



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

**TÍTULO**

Evaluación y comparación del rendimiento de técnicas de modulación digital (ASK, FSK y PSK) en redes GPON-FTTH en términos de tasa de error de bit (BER) y eficiencia espectral

**AUTOR**

**Molina Montes, Fernando David**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

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

**TUTOR**

**Amaya Fariño, Luis Miguel**

**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. Luis Amaya Fariño, Mgtr.  
TUTOR**

---

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

---

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

---

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



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

**CERTIFICACIÓN**

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

**TUTOR**

---

**Ing. Luis Miguel Amaya Fariño, Mgtr.**

**Santa Elena, 24 de julio de 2025**



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

**Yo MOLINA MONTES, FERNANDO DAVID**

**DECLARO QUE:**

El trabajo de Titulación, Evaluación y comparación del rendimiento de técnicas de modulación digital (ASK, FSK y PSK) en redes GPON-FTTH en términos de tasa de error de bit (BER) y eficiencia espectral 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, 24 de julio de 2025

**EL AUTOR**

---

**Fernando David Molina Montes**



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

**CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO**

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado Evaluación y comparación del rendimiento de técnicas de modulación digital (ASK, FSK y PSK) en redes GPON-FTTH en términos de tasa de error de bit (BER) y eficiencia espectral, presentado por el estudiante, Molina Montes Fernando David, 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.

**CERTIFICADO DE ANÁLISIS**  
magister

**Titulación MT Fernando  
Molina 2\_1**

**6%**  
Textos sospechosos

- 6% Similitudes  
0% similitudes entre comillas  
< 1% entre las fuentes mencionadas
- 4% Idiomas no reconocidos (ignorado)
- 14% Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)

Nombre del documento: Titulación MT Fernando Molina 2\_1.docx  
ID del documento: bd46d09fc7ed7d0133ca53abac5871b2d4904692  
Tamaño del documento original: 3,65 MB

Depositante: AMAYA FARIÑO LUIS MIGUEL  
Fecha de depósito: 14/7/2025  
Tipo de carga: interface  
fecha de fin de análisis: 14/7/2025

Número de palabras: 13.863  
Número de caracteres: 88.390

**TUTOR**

---

**Ing. Luis Miguel Amaya Fariño, Mgtr.**



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

**AUTORIZACIÓN**

**Yo, MOLINA MONTES FERNANDO DAVID**

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución. Cedo los derechos en línea patrimoniales de proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, 24 de julio de 2025

**EL AUTOR**

---

**Fernando David Molina Montes**

## **AGRADECIMIENTO**

Este proyecto es el resultado de muchos años de aprendizaje y crecimiento personal. Quiero dedicar este logro a mis padres, quienes me enseñaron el valor del trabajo duro y la perseverancia. A mi hermano mayor, mi más grande admirador, gracias por ser mi guía y mi confidente. Su apoyo significa el mundo para mí.

*Molina Montes, Fernando David*

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres, quienes siempre creyeron en mí y me motivaron a alcanzar mis sueños. A mi hermano, mi más grande confidente, gracias por tus consejos y apoyo incondicional.

*Molina Montes, Fernando David*

## ÍNDICE GENERAL

TÍTULO .....	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	IV
DECLARO QUE: .....	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO .....	V
AUTORIZACIÓN.....	VI
AGRADECIMIENTO .....	VII
DEDICATORIA .....	VIII
ÍNDICE GENERAL .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
RESUMEN .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....</b>	<b>7</b>
1.1.    Introducción a los fundamentos de Redes de Acceso Óptico.....	7
1.2.    Clasificación geográfica de las redes ópticas .....	7
1.3.    Infraestructura de las redes ópticas.....	8
1.3.1.    Red óptica de acceso metropolitano .....	10
1.3.2.    Redes Core.....	11
1.3.3.    Redes de acceso .....	11
1.4.    Las tecnologías de red PON.....	12
1.4.1.    Tecnología activa (Punto a Punto - P2P).....	13
1.4.2.    Tecnología PON (Punto a Multipunto - P2MP) .....	14

1.4.3. PON estándar de la UIT .....	15
1.5. Sistema óptico G-PON .....	18
1.6. Modulación digital .....	20
1.6.1. Fundamentos de la modulación vectorial .....	23
1.6.2. Modulación digital ASK .....	23
1.6.3. Modulación BPSK o PSK de 2 estados .....	24
1.6.4. Modulación FSK .....	25
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>27</b>
2.1. Contexto de la investigación .....	27
2.2. Diseño y alcance de la investigación .....	28
2.3. Tipo y métodos de investigación .....	28
2.4. Población y muestra .....	29
2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	29
2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información .....	30
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>31</b>
3.1. Descripción de la propuesta del entorno de simulación propuesto .....	31
3.2. Diseño del sistema GPON para redes FTTH. ....	32
3.3. Discusión de los resultados obtenidos .....	35
3.4. Eficiencia espectral de las modulaciones ASK, PSK y FSK. ....	41
3.5. Análisis de las métricas de rendimiento de los escenarios de simulación utilizando modulaciones ASK, PSK y FSK .....	43
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>52</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>54</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1: Comparativa de los estándares PON elaborados por FSAN/ITU-T .....	17
Tabla 1. 2: Comparativa de las características entre B-PON, E-PON y G-PON.....	19
Tabla 1. 3: Expresiones de la señal modulada $st$ para los formatos ASK, FSK y PSK.	22
Tabla 3. 1: Resumen de métricas en enlaces DS y US del escenario 1. ....	36
Tabla 3. 2: Resumen de métricas en enlaces DS y US del escenario 2. ....	38
Tabla 3. 3: Resumen de métricas en enlaces DS y US del escenario 3. ....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Clasificación geográficas de redes Core, Metro y Access. ....	8
Figura 1. 2: Esquema de la arquitectura de la red óptica.....	9
Figura 1. 3: Nomenclatura de las redes de acceso óptico. ....	9
Figura 1. 4: Representación esquemática de una red óptica de acceso metro. ....	10
Figura 1. 5: Representación esquemática de una red de acceso óptico o última milla. ..	11
Figura 1. 6: Arquitectura de una PON Ethernet (Ethernet PON, EPON).....	12
Figura 1. 7: Arquitectura de la tecnología P2P.....	14
Figura 1. 8: Arquitectura de la tecnología P2PM. ....	15
Figura 1. 9: Evolución de los estándares PON según ITU-T e IEEE: velocidades por longitud de onda y proyecciones hacia 2030. ....	16
Figura 1. 10: Línea de tiempo de los estándares PON desarrollados por ITU-T y IEEE (2000–2020).....	16
Figura 1. 11: Representación de la arquitectura GPON usando la multiplexación por división de longitud de onda (WDM). ....	18
Figura 1. 12: Representación de los esquemas de modulación digital ASK, FSK y PSK. ....	21
Figura 1. 13: Gráfica de las componentes en fase y cuadratura de la señal modulada. ..	23
Figura 1. 14: Diagrama de constelación de la modulación ASK.....	24
Figura 1. 15: Diagrama de bloques del modulador BPSK.....	24
Figura 1. 16: Diagrama de bloques del demodulador BPSK.....	25
Figura 1. 17: Diseño de simulación del transreceptor BPSK utilizando OWC en Optisystem. ....	25
Figura 1. 18: Principio de la arquitectura WDM-PON modulada FSK propuesta con servicios de multidifusión OFDM. ....	26

Figura 3. 1: Diagrama de bloques del sistema GPON-FTTH.....	32
Figura 3. 2: Esquemático de simulación del sistema GPON-FTTH.....	33
Figura 3. 3: Espectro de la señal de datos regenerada a una frecuencia de 5 GHz del escenario 1. ....	35
Figura 3. 4: Diagrama de ojo y BER para enlace DS en la ONU-1.....	36
Figura 3. 5: Diagrama de ojo y BER para enlace US en la ONU-1.....	37
Figura 3. 6: Espectro de la señal de datos regenerada a una frecuencia de 5 GHz del escenario 2. ....	37
Figura 3. 7: Diagrama de ojo y BER para los enlaces DS y US en la ONU-1. ....	38
Figura 3. 8: Diagrama de ojo y BER para enlace US en la ONU-1.....	39
Figura 3. 9: Espectro de la señal de datos regenerada a una frecuencia de 5 GHz del escenario 3. ....	40
Figura 3. 10: Diagrama de ojo y BER para los enlaces DS y US en la ONU-1. ....	40
Figura 3. 11: Diagrama de ojo y BER para enlace US en la ONU-1.....	41
Figura 3. 12: BER vs. Longitud SMF para la modulación ASK. ....	44
Figura 3. 13: Potencia del Rx para la modulación ASK.....	45
Figura 3. 14: BER vs. Longitud SMF para la modulación BPSK. ....	46
Figura 3. 15: Potencia del Rx para la modulación BPSK.....	47
Figura 3. 16: BER vs. Longitud SMF para la modulación FSK. ....	48
Figura 3. 17: Potencia del Rx para la modulación FSK.....	49
Figura 3. 18: Comparativa de la BER vs. Longitud de fibra para las modulaciones ASK, BPSK y FSK. ....	50
Figura 3. 19: Comparativa de la Potencia óptica vs. Longitud de fibra para las modulaciones ASK, BPSK y FSK. ....	50

## **RESUMEN**

Este documento se presenta el tema de titulación “Evaluación y comparación del rendimiento de técnicas de modulación digital (ASK, FSK y PSK) en redes GPON-FTTH en términos de tasa de error de bit (BER) y eficiencia espectral” en la que se presenta una breve introducción en el contexto de redes de acceso óptico, así como el objetivo general, objetivos específicos y definición del problema a investigar. En el capítulo 1 se presenta el marco teórico de las redes de acceso óptico y de los formatos de modulación ASK, PSK y FSK. En el capítulo 2 se presenta el marco metodológico utilizado en la presente propuesta de investigación. En el Capítulo 3 se presenta el modelo de simulación en OptiSystem y los datos fueron procesados en Python para su posterior discusión de los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

**Palabras claves:** ASK, PSK, FSK, GPON, FTTH

## **ABSTRACT**

This document presents the title theme “Evaluation and comparison of the performance of digital modulation techniques (ASK, FSK and PSK) in GPON-FTTH networks in terms of bit error rate (BER) and spectral efficiency” in which a brief introduction in the context of optical access networks is presented, as well as the general objective, specific objectives and definition of the problem to be investigated. Chapter 1 presents the theoretical framework of optical access networks and the ASK, PSK and FSK modulation formats. Chapter 2 presents the methodological framework used in this research proposal. Chapter 3 presents the simulation model in OptiSystem and the data were processed in Python for further discussion of the results obtained. Finally, conclusions and recommendations are presented.

**Keywords:** ASK, PSK, FSK, GPON, FTTH

## INTRODUCCIÓN

Las redes ópticas pasivas (PON) permiten prestar servicios de banda ancha (Madrazo L., 2018), como voz sobre protocolo de internet (VoIP) (Merayo et al., 2021) y vídeo a la carta (VoD). Hay dos PON principales de clase gigabit, la ethernet PON (E-PON (IEEE802.3ah)) y la gigabit PON (G-PON (ITU-T G.984)), normalizadas por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y el Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T), respectivamente. (Ab-Rahman et al., 2023)

De acuerdo con Tene M., (2021) la rápida expansión de la conectividad a Internet de alta velocidad ha llevado a la adopción generalizada de la tecnología de red óptica pasiva Gigabit (GPON) en redes de fibra hasta el hogar (FTTH). Las redes PON se caracterizan por su capacidad para proporcionar conexiones de banda ancha de alta velocidad a múltiples usuarios finales (Chico A., 2021) utilizando una única fibra óptica y componentes pasivos, lo que las hace altamente eficientes en términos de costo y recursos. Una de las tecnologías PON más utilizadas es la red GPON, que ofrece velocidades de hasta 2.5 Gbps en el enlace descendente y 1.25 Gbps en el enlace ascendente. (Ab-Rahman et al., 2022; Heredia S., 2016; Minelli, 2022; Sugumaran et al., 2021)

Ahmad Niazi, (2019) sostiene que las técnicas de modulación recomendadas son modulación binaria por desplazamiento de fase (BPSK), la modulación gaussiana por desplazamiento mínimo (GMSK), la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK), la modulación de amplitud en cuadratura (8-QAM), la 16-QAM, la modulación On-Off (OOK) y la radiodifusión digital (DRB).

En este contexto, la selección de técnicas de modulación digital juega un papel crucial para garantizar una transmisión de datos eficiente con errores mínimos y una utilización espectral óptima. Este trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar y comparar el rendimiento de tres técnicas clave de modulación digital: modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) y modulación por desplazamiento de fase (PSK) - en redes GPON-FTTH en términos de tasa de error de bits. (BER) y eficiencia espectral.

Al explorar las diferencias en las métricas de rendimiento de estos esquemas de modulación, este estudio busca proporcionar información sobre su efectividad para soportar la transmisión de datos de alta velocidad a través de redes de fibra óptica. Centrándose en comprender cómo ASK, FSK y PSK impactan la BER y la eficiencia espectral, esta investigación aporta información valiosa que puede ayudar a los diseñadores y operadores de redes a optimizar el rendimiento de los sistemas GPON-FTTH.

### **Planteamiento de la investigación**

Se ha planteado la necesidad de estudiar en detalle la evaluación y comparación de los métodos de modulación digital (ASK, FSK y PSK) utilizados en las redes GPON-FTTH, con especial atención a la tasa de error binario (BER) y a la eficiencia espectral. Los resultados esperados de las redes GPON-FTTH están condicionados por el tipo de técnica de modulación digital elegida. Los sistemas de modulación digital ASK, FSK y PSK presentan características y prestaciones diferentes en lo que respecta a la tasa de error binario (BER) y la eficiencia espectral. Pero no hay un análisis de los efectos de estas técnicas en el rendimiento de las redes GPON-FTTH.

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

Las redes ópticas pasivas de fibra hasta el hogar (GPON-FTTH) se han convertido en una tecnología clave para responder a la creciente demanda de servicios de alta velocidad en las telecomunicaciones. El rendimiento de estas redes depende en gran medida de la técnica de modulación digital que se utilice, lo cual influye en parámetros cruciales como la tasa de error binario (BER) y la eficiencia espectral.

Entre las técnicas de modulación digital más utilizadas en estos sistemas se encuentran ASK, FSK y PSK, cada una con sus propias ventajas y limitaciones en cuanto a complejidad, resistencia al ruido y uso del espectro. No obstante, en el ámbito específico de las redes GPON-FTTH, no está claro cuál de estas técnicas proporciona un mejor rendimiento general. La tasa de error binario (BER) es esencial para determinar la fiabilidad de la transmisión de datos, mientras que la eficiencia espectral refleja cómo se aprovecha el espectro disponible. Ambas métricas son cruciales para el diseño y operación efectiva de redes ópticas.

Actualmente, existe una carencia de estudios que analicen de manera comparativa y sistemática el impacto de las técnicas de modulación ASK, FSK y PSK en redes GPON-FTTH, especialmente en términos de BER y eficiencia espectral. Esta falta de análisis detallado limita la capacidad de los ingenieros para seleccionar la técnica de modulación más adecuada que optimice el rendimiento de estas redes.

En consecuencia, se plantea la necesidad de investigar y comparar las técnicas de modulación ASK, FSK y PSK en redes GPON-FTTH, con el objetivo de identificar cuál de ellas ofrece el mejor equilibrio entre la tasa de error binario (BER) y la eficiencia espectral. El estudio se llevará a cabo utilizando simulaciones en OptiSystem y la data es procesada en Python, lo que permitirá realizar un análisis preciso y detallado en un entorno controlado. Este trabajo no solo ayudará a mejorar el diseño de redes GPON-FTTH, sino que también sentará las bases para futuras investigaciones en el campo de las comunicaciones ópticas.

### **Objetivo General:**

Evaluar y comparar el rendimiento de las técnicas de modulación digital ASK, FSK y PSK en redes GPON-FTTH en términos de BER y eficiencia espectral utilizando la herramienta de simulación OptiSystem y Python.

### **Objetivos Específicos:**

1. Diseñar el modelo de simulación de una red GPON-FTTH mediante OptiSystem utilizando las técnicas de modulación digital ASK, FSK y PSK, que permita la creación de un ambiente de simulación controlado y escalable para la evaluación de las prestaciones de cada una de las técnicas de modulación.
2. Realizar la simulación y el análisis de las prestaciones de las técnicas de modulación digital (ASK, FSK y PSK) obtenidas en función de la tasa de error de bits (BER) y la eficiencia espectral en la red GPON-FTTH, con el propósito de la obtención de datos cuantitativos sobre las prestaciones de cada una de las técnicas en condiciones de red específicas.
3. Evaluar comparativamente los resultados obtenidos de la simulación mediante análisis de las técnicas de modulación digital ASK, FSK y PSK utilizando métricas de rendimiento y eficiencia espectral a través del software Python, con

la finalidad de determinar cuál de las técnicas es más adecuada para su implementación en redes GPON-FTTH en función de su capacidad para minimizar la BER y maximizar la eficiencia espectral.

### **Planteamiento de la idea a defender**

El planteamiento a defender está basado en la contribución de las técnicas de modulación digital, concretamente ASK, FSK y PSK, al rendimiento de las redes GPON-FTTH. En este sentido, se propone que la elección de una técnica de modulación digital sobre otra tiene un impacto significativo en la eficiencia y calidad de la transmisión de datos en esta red de fibra óptica. Mediante la evaluación y comparación del rendimiento de estas técnicas en términos de tasa de error binario (BER) y eficiencia espectral, se pretende apoyar la premisa de que la adecuada elección de la modulación digital es capaz de optimizar la calidad y capacidad de las redes GPON-FTTH con el fin de satisfacer los requisitos de conectividad de alta velocidad y fiabilidad en los modernos entornos de telecomunicaciones.

### **Alcance del estudio**

El presente estudio se enfoca en el análisis comparativo del rendimiento de diferentes esquemas de modulación digital (ASK, BPSK y FSK) aplicados a redes ópticas pasivas de alta velocidad basadas en tecnología GPON-FTTH. Se ha delimitado a un modelo de simulación donde se analizan dos parámetros fundamentales para la transmisión óptica: la tasa de error de bit (BER) y la potencia de la señal óptica en función de la longitud de la fibra. Este enfoque permite evaluar, de forma controlada y reproducible, el impacto de la modulación sobre la calidad del enlace, lo cual es relevante en escenarios donde la extensión de la red representa un desafío técnico, como en zonas rurales o periféricas.

El estudio toma como referencia longitudes de fibra realistas, típicas de escenarios de acceso de última milla, y realiza un modelado por software que simula condiciones operativas comunes. En este sentido, el alcance no se limita a un ejercicio académico, sino que ofrece una guía técnica que puede servir de base para decisiones de diseño e implementación de redes GPON con mayores niveles de eficiencia y confiabilidad.

Además, se busca aportar criterios objetivos para que ingenieros y responsables de telecomunicaciones puedan seleccionar el tipo de modulación más adecuado, considerando tanto la distancia del enlace como la sensibilidad de los receptores ópticos. Esto es relevante ante el crecimiento de la demanda de conectividad estable, especialmente en países en desarrollo. La selección de modulaciones simples y robustas permite mantener un equilibrio entre complejidad, costo y desempeño, facilitando la implementación de soluciones escalables.

Este estudio, por tanto, no se limita a una evaluación técnica puntual, sino que ofrece un marco de análisis replicable que puede ser extendido a futuros trabajos con modulaciones más complejas como QAM, DPSK o técnicas adaptativas de modulación dinámica, en línea con la evolución hacia redes ópticas de próxima generación (NG-PON2).

### **Limitaciones del estudio**

A pesar de su relevancia técnica, el presente estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas para interpretar adecuadamente sus resultados y alcance. En primer lugar, la investigación se basa exclusivamente en simulaciones por software, sin validación experimental mediante pruebas de campo o bancos de prueba físicos. Esto implica que factores como, la dispersión cromática, la atenuación por temperatura ambiente, el empalme imperfecto de fibras o la no linealidad de dispositivos ópticos no se encuentran modelados con total precisión, aunque sí se utilizan valores de referencia estandarizados.

