OptSim</b>
<b>Versión</b>	7.0 (gratuita), 18.0, 19.0	15.0 (última versión por Synopsys)
<b>Enfoque</b>	Diseño integral a nivel de red, especialmente PONs	Diseño a nivel de componente, ideal para análisis de capa física
<b>Compatibilidad con Modulación</b>	Extensa (QAM, DP-QPSK, etc.)	Moderada (enfocado en esquemas de modulación básicos y algunos avanzados)
<b>Compatibilidad con PON</b>	Completa, incluye NG-PON2 y elementos avanzados de PON	Limitada, más adecuado para análisis detallado de componentes
<b>Escalabilidad</b>	Alta, soporta redes de múltiples nodos y configuraciones complejas	Escalabilidad limitada para diseño de redes a gran escala
<b>Interfaz de Usuario</b>	Intuitiva, basada en arrastrar y soltar	Modelado detallado a nivel de componente, pero menos intuitivo para diseño de redes
<b>Aceleración mediante GPU</b>	Disponible en versiones recientes	No disponible

<b>Costo</b>	Versión gratuita disponible (7.0), versiones con licencia de pago	Solo con licencia de pago
<b>Aplicabilidad a la Investigación</b>	Ideal para estudios de PONs de alta velocidad y modulación avanzada	Adecuado para análisis detallado a nivel de componente

Elaborado por el autor.

En este trabajo de investigación se examinaron varios entornos de desarrollo de Python para el tratamiento, simulación y análisis de datos. Visual Studio Code (VS Code), PyCharm y Jupyter Notebook son entornos que disponen de características diferentes para cada uno de los aspectos de la programación y análisis. Aunque cada una tiene sus ventajas, Visual Studio Code ha resultado ser la opción más adecuada para este estudio debido a su versatilidad, rentabilidad y capacidad para gestionar eficazmente tanto scripts rápidos como proyectos a gran escala.

Python es un entorno de desarrollo que se utiliza para el análisis de datos, el aprendizaje automático y la creación de scripts para simulaciones, convirtiéndolo en una herramienta válida para la visualización de datos obtenidos a partir de simulaciones de OptiSystem o para el desarrollo de scripts de análisis personalizados. A continuación, la Tabla 2.2 se presentan los entornos de desarrollo específicos de Python que se utilizaron en este estudio, que incluyen una comparación de Visual Studio Code con PyCharm y Jupyter Notebook.

Tabla 2. 2: Comparativa entre herramientas Visual Studio Code, PyCharm y Jupyter Notebook.

<b>Característica</b>	<b>Visual Studio Code (VS Code)</b>	<b>PyCharm</b>	<b>Jupyter Notebook</b>
<b>Costo</b>	Gratuito	Pago para la Edición Profesional; Edición Comunitaria Gratuita	Gratuito
<b>Uso Principal</b>	IDE multipropósito, adecuado para scripting y proyectos basados en Python	IDE completo de Python para proyectos complejos	Entorno interactivo para análisis de datos
<b>Gestión de Código</b>	Soporte integrado de Git, explorador de archivos	Organización de proyectos y código	Limitado, basado principalmente en notebooks

<b>Capacidades de Depuración</b>	Robusto, con herramientas de depuración integradas	Depuración avanzada y pruebas	Depuración limitada
<b>Uso de Recursos</b>	Ligero y flexible	Intensivo en recursos, especialmente en proyectos grandes	Ligero
<b>Personalización</b>	Altamente personalizable mediante extensiones (ej., soporte para Jupyter)	Limitado a funciones integradas	Limitado a la funcionalidad de notebooks
<b>Mejor Para</b>	Entorno equilibrado para scripts rápidos y proyectos complejos	Proyectos grandes y estructurados	Prototipado, visualización de datos y análisis

Elaborado por el autor.

### 2.3. Tipo y métodos de investigación

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, utilizando métodos inductivos y deductivos. Se realizarán simulaciones y pruebas de campo para recolectar datos sobre el rendimiento de las redes ópticas pasivas usando OptiSystem y Visual Studio Code. Se aplicarán métodos analíticos y sintéticos para interpretar los resultados obtenidos mediante indicadores de desempeño (Key Performance Indicators, KPIs) y formular conclusiones.

Los siguientes indicadores clave de rendimiento (KPI) se han establecido como parámetros de métricas para evaluar de forma integral el rendimiento de las redes ópticas pasivas (PON) de alta velocidad con formatos de modulación avanzados:

1. Tasa de error de bits (BER): este KPI calcula el número de errores de bit entre el total de bits transmitidos. Cuanto menor es la BER, mayor es la calidad de la señal y la transmisión de datos. Este indicador es muy importante para evaluar la robustez de formatos de modulación como QAM y DP-QPSK en condiciones variables, como ruido e interferencias.

$$BER = \frac{\text{Número de error de bits}}{\text{Total de bits transmitidos}}$$

2. Eficiencia espectral: por eficacia espectral se entiende a la cantidad de datos transmitidos sobre un ancho de banda específico en bits por segundo por Hertz (bps/Hz). Este parámetro permite evaluar la eficacia de cada formato de

modulación a la hora de optimizar el ancho de banda disponible, lo que es fundamental en las redes de alta capacidad.

3. Factor Q: es una medida de la calidad de la señal que se basa en la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido. Este factor proporciona indicadores del nivel de interferencia y degradación de la señal en la red. Un factor Q más alto indica una mayor claridad de la señal, condición necesaria para mantener el rendimiento para enlaces óptico de mayor alcance. El factor Q ( $Q$ ) se determina mediante la expresión

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

donde:

$\mu_1$  y  $\mu_0$  son los valores de la media de los niveles de señal para los estados “1” y “0”, respectivamente.

$\sigma_1$  y  $\sigma_0$  son las desviaciones estándar de las señales para los estados “1” y “0”.

El factor Q se relaciona con la BER en condiciones de ruido gaussiano de la siguiente manera:

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

Estos KPIs y sus ecuaciones proporcionan una base cuantitativa para evaluar el rendimiento de las redes ópticas pasivas en este estudio.

#### **2.4. Población y muestra**

La población de estudio está compuesta por las instalaciones de telecomunicaciones y usuarios del sector de Guayacanes en Guayaquil. Se seleccionará una muestra representativa utilizando un muestreo probabilístico, asegurando que se incluyan tanto usuarios residenciales como comerciales que utilizan servicios de internet de alta velocidad.

## 2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos, se utilizaron fuentes secundarias disponibles en internet debido a la imposibilidad de realizar un muestreo directo. Las principales técnicas e instrumentos de recolección de datos incluirán:

1. Bases de datos de rendimiento de redes ópticas: se accedió a bases de datos públicas y repositorios de investigaciones que contienen información sobre el rendimiento de redes ópticas pasivas (PON) utilizando diferentes formatos de modulación avanzados. Ejemplos de estas bases de datos incluyen el sitio de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y publicaciones de IEEE Xplore.
2. Artículos científicos y técnicos: se realizó una revisión exhaustiva de la literatura disponible en revistas científicas y conferencias especializadas en telecomunicaciones, como Journal of Optical Communications and Networking, y proceedings de conferencias como Optical Fiber Communication Conference (OFC). Estos artículos proporcionarán datos detallados sobre la implementación y evaluación de redes PON.
3. Informes de empresas de telecomunicaciones: se analizaron informes y estudios de caso publicados por empresas de telecomunicaciones que han implementado redes PON de alta velocidad. Ejemplos de fuentes incluyen informes técnicos de empresas como Huawei, Nokia y ZTE.
4. Documentos de estándares y regulaciones: se revisaron los documentos de estándares y regulaciones relacionados con las redes ópticas pasivas y formatos de modulación avanzados publicados por organismos como la ITU y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Estos documentos proporcionarán directrices sobre las mejores prácticas y rendimiento esperado.

La validez y confiabilidad de los datos recolectados a partir de estas fuentes serán aseguradas mediante una evaluación crítica de la calidad y relevancia de cada fuente, así como mediante la triangulación de datos, comparando y contrastando la información obtenida de múltiples fuentes para garantizar la coherencia y precisión de los resultados.

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

Para garantizar la validez y confiabilidad de los datos recolectados a partir de fuentes secundarias en internet, se emplearán las siguientes técnicas:

1. Evaluación Crítica de Fuentes: cada fuente de datos fue evaluada críticamente en términos de su relevancia, precisión y actualidad. Se seleccionarán únicamente aquellas fuentes que provengan de organismos reconocidos, como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), así como artículos científicos y técnicos publicados en revistas y conferencias de renombre.
2. Triangulación de Datos: para asegurar la coherencia y precisión de la información, se utilizó la triangulación de datos. Esto implicó comparar y contrastar la información obtenida de múltiples fuentes para identificar consistencias y discrepancias. Por ejemplo, los datos sobre el rendimiento de redes PON se verificaron cruzando información de bases de datos de ITU, artículos de IEEE Xplore e informes técnicos de empresas de telecomunicaciones como Huawei.
3. Revisión de Literatura: se realizó una revisión exhaustiva de la literatura existente para contextualizar los datos y asegurar que estén alineados con las investigaciones más recientes y relevantes en el campo de las redes ópticas pasivas. Esta revisión incluyó artículos científicos, informes técnicos y documentos de estándares publicados en los últimos cinco años.
4. Calibración de Datos: los datos cuantitativos recolectados de herramientas de monitoreo de red y otros instrumentos serán calibrados y validados utilizando software de análisis de datos reconocido. Esto asegura que las mediciones sean precisas y consistentes. Los datos de rendimiento, como la capacidad de transmisión y la eficiencia espectral, se analizaron utilizando herramientas de software validadas y reconocidas en la industria.
5. Análisis Estadístico: se emplearon métodos estadísticos para evaluar la confiabilidad de los datos recolectados. Por ejemplo, se utilizó el coeficiente de alfa de Cronbach

para medir la consistencia interna de los datos obtenidos de diferentes fuentes. Además, se aplicarán pruebas estadísticas para determinar la significancia de las diferencias observadas en los datos de rendimiento de las redes PON.

# CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

## 3.1. Análisis Bibliográfico de las Tendencias Actuales en Redes Ópticas Pasivas y Modulación Avanzada

En este apartado se presenta un análisis de las publicaciones científicas y técnicas relacionadas con las redes ópticas pasivas (PON) y los avances en formatos de modulación. Esta revisión pretende destacar las tendencias actuales y las innovaciones recientes en la implementación de PONs de alta velocidad, centrándose en técnicas de modulación como la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM) y la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura con Polarización Dual (DP-QPSK).

### 3.1.1. Tendencias en redes ópticas pasivas

La evolución de las redes PON de nueva generación (Next-Generation PONs, NG-PON2) permiten afrontar la demanda cada vez mayor de aplicaciones que requieren un gran ancho de banda, como el streaming de vídeo, los servicios en la nube y el Internet de las cosas (IoT). NG-PON2 se basa en la multiplexación por división de longitud de onda (WDM), que combina varios canales de datos en una sola fibra, lo que incrementa enormemente la eficiencia espectral (R. Kaur & Singh, 2021). La Tabla 3.1 muestra la comparativa de parámetros relevantes entre NG-PON2 y PONs tradicionales.

Tabla 3. 1: Comparación entre NG-PON2 y los sistemas PON tradicionales.

Parámetros	NG-PON2	Tradicional PONs (GPON/XG-PON)
Tasa de datos	Hasta 40 Gbps para cada $\lambda$	Hasta 2.5 Gbps (GPON) / 10 Gbps (XG-PON)
Eficiencia Espectral	Alta (basada en WDM)	Moderada
Escalabilidad	Alta, admite múltiples $\lambda$	Limitada
Latencia (Retardo)	Baja, asignación de ancho de banda dinámico (DBA)	Moderada

<b>Costes</b>	Costes de despliegue más elevados	Reducido, pero con capacidad limitada
---------------	-----------------------------------	---------------------------------------

Fuente: (R. Kaur & Singh, 2021; Rajalakshmi & Shankar, 2020)

Además, la tendencia hacia la tecnología PON basada en multiplexación por división de longitud de onda en el tiempo (TWDM-PON) mejora la capacidad de NG-PON2 gracias a la asignación dinámica de longitudes de onda, lo que aporta flexibilidad y escalabilidad a las redes modernas (Rajalakshmi & Shankar, 2020). En la Tabla 3.2 se muestran los artículos de investigación más relevantes y sus principales características de las PONs usando formatos de modulación.

Tabla 3. 2: Artículos de investigación relacionados con el tema propuesto.

Tema del artículo	Autores	Año	Aspectos pertinentes
Modification of RR DBA for Performance Improvement of C-RAN on NG-PON2	Kurnia, D., & Wahidah, I.	2021	Se estudió la DBA en NG-PON2 con el objetivo de reducir los retardos e incrementar la capacidad, lo que resultó pertinente para mejorar la QoS y gestionar aplicaciones de gran ancho de banda.
Polarization Multiplexing and Hybrid Modulation Based Bandwidth Efficient NG-PON2	R. Kaur & Singh	2021	Propusieron un esquema de modulación híbrido para NG-PON2, que combina la multiplexación por polarización con QAM para mejorar la eficiencia espectral y reducir el consumo de energía, lo que resultó de gran utilidad para la optimización de la red.
Comparative Analysis of Different NG-PON2 Protection Types Based on FDM	Rajalakshmi, S., & Shankar, T.	2020	Analizaron tipos de protección en NG-PON2 y compararon los métodos de tolerancia a fallos para garantizar la resiliencia de la red, lo cual es relevante para implementaciones de PON reales.
Design and Analysis of a 32x5 Gbps Passive Optical Network Employing FSO-Based Protection	Mirza, J., Imtiaz, W. A., Aljohani, A. J.	2020	Evaluaron la redundancia y protección de las PON basadas en la óptica de espacio libre (FSO) y analizaron métodos para mejorar la calidad de las PON con técnicas de modulación avanzadas.
High Capacity Converged Passive Optical Network and RoF-Based 5G+ Fronthaul Using 4-PAM and NOMA-CAP Signals	Sarmiento et al.	2021	Analizaron los formatos de modulación 4-PAM y NOMA-CAP en PONs, destacando las compensaciones entre coste-eficiencia y rendimiento, mediante comparativa de formatos de modulación.
Performance Analysis of Optical Distribution Network for NG-PON	Kaur, S., & Kapur, R. K.	2019	Abordaron el rendimiento de las redes de distribución óptica (ODN) basadas en NG-PON en condiciones reales, analizando problemas como la atenuación y las interferencias, que resultan determinantes a la hora de evaluar el diseño del sistema.
Coherent Passive Optical Networks: Why, When, and How	Faruk, M. S., Li, X., Nessel, D.	2021	Abordaron las técnicas de detección coherente en PON, y analizaron cuándo es conveniente adoptar modulaciones coherentes como DP-QPSK para la transmisión de larga distancia y una alta eficiencia espectral.
Dynamic wavelength and bandwidth allocation for supporting diverse customers and prioritized traffic in NG-PON2 networks	Hoque, N., & Ramamurthy, B.	2020	Analizaron la DBA y asignación de longitud de onda (DBW) en NG-PON2, lo que resultó determinante para optimizar el rendimiento de la red bajo alta carga y mejoró la transmisión de datos en simulaciones.
Design and investigation of N1-class next-generation passive optical network-2 (NG-PON2) coexistence architecture in the presence of Kerr effect and four-wave mixing (FWM) for fiber to the home (FTTX) access networks	Pagare, R. A., Mishra, A., & Kumar, S.	2021	Examinaron el impacto del efecto Kerr y la mezcla de cuatro ondas en NG-PON2, ofreciendo perspectivas sobre la degradación de señal en escenarios de longitud de onda densa, lo cual mejoró el rendimiento del formato de modulación.
Enhanced passive optical network system-based VCSEL and PSK electrical modulator for 5th generation	Yousif, R. Z., Jalal, S. K., & Al-Mukhtar, F. H.	2024	Evaluaron la integración de sistemas PON basados en VCSEL con 5G, mediante análisis de la técnica de modulación PSK para mejorar la eficiencia energética y la calidad de la señal.