En segundo lugar, la selección de las modulaciones ASK, BPSK y FSK, si bien es útil como punto de partida, excluye otros formatos de mayor eficiencia espectral y tolerancia a errores que han sido ampliamente estudiados en los últimos años, como QAM, QPSK o técnicas de modulación coherente. Según Chen et al., (2024), las modulaciones adaptativas, capaces de conmutar dinámicamente entre formatos como BPSK y QPSK según las condiciones del canal, ofrecen ventajas sustanciales en enlaces de larga distancia o con múltiples fuentes de ruido óptico.

Asimismo, no se incluye el uso de técnicas complementarias como la codificación con corrección de errores (FEC), balance de carga óptica o control dinámico de ganancia (DGA), las cuales podrían mejorar aún más el rendimiento del sistema. La simulación

tampoco incorpora variaciones topológicas como redes en árbol, anillo o mallas, limitándose a una arquitectura punto-a-multipunto típico de GPON. Esto reduce la generalización de los resultados a otras arquitecturas ópticas.

Por último, no se aborda el impacto del tráfico real sobre el rendimiento del sistema, ni se consideran aspectos económicos, regulatorios o de mantenimiento. Estas limitaciones abren oportunidades para futuras investigaciones que complementen el enfoque técnico con validaciones prácticas y un análisis más integral del ecosistema GPON.

### **Relevancia científica**

Desde el punto de vista científico, esta investigación se inserta en un área de gran vigencia: la optimización del rendimiento en redes ópticas de acceso, particularmente en el escenario de la evolución de la tecnología FTTH. El aporte de este estudio radica en ofrecer una evaluación comparativa de formatos de modulación básicos (ASK, BPSK y FSK) en función de métricas críticas como BER y la degradación de potencia. A pesar de su simplicidad, estas modulaciones siguen siendo de interés, especialmente en escenarios de baja complejidad donde se prioriza la estabilidad sobre la velocidad, y donde el uso de técnicas avanzadas no es siempre factible.

Numerosos trabajos recientes (Ab-Rahman et al., 2022; Feng et al., 2023) destacan la importancia de analizar no solo nuevas arquitecturas de red, sino también el impacto de las tecnologías actuales en contextos reales. Así, esta investigación contribuye a cerrar una brecha técnica, al comparar de forma sistemática modulaciones aplicables a GPON, en un entorno simulado que se aproxima a condiciones prácticas de operación.

En el plano social, el trabajo adquiere relevancia al demostrar cómo la selección de la modulación adecuada puede incidir directamente en la viabilidad de implementar redes ópticas en zonas rurales, periurbanas o de difícil acceso. La reducción de errores de transmisión y el mantenimiento de niveles de señal adecuados permiten ofrecer un servicio más confiable y estable, lo cual repercute positivamente en el acceso a educación, salud, y comercio electrónico.

# CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

## 1.1. Introducción a los fundamentos de Redes de Acceso Óptico

Las PONs son redes de acceso óptico que se extienden desde las centrales de un operador de telecomunicaciones hasta las casas de los clientes, apartamentos y oficinas (Cabezas-Chica & Cabrera-Mejía, 2020). En general, las redes PON están caracterizadas por la ausencia de componentes activos, exceptuando los puntos en los que se encuentran la OLT (terminación de línea óptica) y la ONU/ONT (unidad de red óptica/terminación de red óptica) (Bharati et al., 2020). Los principales componentes pasivos son la fibra y los divisores ópticos (splitters). Los splitters se encargan de distribuir la señal óptica sin requerir energía eléctrica y son capaces de garantizar su funcionamiento durante décadas y sin necesidad de mantenimiento continuo.

La transmisión de datos se realiza en dos sentidos: ascendente ("upstream", de los usuarios finales a la OLT) y descendente ("downstream", de la OLT a los usuarios finales). Sin embargo, cuando se requiere un enlace de larga distancia entre la OLT y la ONU, se puede añadir un extensor de alcance (Reach Extender, RE), que contiene componentes activos (Kumar et al., 2024; Rashed et al., 2019). Por regla general, las PON son fundamentales para la conectividad de alta velocidad de hogares, empresas y zonas urbanas, y se basan en topologías de red en árbol que utilizan divisores ópticos pasivos.

A lo largo de este capítulo se describen las redes ópticas, en especial las redes ópticas pasivas, sus componentes y su esquema de funcionamiento. También se describen los dos tipos principales de redes FTTH: punto a punto y punto a multipunto pasivas, así como los distintos tipos de redes PON. Además, se describen los distintos tipos de redes ópticas pasivas (GPON y EPON).

## 1.2. Clasificación geográfica de las redes ópticas

Para la implantación de la red óptica destinada al transporte de datos, voz y vídeo, hay que distinguir tres categorías de redes, como se muestra en la figura 1.1 (Casasco et al., 2024). La red metropolitana es la red que abarca toda una ciudad. La red metropolitana es una red que abarca toda la ciudad. La red central consiste en una serie de conmutadores y enlaces entre ellos. Los usuarios se conectan a la red central a través de redes de acceso.

Por consiguiente, la red de acceso es el segmento final entre el operador de acceso y el abonado. (Amiri et al., 2025)

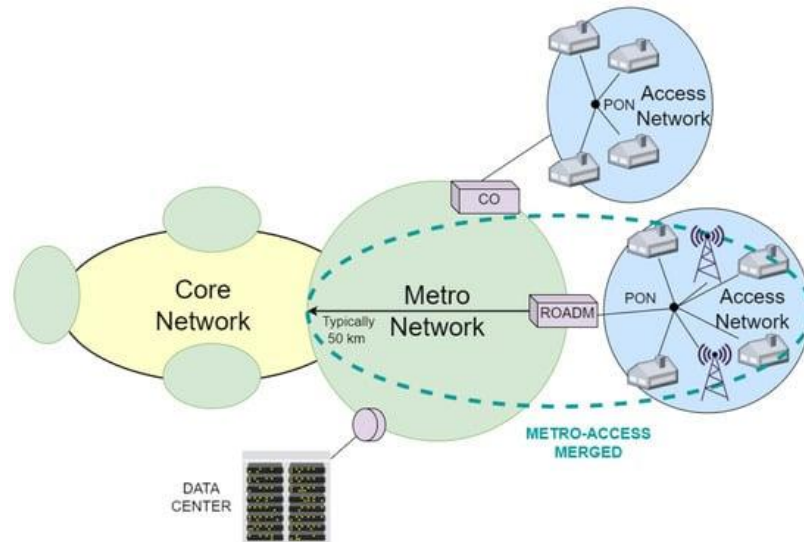


Figura 1. 1: Clasificación geográfica de redes Core, Metro y Access.  
Fuente: (Casasco et al., 2024)

La tecnología de fibra óptica tiene muchas ventajas potenciales para la red de acceso óptico. Así, por ejemplo, teóricamente, si se utiliza un par de cobre, se puede alcanzar una velocidad máxima de datos de 200 Mbps para un alcance de 200 m, y de 100 Mbps hasta 450 m, en tanto que, con la fibra, a un trayecto de 60 km, la transmisión de datos puede alcanzar una velocidad de 10 Gbps de forma sencilla y sin dificultades. Otra desventaja del par de cobre es que esta tecnología no permite el tráfico simétrico. (Eid et al., 2025)

### 1.3. Infraestructura de las redes ópticas

Según su tamaño y velocidad de transferencia, existen tres tipos de redes. En efecto, todas las redes están formadas por un conjunto de redes locales (Elamassie & Uysal, 2023), tal y como se observa en la figura 1.2:

- La red core/Long-Haul (Rashed & Tabbour, 2019): con dimensiones de varios cientos de kilómetros.
- La red metro: cubre distancias de unos cien kilómetros (Casasco et al., 2024).
- La red de acceso: también conocida como red de distribución o red de acceso, con una cobertura del orden de algunos kilómetros a algunas decenas de kilómetros.

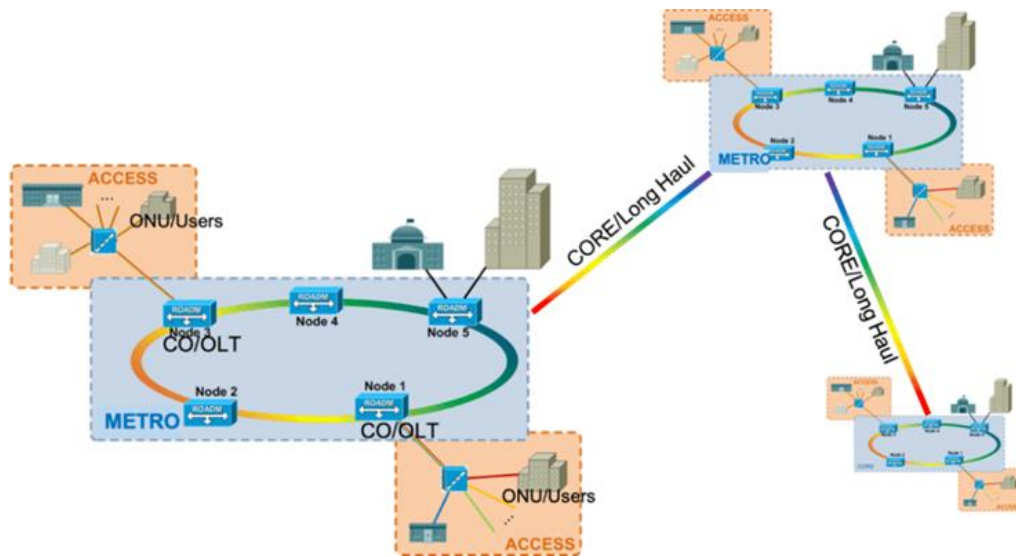


Figura 1. 2: Esquema de la arquitectura de la red óptica  
Fuente: (Martin et al., 2021)

En la arquitectura de la red de acceso óptico (ver Figura 1.3) existen tres niveles más relevante: la oficina central (CO), el punto de acceso (AP) o de distribución y el equipo de abonado (CE).

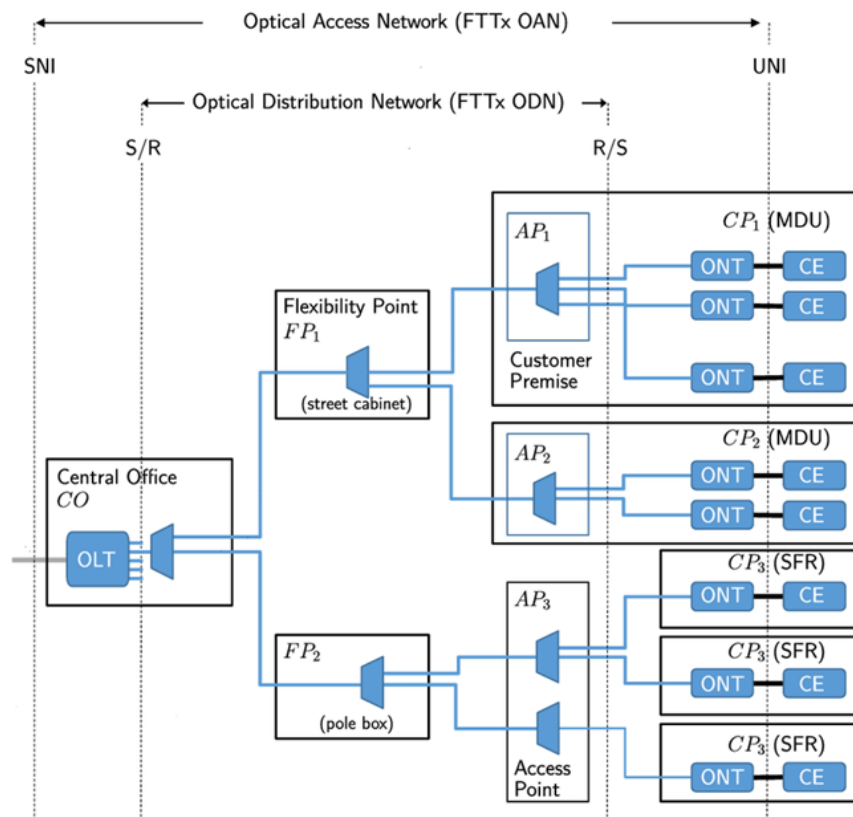


Figura 1. 3: Nomenclatura de las redes de acceso óptico.  
Fuente: (Mycek & Żotkiewicz, 2019)

Por lo general, en las redes de acceso óptico, la CO contiene la OLT, que es el equipo de Tx-Rx del operador. En el caso de los sistemas ópticos compartidos, la CO puede incluir un acoplador en las PON actuales o un elemento de multiplexación óptica en las redes WDM (Mohsen et al., 2022), tal como se observa en la Figura 1.3. La parte "cliente" se suele denominar ONU, si es compartida entre varios clientes y seguida de una transmisión secundaria (caso de FTTCab/Curb/Building) u ONT si se trata de un único cliente FTTH, tal como se muestra en la Figura 1.3. Es la parte que recibe las señales de bajada y transmite las de subida. La parte comprendida entre el LTO y la ONU se denomina Red de Distribución Óptica (ODN). En este caso sería la infraestructura pasiva de la red. Por su parte, los componentes activos se encuentran en ambos extremos, en la ONU y en la OLT

### 1.3.1. Red óptica de acceso metropolitano

La red óptica de acceso metropolitana (Optical Metro Access Network, OMAN) es una red que abarca toda la ciudad también conocida por red de área metropolitana (Metropolitan Area Network, MAN) (Ullah et al., 2024). En general son sistemas de comunicación que conectan dispositivos dentro de un área geográfica específica, como una ciudad o un municipio, con una cobertura superior a 4 kilómetros. (ver Figura 1.4)

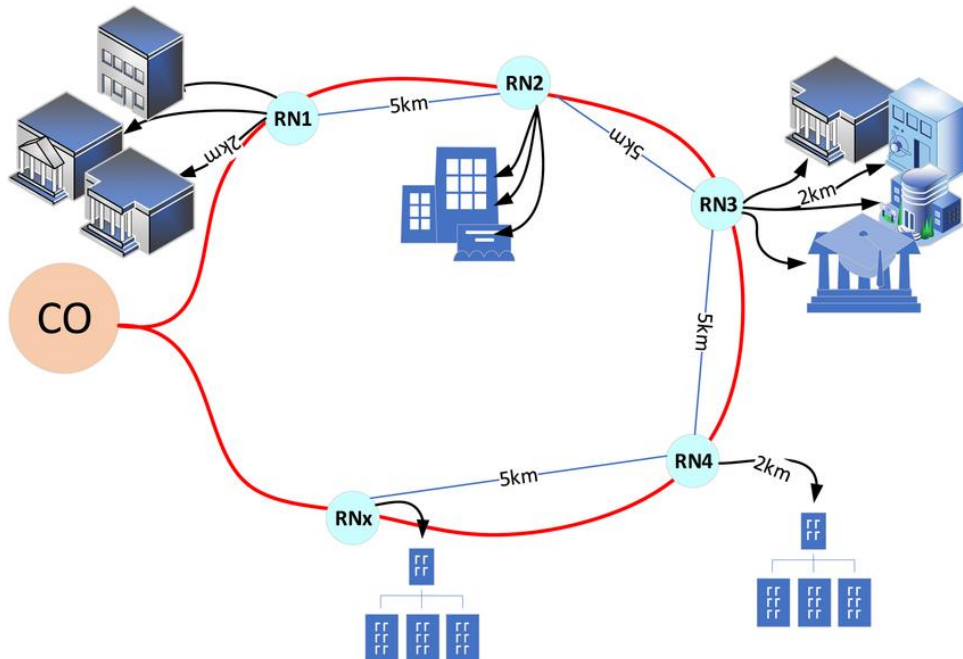


Figura 1. 4: Representación esquemática de una red óptica de acceso metro.

Fuente: (Ullah et al., 2024)

### 1.3.2. Redes Core

Las redes centrales o WAN son generalmente redes con una estructura de malla o anillo en las que las velocidades de transmisión de datos superan los 100 Gbps. Las distancias de interconexión varían de un centenar de kilómetros a más de mil kilómetros, cubriendo zonas geográficas a escala continental. (Fayad et al., 2022)

### 1.3.3. Redes de acceso

También conocidas como redes de distribución o de acceso. Se trata de la última parte de la red de telecomunicaciones, que une al abonado y la última central. Es la parte de la red que une al proveedor de servicios (CO) con el abonado, tal como se muestra en la Figura 1.5 (He et al., 2020). Esta es la interfaz entre el abonado y la red metropolitana, la cual recoge el flujo total de datos procedentes de los abonados y los transfiere a la red metropolitana a través de las CO (Alatwi & Zaki Rashed, 2021). Esto se denomina "enlace ascendente". En el "enlace descendente", las redes de acceso asignan subportadoras para prestar servicios de voz, datos, vídeo y otros a los abonados individuales. Dada la limitación geográfica de las redes de acceso, el desafío actual es emplear tecnologías, arquitecturas e infraestructuras de acceso nuevas para ofrecer conexiones de alta velocidad a los abonados con un despliegue rentable y de bajo coste (Haro García, 2020).

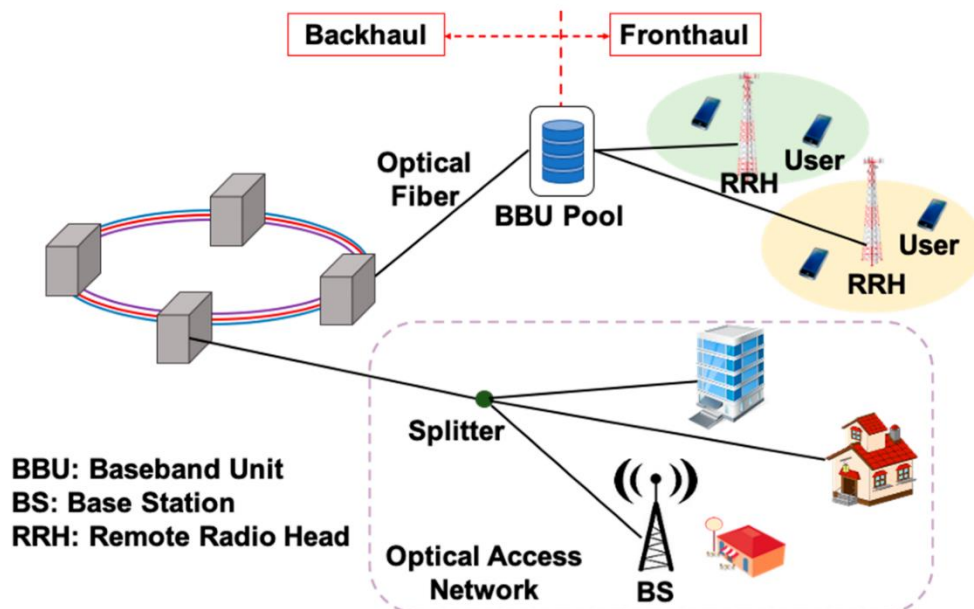


Figura 1. 5: Representación esquemática de una red de acceso óptico o última milla.

Fuente: (He et al., 2020)

Debido a la reducida longitud del enlace de la red de acceso de fibra (normalmente entre 10 y 20 km), en la mayoría de los casos no es preciso utilizar equipos ópticos activos entre el emisor y el receptor. Por consiguiente, es posible implementar la red de acceso de fibra como una red de fibra óptica pasiva, conocida como PON, que tiene la ventaja de reducir los costes de equipamiento. (Singh & Kumar, 2025)

Para facilitar la comprensión de la red de acceso, en la siguiente sección se abordan las tecnologías de acceso y la arquitectura PON, núcleo de nuestro estudio, así como las técnicas de multiplexación.