Fuente: (Faruk et al., 2021; Hoque & Ramamurthy, 2020; R. Kaur & Singh, 2021; S. Kaur & Kapur, 2019; Kurnia & Wahidah, 2021; Mirza et al., 2020; Pagare et al., 2024; Rajalakshmi & Shankar, 2020; Sarmiento et al., 2021; Yousif et al., 2024)

Otra tendencia en crecimiento es la integración de PON con redes inalámbricas 5G, principalmente en zonas en las que el despliegue de fibra resulta poco rentable. Con este modelo híbrido se aumenta el alcance de la red y se mantiene un alto rendimiento. Este modelo es especialmente relevante en los países en desarrollo, donde el despliegue de infraestructuras de fibra óptica puede resultar muy costoso (Kherici & Kandouci, 2024; Pagare et al., 2021).

### 3.1.2. Avances en formatos de modulación avanzados

En la actualidad, técnicas de modulación como QAM y DP-QPSK se han convertido en un componente importante para incrementar la eficiencia y capacidad de las redes ópticas de alta velocidad. La técnica QAM se caracteriza por su alta eficiencia espectral, permitiendo la transmisión de múltiples bits por símbolo, aspecto crítico en aplicaciones de gran ancho de banda (Pagare et al., 2024). Además, la modulación 64-QAM proporciona 6 bits por símbolo, lo que optimiza el uso del ancho de banda. No obstante, QAM es más sensible al ruido óptico, por lo que es menos eficaz en la comunicación a larga distancia sin corrección de errores (Alhorani & Assalem, 2019).

Tabla 3. 3: Comparación de formatos de modulación para PON de alta velocidad.

<b>Característica</b>	<b>QAM</b>	<b>DP-QPSK</b>
<b>Eficiencia espectral</b>	Alta (hasta 6 bits/símbolo)	Moderada (4 bits/símbolo)
<b>Sensibilidad al ruido</b>	Alta, susceptible al ruido y las interferencias	Baja, robusta frente a interferencias
<b>Complejidad</b>	Requiere una corrección de errores avanzada	Requiere un procesamiento complejo de la señal
<b>Coste</b>	Moderada	Elevado por la complejidad del hardware
<b>Aplicación</b>	Distancia corta-media	Comunicación óptica de larga distancia

Fuente: (Pagare et al., 2024; Saber et al., 2019)

### **3.1.3. Identificación de brechas y oportunidades de mejora**

A pesar de los avances tecnológicos, todavía quedan brechas importantes por cubrir. Por ejemplo, la incidencia de la dispersión cromática de QAM en las comunicaciones de larga distancia sigue siendo un reto. QAM suele estar limitada por el ruido óptico, ya que disminuye la calidad de la señal si no se compensa adecuadamente (Hoque & Ramamurthy, 2020). Asimismo, DP-QPSK es exitoso en aplicaciones de larga distancia, sus altos costes y complejidad complican su despliegue comercial (Faruk et al., 2021). En esta investigación, se ha utilizado el entorno de simulación OptiSystem para cubrir esta brecha mediante una comparativa exhaustiva de QAM y DP-QPSK, evaluando su eficacia y eficiencia espectral en PON de alta velocidad. Con este enfoque se logrará una representación más precisa de las condiciones de la red en el mundo real y de los desafíos que plantea la modulación, como sensibilidad al ruido y capacidad de transmisión.

### **3.2. Simulación y Diseño de Redes Ópticas Pasivas de Alta Velocidad con Formatos de Modulación Avanzados**

Aquí se detallará el proceso de diseño y simulación de la red óptica pasiva utilizando tecnologías de modulación avanzadas. Se explicará la metodología utilizada para la simulación, incluyendo las herramientas empleadas y los parámetros de configuración, así como los escenarios creados para evaluar el rendimiento de la red en términos de velocidad de transmisión de datos.

#### **3.2.1. Metodología utilizada para la parte experimental mediante simulación**

La transmisión de datos de banda ancha se hace posible mediante infraestructuras de transporte de gran capacidad creadas por las comunicaciones ópticas. Para ello, se han diseñado formatos avanzados de modulación óptica, que resultan fundamentales en los modernos sistemas de fibra basados en la multiplexación por división de longitud de onda (WDM). WDM consigue incrementar el ancho de banda haciendo posible la transmisión simultánea de diferentes paquetes de datos a través de una misma fibra.

En este último capítulo, se simulan dos formatos de modulación avanzados destinados a la comunicación óptica, con ayuda de la plataforma de simulación OPTISYSTEM 7.0. El primer escenario se refiere a una cadena de transmisión en la que los datos se transmiten de forma simultánea a través de la fibra óptica se ha considerado la modulación QAM y en el escenario siguiente se ha considerado el formato DP-QPSK.

Lo primero que se hará es una breve introducción sobre el programa informático OptiSystem 7.0 ya que es la única versión que permite simular sin restricciones de licencia, así como de sus principales aplicaciones. Después, se presenta los dos escenarios de simulación en el que se exponen los distintos resultados y sus interpretaciones. Finalmente, se presenta una comparativa entre los dos métodos.

### 3.3. Descripción de la herramienta de simulación OptiSystem

Para simular y analizar sistemas de transmisión óptica es posible recurrir a la herramienta de simulación OptiSystem. Esta plataforma permite modelar y simular enlaces ópticos, incluyendo componentes como fibras ópticas, amplificadores, láseres y moduladores, entre otros componentes ópticos. La figura 3.1 muestra la captura de pantalla del entorno de simulación previo al diseño de sistemas ópticos. Además, OptiSystem permite probar y optimizar virtualmente cualquier tipo de enlace óptico y está basado en un modelado realista de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica.



Figura 3. 1: Pantalla de inicio del software de diseño de sistemas ópticos.

Elaborado por el autor usando el software OptiSystem 7.0.

Las interfaces gráficas de usuario permiten controlar y visualizar la disposición de los componentes ópticos y contienen una ventana principal que se divide en varias secciones que se muestran en la Figura 3.2.

- Biblioteca de componentes (Component Library): es la base de datos que contiene los diferentes dispositivos o componentes, ya sean activos o pasivos.
- Editor de diseño (Layout): se utiliza para editar y configurar el diseño en el momento de la elaboración del proyecto.
- Proyecto actual (Project Browser): permite visualizar los diferentes componentes y carpetas correspondientes al proyecto actual.

Su extensa librería de componentes activos y pasivos con parámetros ajustados a la realidad es fácilmente ampliable con la incorporación de otros componentes y puede combinarse con una amplia gama de instrumentos.

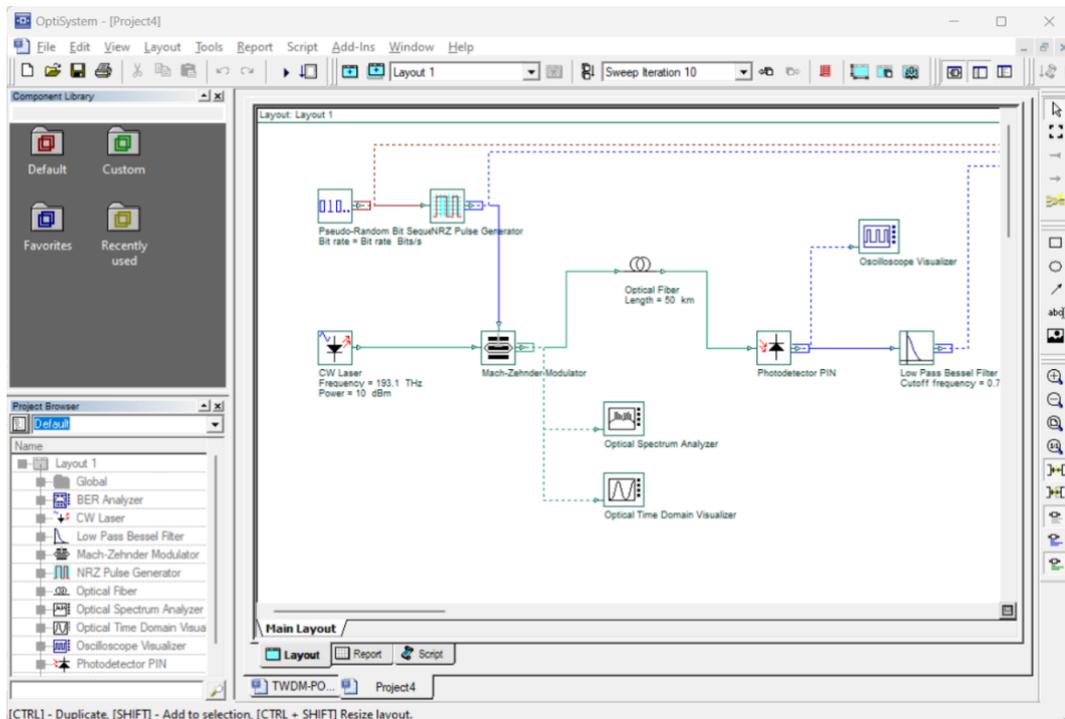


Figura 3. 2: Estructura de la interfaz gráfica de la plataforma de simulación OptiSystem.

Elaborado por el autor usando el software OptiSystem 7.0.

### 3.3.1. Prestaciones principales de la plataforma OptiSystem

Las principales prestaciones de esta plataforma de simulación son:

- Los componentes virtuales de la biblioteca están en capacidad de reproducir el mismo comportamiento en función de la precisión que se haya seleccionado y su rendimiento es el mismo que el de los componentes reales.
- La biblioteca de componentes también permite introducir parámetros que se pueden medir a partir de dispositivos reales y se integra con equipos de prueba y medición de distintos proveedores.
- Las herramientas avanzadas de visualización producen diagramas de señal de audio, de ojo, de estado de polarización, de constelación y mucho más.
- Es posible conectar un número arbitrario del monitor al mismo puerto. Cálculo de flujo de datos de última generación.

### 3.3.2. Configuración de parámetros de componentes en OptiSystem

Los componentes de la biblioteca de OptiSystem, por ejemplo, fotodetectores están disponibles por defecto en la sección biblioteca de receptores y fotodetectores. La Figura 3.3 muestra el ejemplo del fotodetector PIN.

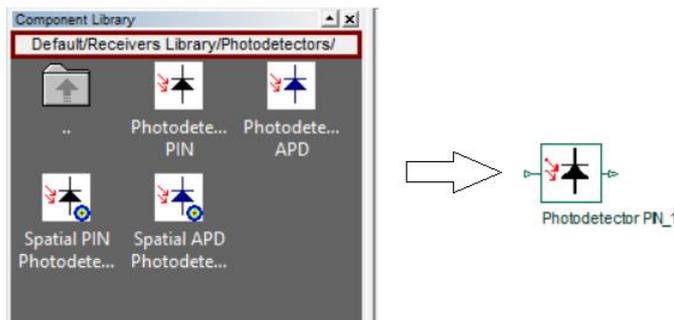


Figura 3. 3: Representación de los componentes de la librería de receptores ópticos.

Elaborado por el autor usando el software OptiSystem 7.0.

La Figura 3.4 muestra la ventana de configuración de los parámetros de simulación del fotodetector PIN seleccionado.

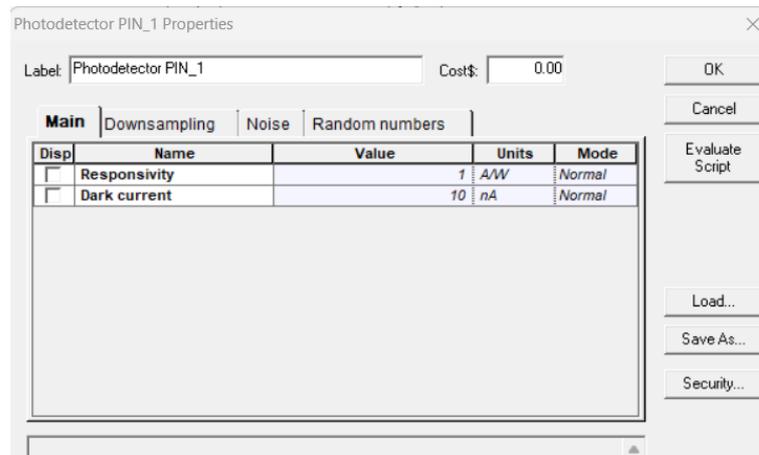


Figura 3. 4: Ventana de configuración de propiedades o parámetros de simulación del fotodetector PIN.

Elaborado por el autor usando el software OptiSystem 7.0.

### 3.3.3. Aplicaciones principales en OptiSystem

A continuación, se mencionan, entre las diferentes áreas de aplicación de OptiSystem, las más ampliamente utilizadas para:

- Diseñar sistemas de comunicación óptica de componentes a nivel de capa física.
- Determinar de la tasa de error binario (BER) y del presupuesto de enlace.
- Diseñar redes PON usando TDM/WDM, entre otras más aplicaciones.
- Diseño de sistemas ópticos de espacio libre (FOS).
- Diseño de transmisores y amplificadores de señales.

### 3.4. Diseño de modulación QAM y DP-QPSK.

El presente escenario de simulación es el resultado de un sistema de transmisión diseñado con modulación de amplitud en cuadratura (QAM), basado en el análisis del rendimiento en términos de calidad de la señal (Factor Q) y tasa de error de bits (BER). El sistema propuesto garantiza la transmisión de datos a alta velocidad, optimizando el uso del ancho de banda disponible en redes ópticas pasivas (PONs).

Los elementos que se muestran en la Figura 3.5 forman parte de la configuración del transmisor OLT (subsistema) juegan su papel en el proceso de modulación y transmisión de ondas de luz.

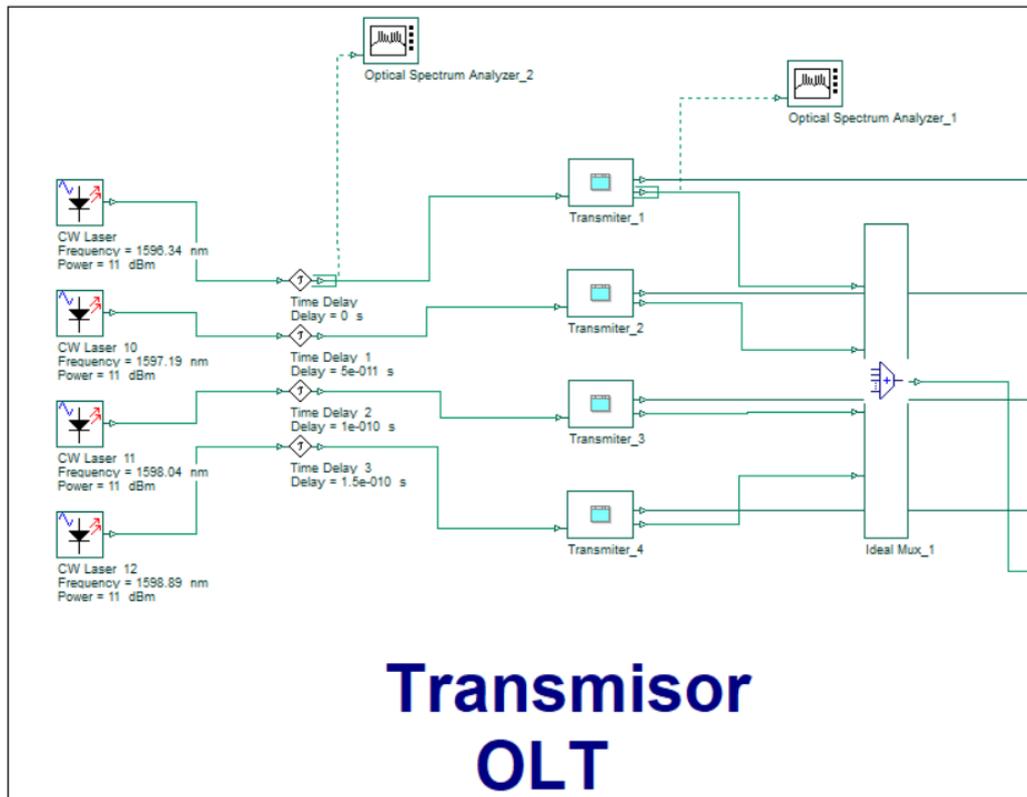


Figura 3. 5: Esquemático del transmisor OLT.

Elaborado por el autor usando el software OptiSystem 7.0.

También se muestra los subsistemas “Transmitter\_1 hasta Transmitter\_4” que corresponde a la OLT para la transmisión de 4 canales (Channel 1 hasta Channel 4). Se observa un generador de secuencia QAM alimenta la modulación de amplitud necesaria para las señales transmitidas. Este módulo desarrolla secuencias digitales de alta velocidad que contienen los datos y luego las prepara para el proceso de modulación óptica. Esta técnica de modulación es utilizada para mejorar el desempeño del sistema óptico, ya que minimiza los efectos de la dispersión cromática y la interferencia entre símbolos, problemas comunes en transmisiones de larga distancia.

El siguiente paso es multiplexar las señales utilizando la técnica OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal). OFDM se encarga de dividir la señal en múltiples subportadoras ortogonales, que utilizan mejor el ancho de banda y disminuyen los efectos

de la dispersión cromática en la fibra. Este proceso garantiza que la transmisión sea robusta especialmente a largas distancia en la que se pueden presentar distorsiones.

Sin embargo, para que la señal sea transmitida de manera eficiente, se debe añadir filtro pasa-bajo con transición suave tipo Coseno “LP Cosine Roll-Off Filter” que limitan el ancho de banda y mejora la forma espectral de la señal. Este filtro minimiza la interferencia entre símbolos (ISI) y asegura que la señal mantenga su calidad.

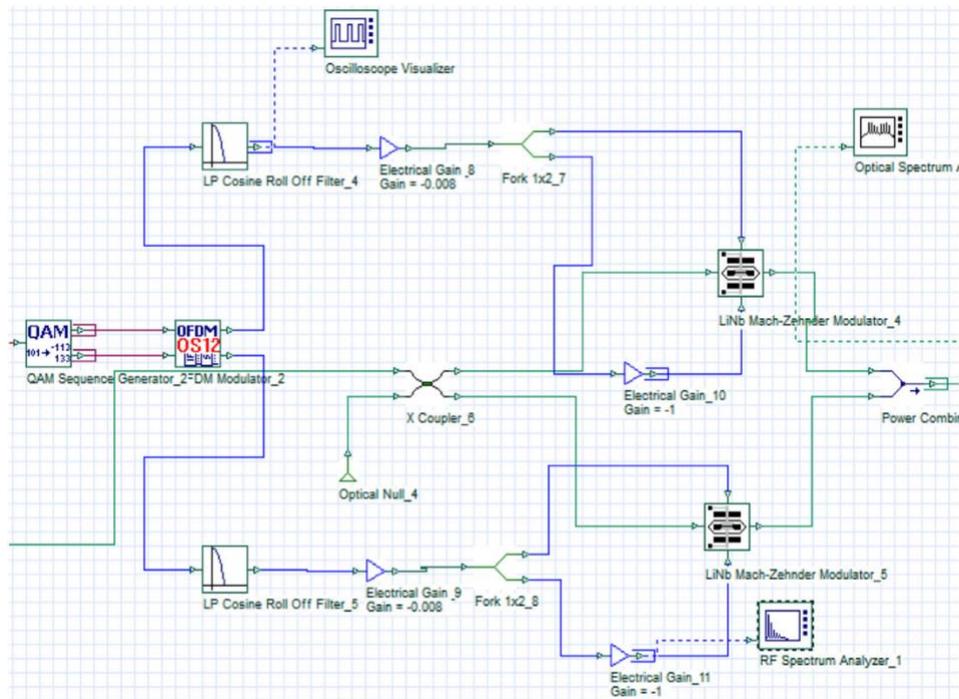


Figura 3. 6: Esquemático del bloque de transmisión óptica.

Elaborado por el autor usando el software OptiSystem 7.0.

Posteriormente, la señal es amplificada mediante el componente “Electrical Gain” que son ajustadas a través del sistema. Este dispositivo se encarga de controlar el nivel de la señal logrando evitar la saturación en los moduladores o pérdidas excesivas en el canal de transmisión. La configuración del canal de transmisión incluye varios componentes.

Primero, se tiene un modulador Mach-Zehnder (MZM) de tipo electro-óptico, encargado de modular la señal óptica en base a las señales eléctricas de entrada. En este sentido, este tipo de modulador es muy importante ya que realiza la conversión señales digitales en ópticas con el propósito de ser transmitidas a través de la fibra óptica. La fibra óptica monomodo (SMF) es el medio de transmisión con una longitud total de 70 km. Para este

diseño propuesto las señales moduladas se propagan, debido al uso de la tecnología WDM, es decir, que múltiples longitudes de onda (colores de luz) son combinadas en un solo haz de luz para su transmisión sobre la fibra óptica. Cada longitud de onda transporta datos para un usuario diferente, lo que maximiza la eficiencia del canal de transmisión.

El sistema también incluye un bloque de multiplexación (ver Figura 3.5) y demultiplexación WDM que se muestra en la Figura 3.7, lo que permite combinar las señales de los diferentes usuarios en el extremo de transmisión y para separar estas señales en el extremo receptor.

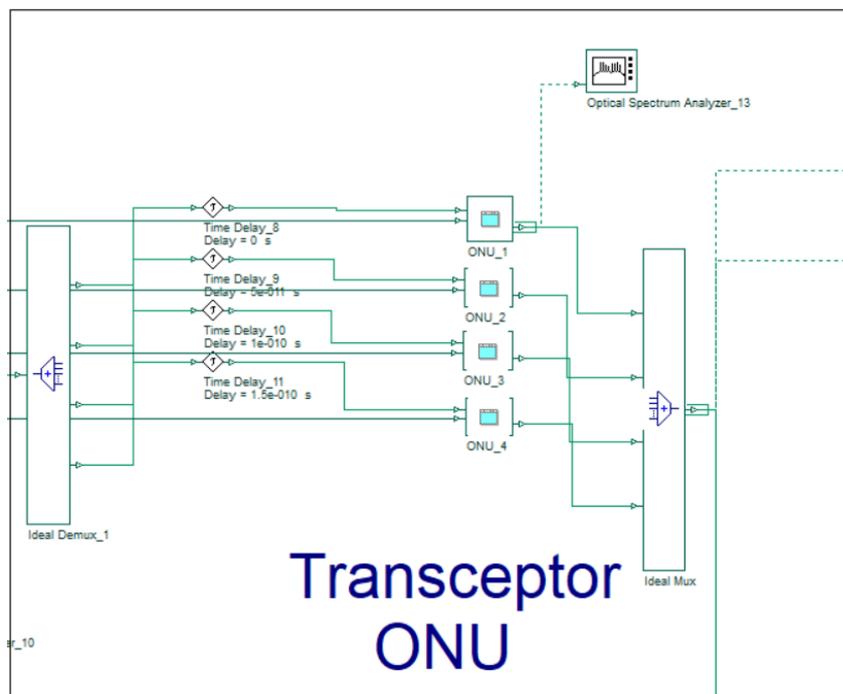


Figura 3. 7: Esquemático del bloque de multiplexación/demultiplexación del sistema WDM.

Elaborado por el autor usando el software OptiSystem 7.0.

Este proceso asegura que las señales lleguen correctamente a su destino y que cada usuario reciba la información destinada a él. La señal óptica procedente de la oficina central es separada a la entrada del sistema por un demultiplexor 1x4 (WDM) en cuatro canales ópticos con longitudes de onda diferentes. Así, la señal se distribuye a cada una de las ONU. Este proceso de demultiplexación permite repartir las longitudes de onda y enviar las señales a sus respectivos destinos.

En el bloque de la Figura 3.7, se realizan las operaciones necesarias para convertir las señales ópticas nuevamente en señales eléctricas y procesarlas para la recuperación de los datos originales. Esto incluye la demultiplexación de las señales WDM, la detección de las señales ópticas, y la conversión de estas en señales digitales que puedan ser interpretadas por los dispositivos del usuario final.

Posteriormente, cada canal óptico está asociado a un retardo de tiempo (Time Delay), que varía entre 0 y  $1.5e-10$  s. Estos retardos aseguran que las señales de las distintas ONUs no se superpongan en el tiempo, lo que es crítico para la sincronización y la correcta transmisión de datos en una red pasiva. Estos distribuyen la potencia óptica a 4 ONUs separadas, lo que permite la comunicación bidireccional entre la OLT y ONUs. Este método de división permite a la red dar servicio a un mayor número de usuarios finales sin necesidad de infraestructura de fibra adicional, lo que supone una solución rentable para ampliar la capacidad de la red.

Cada ONU del sistema está equipada con un transmisor (Tx) y un receptor (Rx). El transmisor convierte las señales eléctricas en ópticas para la transmisión de datos ascendente, en tanto que el receptor recupera las señales ópticas entrantes en forma eléctrica para la comunicación descendente. Las ONU están estratégicamente situadas para administrar la transmisión de datos de los distintos usuarios y lograr que la comunicación ascendente y descendente se realice sin interrupciones.

#### **3.4.1. Parámetros de simulación para modulación QAM y DP-QPSK**

En la OLT, tras el demultiplexado del tráfico ascendente, la salida del DEMUX 1:4 se entrega al receptor de la OLT, tal y como se muestra en la Figura 3.8. Este receptor consta de un filtro óptico, un fotodiodo PIN, un filtro Bessel de paso bajo, un regenerador 3R y un analizador de BER.

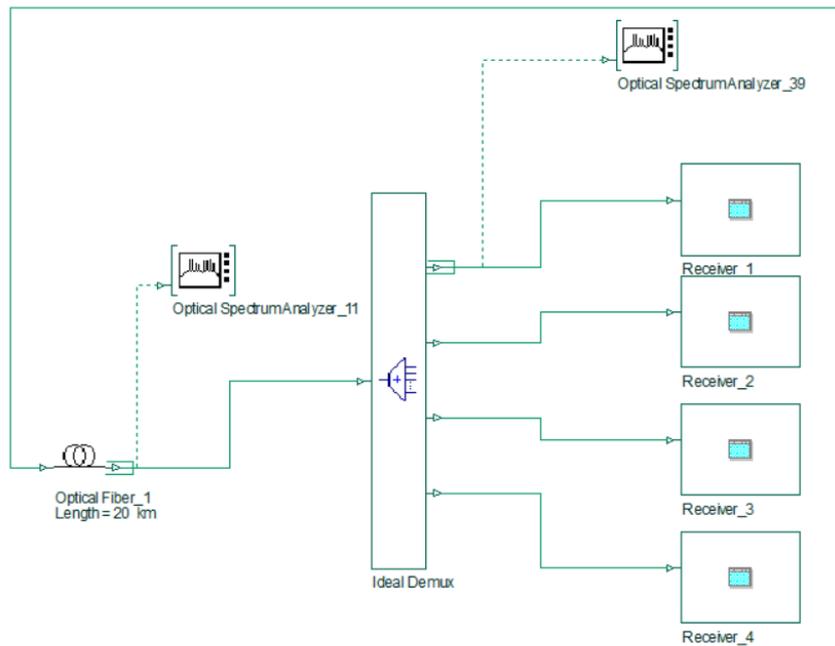


Figura 3. 8: Esquemático del bloque de recepción óptica.  
Elaborado por el autor usando el software OptiSystem 7.0.

La Tabla 3.4 muestra los parámetros de simulación usados en el sistema propuesto.

Tabla 3. 4: Parámetros de simulación de la modulación QAM.

Parámetro	Valor
Tasa de bits en la PRBS (Gbps)	25
Potencia del láser CW (dBm)	5
Frecuencia del láser CW (THz)	193.05–193.20
Número de canales OFDM	4
Ganancia del amplificador (dB)	13 dB
Número de subportadoras para modulador OFDM	512
Número de puntos FFT	1024
Longitud de la fibra óptica (km)	30-70
Dispersión (ps/nm/km)	16
Atenuación (dB/km)	0.2

Tasa de bits del Tx ONU	10 Gbps
-------------------------	---------

Elaborado por Autor.