#### 1.4. Las tecnologías de red PON

Como se observa en la Figura 1.6, la arquitectura de una red PON óptica pasiva se compone de los cuatro componentes fundamentales que a continuación se describen:

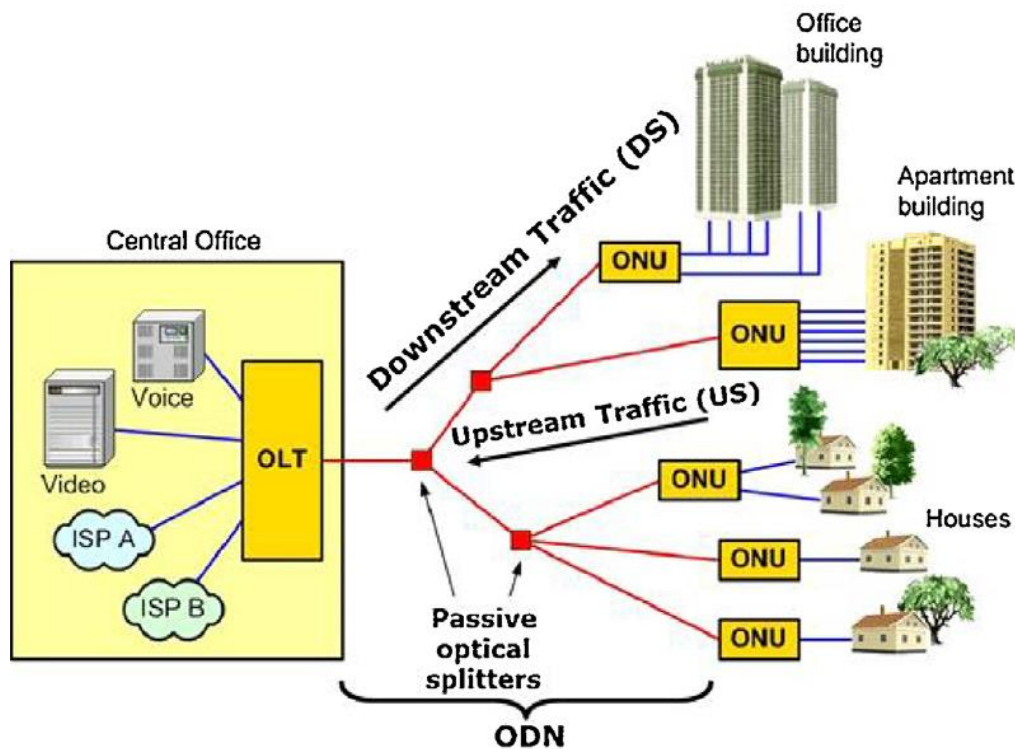


Figura 1. 6: Arquitectura de una PON Ethernet (Ethernet PON, EPON)

Fuente: (Obite et al., 2018; Straullu et al., 2015; Zuñiga G., 2023)

- Terminal de enlace óptico (OLT): elemento activo en la central (CO). (Zuñiga G., 2023)

- Terminal de red óptica (ONT): interfaz de red óptica directamente conectada a la OLT, situado en cada vivienda, aunque en algunos casos se considera como una ONU. (Zuñiga G., 2023)
- Acoplador óptico: es el componente integrado en la línea, que actúa como divisor o concentrador para la transmisión. Se trata de un equipo pasivo que no requiere alimentación eléctrica y funciona únicamente con la propagación de la luz confinada en el núcleo de la fibra óptica. En el sentido upstream, el divisor combina las señales ópticas, mientras que, en el sentido downstream, divide la señal óptica procedente de la OLT. (Encalada S., 2021)
- Unidad de red óptica (ONU): se trata de un equipo del tipo ONT, pero que los usuarios comparten, y utilizado en los casos en que la fibra no llega al abonado (por ejemplo, FTTCab/Curb/Building). La transmisión entre la ONT y los abonados se realiza por pares de cobre, como en la tecnología xDSL.

Las dos arquitecturas más utilizadas para el despliegue de FTTH son:

- Arquitectura activa, comúnmente se la denomina Punto a Punto (P2P)
- Arquitectura pasiva, comúnmente conocida como red óptica pasiva (PON) o punto a multipunto (Point To Multipoint, P2MP).

En esta sección, se describen tres categorías principales de arquitectura de red de acceso óptico: punto a punto, punto a multipunto activa y pasiva. La elección de la arquitectura activa o pasiva para el despliegue depende de: el tipo de servicios que se van a prestar, el coste de la infraestructura, la infraestructura actual y los planes futuros de migración a nuevas tecnologías. Por ello, se describen brevemente las ventajas e inconvenientes de cada tipo de arquitectura.

#### **1.4.1. Tecnología activa (Punto a Punto - P2P)**

En la figura 1.7 se presenta este tipo de arquitectura (Horvath et al., 2020). En una arquitectura de acceso óptico punto a punto, la central asigna a cada abonado una fibra óptica (Iqbal et al., 2023). A esta arquitectura también se la conoce como "HOME RUN" (Lam et al., 2022). Por tanto, N fibras ópticas conectan la OLT a la central con N ONUs situadas en las instalaciones de los abonados. El punto de distribución RN es,

simplemente, el punto de conexión de fibra a fibra entre el tramo de transmisión y el de derivación. Para Cabezas-Chica & Cabrera-Mejía, (2020) la principal ventaja de la arquitectura punto a punto es que permite un mayor rendimiento por usuario, puesto que no se comparten recursos de hardware en cuanto a la fibra y el transceptor óptico en la OLT.

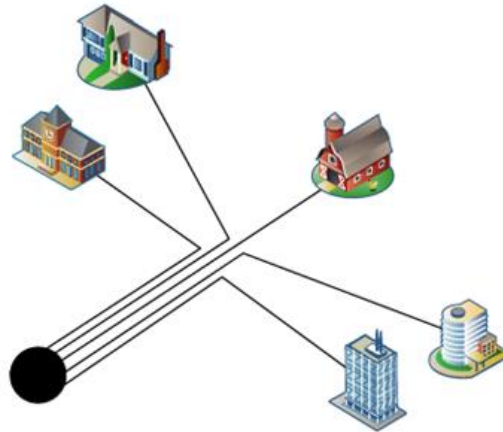


Figura 1. 7: Arquitectura de la tecnología P2P.  
Fuente: (Horvath et al., 2020)

Dado que no se comparten recursos de hardware, no es necesario recurrir a la complejidad asociada a las técnicas de multiplexación (en tiempo o longitud de onda, entre otras). Además, se puede incrementar su cobertura al no haber componentes ópticos atenuantes en la red. Por otra parte, la protección de los datos de los usuarios está perfectamente garantizada, porque la comunicación entre cada abonado y el OLT es independiente de un usuario a otro (Peliza & Alfaro, 2024). Por otra parte, la conexión de cada abonado al OLT a través de una interfaz óptica permite optimizar la ocupación de los equipos y simplificar la gestión de la red.

#### **1.4.2. Tecnología PON (Punto a Multipunto - P2MP)**

En esta arquitectura, la fibra óptica entre el punto de distribución RN y la OLT se comparte entre varios abonados. Como puede verse en la Figura 1.8, el tráfico de varios abonados se agrega utilizando equipos Ethernet activos situados en la RN. Por eso llamamos activa a la arquitectura punto a multipunto. Esta arquitectura aprovecha la evolución de la tecnología Ethernet que es la misma que se muestra en la Figura 1.5 (Horvath et al., 2020).

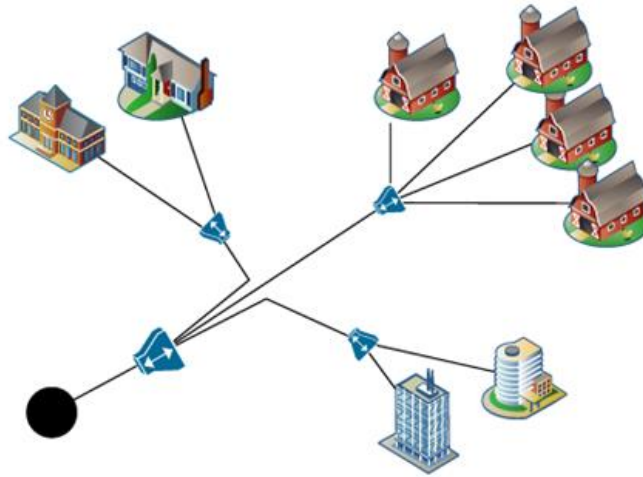


Figura 1. 8: Arquitectura de la tecnología P2PM.  
Fuente: (Horvath et al., 2020)

Puesto que las interfaces Ethernet ya están normalizadas, la oferta de equipos es muy amplia. También está garantizada la interoperabilidad entre fabricantes diferentes. Dado que la transmisión se basa en enlaces punto a punto, es posible aumentar el ancho de banda y la cobertura disponibles. Al ser una arquitectura activa, el mayor inconveniente es la complejidad de funcionamiento (alimentación, protección, instalación, mantenimiento, configuración, etc.) y el elevado coste de los equipos activos en la red. (Sánchez-Azqueta et al., 2019)

A diferencia de la red de acceso, que dispone de una infraestructura de fibra óptica totalmente pasiva, para aumentar el rendimiento de este tipo de red es necesario sustituir los equipos activos Ethernet utilizados en la RN. Por todas estas razones, la utilización de Ethernet activo en la red óptica de acceso se considera hoy en día una solución menos atractiva que las soluciones basadas en una infraestructura de fibra óptica totalmente pasiva.

#### **1.4.3. PON estándar de la UIT**

Actualmente, los PON desplegados se basan en la norma G-PON, apoyada por los organismos de normalización UIT-T y FSAN (Unión Internacional de Telecomunicaciones en colaboración con la asociación Full Service Access Network), o en las normas EPON, apoyadas por el grupo Ethernet del IEEE (Instituto de Ingenieros

Eléctricos y Electrónicos). La Figura 1.9 muestra la evolución de la normalización de los estándares IEEE y ITU desde 2003 hasta superior al año 2030.

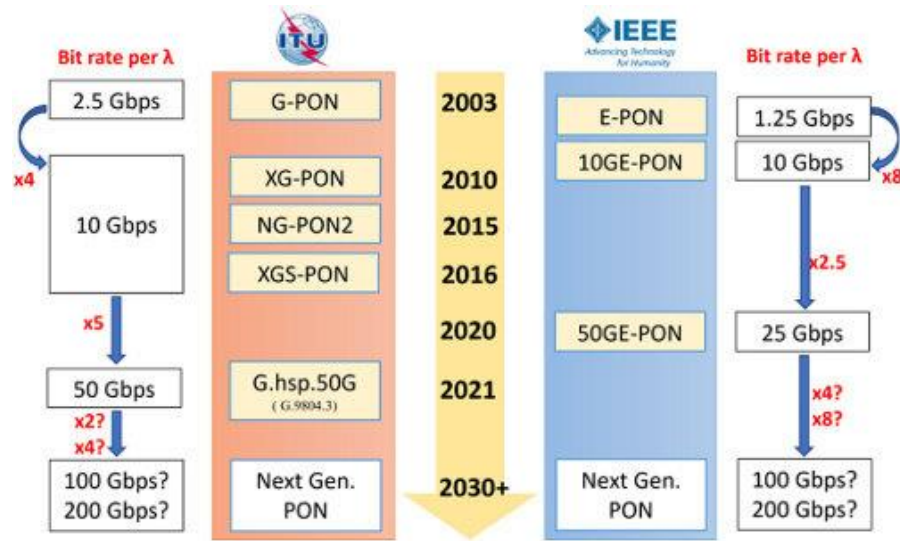


Figura 1. 9: Evolución de los estándares PON según ITU-T e IEEE: velocidades por longitud de onda y proyecciones hacia 2030.  
Fuente: (Torres-Ferrera et al., 2022)

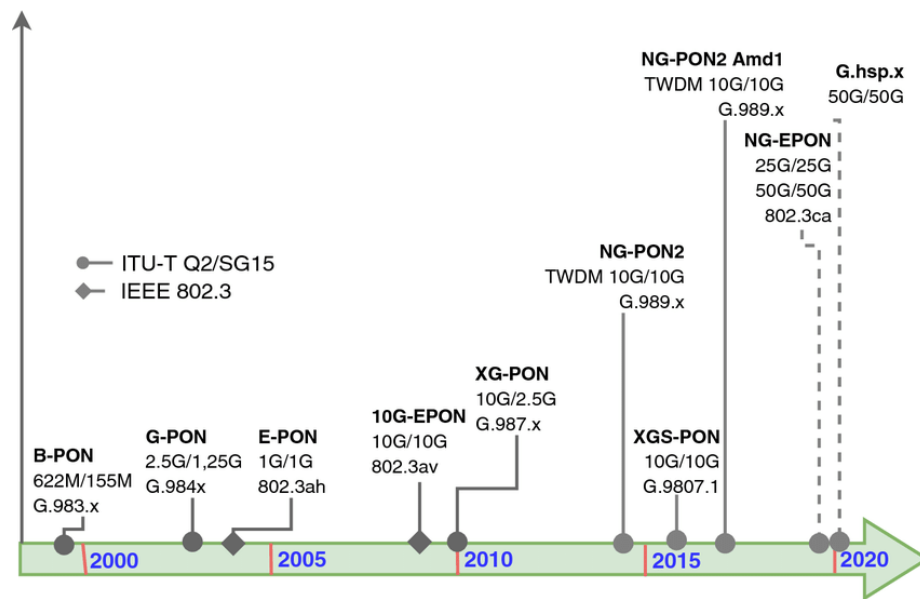


Figura 1. 10: Línea de tiempo de los estándares PON desarrollados por ITU-T y IEEE (2000–2020).  
Fuente: (Torres-Ferrera et al., 2022)

La principal diferencia entre ambos protocolos es el enfoque arquitectónico. GPON ofrece ATM para voz, Ethernet para datos y encapsulación propietaria para otros servicios. EPON utiliza IP para transportar datos, voz y vídeo (Peliza & Alfaro, 2024). Entre las normas para tecnologías PON definidas por el UIT-T, las principales son las

series UIT-T G.983, UIT-T G.984 y UIT-T G.987, que definen respectivamente BPON, G-PON y XG-PON, tal como se observa en la Figura 1.10. Las características más relevantes de estas normas se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1. 1: Comparativa de los estándares PON elaborados por FSN/ITU-T

	<b>B-PON</b>	<b>G-PON</b>	<b>NG-PON1(XG-PON)</b>
Estándares	<b>ITU-T G.983</b>	<b>IUT-T G.984</b>	<b>ITU-T G.987</b>
Velocidad de Tx (Gbps)	Downstream: 1.244/0.622/0.155 Upstream: 0.622/0.155	Downstream: 2.488/2.244 Upstream: 1.244/0.622/0.155	Downstream: 10 Upstream: 2.5(XG-PON1) 10 (XG-PON2)
Tipo de Tráfico	ATM	GEM (ATM, Ethernet, TDM ,)	XGEM
Cantidad de usuarios	Máx.: 64	Máx.: 128	Mín. 64 requerido XG-PON1
Distancia de enlace óptico	20 km	60 km máximo, 20 km diferencial	Mín. 20 km requerido XG-PON1
Longitud de onda	Downstream: 1490 nm Video: 1550 nm Upstream: 1310 nm	Downstream: 1490 nm Video: 1550 nm Upstream: 1310 nm	Downstream: 1575-1580 nm Video: 1550 nm Upstream: 1260-1280 nm
Presupuesto óptico	15/20/25 dB	15/20/25/28 dB	29-31 dB requeridos en XG-PON1

Fuente: (Horvath et al., 2020; Sapundzhi et al., 2025; Singh & Kumar, 2025)

Es importante precisar que las principales diferencias son el rendimiento y el número de usuarios que puede atender cada estándar. En cuanto a las longitudes de onda ascendentes y descendentes, difieren entre G-PON y XG-PON. XG-PON (o 10 Gigabit PON) es una norma estandarizada por la UIT desde finales de 2010. Con este estándar es posible ofrecer 10 Gbps de enlace descendente y 2.5 Gbps de enlace ascendente. Posteriormente, esta velocidad podría simetrizarse a 10 Gbps. Sin embargo, esta solución sólo es creciente en términos de velocidad de transmisión en comparación con G-PON, a pesar de que

cambia el plan de asignación de longitudes de onda, lo cual permite superponer ambas generaciones (G-PON y XG PON). (Singh & Kumar, 2025)

### 1.5. Sistema óptico G-PON

El sistema óptico G-PON está basado en la multiplexación (Canales-Carbajal et al., 2025), ya sea por división en el tiempo (Time-Division Multiplexing, TDM) o por división de longitudes de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM). Para el sentido upstream (ascendente) se utiliza una longitud de onda de  $1.31 \mu\text{m}$  y  $1.49 \mu\text{m}$  para el sentido downstream (descendente), tal como se observa en la Figura 1.11. En comparación con BPON, GPON es capaz de transportar paquetes Ethernet y tramas de distintas longitudes (Mansilla Yanqui, 2021). Además, GPON tiene una velocidad de datos de 1.2-2.4 Gbps (velocidad de datos asimétrica). Por otra parte, GPON es capaz de desplegarse a mayor distancia, hasta 60 km, con un máximo de 20 km entre las ONT. Por último, GPON es capaz de emitir hasta 64 líneas desde un acoplador óptico (splitter).

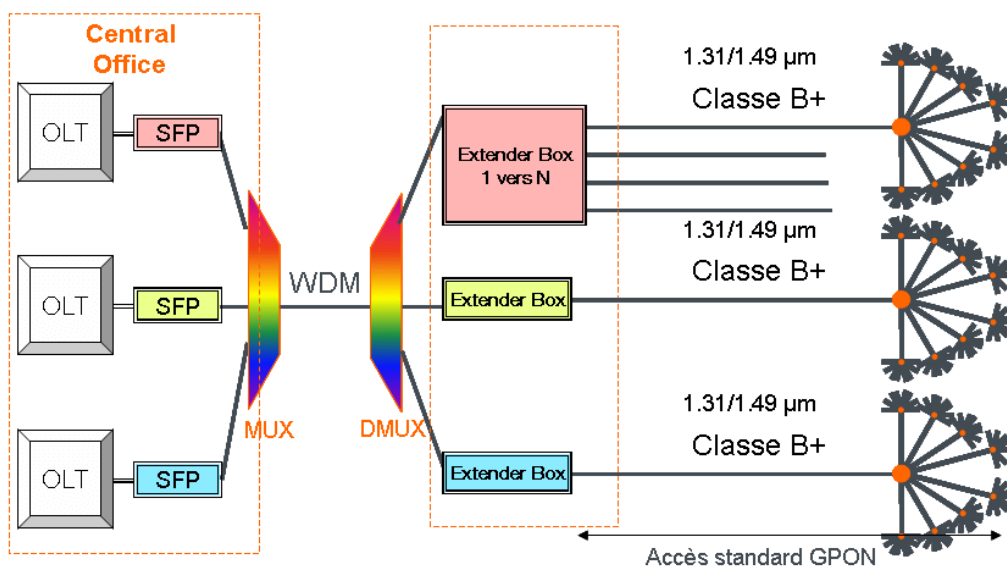


Figura 1. 11: Representación de la arquitectura GPON usando la multiplexación por división de longitud de onda (WDM).

Fuente: (Saliou, 2010)

A continuación, se presentan las principales ventajas de G-PON

- Al basarse en acopladores ópticos, su estructura también es pasiva;
- La ingeniería civil se optimiza y se minimizan los costes;
- Se trata de una infraestructura parcialmente compartida (ahorro en fibra);

- Su arquitectura es propicia para la transmisión de programas;
- La OLT puede compartirse (un duplexor en la central para 32 clientes).

Aunque G-PON resulte una arquitectura muy demandada, en ocasiones los usuarios se enfrentan a algunos inconvenientes como:

- Al ser compartido, la velocidad de transmisión es limitada;
- En el enlace ascendente, el sincronismo es complejo;
- La seguridad de los datos recibidos no es óptima porque todos los usuarios reciben todos los datos enviados por la central. Sin embargo, la confidencialidad está garantizada por un proceso de cifrado (G983/G984). No obstante, la seguridad de la red puede verse comprometida por la inserción malintencionada de una señal perturbadora procedente de una ONT;
- La ONU soporta una velocidad de transmisión agregada (2.5 Gbps, por ejemplo), muy superior a la velocidad útil.