Estos parámetros abarcan las características principales del terminal de línea óptica (OLT), el enlace de fibra óptica y las unidades de red óptica (ONU), que son esenciales para evaluar el rendimiento del sistema. Entre ellos, se incluyen valores como la tasa de bits, la potencia del láser, la longitud de la fibra óptica y las especificaciones de los fotodiodos. La correcta configuración de estos parámetros asegura la fidelidad de la simulación y proporciona una base sólida para el análisis del rendimiento de la red.

### 3.5. Evaluación Comparativa del Rendimiento de la Transmisión de Datos con Técnicas de Modulación QAM y DP-QPSK

En esta subsección se presentarán los resultados de la evaluación de rendimiento de la red bajo diferentes técnicas de modulación, como QAM y DP-QPSK. Se compararán métricas clave como capacidad de transmisión, eficiencia espectral y calidad de servicio, discutiendo las ventajas y desventajas de cada formato de modulación en diversos escenarios simulados y validando su eficacia en entornos experimentales.

#### 3.5.1. Discusión de resultados en la modulación QAM

Se ha constatado que la BER produce el mejor rendimiento para una potencia del láser de onda continua (CW Laser) de emisión 5 dBm. En la Figura 3.9 se muestra un valor de BER de aproximadamente  $-11.85$  o  $1.41 \times 10^{-12}$  (BER de referencia para NG-PON). La tabla 3.5 muestra los valores máximos de la BER para diferentes valores de potencia.

Tabla 3. 5: Valores de Min. Log de BER/BER diferentes potencias del transmisor en QAM.

Potencia (dBm)	Min Log de BER	BER
3	-9.7	$2 \times 10^{-10}$
4	-10.75	$1.78 \times 10^{-11}$
5	-11.85	$1.41 \times 10^{-12}$

6	-10.45	$3.55 \times 10^{-11}$
7	-9.5	$3.16 \times 10^{-10}$

Elaborado por Autor.

La escala logarítmica de una  $BER = 1.41 \times 10^{-12}$  se calcula de la siguiente forma:

$$\log_{10}(BER) = \log_{10}(1.41 \times 10^{-12}) = \log_{10} 1.41 + \log_{10} 10^{-12}$$

$$\log_{10}(BER) = \log_{10} 1.41 - 12 \log_{10} 10 = 0.149 - 12$$

$$\log_{10}(BER) = -11.851$$

En la Figura 3.9 se aprecia la potencia de transmisión (dBm) frente a la mínima tasa logarítmica de BER. Si se incrementa la potencia de 3 dBm a 5 dBm, aumenta la BER, alcanzando un nivel óptimo a 5 dBm, que es cuando el sistema logra una BER más baja (en torno a  $10^{-11.85}$ ). A partir de 5 dBm, la BER empeora, sin duda como consecuencia de la distorsión de la señal por exceso de potencia. Esto demuestra que es necesario balancear la potencia de transmisión para minimizar errores y maximizar la calidad de la señal.

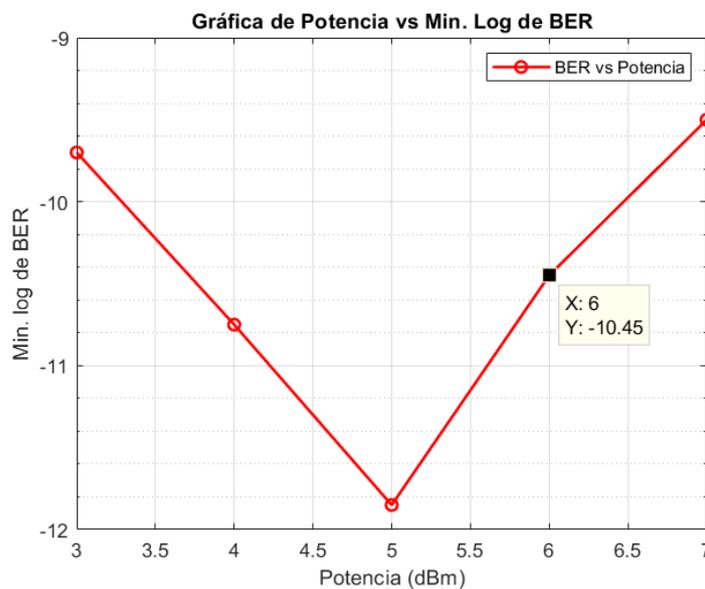


Figura 3. 9: Resultado obtenido de la Potencia (dBm) vs BER usando modulación QAM.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

En la figura 3.10 se presenta el comportamiento del Factor Q frente al tiempo (período de bits) de un enlace óptico a diferentes distancias (de 30 km a 70 km). Al aumentar el tiempo, el Factor Q se incrementa, hasta alcanzar su punto máximo en un periodo de 0,5 bits, con lo que se consigue la mejor calidad de señal. Posteriormente, el Factor Q decrece, y los enlaces a distancias más largas (como 70 km) son menos eficaces que los enlaces a distancias más cortas. Por tanto, es evidente que la calidad de la señal se degrada en las distancias largas y que el mejor rendimiento se obtiene en un intervalo de tiempo determinado.

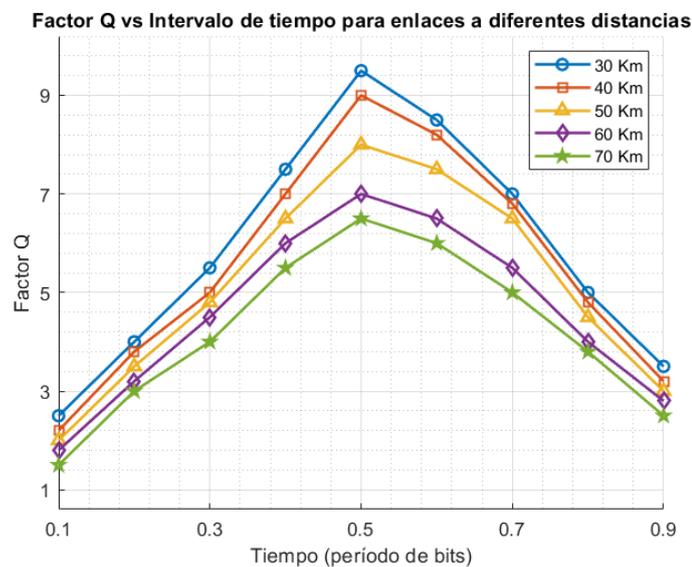


Figura 3. 10: Resultados obtenidos del Factor Q para enlaces entre 30 y 70 km usando QAM.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

La Tabla 3.6 muestra el resumen de los datos obtenidos para el factor Q, la BER y la potencia recibida en una de las ONU con diferentes longitudes de enlaces ópticos. Los resultados obtenidos también pueden analizarse en términos de diagrama de constelación, que es la representación de la señal modulada en un formato bidimensional, aunque no es propósito del presente estudio, para lo cual no se consideran los resultados obtenidos. En la Figura 3.11 se muestra la variación del factor Q para un enlace entre 30 y 70 km.

Tabla 3. 6: Resumen de Parámetros de Calidad de la Señal QAM.

Distancia de Enlace (km)	Factor Q	Min. Log de BER	BER	Potencia Rx (dBm)

30	9.5	-19.2	6.31e-20	-13.560
40	9.0	-18.0	1.00e-18	-15.561
50	8.0	-16.5	3.16e-17	-17.557
60	7.0	-14.5	3.16e-15	-19.560
70	6.5	-12.5	3.16e-13	-21.559

Elaborado por Autor.

En la Figura 3.11 se visualiza la curva Min. Log de BER frente a la distancia del enlace (en km) en el caso de las cuatro frecuencias diferentes comprendidas entre 193.05 THz y 193.20 THz. Por ejemplo, cuando se incrementa la distancia del enlace de 30 km a 70 km, empeora significativamente el Min. Log de la BER (es decir, la BER aumenta), alcanzando niveles que oscilan entre -19.2 a 30 km y -12,5 a 70 km.

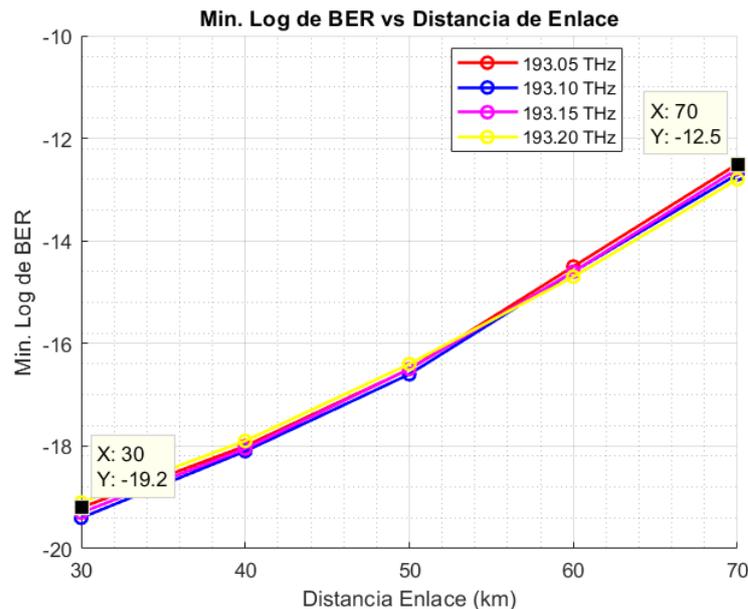


Figura 3. 11: Resultados obtenidos de la BER para enlaces entre 30 y 70 km usando QAM.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

Además, el agrupamiento similar de las líneas correspondientes a las frecuencias 193.10 a 193.20 THz parece indicar que todas experimentan una tasa similar de degradación de la BER a medida que aumenta la distancia del enlace óptico. Este hecho destaca las

dificultades crecientes para mantener la calidad de la señal en distancias más largas, al margen de la frecuencia utilizada.

En la Figura 3.12, se muestra el rendimiento de la BER en función de la potencia recibida en el tramo descendente (downstream), y se puede apreciar que para alcanzar una BER de  $10^{-12}$ , la potencia óptica recibida es de -19,56 dBm. De este modo, si se considera 5 dBm de potencia transmitida en sentido descendente para cada canal, el presupuesto de potencia alcanzado para la transmisión de OLT a la ONU es el siguiente:

$$5 \text{ dBm} - (-19.56 \text{ dBm}) = 24.56 \text{ dBm}$$

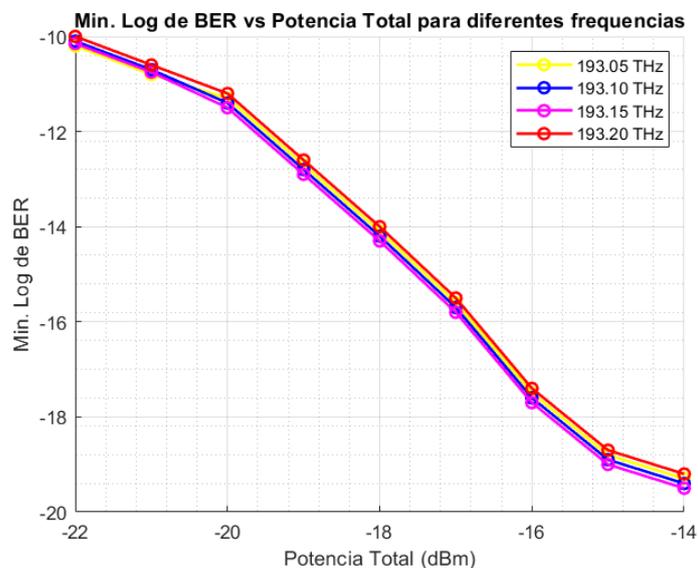


Figura 3. 12: Resultados obtenidos de la BER vs. Potencia recibida para diferentes potencias usando QAM.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

La figura 3.13 muestra que el factor Q y la distancia del enlace (en km) dependen de cuatro frecuencias diferentes, de 193.05 THz a 193.20 THz. Si la distancia del enlace se incrementa de 30 km a 70 km, el factor Q disminuye gradualmente, por lo que se reduce la calidad de la señal. Si la distancia del enlace es menor, entonces el factor Q es aproximadamente 10, mientras que a 70 km se reduce a 6.5 aproximadamente.

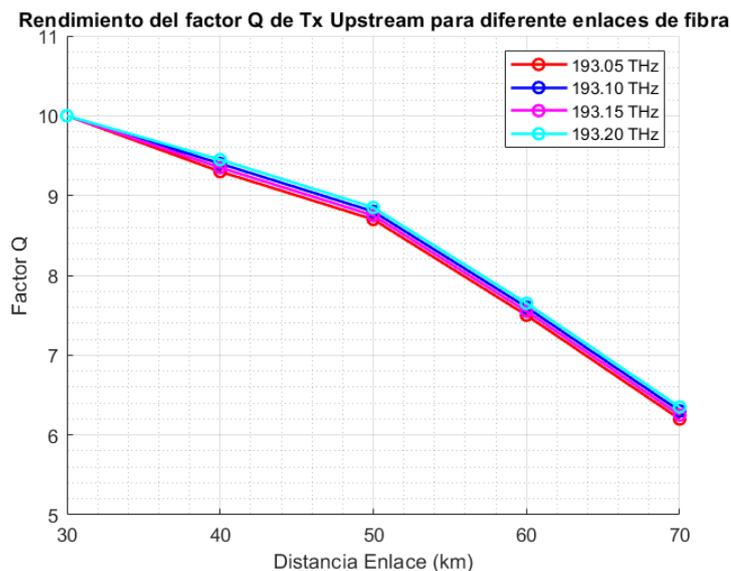


Figura 3. 13: Resultados obtenidos de la BER para enlaces entre 30 y 70 km usando QAM.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

Esa pequeña variación entre frecuencias indica que todas experimentan un nivel similar de degradación del factor Q a medida que se incrementa la distancia del enlace. Con ello se ponen de manifiesto los efectos acumulativos de la atenuación de la señal, la dispersión y el ruido en distancias más largas, lo que reduce la calidad de la transmisión.

### 3.5.2. Discusión de resultados en la modulación DP-QPSK

En el caso de la modulación DP-QPSK se observa un comportamiento análogo en términos de BER y de potencia, con un óptimo rendimiento a un nivel de potencia de 5 dBm, tal como se señaló en el caso de la modulación QAM. Ahora bien, DP-QPSK presenta mejoras significativas tanto en el factor Q como en la BER, gracias a su máxima eficiencia espectral y a la capacidad de transmitir datos en ambas polarizaciones.

Por ejemplo, la Figura 3.14 muestra que la BER tiene un valor mínimo de casi  $-12,0$  ( $BER \approx 1 \times 10^{-12}$ ), por lo que los resultados obtenidos frente a la modulación QAM mejoran respecto a la tasa de bits erróneos. El hecho de disponer de dos polarizaciones permite que la modulación DP-QPSK resulte más resistente a las interferencias y a los efectos no lineales de la fibra óptica, principalmente en enlaces de larga distancia.

Por otro lado, la Tabla 3.7 presenta de forma resumida los valores máximos de Factor Q obtenidos a diferentes distancias de enlace, observándose que, a 30 km, el Factor Q se

sitúa aproximadamente en 9,8, en tanto que a 70 km disminuye hasta 6.4. Los resultados muestran que, a pesar de la degradación que se produce al incrementar la distancia, la modulación DP-QPSK presenta un mejor rendimiento que la modulación QAM, hecho que confirma su superioridad en enlaces de larga distancia, incluso en presencia de otros factores acumulativos como la dispersión y la atenuación.

Tabla 3. 7: Valores de Min. Log de BER/BER diferentes potencias del transmisor en DP-QPSK.

Potencia (dBm)	Min Log de BER	BER
3	-10.2	$6.31 \times 10^{-11}$
4	-11.1	$7.94 \times 10^{-12}$
5	-12	$1 \times 10^{-12}$
6	-11.2	$6.31 \times 10^{-12}$
7	-9.8	$1.58 \times 10^{-10}$

Elaborado por Autor.

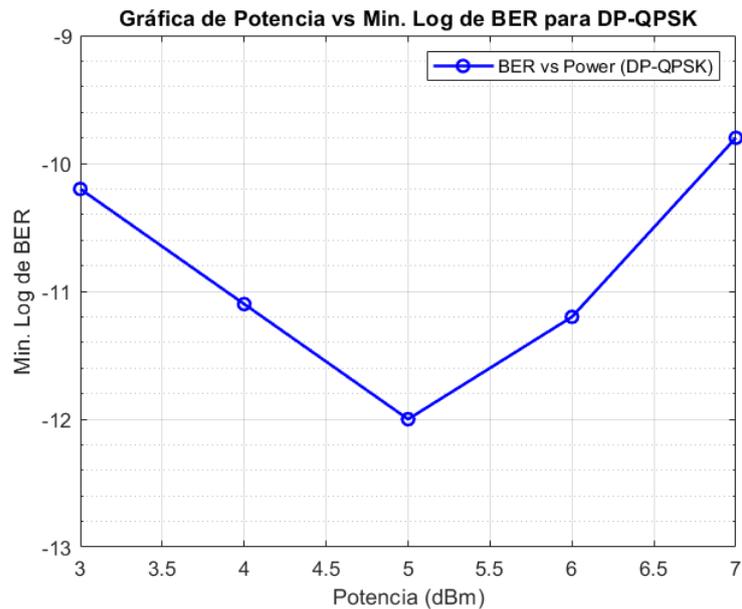


Figura 3. 14: Resultado obtenido de la Potencia (dBm) vs BER para DP-QPSK.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

La Figura 3.15 presenta el Factor Q calculado (período de bit) para la modulación DP-QPSK para diferentes distancias de enlaces ópticos (entre 30 km y 70 km).

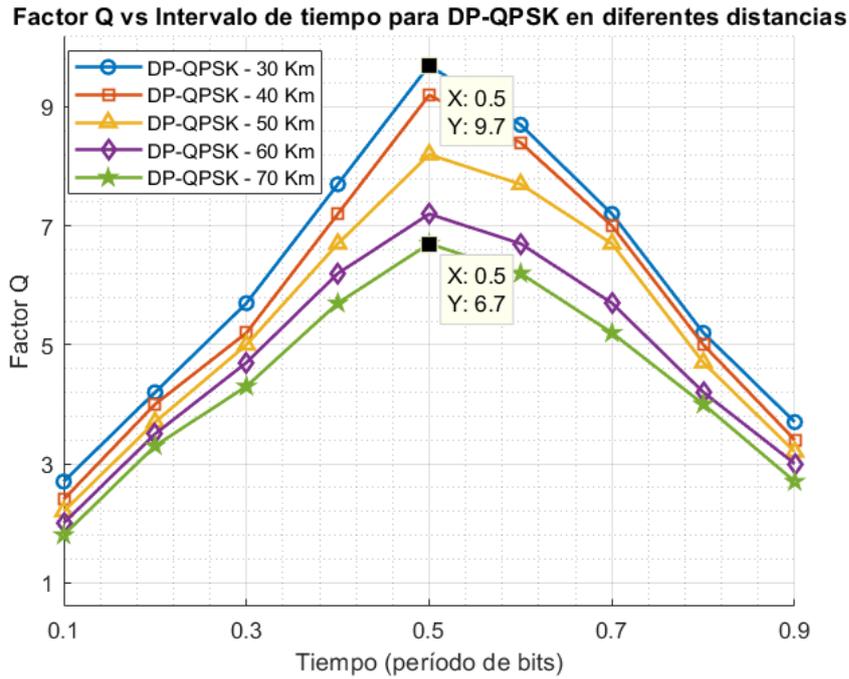


Figura 3. 15: Resultados obtenidos del Factor Q para enlaces entre 30 y 70 km usando modulación DP-QPSK,

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

Asimismo, a partir de ese momento, el Factor Q se incrementa inicialmente, alcanzando su máximo valor aproximadamente en un periodo de bit de 0.5, después del cual disminuye. Según la gráfica, los valores del Factor Q son más altos en los enlaces a distancias cortas, por ejemplo, 30 km, alcanzando un máximo de 9.7, en tanto que, en los enlaces a distancias más largas, en el caso de 70 km, el rendimiento disminuye, alcanzando un valor máximo de 6.7.

En la Figura 3.16 se representa el Mín. Log de BER para la modulación DP-QPSK utilizando frecuencias diferentes (entre 193.05 THz y 193.20 THz). Cuando se incrementa la distancia del enlace de 30 km a 70 km, el Mín. Log de BER mejora. Sin embargo, la variación mínima entre frecuencias demuestra que el rendimiento de DP-QPSK es prácticamente el mismo en toda la banda de frecuencias y el aumento de la BER se acentúa a medida que aumenta la distancia.

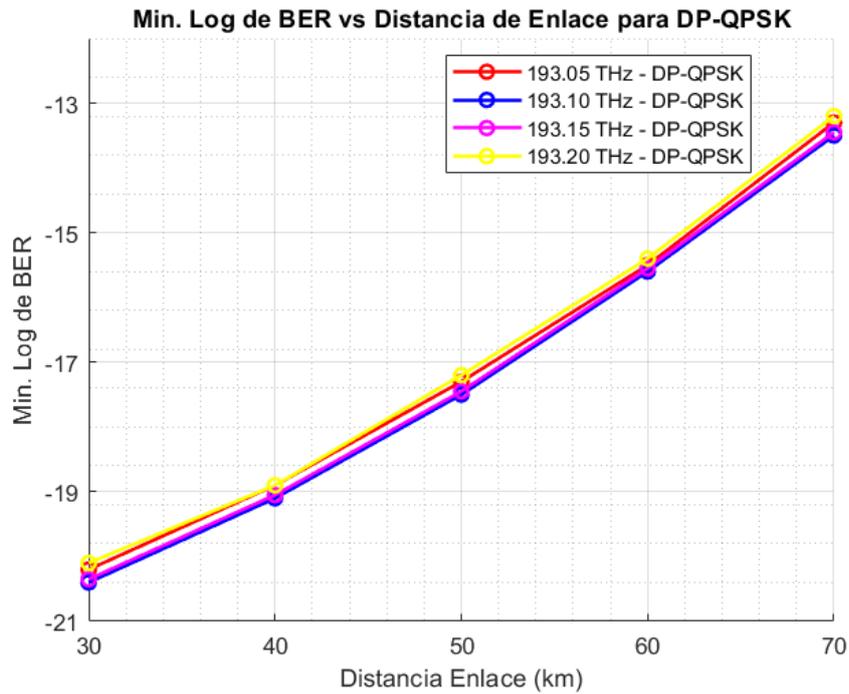


Figura 3. 16: Resultados obtenidos de la BER para enlaces entre 30 y 70 km usando modulación DP-QPSK.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

La Tabla 3.8 muestra el resumen de los datos obtenidos para el factor Q, la BER y la potencia recibida en una de las ONU con diferentes longitudes de ondas y de enlaces ópticos.

Tabla 3. 8: Resumen de Parámetros de Calidad de la Señal DP-QPSK.

Distancia del Enlace (km)	Factor Q	Min. Log de BER	BER	Potencia Rx (dBm)
30	9.7	-20.2	6.31e-20	-13.560
40	9.2	-18.9	1.26e-19	-15.561
50	8.2	-17.3	5.01e-18	-17.557
60	7.2	-15.5	3.16e-16	-19.560
70	6.7	-13.3	5.01e-14	-21.559

Elaborado por Autor.

En la Figura 3.17 se muestra el valor de la relación entre la BER y la Potencia total (dBm) para la modulación DP-QPSK en diferentes frecuencias entre 193.05 THz y 193.20 THz. Cuando la potencia total se incrementa de -22 dBm a -14 dBm, la BER decrece constantemente, lo cual indica una mejora en la BER. La BER mejoró de -11 a una potencia más baja hasta -20.3 para niveles de potencia más altos.

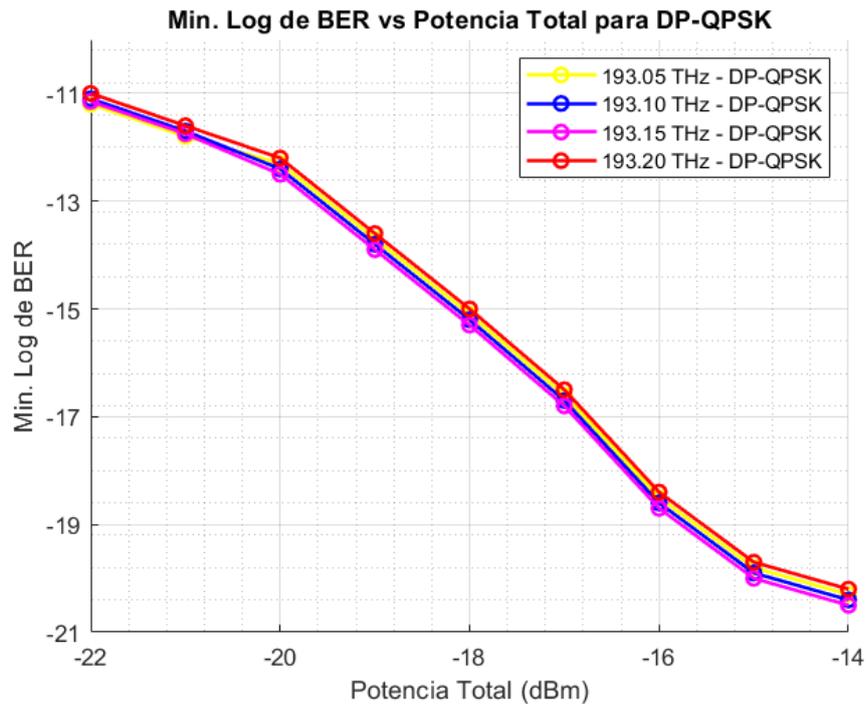


Figura 3. 17: Resultados obtenidos de la BER vs. Potencia recibida para diferentes potencias usando modulación DP-QPSK.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

La superposición de las líneas para diferentes frecuencias demuestra que todas ellas se comportan de forma similar en términos de BER al incrementar la potencia, lo que significa que la potencia es el factor dominante en la mejora de la BER para DP-QPSK, con un impacto menor de la variación de frecuencia. Esto destaca la importancia de optimizar la potencia para conseguir una mejor calidad de señal en sistemas DP-QPSK. La Figura 3.18 representa la relación entre el Factor Q y la distancia de enlace para la modulación DP-QPSK a diferentes frecuencias (193.05 THz a 193.20 THz). Se puede ver que cuando la distancia de enlace se incrementa de 30 km hasta 70 km, el Factor Q se

reduce linealmente, lo que indica que hay una disminución gradual de la calidad de la señal a medida que el alcance del enlace se incrementa.

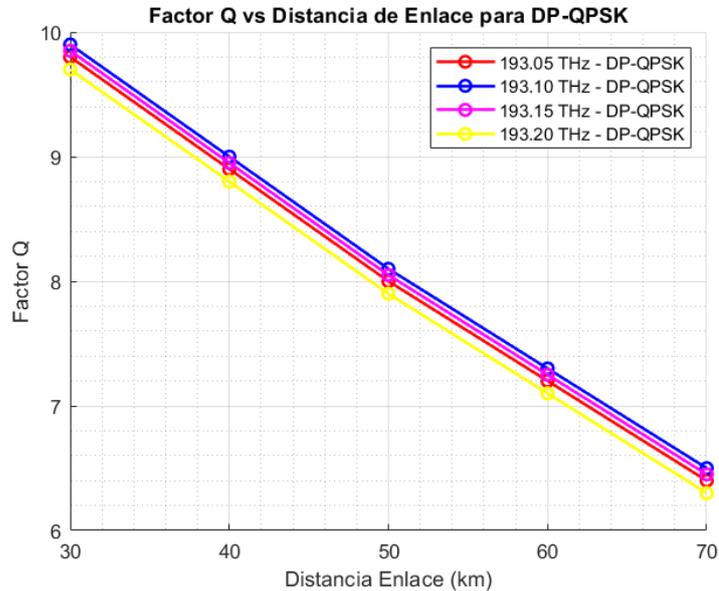


Figura 3. 18: Resultados obtenidos de la BER para enlaces entre 30 y 70 km usando QAM.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

### 3.5.3. Discusión de resultados comparativos entre formatos de modulación QAM y DP-QPSK

Todas las comparaciones de las gráficas que se observan en las Figuras 3.19 a 3.23 demuestran que DP-QPSK tiene un rendimiento superior a QAM. Esto incluye:

BER más bajo: el rendimiento de la tasa de errores del formato DP-QPSK es significativamente mejor en todos los niveles de potencia y distancias de enlaces ópticos.

Factor Q más alto: la calidad de la señal del formato DP-QPSK es más alta, especialmente en distancias largas.

Eficiencia energética: el formato DP-QPSK presenta un mejor rendimiento con niveles de potencia más bajos, por lo que su eficiencia en redes ópticas resulta evidente.

Por ejemplo, la Figura 3.19 muestra los resultados de la comparación entre la modulación QAM y DP-QPSK en términos de BER para diferentes niveles de potencia. Tal y como era de esperar, la BER disminuye a medida que se incrementa la potencia de entrada, hasta alcanzar un punto óptimo de 5 dBm en ambas modulaciones. Sin embargo, la

modulación DP-QPSK presenta un rendimiento más robusto en todo momento frente a QAM, consiguiendo una BER inferior ( $1 \times 10^{-12}$ ) a la modulación QAM.