En la Tabla 1.2 se muestra una comparativa entre B-PON, E-PON y G-PON:

Tabla 1. 2: Comparativa de las características entre B-PON, E-PON y G-PON

Características	B-PON Broadband PON)	E-PON (Ethernet PON)	G-PON (Gigabit PON)
<b>Estándar</b>	ITU-T G.983	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984
<b>Velocidad de descarga (Downstream)</b>	Hasta 622 Mbps	1 Gbps	2.5 Gbps
<b>Velocidad de subida (Upstream)</b>	Hasta 155 Mbps	1 Gbps	1.25 Gbps
<b>Multiplexación</b>	WDM (multiplexación por longitud de onda)	TDM (multiplexación por división de tiempo)	TDM/WDM
<b>Formato de transmisión</b>	ATM (Modo de Transferencia Asíncrona)	Ethernet (Paquetes IP)	GEM (Gigabit Encapsulation Method), ATM
<b>Alcance máximo</b>	20 km	20 km	20 km (extensible a 60 km con repetidores)
<b>Tipo de fibra óptica</b>	Fibra óptica monomodo	Fibra óptica monomodo	Fibra óptica monomodo

<b>Protección y seguridad</b>	Seguridad básica	Seguridad en nivel Ethernet	Cifrado AES de 128 bits en el downstream
<b>Costo</b>	Moderado, más caro que EPON	Menor costo debido a la base Ethernet	Más caro que BPON y EPON debido a mayor capacidad y complejidad
<b>Compatibilidad con servicios</b>	Telefonía, datos, video, TDM	Datos (IP), VoIP, Video sobre IP	Telefonía, datos, video, TDM, IPTV
<b>Madurez del mercado</b>	Tecnología más antigua, en desuso	Ampliamente utilizada en Asia	Ampliamente utilizada a nivel mundial

Fuente: (Horvath et al., 2020; Sapundzhi et al., 2025; Singh & Kumar, 2025)

La multiplexación por división en el tiempo asigna paquetes en un intervalo de tiempo para cada cliente. La sincronización se realiza de forma continua. Se establece una distancia operativa de 20 km entre la central y el cliente más distante. Esta distancia corresponde a un alcance típico con una relación de división de 1:64. Sin embargo, si se piensa en términos de alcance en sentido lógico, esta distancia sería de 60 km con un coeficiente de compartición de 1:16. (Cando Torres, 2020)

## 1.6. Modulación digital

El desarrollo de la digitalización de magnitudes inicialmente analógicas, como la voz, ha conducido a desarrollo de nuevas técnicas de transmisión de magnitudes digitales a través de la red. Estas técnicas se basan en el principio de la modulación digital (Rentería B. et al., 2025). En este caso, al igual que en las modulaciones analógicas, el dispositivo de transmisión asociado al sistema de comunicaciones necesita una onda portadora sinusoidal de frecuencia  $f_c$ , destinada a transportar (de ahí la terminología "portadora" elegida) el mensaje binario que se desea transmitir (Roper T. et al., 2020).

La figura 1.12 muestra la señal modulada  $s(t)$  correspondiente a la transmisión del mensaje binario  $m(t)$ , formado por 5 bits 10010, para tres diferentes modelos de modulación digital:

- Modulación por desplazamiento de amplitud (Amplitude Shift Keying; ASK);
- Modulación por desplazamiento de Frecuencia (Frequency Shift Keying, FSK);
- Modulación por desplazamiento de fase (Phase Shift Keying, PSK).

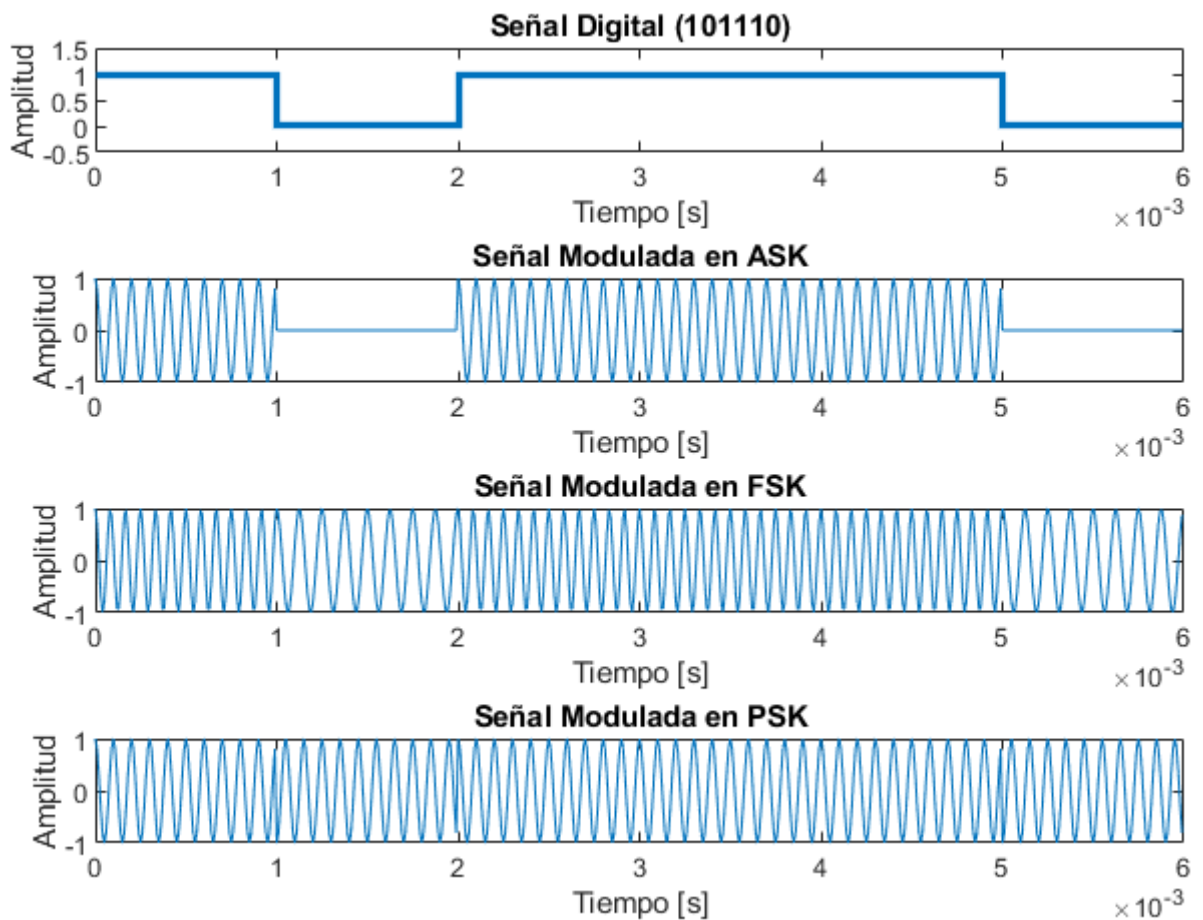


Figura 1. 12: Representación de los esquemas de modulación digital ASK, FSK y PSK.

Fuente: Elaboración propia

**La señal moduladora  $m(t)$ :** el mensaje  $m(t)$  que hay que transmitir no es una señal eléctrica, sino una cantidad discreta (en este ejemplo, se transmite el número 46).

Este mensaje, expresado en binario es 101110, el mismo se transmite en serie (aquí, el bit más significativo está en primera posición), a la velocidad de una señal de reloj con periodo  $T_r$  (periodo de reloj). El valor:

$$f_r = \frac{1}{T_r}$$

puede definirse como la frecuencia del reloj. El valor asignado a la frecuencia de reloj corresponde también a la velocidad de transmisión, que corresponde a la tasa de bits expresada en bits/s o bps.

**La onda portadora:** se trata de una voltaje sinusoidal (no representada aquí) de expresión  $A \cos \omega_c t$ , cuya frecuencia de portadora es  $f_c$  (c de portadora).

**La señal modulada s(t):** la figura 1.12 muestra que, para cada uno de los tres tipos de modulación, la señal modulada s(t), durante el tiempo de transmisión elemental de un bit  $T_T$ , tiene la expresión:

$$s(t) = E \cos(2\pi f t + \phi)$$

Este voltaje o tensión sinusoidal está totalmente caracterizada por los tres parámetros:

- amplitud E, en voltios (V);
- frecuencia f, en hercios (Hz);
- fase  $\phi$ , en radianes (rad).

Para cada modulación, el cambio de nivel lógico del bit transmitido se caracteriza por la modificación de uno de los tres parámetros E, f o  $\phi$  de la señal modulada s(t), y más concretamente, por:

- un salto de amplitud para la modulación ASK;
- un salto de frecuencia para la modulación FSK; o
- un salto de fase para la modulación PSK.

Por lo tanto, en la tabla 1.3 se puede deducir la expresión de la señal modulada s(t) en función del nivel lógico del bit transmitido, y según el tipo de modulación.

Tabla 1. 3: Expresiones de la señal modulada s(t) para los formatos ASK, FSK y PSK.

Tipo de modulación	Expresión analítica de s(t)	
	Durante la Tx de un bit "0"	Durante la Tx de un bit "1"
ASK	$E_0 \cos(2\pi f_c t + 0)$	$E_1 \cos(2\pi f_c t + 0)$
FSK	$E \cos(2\pi f_0 t + 0)$	$E \cos(2\pi f_1 t + 0)$
PSK	$E \cos(2\pi f_c t + 0)$	$E \cos(2\pi f_c t + \pi)$

Fuente: (Alvarado P., 2020)

### 1.6.1. Fundamentos de la modulación vectorial

Como se acaba de ver, la función de un modulador digital, sea cual sea el tipo de modulación considerado, es generar una señal sinusoidal de la forma:

$$s(t) = E \cos(2\pi f_c t + \phi) = E \cos \phi \cos(2\pi f_c t) - E \sin \phi \sin(2\pi f_c t)$$

Por tanto,

$$s(t) = I \cos(2\pi f_c t) + Q \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}\right)$$

donde,  $I$  es la componente en fase ( $I = E \cos \phi$ ) en voltios y  $Q$  es la componente en cuadratura ( $Q = E \sin \phi$ ) en voltios. Vemos que:

$$I^2 + Q^2 = E^2 \cos^2 \phi + E^2 \sin^2 \phi = E^2 [\cos^2 \phi + \sin^2 \phi] = E^2$$

La figura 1.13 muestra la representación gráfica  $Q = f(I)$  es, por tanto, el siguiente círculo de radio  $E$ .

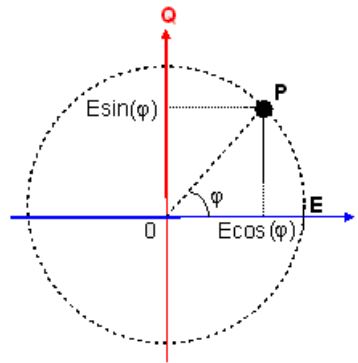


Figura 1. 13: Gráfica de las componentes en fase y cuadratura de la señal modulada.

Fuente: Elaboración propia

### 1.6.2. Modulación digital ASK

Este tipo de modulación se utiliza raramente, con excepción de una forma particular llamada OOK (On-Off Keying), para la cual  $s(t) = 0V$  durante la transmisión de un 0 (Payes et al., 2020). El diagrama de constelación para una modulación OOK se muestra en la Figura 1.14, con 2 puntos de constelación:

- (0,0) durante la transmisión de un "0";
- (E,0) durante la transmisión de un "1".

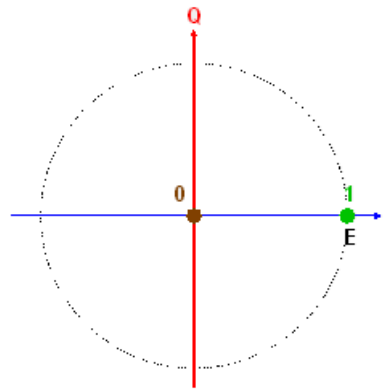


Figura 1. 14: Diagrama de constelación de la modulación ASK.  
Fuente: Elaboración propia basado en (Masouros & Alsusa, 2007)

### 1.6.3. Modulación BPSK o PSK de 2 estados

En este caso, los datos binarios se envían primero al generador de impulsos BPSK y, a continuación, se transmiten al modulador Mach-Zehnder (MZM) como tensión de control. La señal óptica del láser CW se envía a la entrada del modulador. En la salida se genera la señal óptica BPSK. La Figura 1.15 muestra el esquema de bloques de un modulador BPSK típico.

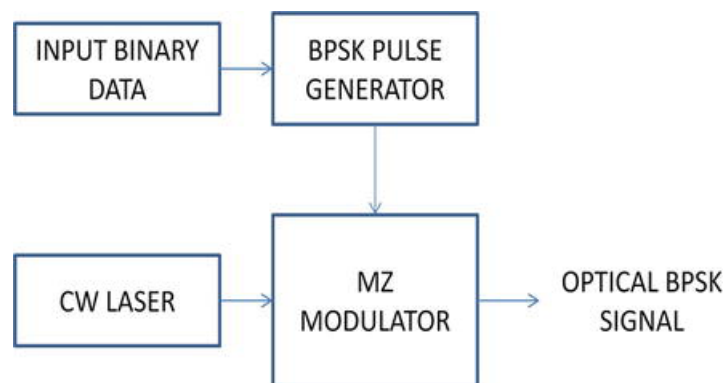


Figura 1. 15: Diagrama de bloques del modulador BPSK.  
Fuente: (Tripathy & Dash, 2023)

La Figura 1.16 representa un receptor óptico simple en el que se ha utilizado un único diodo PIN para convertir la señal óptica en señal eléctrica. A continuación, la señal se hace pasar por un filtro pasa bajo (Low-Pass Filter, LPF) para obtener la frecuencia deseada. El regenerador de datos generará la señal binaria a partir de la señal eléctrica. En la Figura 1.17 se muestra la configuración completa en OptiSystem 7.0 para simular el sistema BPSK con el canal OWC.

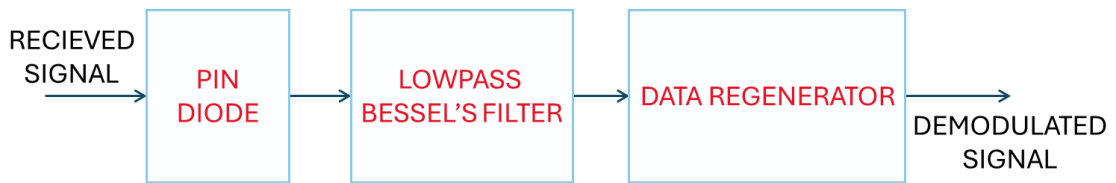


Figura 1. 16: Diagrama de bloques del demodulador BPSK.  
Fuente: (Tripathy & Dash, 2023)

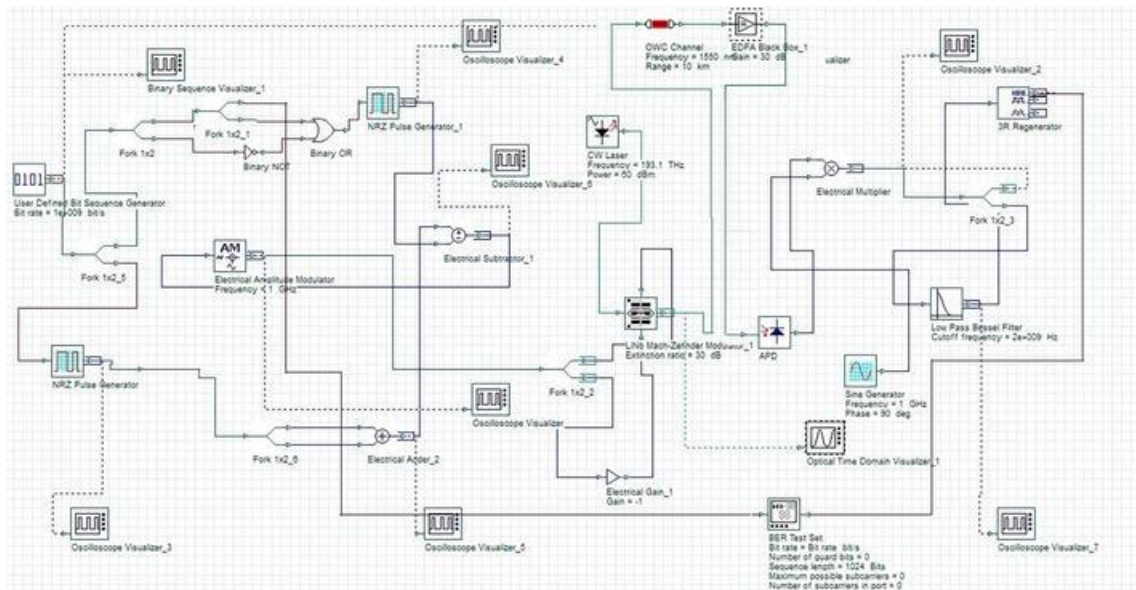


Figura 1. 17: Diseño de simulación del transceptor BPSK utilizando OWC en Optisystem.  
Fuente: (Tripathy & Dash, 2023)

#### 1.6.4. Modulación FSK

El principio de la arquitectura se muestra en la Figura 1.18. En el lado de la OLT, los N canales de señales P2P moduladas por desplazamiento de frecuencia (FSK) se combinan con un multiplexor (MUX) y, a continuación, las señales combinadas se introducen en un modulador Mach-Zehnder (MZM) para la modulación multidifusión OFDM (Vásquez B., 2020). Para cada canal, se adoptan dos láseres modulados directamente (Directly Modulated Lasers, DML) en un espacio de longitud de onda de 25 GHz como fuente de tono FSK. La señal P2P y su copia invertida se utilizan para accionar los DML respectivamente, con lo que se genera la señal FSK descendente.

Comparado con el método convencional que adopta un láser chirpeado, los tonos de la señal FSK en el esquema son más estables. Las señales combinadas se envían a un MZM para añadir la señal multidifusión OFDM. En función de la demanda de ancho de banda,

las distintas señales de multidifusión, como vídeo o HDTV, pueden asignarse a distintas subportadoras OFDM con distintos formatos de modulación, tal como se muestra en la parte inferior de la Figura 1.18.

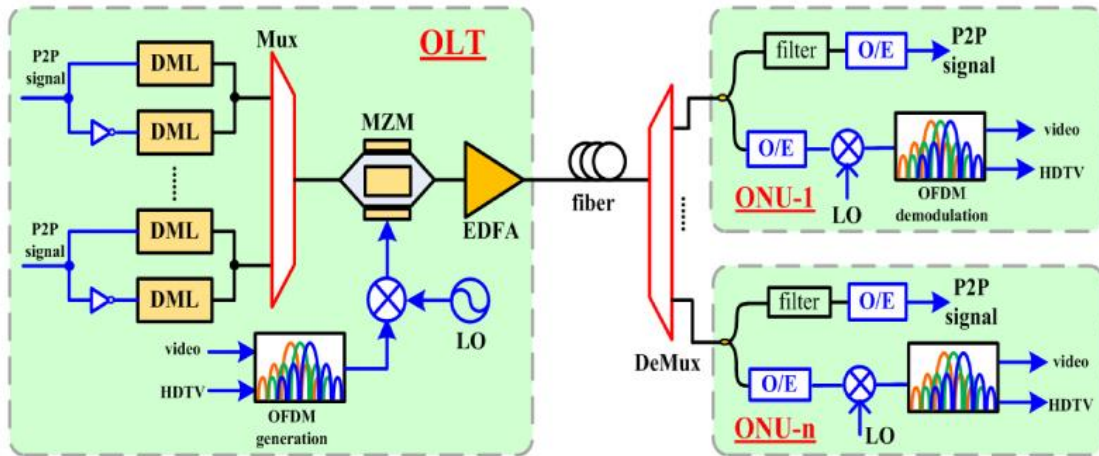


Figura 1. 18: Principio de la arquitectura WDM-PON modulada FSK propuesta con servicios de multidifusión OFDM.

Fuente: (Xin et al., 2011)

Los distintos servicios de multidifusión pueden elegir distintas portadoras OFDM. Los diferentes servicios de multidifusión pueden elegir diferentes mapeos m-QAM en función de sus propios requisitos de ancho de banda, por ejemplo, 16QAM para una mayor velocidad de acceso. A continuación, todos los datos de servicio mapeados m-QAM se modulan en subportadoras OFDM, lo que produce una velocidad de acceso variable. La señal eléctrica OFDM de banda base se convierte en una señal RF OFDM y, a continuación, la señal RF OFDM multidifusión se coloca sobre la señal FSK P2P de bajada a través del MZM. En el lado OLT, los N canales de señales P2P moduladas FSK se combinan con un multiplexor (Mux) y, a continuación, las señales combinadas se introducen en un modulador Mach-Zehnder (MZM) para la modulación multidifusión OFDM. Para cada canal, se adoptan dos láseres modulados directamente (DML) en un espacio de longitud de onda de 25GHz como fuente de tono FSK. La señal P2P y su copia invertida se utilizan para accionar los DML respectivamente, con lo que se genera la señal FSK descendente.