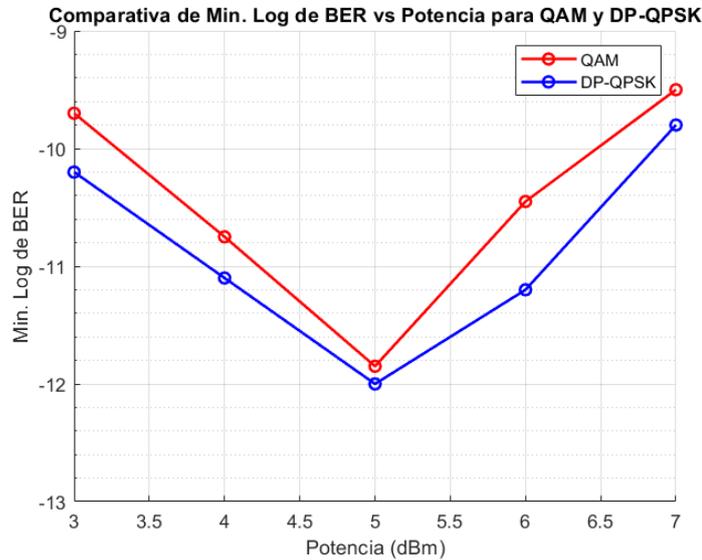


Figura 3. 19: Comparativa de la Potencia (dBm) vs BER en modulaciones QAM y DP-QPSK.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

Cuando los niveles de potencia son más altos, por encima de 5 dBm, ambos formatos de modulación presentan un aumento de la BER debido a la aparición de efectos no lineales tales como la dispersión de la fibra y la modulación en fase interna. Ahora bien, en el caso de QAM el efecto es más pronunciado, debido a su mayor sensibilidad a estas perturbaciones.

Así, mientras QAM resulta más adecuado en aplicaciones de corto alcance o de bajo consumo, es más conveniente utilizar DP-QPSK en enlaces ópticos de gran capacidad y larga distancia, en los que es fundamental mantener una BER baja. Además, la eficiencia energética de DP-QPSK la convierte en una opción atractiva para las redes ópticas pasivas (PON) que priorizan el ahorro de energía sin comprometer el rendimiento.

La Figura 3.20 representa la comparativa del factor Q de ambas modulaciones QAM y DP-QPSK a diferentes distancias (de 30 km a 70 km) en función del tiempo (periodo de bits). En ambas técnicas se observa un factor Q máximo en torno a 0.5 periodos de bits, después del cual el factor Q disminuye. Esto indica que la señal presenta una mejor calidad al principio, posiblemente gracias a una mayor tolerancia al ruido, antes de

empeorar a medida que se alarga el periodo, lo que podría introducir efectos como la interferencia entre símbolos.

**Comparación del Factor Q para QAM y DP-QPSK en diferentes distancias**

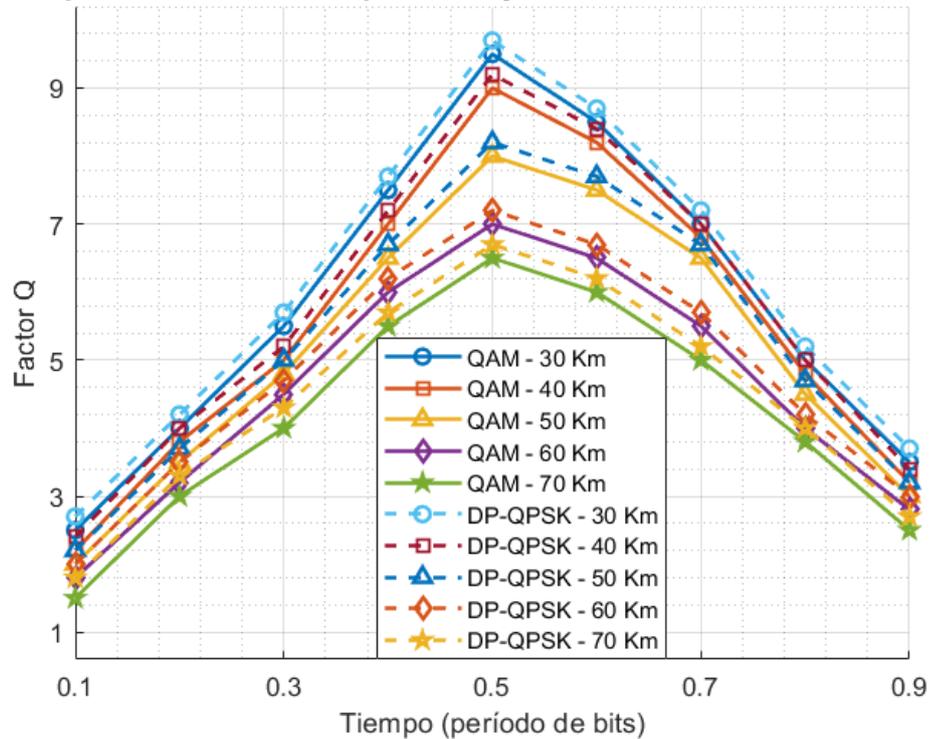


Figura 3. 20: Comparativa del Factor Q vs. Período de bits para enlaces entre 30 y 70 km.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

La Figura 3.21 muestra la comparación del factor Q para ambas modulaciones QAM y DP-QPSK en distancias variables (entre 30 y 70 km) en función del tiempo (periodo de bits). Ambos esquemas de modulación presentan un factor Q máximo en torno a 0.5 periodos de bits, tras lo cual el factor Q disminuye. Este comportamiento sugiere que la calidad de la señal mejora inicialmente con el tiempo, probablemente debido a una mayor tolerancia al ruido, antes de deteriorarse a medida que el periodo se hace demasiado largo, lo que podría introducir efectos como la interferencia entre símbolos.

**Comparativa de Min. Log de BER vs Distancia de Enlace para QAM y DP-QPSK**

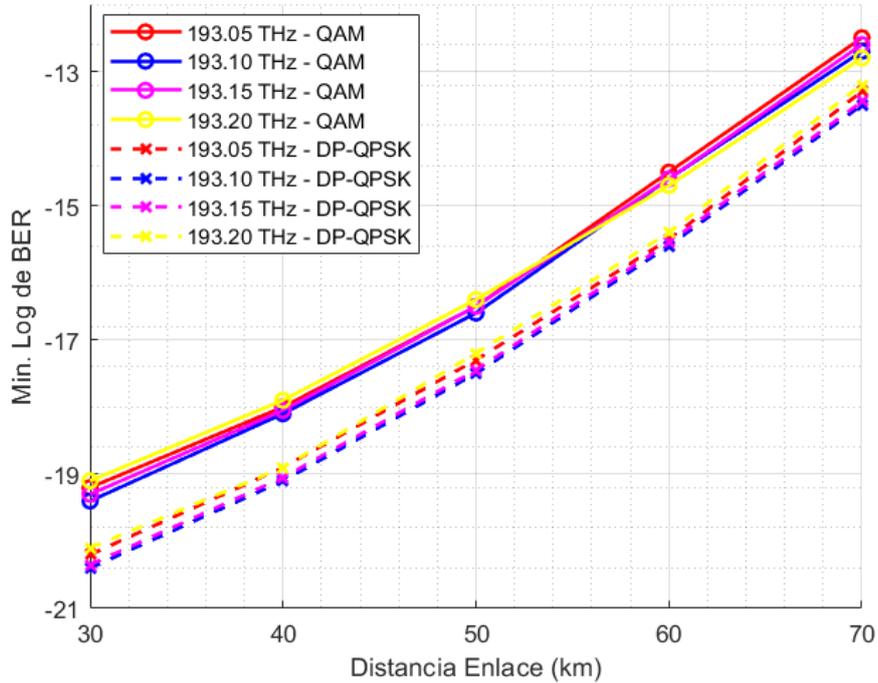


Figura 3. 21: Comparativa de Min. Log de BER vs. Distancia de enlace QAM y DP-QPSK.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

Sin embargo, al aumentar la distancia hasta 50 km, QAM supera a DP-QPSK con un factor Q más alto, lo cual indica una mejor calidad de la señal. No obstante, a medida que la distancia pasa o supera los 50 km, DP-QPSK muestra un rendimiento más estable con una menor disminución del factor Q, especialmente en el rango de 60-70 km.

En la Figura 3.22 se muestra la comparación de la BER mínima en función de la potencia total (dBm) tanto para la modulación QAM como para DP-QPSK en diferentes canales de frecuencia, entre 193.05 THz y 193.20 THz. La variación muestra una disminución de la BER a medida que se incrementa la potencia total, lo que resulta lógico ya que los niveles de potencia más elevados permiten mejorar la relación señal/ruido, disminuyendo así la tasa de bits erróneos.

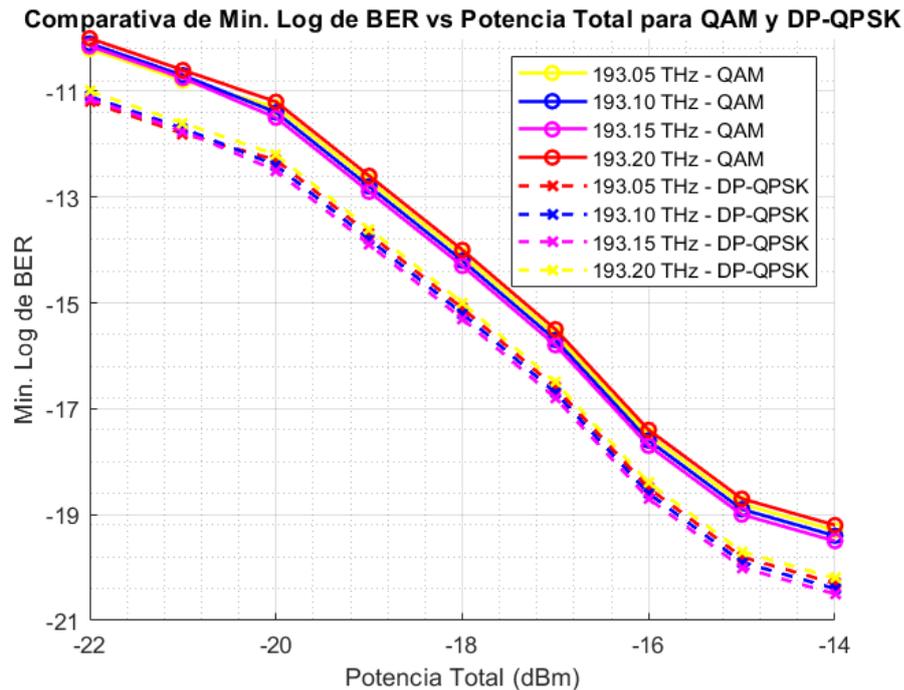


Figura 3. 22: Comparativa de BER vs Potencia entre formatos QAM y DP-QPSK.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

En general, DP-QPSK consigue una BER menor que QAM para todos los niveles de potencia, aunque esta diferencia resulta más evidente a mayor potencia (en torno a -14 dBm). Esto demuestra el mayor rendimiento de DP-QPSK manteniendo una señal más robusta a medida que se incrementa la potencia, debido probablemente a su mayor resistencia a los efectos no lineales y al ruido, que resultan más evidentes a mayores intensidades. En contraste, QAM, aunque mejora con el aumento de potencia, no alcanza a DP-QPSK en términos de BER global.

La Figura 3.23 muestra una comparativa del factor Q con respecto a la distancia del enlace (km) para QAM y DP-QPSK en diferentes canales de frecuencia, entre 193.05 y 193.20 THz. El factor Q disminuye proporcionalmente al incremento del enlace de 30 a 70 km, lo que indica que la señal se degrada debido a la dispersión de la fibra, atenuación y otros efectos relacionados con la distancia.

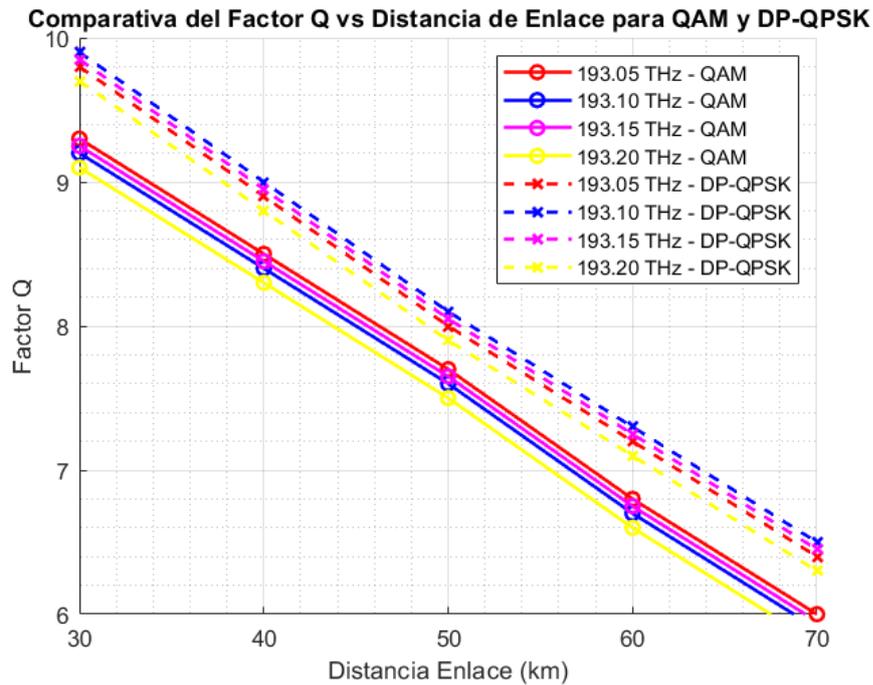


Figura 3. 23: Comparativa Factor Q vs Distancia de enlace entre formatos QAM y DP-QPSK.

Elaborado por el autor usando el software Matlab 23.0.

DP-QPSK consigue superar a QAM en cuanto al factor Q, especialmente a mayores distancias. Esto indica que DP-QPSK es más resistente a los efectos de la degradación de la señal a larga distancia, lo que es crítico en los sistemas de comunicación óptica de larga distancia. Por el contrario, QAM experimenta un descenso más rápido del factor Q, lo que indica una mayor sensibilidad a los efectos de la dispersión, lo que la hace menos idónea para enlaces de mayor longitud que carecen de técnicas adicionales de regeneración o compensación de la señal.

Todos estos resultados confirman que la técnica DP-QPSK es un esquema de modulación más idóneo que la técnica QAM para redes de comunicaciones ópticas de larga distancia y alta capacidad, puesto que permitió optimizar la corrección de errores y la calidad de la señal en condiciones de funcionamiento muy diversas.

## CONCLUSIONES

1. Las Redes Ópticas Pasivas ofrecen una propuesta de valor convincente en términos de rentabilidad y eficiencia operativa. Desde la reducción de costos de despliegue y mantenimiento hasta el ahorro de energía y la escalabilidad a largo plazo, las PON proporcionan numerosos beneficios que las convierten en una elección atractiva tanto para proveedores de servicios como para usuarios finales. A medida que las demandas de ancho de banda continúan creciendo y surgen nuevas aplicaciones, las ventajas inherentes de las arquitecturas PON las posicionan como una tecnología clave en la configuración del futuro de las redes de acceso de banda ancha.
2. Se logró diseñar y simular una red óptica pasiva de alta velocidad usando formatos de modulación QAM y DP-QPSK, con lo cual se evaluó el rendimiento de la transmisión de datos. Según los resultados, el formato de modulación DP-QPSK tiene un rendimiento superior en condiciones de larga distancia y baja potencia, convirtiéndose en una opción mucho más robusta en el caso de las redes ópticas de alta capacidad.
3. Los resultados obtenidos en cuanto a capacidad de transmisión de datos y eficiencia espectral confirman que DP-QPSK es más eficaz que QAM, en especial a distancias superiores a 50 km. En este caso, los valores de BER y factor Q fueron coherentemente mejores, lo que validó su eficacia para mejorar la calidad del servicio en redes ópticas. Así, DP-QPSK se considera más adecuado en redes de alta capacidad y transmisión a larga distancia, ya que reduce significativamente la tasa de bits erróneos.
4. La técnica QAM es una opción interesante para enlaces de corta distancia por su sencillez, pero DP-QPSK resulta superior en situaciones que requieren mayor capacidad de transmisión y rendimiento espectral. Esta comparativa demuestra las ventajas de DP-QPSK para las redes ópticas de próxima generación, en tanto que QAM es más adecuado para redes que no requieran distancias y capacidad tan exigentes.

## RECOMENDACIONES

1. Los estudios posteriores deben centrarse en desarrollar técnicas de modulación híbridas basadas en QAM y DP-QPSK para lograr una solución que proporcione eficiencia espectral a los enlaces de corta distancia y capacidad de corrección de errores a los enlaces de mayor distancia.
2. GPON basadas en la modulación QAM y DP-QPSK mejorarían mucho más si se diseñaran y probaran algoritmos más sofisticados de corrección de errores que compensen las pérdidas de señal en trayectos aún más largos y proporcionen niveles de BER bajos también en presencia de niveles de ruido y atenuación más elevados.
3. Analizar una integración de la multiplexación por división de modos (MDM) usando modulación DP-QPSK que permita combinar varios modos de transmisión espacio-temporales en la misma fibra óptica, y cada modo de transmisión actúa como un canal independiente para la transferencia de datos.

## REFERENCIAS

- Abbas, H. S., & Gregory, M. A. (2016). The next generation of passive optical networks: A review. *Journal of Network and Computer Applications*, 67, 53–74. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.015>
- Abdellaoui, Z., Dieudonne, Y., & Aleya, A. (2021). Design, implementation and evaluation of a Fiber To The Home (FTTH) access network based on a Giga Passive Optical Network GPON. *Array*, 10, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.array.2021.100058>
- Abejide, A. E., Duarte, P., Patel, R., Pandey, S., R. Kota, M., Pinho, C., Novo, C., Julius Popoola, J., Isiaka Ajewale, A., Lima, M., & Teixeira, A. (2024). PON-FTTX Architecture and Bandwidth Analysis for Future Broadband Communications. En *5G and 6G Enhanced Broadband Communications [Working Title]*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.114274>
- 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>
- Ab-Rahman, M. S., Rahman, J. A., Arifin, N. F. M., Kaharudin, I. H., & Hwang, I.-S. (2023). Upscaling Customer Access Network Using Spectrum Conversion–Slicing–Duplication Technique. *Photonics*, 10(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/photonics10111271>
- Agalliu, R., Burtscher, C., Lucki, M., & Seyringer, D. (2018). Optical splitter design for telecommunication access networks with triple-play services. *Journal of Electrical Engineering*, 69(1), 32–38. <https://doi.org/10.1515/jee-2018-0004>

- Agrawal, G. P. (2016). Optical Communication: Its History and Recent Progress. En M. D. Al-Amri, M. El-Gomati, & M. S. Zubairy (Eds.), *Optics in Our Time* (pp. 177–199). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-31903-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31903-2_8)
- Alhorani, F. M., & Assalem, A. (2019). NG-PON2 Network With 120Km Fiber Length Using Fiber Bragg Grating FBG. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, 57(1), 35–44.
- Arie, D., & Katz, G. (2022). Electrical Equalization Analysis of PAM-4 Transmission in Short-Reach Optical Systems. *Applied Sciences*, 12(4), 2255. <https://doi.org/10.3390/app12042255>
- Baliga, J., Ayre, R., Hinton, K., Sorin, W. V., & Tucker, R. S. (2009). Energy Consumption in Optical IP Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 27(13), 2391–2403. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2010142>
- Beguni, C., Căilean, A.-M., Avătămăniței, S.-A., & Dimian, M. (2021). Analysis and Experimental Investigation of the Light Dimming Effect on Automotive Visible Light Communications Performances. *Sensors*, 21(13), 4446. <https://doi.org/10.3390/s21134446>
- Bonk, R. (2021). The Future of Passive Optical Networks. *2021 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, 1–3. <https://doi.org/10.23919/ONDM51796.2021.9492398>
- Brestas, G., Kanakis, G., Spyropoulou, M., & Avramopoulos, H. (2024). Beyond 100G: All-Optical Processor for High-Capacity Access~Networks. *Photonics*, 11(7), 640. <https://doi.org/10.3390/photonics11070640>
- Butt, M. A., & Mateos, X. (2024). Strategic Insights into Integrated Photonics: Core Concepts, Practical Deployments, and Future Outlook. *Applied Sciences*, 14(14), 6365. <https://doi.org/10.3390/app14146365>

- Calvo-Salcedo, A. F., González, N. G., & Jaramillo-Villegas, J. A. (2023). Dynamic Spectrum Assignment in Passive Optical Networks Based on Optical Integrated Microring Resonators Using Machine Learning and a Routing, Modulation Level, and Spectrum Assignment Method. *Applied Sciences*, 13(24), 13294. <https://doi.org/10.3390/app132413294>
- Chang, S.-H. (2019). Key Technologies and Development Trends of 5G Optical Networks. *Applied Sciences*, 9(22), 4835. <https://doi.org/10.3390/app9224835>
- Che, D., & Chen, X. (2022). Higher-Order Modulation vs Faster-Than-Nyquist PAM-4 for Datacenter IM-DD Optics: An AIR Comparison Under Practical Bandwidth Limits. *Journal of Lightwave Technology*, 40(10), 3347–3357. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3172247>
- Chou, E. S., & Kahn, J. M. (2020). Adaptive Coding and Modulation for Robust Optical Access Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 38(8), 2242–2252. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2963276>
- Chowdhury, P., Tornatore, M., Sarkar, S., & Mukherjee, B. (2010). Building a Green Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN). *Journal of Lightwave Technology*, 28(16), 2219–2229. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2044369>
- Delgado M., J., Shinada, S., Furukawa, H., & Wada, N. (2017). Ultra-High-Capacity Optical Packet Switching Networks with Coherent Polarization Division Multiplexing QPSK/16QAM Modulation Formats. *Photonics*, 4(4), 27. <https://doi.org/10.3390/photonics4020027>
- Dias, L. P., Dos Santos, A. F., Pereira, H. A., De Andrade Almeida, R. C., Giozza, W. F., De Sousa, R. T., & Assis, K. D. R. (2022). Evolutionary Strategy for Practical Design of Passive Optical Networks. *Photonics*, 9(5), 278. <https://doi.org/10.3390/photonics9050278>

- Dutta, B., Sarkar, N., Atta, R., Kuiri, B., & Sekhar Patra, A. (2022). 1600 Gbps PAM-4 FSO link enabled using OFCL-based WDM and OAM-multiplexing techniques. *Results in Optics*, 9, 100287. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2022.100287>
- Effenberger, F. (2012). XG-PON1 versus NG-PON2: Which One Will Win? *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Tu.4.B.1. <https://doi.org/10.1364/ECEOC.2012.Tu.4.B.1>
- Effenberger, F. J. (2017). Industrial Trends and Roadmap of Access. *Journal of Lightwave Technology*, 35(5), 1142–1146. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2636246>
- Faruk, M. S., Li, X., Nasset, D., Cano, I. N., Rafel, A., & Savory, S. J. (2021). Coherent Passive Optical Networks: Why, When, and How. *IEEE Communications Magazine*, 59(12), 112–117. <https://doi.org/10.1109/MCOM.010.2100503>
- Feng, Z., He, P., Li, W., Hu, K., Tong, F., & Su, X. (2024). Improving the Performance of Bidirectional Communication System Using Second-Order Raman Amplifiers. *Photonics*, 11(9), 879. <https://doi.org/10.3390/photonics11090879>
- Fischer, U. H. P., Haupt, M., & Kußmann, P. (2021). Optical Inhouse Networks. En G. Huerta-Cuellar (Ed.), *Fiber Optics—Technology and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98921>
- Flores A., G. N., Paredes P., L. S., Roldan T., S. N., & Valdizan G., D. (2021). *Implementar redes inalámbricas a través de fibra óptica para impulsar la educación en las zonas rurales del Perú* [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica de Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/20957>
- Fyshop. (2024). *FTTB and FTTC Solution Overview*. PHIL-ICLOUD TECH INC. <https://fyshop.ph/cases-detail/fttb-and-fttc-solution-6>

- Grami, A. (2016). Passband Digital Transmission. En *Introduction to Digital Communications* (pp. 299–355). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407682-2.00007-7>
- Haider, A., Rahman, M., Khan, T., Tabish Niaz, M., & Seok Kim, H. (2021). Multi-Gigabit CO-OFDM System over SMF and MMF Links for 5G URLLC Backhaul Network. *Computers, Materials & Continua*, 67(2), 1747–1758. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.015611>
- Hamadamin, J. A., Ibrahim, M. A., & Saleem, S. M. (2019). Performance Evaluation of 100 Gb/s WDM DP-QPSK Lightwave System with Reduced PMD Effects. *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*, 9(5), 362. <https://doi.org/10.15866/irecap.v9i5.17699>
- Hambly, H., & Rajabiun, R. (2021). Rural broadband: Gaps, maps and challenges. *Telematics and Informatics*, 60, 101565. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2021.101565>
- Hamza, B. J., Saad, W. K., Shayea, I., Ahmad, N., Mohamed, N., Nandi, D., & Gholampour, G. (2021). Performance Enhancement of SCM/WDM-RoF-XGPON System for Bidirectional Transmission With Square Root Module. *IEEE Access*, 9, 49487–49503. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065285>
- Hoernig, S., Jay, S., Neumann, K.-H., Peitz, M., Plückebaum, T., & Vogelsang, I. (2012). The impact of different fibre access network technologies on cost, competition and welfare. *Telecommunications Policy*, 36(2), 96–112. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2011.12.003>
- Hood, D., & Trojer, E. (2012). *Gigabit-Capable Passive Optical Networks* (1a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118156070>
- Hoque, N., & Ramamurthy, B. (2020). Dynamic wavelength and bandwidth allocation for supporting diverse customers and prioritized traffic in NG-PON2 networks.

- Photonic Network Communications*, 40(3), 194–208.  
<https://doi.org/10.1007/s11107-020-00922-8>
- Horvath, T., Munster, P., Oujezsky, V., & Bao, N.-H. (2020). Passive Optical Networks Progress: A Tutorial. *Electronics*, 9(7), 1081.  
<https://doi.org/10.3390/electronics9071081>
- Horvath, T., Radil, J., Munster, P., & Bao, N.-H. (2020). Optical Amplifiers for Access and Passive Optical Networks: A Tutorial. *Applied Sciences*, 10(17), 5912.  
<https://doi.org/10.3390/app10175912>
- Hung, N. T., Stainton, S., Le, S. T., Haigh, P. A., Tien, H. P., Vien, N. D. N., & Tuan, N. V. (2023). High-speed PAM4 transmission using directly modulated laser and artificial neural network nonlinear equaliser. *Optics & Laser Technology*, 157, 108642. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108642>
- Kataria, A., Ghosh, S., Karar, V., Gupta, T., Srinivasan, K., & Hu, Y.-C. (2020). Improved Diver Communication System by Combining Optical and Electromagnetic Trackers. *Sensors*, 20(18), 5084.  
<https://doi.org/10.3390/s20185084>
- Kaur, A., & Dewra, S. (2015). Comparative Analysis of Different Modulation Techniques in Coherent Optical Communication System. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 3(8), 7193–7200.  
<https://doi.org/10.15680/IJIRCCE.2015.0308009>
- Kaur, R., & Singh, S. (2021). Polarization multiplexing and hybrid modulation based bandwidth efficient NG-PON2 coexisting with GPON and XG-PON. *Journal of Optical Technology*, 88(4), 196. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000196>
- Kaur, S., & Kapur, R. K. (2019). Performance analysis of optical distribution network for NG-PON. *Journal of Optics*, 48(4), 606–615. <https://doi.org/10.1007/s12596-019-00574-6>

- Khatiwoda, N. R., & Dawadi, B. R. (2021). A study on FTTH implementation and migration in Nepal. *Journal of Engineering Issues and Solutions*, 44(1), 174–196.
- Kherici, C., & Kandouci, M. (2020). A Comparative Study of Performances Between the WDM PON System and the CWDM PON System in an Optical Access Network. *Journal of Optical Communications*, 0(0). <https://doi.org/10.1515/joc-2019-0248>
- Kurnia, D., & Wahidah, I. (2021). Modification of RR DBA for Performance Improvement of C-RAN on NG-PON2. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 14(6), 579–587. <https://doi.org/10.22266/ijies2021.1231.51>
- Lam, C. F. (Ed.). (2007). *Passive optical networks: Principles and practice*. Elsevier/Academic Press.
- Li, Z., Xia, Y., Cheng, M., Yang, Q., Tang, M., Liu, D., & Deng, L. (2023). SNR-enhanced and high-order frequency multiplied 64-QAM millimeter-wave signal generation enabled by MZM-based angle modulation. *Optics Letters*, 48(8), 2106. <https://doi.org/10.1364/OL.486671>
- Liu, X. (2019). Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era. *iScience*, 22, 489–506. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.11.026>
- Luo, Y., Zhou, X., Effenberger, F., Yan, X., Peng, G., Qian, Y., & Ma, Y. (2013). Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2). *Journal of Lightwave Technology*, 31(4), 587–593. <https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2215841>
- Ma, Y., & Jia, Z. (2017). Evolution and Trends of Broadband Access Technologies and Fiber-Wireless Systems. En M. Tornatore, G.-K. Chang, & G. Ellinas (Eds.), *Fiber-Wireless Convergence in Next-Generation Communication Networks* (pp. 43–75). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42822-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42822-2_2)