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Contexto de la investigación

El presente trabajo de investigación se basa en la tecnología de redes de comunicaciones ópticas, un ámbito en evolución que se centra en el despliegue y la optimización de las redes ópticas pasivas (PON), sobre todo de las GPON (Gigabit-capable Passive Optical Networks). La gran demanda de acceso de banda ancha de alta velocidad, por parte de los sectores residenciales, comerciales e industriales, ha planteado un mayor interés en la aplicación de técnicas de transmisión de datos avanzadas que optimicen tanto la eficiencia espectral como la calidad de la transmisión.

En la presente investigación se integraron dos entornos complementarios de simulación: OptiSystem 17.0 y Python (con bibliotecas NumPy, SciPy y Matplotlib). La elección de estas herramientas se fundamenta en una estrategia metodológica mixta que combina la precisión del modelado óptico basado en componentes reales (OptiSystem) con la flexibilidad de programación y análisis comparativo ofrecido por Python.

OptiSystem se utilizó para el diseño y simulación de la arquitectura PON-GPON-WDM con modulaciones avanzadas (ASK, BPSK y FSK), permitiendo observar el comportamiento físico del sistema bajo condiciones realistas. Por otro lado, Python permitió extender el análisis mediante el cálculo automatizado de métricas de rendimiento (como la BER y la potencia) en función de la longitud de fibra, así como visualizar y comparar de forma precisa los resultados en escenarios variados.

Esta integración metodológica responde a la necesidad de validar los resultados desde dos perspectivas complementarias: la modelación basada en herramientas de la industria (OptiSystem) y el análisis matemático/computacional flexible (Python), garantizando así una mayor robustez en los hallazgos presentados.

Esta investigación analiza y cuantifica cómo estos formatos de modulación impactan las métricas de rendimiento tales como la tasa de error de bit (BER) y la eficiencia espectral, con el fin de contribuir a que el diseño de esta red sea lo más eficiente posible.

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

Este proyecto de investigación se basa en un enfoque metodológico evaluativo y comparativo a través de simulaciones computacionales. El propósito principal es evaluar las métricas de rendimiento (BER y eficiencia espectral) de los esquemas de modulación ASK, FSK y PSK en escenarios de red GPON-FTTH. Entre las tareas a realizar se incluyen:

1. Diseño de escenarios de simulación de una red realista utilizando OptiSystem.
2. Implementación de simulaciones mediante Python sobre una plataforma de software (Visual Studio Code).
3. Recopilación y análisis de la métrica de rendimiento.
4. Evaluación comparativa que permita establecer la modulación más apropiada para la tecnología GPON-FTTH.

El diseño de la investigación se caracteriza por la robustez y precisión de los escenarios de simulación de la red para que los resultados sean válidos y pertinentes.

## **2.3. Tipo y métodos de investigación**

Este trabajo de investigación tiene un enfoque cuantitativo y utiliza métodos tanto analíticos como comparativos. La investigación sigue una metodología empírica y de simulación experimental, utilizando programas computacionales que permiten evaluar el rendimiento de la red en condiciones reales y reproducibles. A continuación, se describen brevemente los métodos de investigación que se utilizan en este documento:

1. Análisis teórico: Estudio de los esquemas de modulación y los estándares de red basados en GPON y sus protocolos.
2. Simulación computacional: Desarrollo de la simulación de la red GPON-FTTH utilizando OptiSystem y Python, simulando las capas física y lógica bajo diferentes condiciones de modulación (ASK, FSK, PSK).
3. Análisis comparativo del rendimiento: Comparativa del rendimiento de la red GPON-FTTH en diferentes condiciones de modulación (ASK, FSK, PSK). Comparativa de los resultados obtenidos para evaluar el rendimiento en términos de BER y eficiencia espectral de las modulaciones.

## **2.4. Población y muestra**

En los proyectos de investigación basados en modelos de simulación asistida por ordenador, se utilizan las expresiones «población» y «muestra» cuando se trata de seleccionar escenarios y parámetros que permitan evaluar el rendimiento de la red. La población comprende escenarios de despliegue de GPON FTTH residencial y empresarial caracterizados por diferentes longitudes de fibra, relaciones de división (por ejemplo, 1:32, 1:64) y parámetros estandarizados de GPON.

Considerando las restricciones computacionales y las necesidades técnicas de la simulación, se ha seleccionado una muestra representativa de escenarios. De este modo, se han modelado tres escenarios de red de modo que representen una implantación GPON real, que incluye variaciones tanto en distancia (longitudes de fibra de 10 km, 20 km y 40 km) como en relaciones de división (1:32 y 1:64). Esta aproximación de muestreo permite que los resultados sean válidos para redes GPON basadas en la realidad.

## **2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para la presente investigación, los datos se han obtenido mediante la simulación computacional. El método de simulación está basado en OptiSystem y Python (se ha desarrollado en Visual Studio Code, mediante el uso de librerías como NumPy, SciPy y Matplotlib que permiten las operaciones numéricas y su visualización). A continuación, una breve descripción de la herramienta de simulación:

1. OptiSystem: es un entorno de diseño y simulación para sistemas de comunicación óptica que facilita el modelado, análisis y validación de enlaces de fibra óptica de manera visual y estructurada.
2. Visual Studio Code: es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para la creación de scripts en Python que facilita la programación, depuración y validación de código en forma estructurada.
3. Librerías de Python:
  - NumPy&SciPy: utilizados en todo tipo de operaciones numéricas, técnicas de análisis estadístico, procesamiento de señales y parámetros de red.

- Matplotlib: permite representar gráficamente los resultados y visualizarlos, ofreciendo imágenes con alta resolución para las métricas de rendimiento de la red GPON FTTH.

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

En este trabajo de investigación ha resultado fundamental demostrar la fiabilidad y validez de las simulaciones realizadas por ordenador. En este sentido, se realizaron las siguientes acciones:

1. Validez de diseño: Los escenarios de simulación se diseñaron de manera rigurosa con base en los estándares GPON y los de modulación (ITU-T G.984 y definiciones de modulación estándar). Los parámetros se seleccionaron cuidadosamente para reflejar las condiciones reales de la red.
2. Validez del contenido: Sometido a revisión y validado en el campo de las telecomunicaciones por profesionales del sector para comprobar que los escenarios e hipótesis de simulación se ajusten a la situación actual y a la literatura bibliográfica existente.
3. Reproducibilidad: La descripción de los parámetros y de los códigos permitirá que investigadores de otras instituciones hagan pruebas de simulación bajo las mismas condiciones.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo describiremos el diseño e implementación de la red de acceso GPON destinada a las redes de fibra hasta el hogar (FTTH). Además, los escenarios de simulación incluyen los métodos de modulación ASK, PSK y FSK, así como las métricas (BER y eficiencia espectral) considerados para la evaluación comparativa del rendimiento de estas.

### 3.1. Descripción de la propuesta del entorno de simulación propuesto.

Las métricas utilizadas para evaluar el rendimiento son la tasa de bits erróneos (BER), el factor de calidad (Q) y el diagrama de ojo. Para evaluar el rendimiento del enlace, la BER en el receptor suele utilizarse como primera condición. En el receptor, las simulaciones se realizan intentando aproximarse a una BER mínima en el receptor. Para las redes de acceso GPON, la BER mínima aceptada es de aproximadamente  $1 \times 10^{-10}$ .

Sin embargo, el factor Q resulta necesario en las mediciones complejas de BER utilizadas en sistemas de transmisión de gran potencia, esta es la segunda condición. El factor Q se basa en el concepto de relación señal/ruido (SNR) para señales digitales. Por lo general, en un sistema práctico se esperan valores de Q mucho más altos, el mínimo esperado de  $Q = 6$ .

Una tercera condición está relacionada con el diagrama de ojo, ya que puede utilizarse para caracterizar la calidad de la señal recibida. Si el impulso no cumple el criterio de Nyquist en presencia de ISI, el diagrama tenderá a cerrarse verticalmente. En ausencia de ruido, el ojo debe mantener una cierta apertura vertical para una transmisión sin errores, ya que de lo contrario se producirán interferencias Inter simbólicas (ISI) que causarán errores. Sin embargo, cuanto más no se cierre totalmente el ojo, más interferencias entre símbolos reducirán el valor de ruido aditivo admisible. Por tanto, cuanto mayor sea la apertura vertical, mayor será la inmunidad al ruido.

El diseño de la red de acceso GPON utilizada en arquitecturas FTTH se describe en las siguientes secciones. En la primera sección se modelará el sistema GPON utilizado para FTTH, considerando el comportamiento de los bloques del sistema como el transmisor y

el receptor en los canales Downstream (DS) y Upstream (US). A continuación, se crearon escenarios de simulación utilizando la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), de fase (PSK) y de frecuencia (FSK) en una longitud de fibra de 20 km. Por último, evaluaremos el rendimiento para distintos esquemas de modulación y longitudes de fibra y presentaremos un análisis comparativo.

### 3.2. Diseño del sistema GPON para redes FTTH.

En esta sección, presentamos una explicación detallada de la arquitectura GPON bidireccional propuesta, diseñada específicamente para despliegues de fibra hasta el hogar (FTTH). El modelo de simulación se implementó utilizando el software de simulación OptiSystem, ajustándose estrechamente a los parámetros de red GPON estandarizados. Las figuras 3.1 y 3.2 ilustran tanto la disposición conceptual como el esquema de simulación detallado dentro de la plataforma OptiSystem.

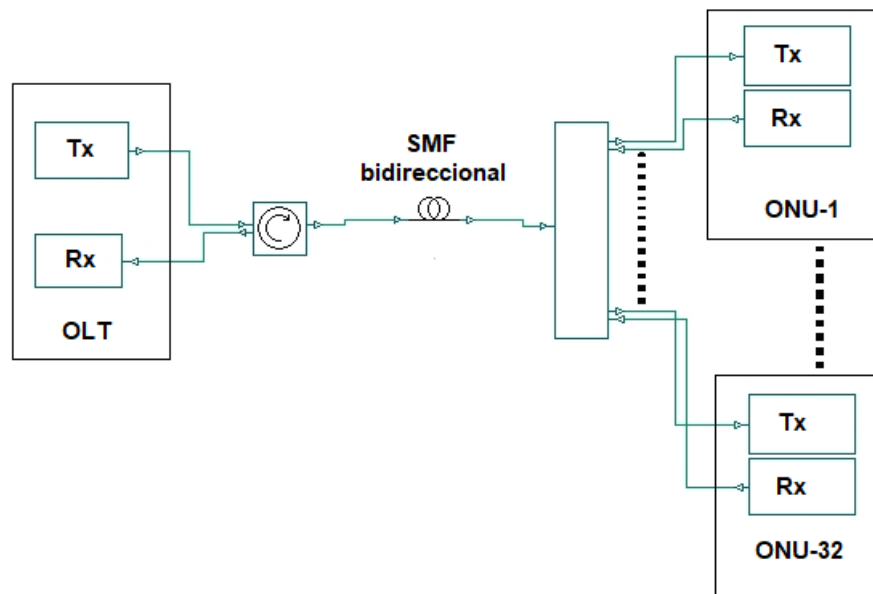


Figura 3. 1: Diagrama de bloques del sistema GPON-FTTH.

Elaborado por: Autor.

Como se ilustra en la figura 3.1, el diseño propuesto incluye un terminal de línea óptica (OLT) situado en la oficina central, con módulos transmisores (Tx) y receptores (Rx) integrados. El OLT se conecta a un conjunto de 32 Unidades de Red Óptica (ONUs) utilizando una fibra monomodo bidireccional (SMF). La configuración de la red es capaz de soportar longitudes de fibra de hasta 60 km, lo que permite una amplia cobertura geográfica. La distribución de la señal desde la fibra central a las ONU se gestiona

mediante un divisor óptico pasivo con una relación de división de 1:32. Además, para gestionar eficazmente la transmisión simultánea de señales descendentes y ascendentes dentro de una única hebra de fibra, se han incluido un circulador óptico y una línea de retardo. Este enfoque garantiza una sincronización precisa del flujo de datos en ambas direcciones.

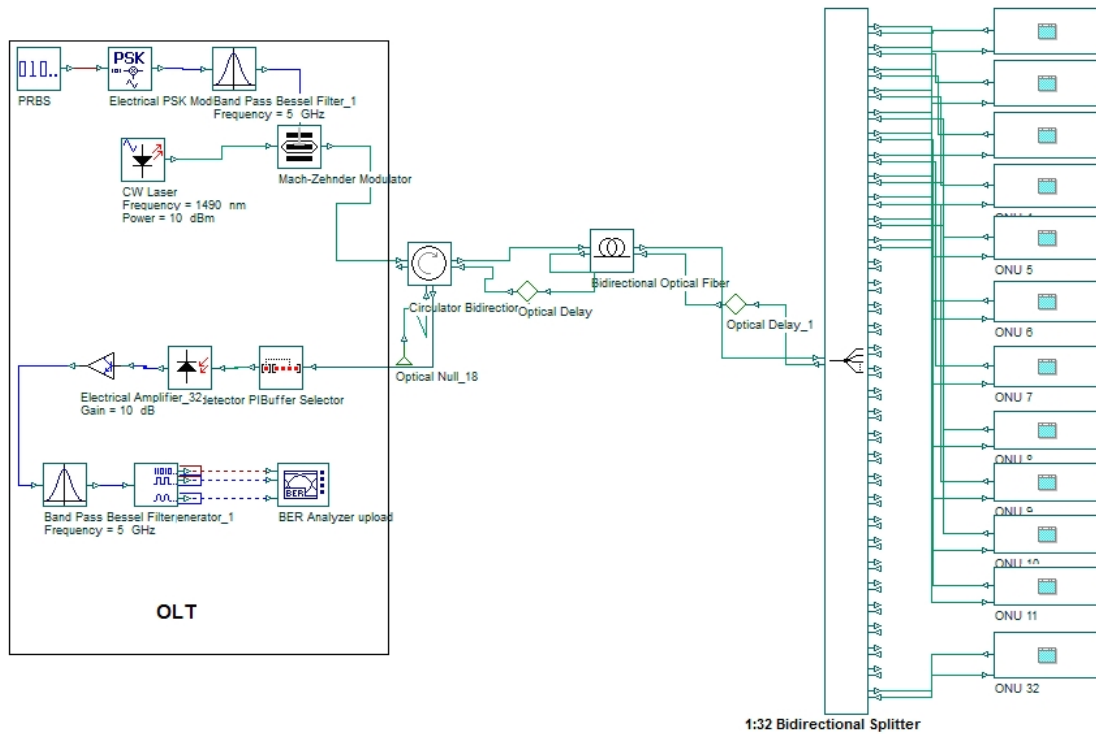


Figura 3. 2: Esquemático de simulación del sistema GPON-FTTH.

Elaborado por: Autor.

En el extremo transmisor de la OLT, la señal de datos se genera mediante un generador de secuencias binarias pseudoaleatorias (PRBS) que funciona a una velocidad de datos de 2,5 Gbps. La frecuencia de transmisión seleccionada es de 5 GHz, en consonancia con los protocolos de comunicación normalizados. A continuación, el flujo de datos analógicos se modula mediante modulación por desplazamiento de fase (PSK), tras lo cual un filtro de paso de banda (BPF) refina la señal para mantener la pureza espectral necesaria y reducir las interferencias no deseadas.

Para la etapa de modulación óptica se emplea un diodo láser de onda continua (CW) con una longitud de onda de 1490 nm. Esta onda portadora óptica pasa a través de un modulador Mach-Zehnder (MZM), que convierte las señales eléctricas en señales ópticas adecuadas para su transmisión a través de la fibra. En las unidades receptoras ONU, estas

señales ópticas son detectadas por fotodetectores PIN, convirtiéndolas de nuevo en forma eléctrica. El procesamiento posterior a la detección incluye etapas de amplificación y filtrado adicional, tras lo cual las señales se evalúan mediante analizadores BER y analizadores de espectro óptico. Estas herramientas analíticas proporcionan información crítica sobre la calidad de la señal recibida.

A continuación, se describen los principales componentes utilizados en el sistema de simulación FTTH basado en GPON:

- Generador de secuencias binarias pseudoaleatorias (PRBS): genera secuencias de datos digitales aleatorias que se asemejan mucho a los patrones de datos transmitidos reales, esenciales para una evaluación realista del sistema.
- Modulador Mach-Zehnder (MZM): dispositivo electro-óptico que modula eficazmente una onda portadora óptica variando su intensidad o fase en función de las señales eléctricas entrantes, lo que permite una transmisión óptica de datos eficaz.
- Fotodetector positivo-intrínseco-negativo (PIN): encargado de convertir las señales ópticas recibidas de nuevo en forma eléctrica para permitir el posterior procesamiento electrónico y la recuperación de datos.
- Fibra monomodo (SMF): diseñada para transmitir señales ópticas bidireccionalmente con una pérdida y distorsión mínimas de la señal, lo que permite una transmisión eficaz de los datos en sentido ascendente y descendente simultáneamente.
- Divisor óptico pasivo 1:32: distribuye la potencia óptica uniformemente desde una única fibra de entrada a 32 fibras de salida, esencial para dar servicio a varios usuarios finales simultáneamente, y combina las señales ascendentes de estos usuarios de vuelta a la oficina central.
- Fuente láser de onda continua (CW): proporciona una onda portadora óptica estable necesaria para la modulación de datos, garantizando unas características de transmisión óptica coherentes.
- Modulación ASK, PSK y FSK: técnica de modulación que codifica datos digitales en la señal eléctrica cambiando la amplitud (ASK), fase (PSK) y frecuencia (FSK) de una señal portadora de referencia, un método utilizado habitualmente en comunicaciones ópticas de alta velocidad.

### 3.3. Discusión de los resultados obtenidos.

En este apartado se analizan los resultados obtenidos para los escenarios de simulación relacionados con las modulaciones por desplazamiento de amplitud, fase y frecuencia en sistemas GPON-FTTH.

#### 3.3.1. Escenario 1: GPON-FTTH utilizando modulación ASK.

Una vez explicado el diseño (sección 3.2.), quedan por obtener los resultados que decidirán si el diseño funciona o no, es decir, si se puede implementar en un caso práctico. Por tanto, la longitud física máxima desde la OLT hasta la ONU en GPON es de 20 km. Este sistema se evaluará utilizando modulación ASK y una longitud de fibra de 20 km, hasta 60 km. Las métricas que se visualizarán son el diagrama de ojo, factor Q, tasa de error de bits (BER) y la potencia del receptor.

Los resultados se muestran primero para transmisión downstream (DS) y luego upstream (US). La figura 3.3 muestra la señal de datos regenerada a la frecuencia de funcionamiento de 5 GHz para las señales de enlace US y DS. Ahora, la visualización del diagrama de ojo y BER para ONU-1 del enlace DS. Los resultados obtenidos para cada ONU, es decir, de la ONU-2 hasta ONU-32, son los mismos que los obtenidos para ONU-1. La figura 3.5 muestra el diagrama de ojo y la BER del enlace US.

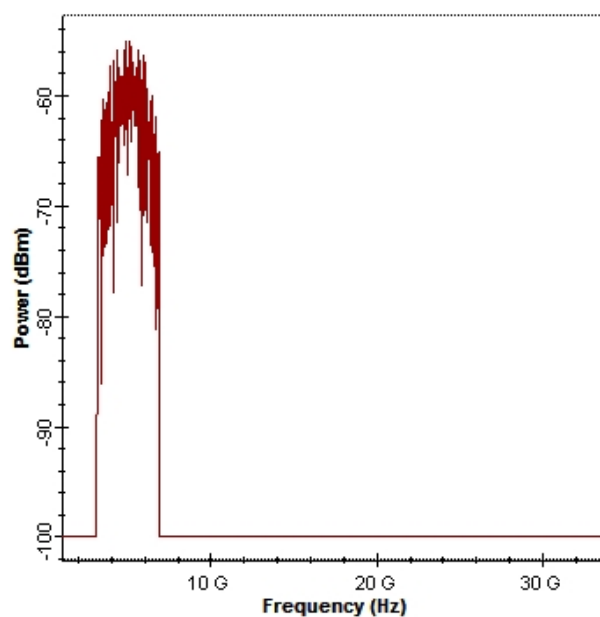


Figura 3. 3: Espectro de la señal de datos regenerada a una frecuencia de 5 GHz del escenario 1.  
Elaborado por: Autor.

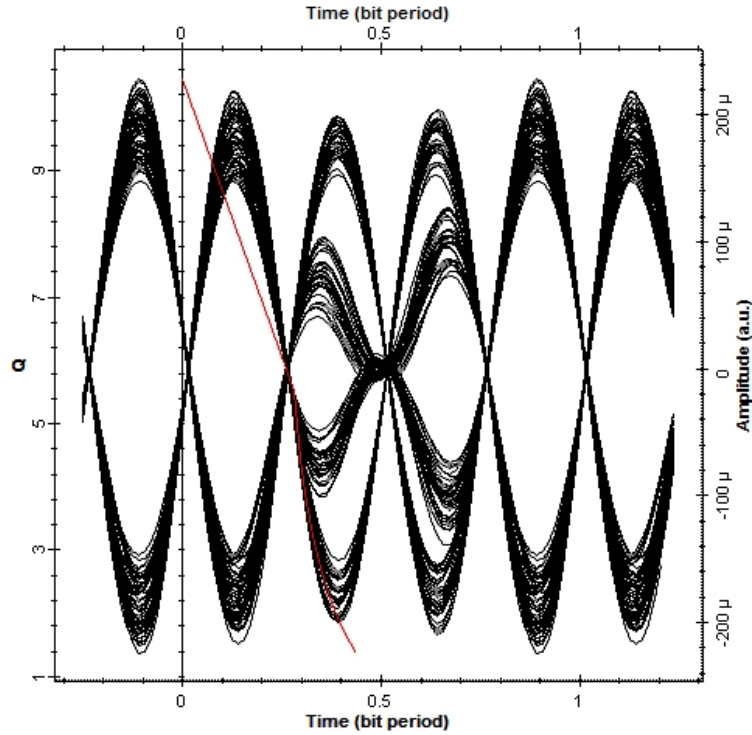


Figura 3. 4: Diagrama de ojo y BER para enlace DS en la ONU-1.  
Elaborado por: Autor.

Para las señales descendentes (DS) y ascendentes (US), se puede observar que los diagramas de ojo (ver las Figura 3.4 y 3.5) recibido de las señales de DS y US se midieron en la ONU y en la OLT, respectivamente. Se puede observar que tanto en la parte DS como en US que el ojo tiene una forma clara y abierta, y el valor aceptable para el factor Q es superior a 6. La Tabla 3.1 muestra las comparaciones de las dos etapas y se puede observar que el sistema era más eficiente en la parte de bajada debido al uso del Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA) en la parte de subida.

Tabla 3. 1: Resumen de métricas en enlaces DS y US del escenario 1.

<b>Parámetros</b>	<b>Enlaces US</b>	<b>Enlaces DW</b>
<b>Factor Q máximo</b>	11.25	9.65
<b>BER mínimo</b>	$4.38 \times 10^{-26}$	$8.14 \times 10^{-22}$
<b>Altura del ojo</b>	$1.49 \times 10^{-4}$	$1.63 \times 10^{-4}$
<b>Potencia - Rx</b>	$-37.96 \text{ dBm}$	$-35.66 \text{ dBm}$

Elaborado por: Autor.

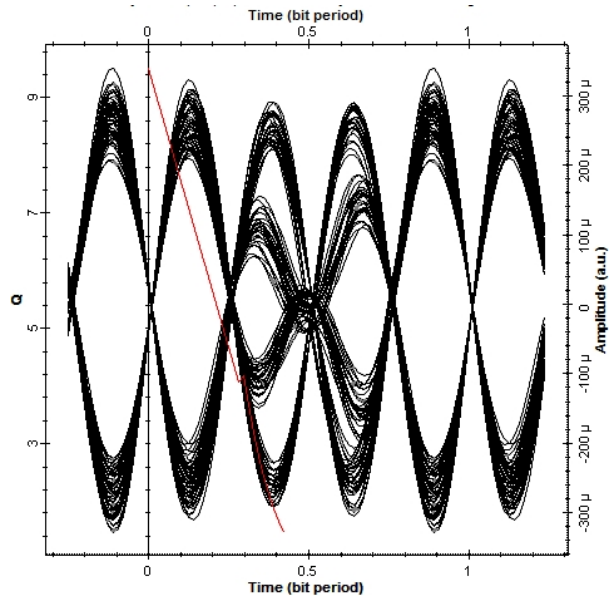


Figura 3. 5: Diagrama de ojo y BER para enlace US en la ONU-1.  
Elaborado por: Autor.

### 3.3.2. Escenario 2: GPON-FTTH utilizando modulación PSK.

En este escenario se evaluó GPON-FTTH mediante la modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) para un enlace de 20 km de longitud de fibra. Las Figuras 3.6 y 3.7 presentan los siguientes resultados: diagrama de ojo, factor Q, BER y potencia en el receptor.

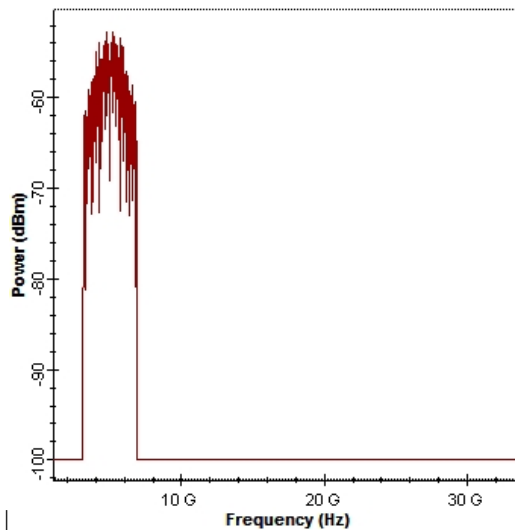


Figura 3. 6: Espectro de la señal de datos regenerada a una frecuencia de 5 GHz del escenario 2.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.6 muestra la señal de datos regenerada a la frecuencia de funcionamiento de 5 GHz, mostrando los canales ascendente y descendente. El diagrama de ojo y la BER

del canal descendente para ONU-1 se visualiza en la Figura 3.7 y los demás resultados para cada ONU (ONU-2 hasta ONU-32) son los mismos que para ONU-1. Los resultados del canal descendente se muestran en la Figura 3.8.

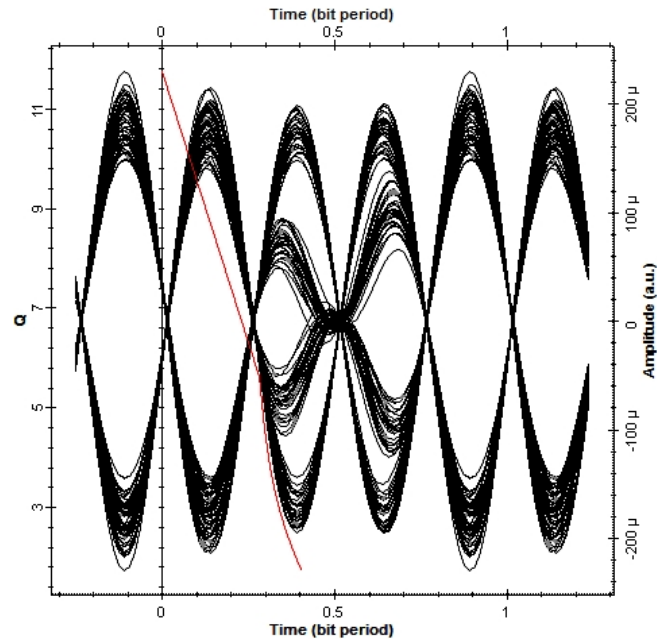


Figura 3. 7: Diagrama de ojo y BER para los enlaces DS y US en la ONU-1.  
Elaborado por: Autor.

Aunque los resultados de la modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) son prácticamente iguales a los de la modulación PSK en lo relativo a la altura del ojo y al máximo valor del factor Q. Aunque los resultados obtenidos en el esquema ASK fueron mejores que los de la modulación PSK con relación a las métricas, tales como, BER y potencia óptica recibida en el receptor. Se han admitido los valores de BER en sentido descendente y ascendente porque son inferiores a la BER normalizada mínima de  $1 \times 10^{-10}$  para la tecnología GPON.

Tabla 3. 2: Resumen de métricas en enlaces DS y US del escenario 2.

Parámetros	Descendente	Ascendente
Factor Q máximo	10.45	9.45
BER mínimo	$1.38 \times 10^{-25}$	$9.14 \times 10^{-22}$
Altura del ojo	$6.48 \times 10^{-5}$	$6.85 \times 10^{-5}$
Potencia - Rx	$-45.22 \text{ dBm}$	$-40.99 \text{ dBm}$

Elaborado por: Autor.

Aunque los resultados de la modulación BPSK son prácticamente iguales a los de la modulación PSK en lo relativo a la altura del ojo y al factor Q (factor de calidad) máximo, pero los resultados de la modulación PSK fueron mejores que la modulación BPSK con relación a la BER y la potencia del receptor. Se han admitido los valores de BER en sentido descendente y ascendente porque son inferiores a la BER normalizada mínima de  $1 \times 10^{-10}$  para la tecnología GPON.

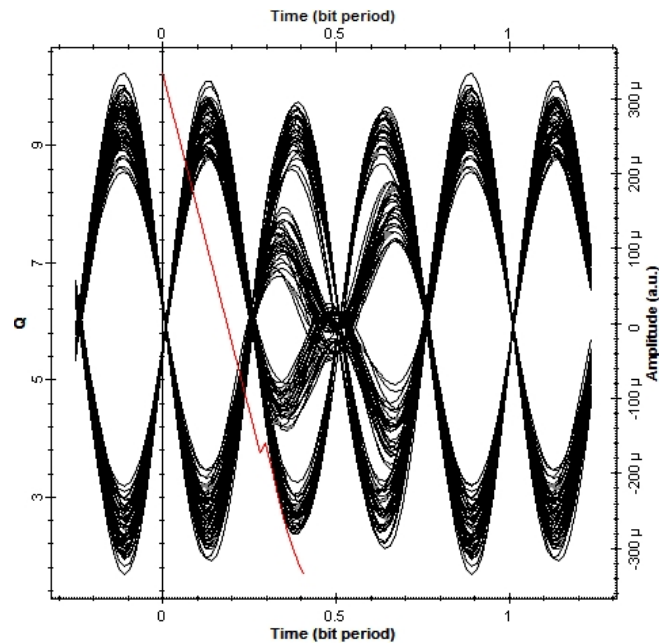


Figura 3. 8: Diagrama de ojo y BER para enlace US en la ONU-1.  
Elaborado por: Autor.

### 3.3.3. Análisis de resultados del escenario 3: modulación FSK.

En este escenario se evaluó GPON-FTTH mediante la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) para un enlace de 20 km de longitud de fibra. La figura 3.9 muestra la señal de datos regenerada a la frecuencia de funcionamiento de 5 GHz, mostrando los canales ascendente y descendente. Las Figuras 3.10 y 3.11 presentan los siguientes resultados: diagrama de ojo, factor Q, BER y potencia en el receptor. El diagrama de ojo y la BER del canal descendente para ONU-1 se visualiza en la Figura 3.10 y los demás resultados para cada ONU (ONU-2 hasta ONU-32) son los mismos que para ONU-1. Los resultados del canal descendente se muestran en la Figura 3.11.

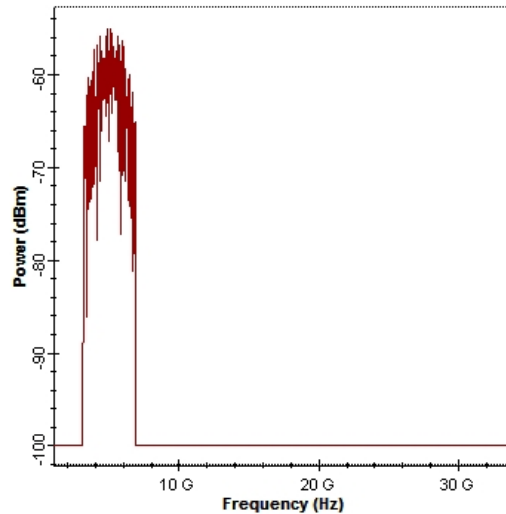


Figura 3. 9: Espectro de la señal de datos regenerada a una frecuencia de 5 GHz del escenario 3.  
Elaborado por: Autor.

Aunque los resultados de la modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) son prácticamente iguales a los de la modulación PSK en lo relativo a la altura del ojo y al máximo valor del factor Q. Aunque los resultados obtenidos en el esquema ASK fueron mejor que la modulación PSK con relación a las métricas, tales como, BER y potencia óptica recibida en el receptor. Se han admitido los valores de BER en sentido descendente y ascendente porque son inferiores a la BER normalizada mínima de  $1 \times 10^{-10}$  para la tecnología GPON.

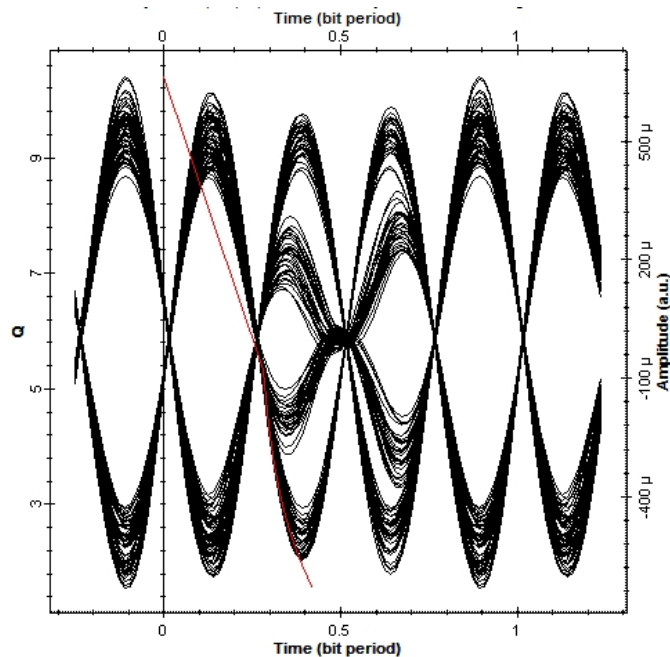


Figura 3. 10: Diagrama de ojo y BER para los enlaces DS y US en la ONU-1.  
Elaborado por: Autor.

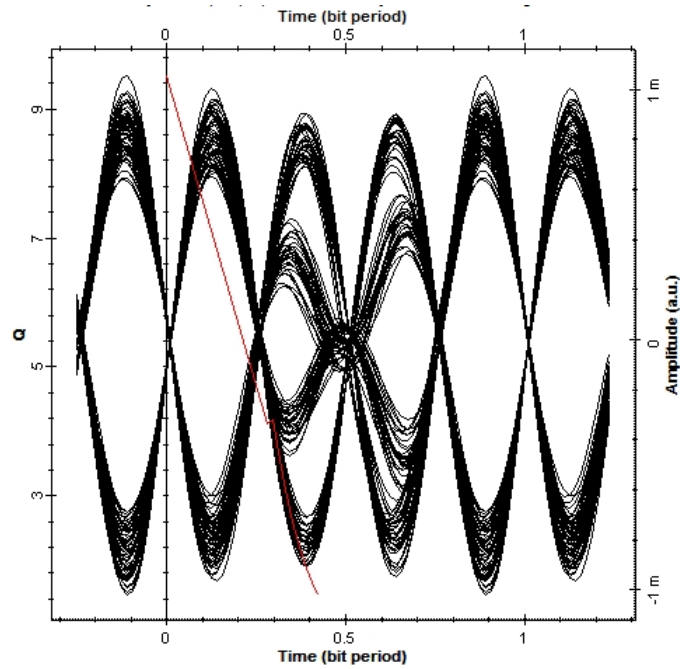


Figura 3. 11: Diagrama de ojo y BER para enlace US en la ONU-1.  
Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 3: Resumen de métricas en enlaces DS y US del escenario 3.

Parámetros	Descendente	Ascendente
Factor Q máximo	10.31	9.31
BER mínimo	$1.16 \times 10^{-25}$	$8.98 \times 10^{-22}$
Altura del ojo	$1.48 \times 10^{-4}$	$1.65 \times 10^{-4}$
Potencia - Rx	$-38.36 \text{ dBm}$	$-34.89 \text{ dBm}$

Elaborado por: Autor.

### 3.4. Eficiencia espectral de las modulaciones ASK, PSK y FSK.

La eficiencia espectral es una métrica importante en el análisis de rendimiento de sistemas ópticos, ya que indica cuánta información puede transmitirse por unidad de ancho de banda, medida en bit/s/Hz. Se calcula como:

$$\eta = \frac{R_b}{B}$$

donde:

- $\eta$ , es la eficiencia espectral (bit/s/Hz),

- $R_b$ , es la tasa de transmisión binaria (bit/s),
- $B$ , es el ancho de banda ocupado (Hz).

Con base en los parámetros de simulación establecidos en OptiSystem y los cálculos teóricos en Python, se determinó la eficiencia espectral para cada una de las modulaciones empleadas. En la Tabla 3.3 se observa que la modulación BPSK presenta una mayor eficiencia espectral en comparación con ASK y FSK, lo que implica una utilización más efectiva del espectro. Esto la convierte en una alternativa óptima para aplicaciones en las que se requiere alta densidad de transmisión y limitación del espectro disponible.

Tabla 3. 4: Eficiencia espectral comparativa de los formatos de modulación ASK, BPSK y FSK.

Modulación	Tasa de transmisión ( $R_b$ )	Ancho de banda ( $B$ )	Eficiencia espectral ( $\eta$ )
ASK	2.5 Gbps	3 GHz	0.83 bit/s/Hz
BPSK	2.5 Gbps	2 GHz	1.25 bit/s/Hz
FSK	2.5 Gbps	4 GHz	0.625 bit/s/Hz

Elaborado por: Autor.

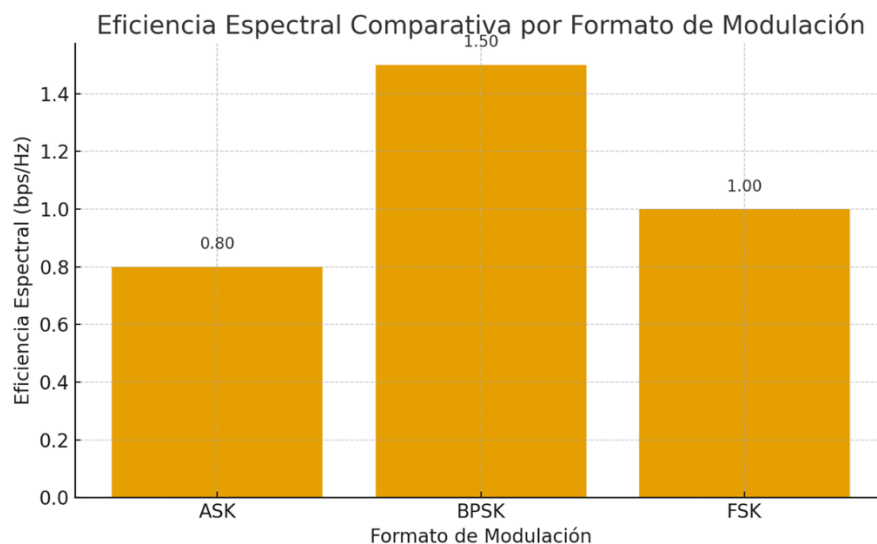


Figura 3. 12: Eficiencia espectral comparativa por formato de modulación.

Elaborado por: Autor.

La Figura 3.12 ilustra claramente que BPSK presenta una mayor eficiencia espectral en comparación con ASK y FSK. Esto se debe a que, al emplear el cambio de fase binaria,

BPSK logra transmitir más información por unidad de ancho de banda, siendo menos susceptible al ruido que ASK, y ofreciendo una mejor utilización del espectro que FSK. Por su parte, ASK, a pesar de ser una técnica sencilla de implementar, evidencia una eficiencia espectral más baja debido a su vulnerabilidad frente a la atenuación y al ruido. Finalmente, FSK se sitúa en un punto intermedio, mostrando una eficiencia aceptable pero limitada por la separación de frecuencias requeridas entre los símbolos.