- Maamoun, K. M., & Mouftah, H. T. (2011). Survivability models for radio-over-fiber passive optical networks (RoF-PON)/PON. *2011 seventh International Computer Engineering Conference (ICENCO'2011)*, 13–18. <https://doi.org/10.1109/ICENCO.2011.6153926>
- Mahloo, M., Mas Machuca, C., Chen, J., & Wosinska, L. (2013). Protection cost evaluation of WDM-based next generation optical access networks. *Optical Switching and Networking*, 10(1), 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2012.07.002>
- Manchay, N., Tipantuña, C., Arévalo, G. V., Arguero, B., & Parra, C. (2024). Analysis of Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing (UDWDM) in a Passive Optical Network (PON). *Enfoque UTE*, 15(3), 1–17. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.1049>
- Martinez-Curipoma, J., & Arévalo, G. V. (2023). Performance Analysis of a 200 Gb/s PAM-4 PAM-8 WDM-PON. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 71(2), 362–370. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I2P238>
- Méndez, C. D. Q., Zúñiga, E. F. H., & Agredo, G. A. G. (2021). Effect of M-QAM Modulation Technique for a Converged Network Infrastructure Radio over Fiber (RoF). *Ingeniería y Desarrollo*, 39(1), 66–85.
- Mirza, J., Imtiaz, W. A., Aljohani, A. J., Atieh, A., & Ghafoor, S. (2020). Design and analysis of a  $32 \times 5$  Gbps passive optical network employing FSO based protection at the distribution level☆. *Alexandria Engineering Journal*, 59(6), 4621–4631. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.08.020>
- Montalvo, J., Torrijos, J., Cortes, D., Chundury, R., & St. Peter, M. (2021). Journey toward software-defined passive optical networks with multi-PON technology: An industry view [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 13(8), D22. <https://doi.org/10.1364/JOCN.423034>

- Muhammad, F., Ali, F., Habib, U., Usman, M., Khan, I., & Kim, S. (2020). Time Domain Equalization and Digital Back-Propagation Method-Based Receiver for Fiber Optic Communication Systems. *International Journal of Optics*, 2020, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2020/3146374>
- Nance Hall, M., Foerster, K.-T., Schmid, S., & Durairajan, R. (2021). A Survey of Reconfigurable Optical Networks. *Optical Switching and Networking*, 41, 54. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2021.100621>
- Nesset, D. (2015). NG-PON2 Technology and Standards. *Journal of Lightwave Technology*, 33(5), 1136–1143. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2389115>
- 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>
- Obite, F., Jaja, E. T., Ijeomah, G., & Jahun, K. I. (2018). The evolution of Ethernet Passive Optical Network (EPON) and future trends. *Optik*, 167, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.03.119>
- Ogawa, K. (2024). Increase in Modulation Speed of Silicon Photonics Modulator with Quantum-Well Slab Wings: New Insights from a Numerical Study. *Photonics*, 11(6), 535. <https://doi.org/10.3390/photonics11060535>
- Pagare, R. A., Kumar, S., & Mishra, A. (2024). Design and investigation of N1-class next-generation passive optical network-2 (NG-PON2) coexistence architecture in the presence of Kerr effect and four-wave mixing (FWM) for fiber to the home (FTTX) access networks. *Journal of Optical Communications*, 44(s1), s1051–s1070. <https://doi.org/10.1515/joc-2020-0299>

- Pan, Z., Wang, Q., Yue, Y., Huang, H., & Bao, C. (2020). Special Issue on Optical Communications and Networking: Prospects in Industrial Applications. *Applied Sciences*, *10*(1), 411. <https://doi.org/10.3390/app10010411>
- Pavez Bravo, A. (2021, abril 1). *Rural Broadband Design and Operational Challenges*. ERA. <https://doi.org/10.7939/r3-nxqs-x318>
- Rafiq, A., & Hayat, M. F. (2019). QoS-Based DWBA Algorithm for NG-EPON. *Electronics*, *8*(2), 230. <https://doi.org/10.3390/electronics8020230>
- Raj, A. A. B., Krishnan, P., Darusalam, U., Kaddoum, G., Ghassemlooy, Z., Abadi, M. M., Majumdar, A. K., & Ijaz, M. (2023). A Review–Unguided Optical Communications: Developments, Technology Evolution, and Challenges. *Electronics*, *12*(8), 1922. <https://doi.org/10.3390/electronics12081922>
- Rajalakshmi, S., & Shankar, T. (2020). Comparative Analysis of Different NG-PON2 Protection Types Based on FDM. *Journal of Communications*, *15*(1), 45–57. <https://doi.org/10.12720/jcm.15.1.45-57>
- Rajeev, & Kumar, C. (2024). Performance Investigation of 400 × 100 Gb/s Ultra-Dense WDM System Using Different Modulation Techniques with Varying Channel Spacing. *Wireless Personal Communications*, *134*(4), 2203–2233. <https://doi.org/10.1007/s11277-024-11008-3>
- Rodrigues, F., Rodrigues, C., Santos, J., Rodrigues, C., & Teixeira, A. (2023). Photonic Integrated Circuits for Passive Optical Networks: Outlook and Case Study of Integrated Quasi-Coherent Receiver. *Photonics*, *10*(2), 182. <https://doi.org/10.3390/photonics10020182>
- Rouwet, W. (2022). Wireless scheduling and Quality of Service optimization techniques. *En Open Radio Access Network (O-RAN) Systems Architecture and Design* (pp. 237–263). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91923-4.00004-5>

- Saber, M. G., Vall-Llosera, G., Patel, D., Samani, A., Li, R., Morsy-Osman, M., Chagnon, M., El-Fiky, E., Gutiérrez-Castrejón, R., Urban, P. J., Dortschy, B., Cavaliere, F., Lessard, S., & Plant, D. V. (2019). Silicon-based optical links using novel direct detection, coherent detection and dual polarization methods for new generation transport architectures. *Optics Communications*, 450, 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.05.027>
- Sarigiannidis, A. G., Iloridou, M., Nicopolitidis, P., Papadimitriou, G., Pavlidou, F.-N., Sarigiannidis, P. G., Louta, M. D., & Vitsas, V. (2015). Architectures and Bandwidth Allocation Schemes for Hybrid Wireless-Optical Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), 427–468. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2356640>
- Sarmiento, S., Mendinueta, J. M. D., Altabas, J. A., Spadaro, S., Shinada, S., Furukawa, H., Olmos, J. J. V., Lazaro, J. A., & Wada, N. (2021). High Capacity Converged Passive Optical Network and RoF-Based 5G+ Fronthaul Using 4-PAM and NOMA-CAP Signals. *Journal of Lightwave Technology*, 39(2), 372–380. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3028492>
- Shah, P. M. A., Qureshi, S. S., Butt, R. A., Mahdaliza Idrus, S., & Mirza, J. (2021). Design and analysis of 5G network architecture with orthogonal frequency division multiple access based passive optical network. *Optical Fiber Technology*, 67, 102678. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102678>
- Sharma, A., Kaur, S., Nair, N., & Bhatia, K. S. (2022). Investigation of WDM-MDM PON employing different modulation formats. *Optik*, 257, 168855. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168855>
- Shi, Y., Armghan, A., Ali, F., Aliqab, K., & Alsharari, M. (2023). Enriching Capacity and Transmission of Hybrid WDM-FSO Link for 5G Mobility. *Photonics*, 10(2), 121. <https://doi.org/10.3390/photonics10020121>

- Sirleto, L. (2020). Fiber Raman Amplifiers and Fiber Raman Lasers. *Micromachines*, *11*(12), 1044. <https://doi.org/10.3390/mi11121044>
- Sirleto, L., & Ferrara, M. A. (2020). Fiber Amplifiers and Fiber Lasers Based on Stimulated Raman Scattering: A Review. *Micromachines*, *11*(3), 247. <https://doi.org/10.3390/mi11030247>
- Sivakumar, P., Singh, M., Malhotra, J., & Dhasarathan, V. (2020). Performance analysis of 160 Gbit/s single-channel PDM-QPSK based inter-satellite optical wireless communication (IsOWC) system. *Wireless Networks*, *26*(5), 3579–3590. <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02287-2>
- Sizer, T., Samardzija, D., Viswanathan, H., Thai Le, S., Bidkar, S., Dom, P., Harstead, E., & Pfeiffer, T. (2022). Integrated Solutions for Deployment of 6G Mobile Networks. *Journal of Lightwave Technology*, *40*(2), 346–357. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3110436>
- Strecker, K., Ekin, S., & John O’Hara. (2021). M-ary quadrature amplitude modulation order optimization for terahertz wireless communications over dispersive channels. *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*, *2*(7), 21–30. <https://doi.org/10.52953/GQXZ9838>
- 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](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9938-5_6)
- Tang, H., Zhang, M., Liang, L., Zhang, T., Qin, L., Song, Y., Lei, Y., Jia, P., Wang, Y., Qiu, C., Zheng, C., Li, X., Chen, Y., Li, D., Ning, Y., & Wang, L. (2024). Active Region Mode Control for High-Power, Low-Linewidth Broadened Semiconductor Optical Amplifiers for Light Detection and Ranging. *Sensors*, *24*(18), 6083. <https://doi.org/10.3390/s24186083>

- Ullah, R., Ullah, S., Imtiaz, W. A., Alatawi, A. A., Alzaid, Z., & Alwageed, H. S. (2024). Optimization and analysis of Spectral/Spatial optical code division multiple access passive optical network. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 175, 155084. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.155084>
- Ullah, R., Ullah, S., Imtiaz, W. A., Khan, J., Shah, P. M. A., Kamran, M., Ren, J., & Chen, S. (2023). High-Capacity Free Space Optics-Based Passive Optical Network for 5G Front-Haul Deployment. *Photonics*, 10(10), 1073. <https://doi.org/10.3390/photonics10101073>
- Ulloa, D., Arevalo, G., & Gaudino, R. (2020). Optimal Deployment of Next-Generation PON for High and Ultra-High Bandwidth Demand Scenarios in Large Urban Areas. *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICTON51198.2020.9203528>
- Uzunidis, D., Logothetis, M., Stavdas, A., Hillerkuss, D., & Tomkos, I. (2022). Fifty Years of Fixed Optical Networks Evolution: A Survey of Architectural and Technological Developments in a Layered Approach. *Telecom*, 3(4), 619–674. <https://doi.org/10.3390/telecom3040035>
- Van der Linden, R. (2018). *Adaptive modulation techniques for passive optical networks* [PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven]. [https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/93929754/20180417\\_van\\_der\\_Linden.pdf](https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/93929754/20180417_van_der_Linden.pdf)
- Viavi. (2024). *What is FTTx?* [Network Design & Testing]. <https://www.viavisolutions.com/en-us/what-fttx>
- Vinita, K. (2018). A Comprehensive Review of Recent Advancement in Optical Communication Networks. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 6(9), 617–626. <https://doi.org/10.26438/ijcse/v6i9.617626>

- Wei, J., Lam, C., Zhou, J., Aldaya, I., Giacomidis, E., Richter, A., Cheng, Q., Penty, R., & White, I. (2021). Low Complexity DSP for High Speed Optical Access Networking. *Applied Sciences*, *11*(8), 3406. <https://doi.org/10.3390/app11083406>
- Welch, D., Napoli, A., Back, J., Buggaveeti, S., Castro, C., Chase, A., Chen, X., Dominic, V., Duthel, T., Eriksson, T. A., Erkilinc, S., Evans, P., Fludger, C. R. S., Foo, B., Frost, T., Gavrilovic, P., Hand, S. J., Kakkar, A., Kumpera, A., ... Ziari, M. (2023). Digital Subcarrier Multiplexing: Enabling Software-Configurable Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology*, *41*(4), 1175–1191. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3211466>
- Wu, H., Lu, M., Li, Y., & Liu, M. (2019). Implementation of High Order QAM Modulation on SDR. *Journal of Physics: Conference Series*, *1302*(2), 022095. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1302/2/022095>
- Xie, R., Wu, D., Zhang, Q., Yao, H., Wang, X., Xin, X., Tian, F., Tian, Q., Wang, F., Wang, Y., Yang, L., & Jiang, J. (2023). A Novel 64 QAM-OFDM Optical Access System Based on Bit Reconstruction. *Photonics*, *10*(8), 879. <https://doi.org/10.3390/photonics10080879>
- Yazbeck, H. A., & Belyaev, V. V. (2019). Comparison of typical access networks with AMOOFDM based access networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *675*(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/675/1/012033>
- Yeh, C.-H., Lin, W.-P., Jiang, S.-Y., Hsieh, S.-E., Hsu, C.-H., & Chow, C.-W. (2022). Integrated Fiber-FSO WDM Access System with Fiber Fault Protection. *Electronics*, *11*(13), 2101. <https://doi.org/10.3390/electronics11132101>
- Yeh, C.-H., Lin, W.-P., Lai, Y.-T., Chen, L.-Y., Lin, C.-Y., Cheng, K.-M., Yang, T.-Y., & Chow, C.-W. (2023). Unidirectional Ring-Based WDM Fiber Network for Both Downlink and Uplink Signal Access. *Electronics*, *12*(20), 4264. <https://doi.org/10.3390/electronics12204264>

- Yousif, R. Z., Jalal, S. K., & Al-Mukhtar, F. H. (2024). Enhanced passive optical network system-based VCSEL and PSK electrical modulator for 5th generation. *Wireless Networks*, 30(4), 2203–2217. <https://doi.org/10.1007/s11276-024-03652-1>
- Zamora R., X. (2022). *High resolution DFB laser tuning for optical spectrum analysis in access networks* [Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/375323>
- Zhou, Q., Zhao, T., Chen, X., Zhong, Y., & Luo, H. (2022). A Fault-Tolerant Transmission Scheme in SDN-Based Industrial IoT (IIoT) over Fiber-Wireless Networks. *Entropy*, 24(2), 157. <https://doi.org/10.3390/e24020157>
- Zhu, L., Xu, T., & Darwazeh, I. (2019). Fast-OFDM Transmission with Duobinary 3-PSK Modulation: Invited Paper. *2019 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/WINCOM47513.2019.8942502>
- Żukowski, C., Mukhopadhyay, A., Payne, D. B., & Ruffini, M. (2021). Cost analysis of rural roll-out using a long-reach passive optical network: Trading off the upfront cost under uncertainty of the user take-up rate. *Journal of Optical Communications and Networking*, 13(5), 69. <https://doi.org/10.1364/JOCN.415806>