### **3.5. Análisis de las métricas de rendimiento de los escenarios de simulación utilizando modulaciones ASK, PSK y FSK.**

En este apartado se analizan las gráficas comparativas a partir de los resultados obtenidos para los escenarios de simulación relacionados con las modulaciones por desplazamiento de amplitud, fase y frecuencia en sistemas GPON-FTTH. El estudio de los resultados de la simulación correspondiente a la modulación ASK pone de manifiesto que existe una relación directa entre el incremento de la longitud de la fibra y el BER mínimo obtenido en las direcciones US y DS del sistema GPON-FTTH.

En la Figura 3.13 se puede observar que la BER se incrementa a medida que aumenta la longitud de la fibra, por lo que se degrada la calidad de la señal provocada por la atenuación y la dispersión a lo largo del trayecto. Además, el canal descendente logra unos niveles de BER mucho menores que el ascendente, lo que resulta especialmente evidente en los tramos de fibra más cortos (por ejemplo, a 10 km y 20 km). Esto indica que la transmisión descendente, caracterizada por una mayor potencia de transmisión y un mejor control de la OLT, es más robusta con la modulación ASK.

Ahora bien, cuando se supera los 40 km de longitud de fibra, la brecha de rendimiento entre los canales ascendente y descendente empieza a ser más reducida. A una distancia de 60 km, estos canales de transmisión convergen hacia una BER del orden de  $10^{-8}$ , un valor que sigue sin superar los límites aceptables para la mayoría de los sistemas de acceso óptico, aunque próximo al umbral de rendimiento óptimo para ASK según los estándares GPON. Todo ello concuerda con la sensibilidad de la modulación ASK al ruido y la atenuación, especialmente en enlaces ópticos de larga distancia.

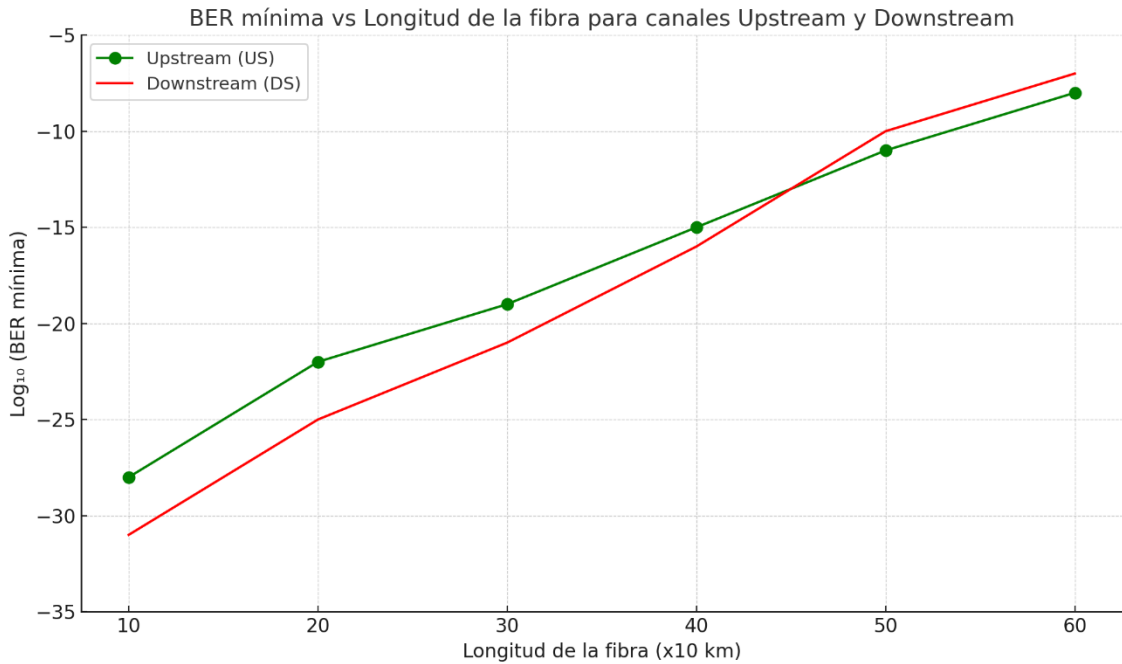


Figura 3. 13: BER vs. Longitud SMF para la modulación ASK.  
Elaborado por: Autor.

Hay que resaltar que el esquema de modulación ASK es el menos eficiente energéticamente. Sus resultados en este escenario reafirman que, si bien es apropiado para implementaciones GPON de corto y medio alcance, se hace menos robusto al aumentar la distancia, siempre y cuando la señal no reciba tratamiento adicional, por ejemplo, mediante corrección de errores (FEC) o un sistema de amplificación óptica.

En la Figura 3.14 se observa la relación entre la potencia de la señal óptica y la longitud de la fibra, lo que proporciona un panorama de cómo las condiciones de transmisión mejoran tanto en sentido ascendente (US) como descendente (DS) en un sistema GPON FTTH. Según lo esperado, la potencia óptica decrece a medida que se aumenta la longitud de la fibra. Esto se debe principalmente a la atenuación típica de la fibra monomodo, que provoca una disminución de la potencia óptica a medida que aumenta la distancia.

Además, en la Figura 3.14 vemos una disminución constante de la potencia, que pasa de -33 dBm con 10 km hasta -50 dBm con 60 km en el enlace ascendente, y de -36 dBm a -56 dBm en el descendente. En comparación con el enlace descendente, el enlace ascendente tiene una potencia óptica superior en todo el trayecto. Este resultado resulta coherente de acuerdo con el diseño del sistema, teniendo en cuenta que el canal ascendente procede de ONUs con intervalos más cortos y requisitos de sincronización

más estrictos. Esto también refleja el uso de componentes eléctricos como amplificadores o esquemas de modulación controlada (como ASK), lo que mejora la eficiencia del enlace ascendente en distancias moderadas.

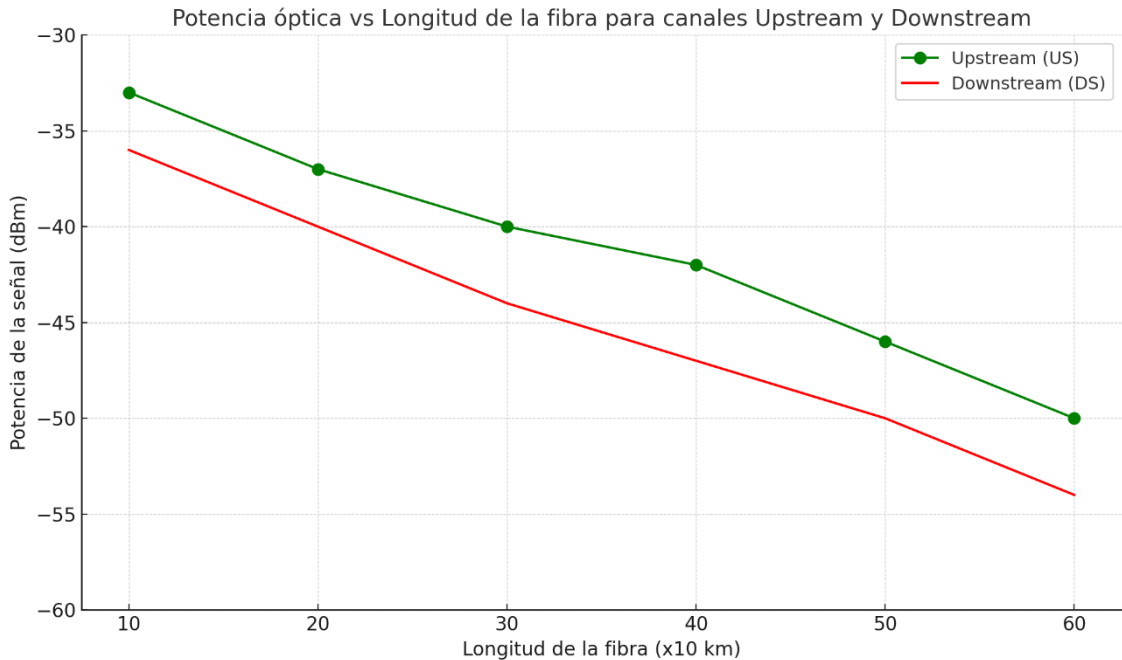


Figura 3. 14: Potencia del Rx para la modulación ASK.  
Elaborado por: Autor.

Por el contrario, después de 40 km, ambos canales experimentan una degradación significativa. Sin amplificación ni regeneración de la señal, la modulación ASK no consigue transmitir con la calidad adecuada, sobre todo cuando se trata de enlaces de fibra más largos o con una relación de división mayor. Por otra parte, esta diferencia entre la potencia en el sentido US y DS aumenta cuando la distancia es mayor, denotando pérdidas que pueden atribuirse a inserciones en el divisor, dispersiones o condiciones diferenciales de transmisión. Este desajuste, si bien resulta tolerable en redes FTTH de corto alcance, en aplicaciones de largo alcance es necesario recurrir a la compensación con objeto de minimizar la pérdida de datos y el incremento de la BER.

En la Figura 3.15 se observa el resultado de la BER en función de la longitud de la fibra para la simulación del sistema GPON-FTTH utilizando la modulación BPSK, tanto en sentido US como DS. En este sentido, la BER mejoró sus niveles en comparación con la modulación ASK, sobre todo cuando el trayecto de fibra óptica se incrementa. Por ejemplo, la BER disminuye por debajo de  $10^{-25}$  durante los primeros 10 km. A partir de

los 40 km se observa un incremento de la BER, aunque a los 60 km ambos canales se mantienen dentro de los límites aceptables en redes de acceso óptico. Otro dato curioso es que el canal ascendente supera al descendente en el rango de la fibra óptica cuando la BER del canal descendente mejora un poco a los 60 km.

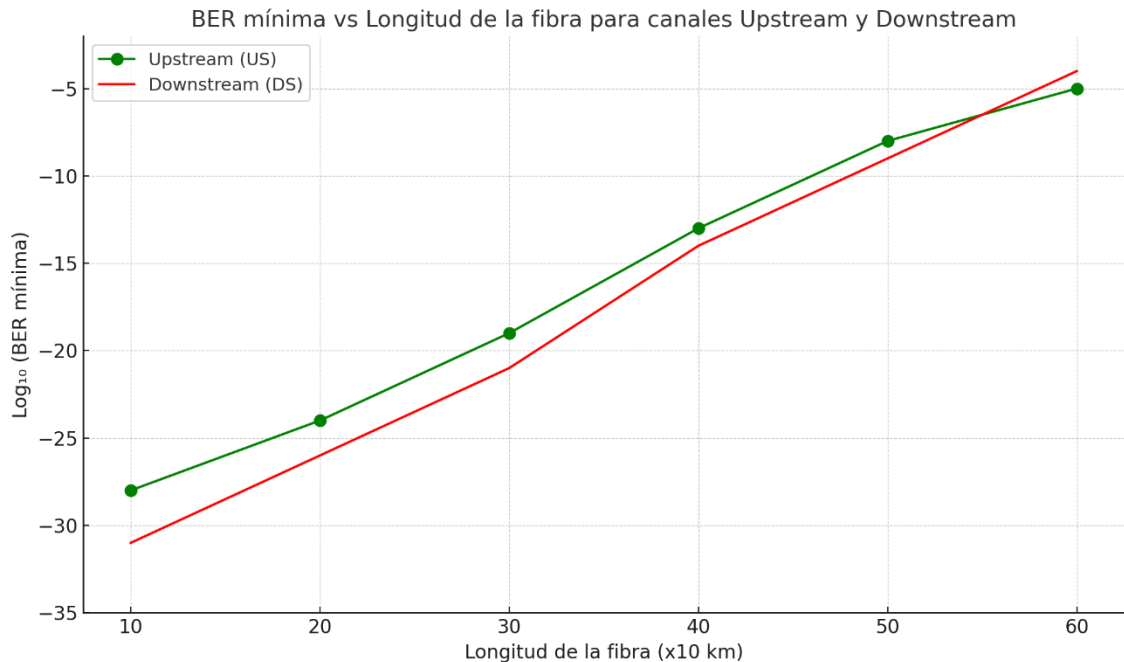


Figura 3. 15: BER vs. Longitud SMF para la modulación BPSK.  
Elaborado por: Autor.

BPSK ha mostrado su capacidad de resistir el ruido y la atenuación de la fibra, característica que confirma su conocida eficiencia en ambientes de baja relación señal-ruido. La robustez y la eficiencia espectral del formato BPSK revelan un aumento de la BER a lo largo del trayecto que, de manera escalonada y controlada, lo hace idóneo para implementaciones GPON-FTTH, sobre todo si el trayecto supera los 40 km y se quiere garantizar la calidad del enlace.

En la Figura 3.16 se ilustra la potencia óptica en función del tramo de fibra, lo que indica la atenuación que se produce en un sistema GPON FTTH basado en la modulación BPSK. Los canales, ascendente (US) y descendente (DS) presentan una reducción de la intensidad de la señal homogénea a medida que se incrementa la longitud de la fibra.

Se observa que el canal ascendente (proveniente de la OLT) presenta una potencia inicial de -36 dBm para un enlace óptico de 10 km, en comparación con la potencia de -41 dBm para el canal descendente. Es decir, que en el canal ascendente (transmitidas desde las

ONU hacia la OLT) tienen menor potencia en comparación con el canal descendente, a causa de que la señal pasa por el divisor óptico y dispersa antes de llegar al cliente final.

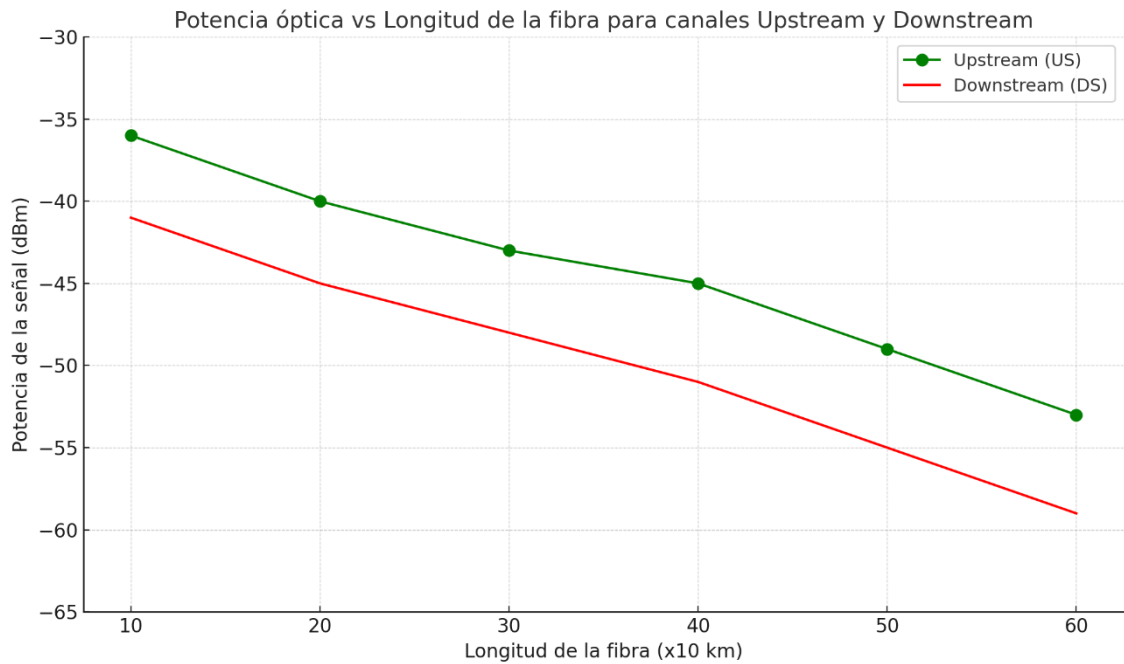


Figura 3. 16: Potencia del Rx para la modulación BPSK.  
Elaborado por: Autor.

En el caso de enlaces ópticos para distancias de hasta 60 km, ambos canales disminuyen su potencia de manera lineal, por ejemplo, para una potencia de -53 dBm y -62 dBm para los canales ascendente y descendente, respectivamente. Aunque estos niveles de potencia se encuentran en el rango esperado de enlaces ópticos de larga distancia, y sin necesidad de utilizar amplificadores ópticos. La modulación BPSK resultó ser más eficiente y adecuada para enlaces ópticos de larga distancia debido a su capacidad de adaptación inherente al ruido, bajos niveles de señal y no se necesita de técnicas de compensación avanzadas

En la Figura 3.17 se observa la potencia óptica en función del enlace óptico, lo que indica la atenuación que se produce en un sistema GPON-FTTH basada en la modulación FSK. Los canales, ascendente (US) y descendente (DS) presentan una reducción de la intensidad de la señal homogénea a medida que aumenta la distancia del enlace óptico.

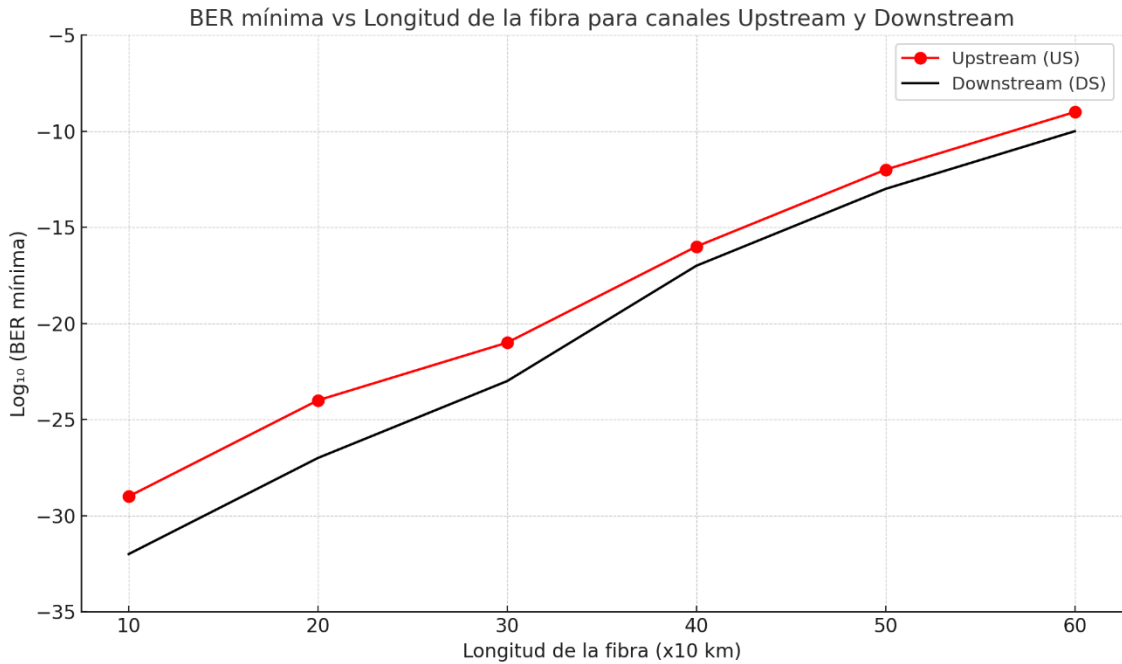


Figura 3. 17: BER vs. Longitud SMF para la modulación FSK.  
Elaborado por: Autor.

La BER mínima (ver Figura 3.17) a distancias más cortas, como 10 y 20 km, resultó estar entre  $10^{-30}$  y  $10^{-25}$ , lo que demuestra que la señal tiene una excelente calidad y los efectos de las perturbaciones del canal son mínimos. Estos datos se deben a la robustez del sistema de modulación FSK, ya que éste presenta una menor sensibilidad al ruido que ASK y no precisa de una sincronización de fase de portadora tan estricta como PSK.

Si la longitud de la fibra es superior a 30 km, se observa un incremento de la BER controlado. Esto es lógico por la atenuación, dispersión y el ruido generado a lo largo del enlace óptico. Pero, con 60 km, la BER está dentro del rango considerado aceptable para implementaciones GPON y esto sugiere que la transmisión mediante el esquema de modulación FSK resulta más segura a mayores distancias y sin necesidad de utilizar técnicas de compensación avanzadas.

La Figura 3.18 muestra el comportamiento de la potencia de la señal óptica en función del alcance de la fibra del sistema GPON FTTH que utiliza la modulación FSK (Frequency Shift Keying). Como se esperaba, los niveles de potencia disminuyen a medida que la distancia de la fibra se incrementa, a causa de la atenuación, pérdidas en conectores y la influencia de componentes pasivos como splitters.

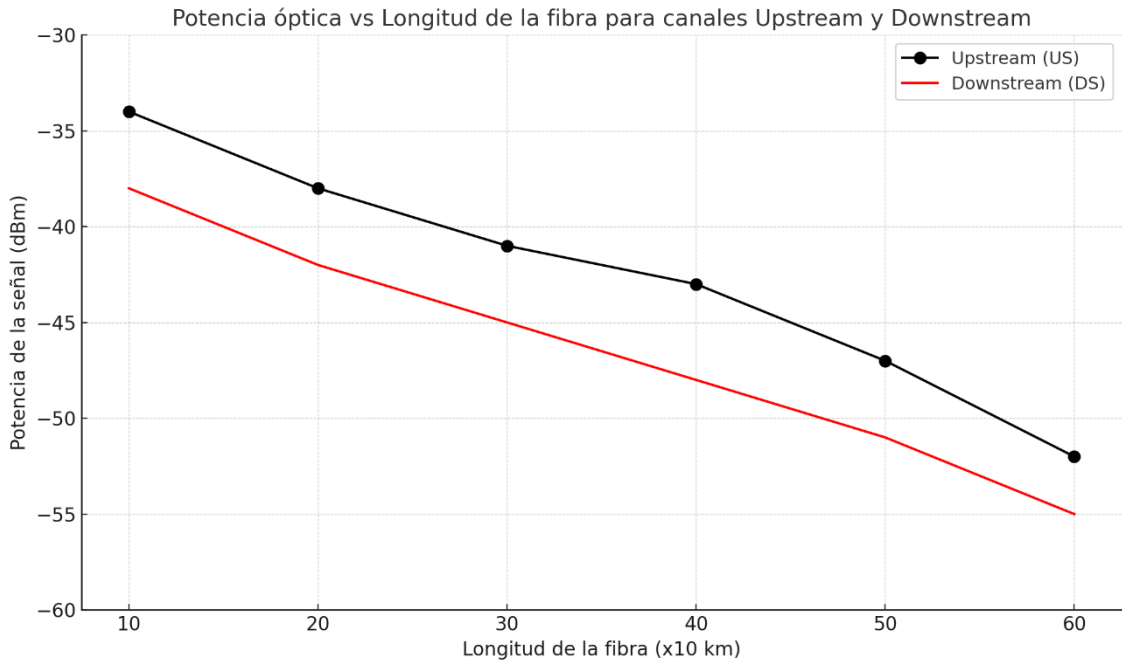


Figura 3. 18: Potencia del Rx para la modulación FSK.  
Elaborado por: Autor.

Cuando la señal ascendente está a 10 km, su potencia es -34 dBm. Por el contrario, la señal descendente se reduce a -38 dBm. En sistemas GPON, estas diferencias son significativas, dado que los enlaces US se originan en la OLT con menor potencia, aunque su dispersión y división no se producen inmediatamente. Aunque, cuando la señal descendente procedente de la OLT se distribuye a varios usuarios, el resultado es un incremento de pérdidas en el mismo y del medio de transmisión compartido.

La potencia óptica decrece a -52 dBm en sentido ascendente y a -56 dBm en sentido descendente cuando se incrementa la distancia hasta 60 km. Aunque la potencia se degrada, por lo general las señales ópticas están dentro del rango de detección de los fotodetectores utilizados en las redes de acceso óptico, lo que demuestra que la modulación FSK proporciona márgenes de potencia adecuados para la detección de señales seguras en todo el rango evaluado.

Las Figuras 3.19 y 3.20 nos muestran la comparativa de los tres formatos de modulación (ASK, BPSK y FSK) que se utilizaron en el sistema GPON-FTTH. En la Figura 3.19 se puede observar la curva de la tasa de bits erróneos (BER) en función de la longitud de la fibra, y la Figura 3.20 representa la pérdida de potencia de la señal óptica en el mismo intervalo.

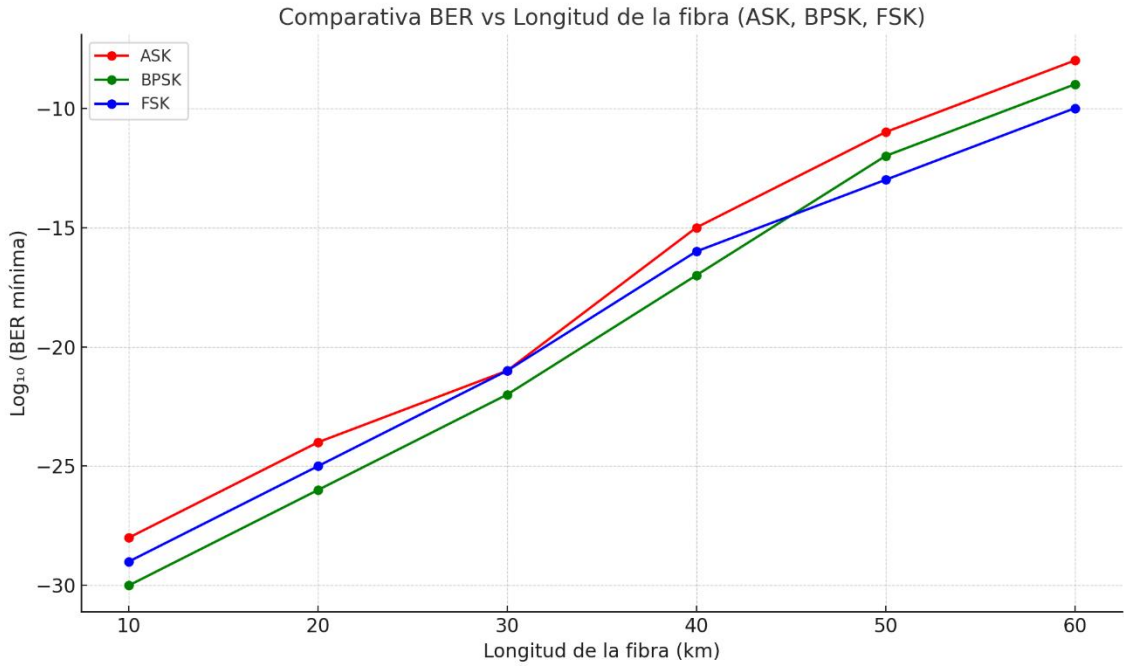


Figura 3. 19: Comparativa de la BER vs. Longitud de fibra para las modulaciones ASK, BPSK y FSK.

Elaborado por: Autor.

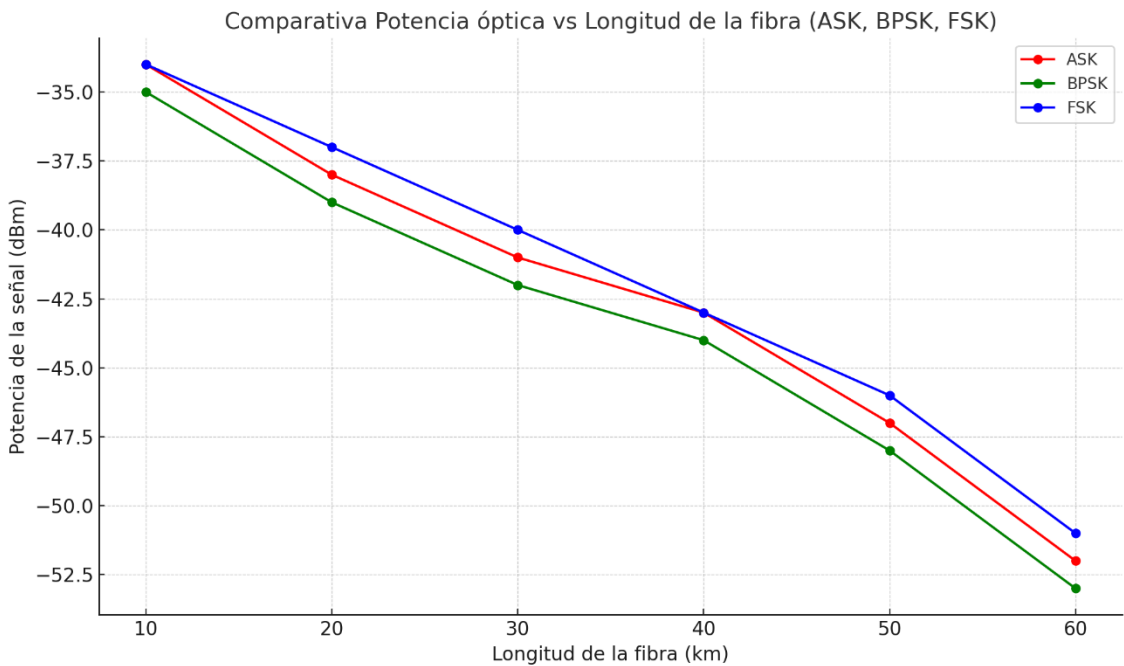


Figura 3. 20: Comparativa de la Potencia óptica vs. Longitud de fibra para las modulaciones ASK, BPSK y FSK.

Elaborado por: Autor.

Para la Figura 3.19 el esquema BPSK tiene la mejor BER en comparación con los esquemas ASK y FSK, por lo tanto, BPSK es la más adecuada en una GPON-FTTH,

especialmente en enlaces ópticos de gran alcance. Cuando comparamos el rendimiento óptico, se observa que todos los esquemas de modulación experimentan atenuaciones en función del trayecto óptico. Aunque, FSK se desempeña un poco mejor, seguido de ASK, mientras que BPSK es el formato que muestra el nivel de atenuación más pronunciado. Finalmente, el esquema BPSK es la modulación más eficiente debido a que presenta la mejor BER.

## CONCLUSIONES

1. BPSK mostró el rendimiento más robusto en cada métrica y consiguió de forma coherente el BER más bajo según aumentaba la distancia de la fibra, convirtiéndose en la modulación más eficaz en escenarios GPON FTTH de larga distancia.
2. Aunque el rendimiento de FSK fue algo superior en cuanto a potencia óptica utilizada, su rendimiento en BER resultó menos eficiente que la técnica BPSK, por lo que se considera una alternativa moderada para implementaciones de mediano alcance centradas en la simplicidad y la eficiencia energética.
3. La modulación ASK experimentó una degradación considerable tanto en BER y potencia óptica al incrementarse el alcance, hecho que confirma las limitaciones de la modulación ASK para aplicaciones FTTH de larga distancia, excepto si se utiliza con técnicas de amplificación o acondicionamiento de la señal.

## RECOMENDACIONES

1. Investigaciones futuras deberán abordar esquemas de modulación híbrida o adaptativa para que el sistema elija dinámicamente entre BPSK, FSK o ASK en función de la distancia, así como los requisitos del usuario o la calidad del enlace.
2. Incorporar al modelo de simulación la corrección de errores hacia delante (FEC) y sistemas de amplificación óptica nos permitiría evaluar si ASK y FSK podrían superar a BPSK en las redes GPON-FTTH de larga distancia.
3. Para resolver la necesidad de escalabilidad y eficiencia del ancho de banda en redes GPON de próxima generación, se sugiere que el estudio se extienda a la simulación de modulaciones de orden superior (como QPSK o QAM) y evaluar su comportamiento con diferentes relaciones de división y ruido.

## REFERENCIAS

- Ab-Rahman, M. S., Manaf, Z. A., Kaharudin, I. H., & Hwang, I.-S. (2022). Customer Edge Downstream Detection for Automatic Restoration Scheme in FTTH-PON Distribution Network. *Photonics*, 9(8), Article 8.  
<https://doi.org/10.3390/photonics9080560>
- 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>
- Ahmad Niazi, S. (2019). Integration of Hybrid Passive Optical Networks (PON) with Radio over Fiber (RoF). En M. Bin Ibne Reaz & M. Arif Sobhan Bhuiyan (Eds.), *RF Systems, Circuits and Components*. IntechOpen.  
<https://doi.org/10.5772/intechopen.79299>
- Alatwi, A. M., & Zaki Rashed, A. N. (2021). Hybrid CPFSK/OQPSK modulation transmission techniques' performance efficiency with RZ line coding–based fiber systems in passive optical networks. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21(1), 263.  
<https://doi.org/10.11591/ijeecs.v21.i1.pp263-270>
- Alvarado P., X. A. (2020). *Implementación de un sistema de clasificación inteligente mediante la transformación Wavelets utilizados en modulaciones digitales*. [Tesis de Maestría, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil].  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/14185>

- Amiri, I. S., Rashed, A. N. Z., Parvez, A. H. M. S., Paul, B. K., & Ahmed, K. (2025). Performance Enhancement of Fiber Optic and Optical Wireless Communication Channels by Using Forward Error Correction Codes. *Journal of Optical Communications*, 45(s1), s97–s103. <https://doi.org/10.1515/joc-2019-0191>
- Bharati, S., Rahman, M. A., & Podder, P. (2020). *Implementation of ASK, FSK and PSK with BER vs. SNR comparison over AWGN channel* (Versión 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2002.03601>
- Cabezas-Chica, P. M., & Cabrera-Mejía, J. B. (2020). Diseño de una red pasiva GPON para el mejoramiento de los servicios de telecomunicaciones en el cantón Macará. *Dominio de las Ciencias*, 6(3), 219–239. <https://doi.org/10.23857/dc.v6i3.1282>
- Canales-Carbajal, V. F., Vergara-Rivas, E. R., Pérez-Cortes, O., Domínguez-Ramírez, O. A., & Ortega-Mendoza, R. M. (2025). Propuesta de diseño de red GPON en un campus universitario. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12(24), 184–198. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i24.12577>
- Cando Torres, C. P. (2020). *Análisis comparativo entre NGPON2 y GPON para mejorar el desempeño de las redes pasivas de fibra óptica FTTH*. [Tesis de Maestría, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)]. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14083>
- Casasco, M., Rizzelli, G., Pagano, A., Riccardi, E., Ferrero, V., & Gaudino, R. (2024). Metro-Passive Optical Network Convergence: 400 Gbps Fully Coherent

- Transmission Using Pre-Commercial Transceivers. *Electronics*, 13(13), 2543.  
<https://doi.org/10.3390/electronics13132543>
- Chen, Y., Ming, C., Xie, K., Gao, S., Jiang, Q., Liu, Z., Yao, H., & Dong, K. (2024). All-in-One BPSK/QPSK Switchable Transmission and Reception for Adaptive Free-Space Optical Communication Links. *Photonics*, 11(4), 326.  
<https://doi.org/10.3390/photonics11040326>
- Chico A., L. E. (2021). *Gestión y calidad de servicio para una red IPTV con tecnología GPON* [masterThesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Maestría en Telecomunicaciones].  
<https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/34042>
- Eid, M. M. A., Sorathiya, V., Lavadiya, S., Abd El-Aziz, I. A., & Rashed, A. N. Z. (2025). Free space optics communication channel with amplitude/frequency shift keying modulation technique based raised cosine line coding. *Journal of Optical Communications*, 45(s1), s383–s391. <https://doi.org/10.1515/joc-2021-0037>
- Elamassie, M., & Uysal, M. (2023). Free Space Optical Communication: An Enabling Backhaul Technology for 6G Non-Terrestrial Networks. *Photonics*, 10(11), 1210. <https://doi.org/10.3390/photonics10111210>
- Encalada S., J. P. (2021). *Diseño de escenarios de simulación de la transmisión ascendente/descendente en una red óptica pasiva gigabit (GPON)*. [Trabajo de Titulación de Maestría, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil].  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/17646>

- Fayad, A., Cinkler, T., Rak, J., & Jha, M. (2022). Design of Cost-Efficient Optical Fronthaul for 5G/6G Networks: An Optimization Perspective. *Sensors*, 22(23), 9394. <https://doi.org/10.3390/s22239394>
- Feng, N., Ma, M., Zhang, Y., Tan, X., Li, Z., & Li, S. (2023). Key Technologies for a Beyond-100G Next-Generation Passive Optical Network. *Photonics*, 10(10), 1128. <https://doi.org/10.3390/photonics10101128>
- Haro García, J. (2020). *Análisis de Factores Limitantes en la Escalabilidad de Redes ópticas legadas y de nueva generación: Propuesta de soluciones basadas en la gestión de la polarización* [PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.65781>
- He, J., Lee, J., Kandeepan, S., & Wang, K. (2020). Machine Learning Techniques in Radio-over-Fiber Systems and Networks. *Photonics*, 7(4), 105. <https://doi.org/10.3390/photonics7040105>
- Heredia S., V. F. (2016). *Diseño de una red FTTH para la utilización de servicios de los operadores de telecomunicaciones en la ciudad de Cuenca* [Tesis de Maestría, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/25833>
- 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>
- Iqbal, M., Velasco, L., Ruiz, M., Costa, N., Napoli, A., Pedro, J., & Comellas, J. (2023). Supporting Heterogenous Traffic on Top of Point-to-Multipoint Light-Trees. *Sensors*, 23(5), 2500. <https://doi.org/10.3390/s23052500>

- Kumar, S., Mishra, A., Pagare, R. A., & Marques, C. (2024). Advance Transceiver Mechanisms Enabling FOAN. En S. Kumar, A. Mishra, R. A. Pagare, & C. Marques, *Future Optical Access Network* (pp. 75–98). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-4371-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-97-4371-1_3)
- Lam, C. F., Yin, S., & Zhang, T. (2022). Overview of fiber access architectures and mature PON standards. En *Advanced Fiber Access Networks* (pp. 23–41). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85499-3.00007-2>
- Madrazo L., J. (2018). *Análisis y estudio de soluciones para fronthaul radio* [Trabajo Final de Maestría, Universitat Oberta de Catalunya]. <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/72005/7/javimloriteTFM0118memoria.pdf>
- Mansilla Yanqui, J. (2021). Diseño de una Red GPON aplicada a un sistema de comunicaciones de buses de transporte de alta velocidad (BRT). *Perfiles de Ingeniería*, 17(17). [https://doi.org/10.31381/perfiles\\_ingenieria.v17i17.4577](https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v17i17.4577)
- Martin, V., Brito, J. P., Escribano, C., Menchetti, M., White, C., Lord, A., Wissel, F., Gunkel, M., Gavignet, P., Genay, N., Le Moul, O., Abellán, C., Manzalini, A., Pastor-Perales, A., López, V., & López, D. (2021). Quantum technologies in the telecommunications industry. *EPJ Quantum Technology*, 8(1), 19. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00108-9>
- Masouros, C., & Alsusa, E. (2007). A Novel Transmitter-Based Selective-Precoding Technique for DS/CDMA Systems. *IEEE Signal Processing Letters*, 14(9), 637–640. <https://doi.org/10.1109/LSP.2007.896196>

- Merayo, N., de Pintos, D., Aguado, J. C., de Miguel, I., Durán, R. J., Fernández, P., Lorenzo, R. M., & Abril, E. J. (2021). An Experimental OpenFlow Proposal over Legacy GPONs to Allow Real-Time Service Reconfiguration Policies. *Applied Sciences*, *11*(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/app11030903>
- Minelli, L. (2022). *Optimization strategies for high speed Passive Optical Networks* [Tesis de Maestría, Politecnico Di Torino]. <https://webthesis.biblio.polito.it/23637/1/tesi.pdf>
- Mohsen, D. E., Hammadi, A. M., & Al-Askery, A. J. (2022). WDM and DWDM based RoF system in Fiber Optic Communication Systems: A review. *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, *13*(1). <https://doi.org/10.17762/ijcnis.v13i1.4887>
- Mycek, M., & Żotkiewicz, M. (2019). On optimal trajectory for the multi-period evolution of FTTx networks. *Telecommunication Systems*, *71*(3), 353–376. <https://doi.org/10.1007/s11235-018-0503-8>
- 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>
- Payes, L. F., Lombardero, O. G., & Toranzos, V. J. (2020). Diseño de un transmisor de datos con modulación FSK en banda HF para un sistema de telemetría. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, *6*, 240. <https://doi.org/10.30972/eitt.604397>

- Peliza, C., & Alfaro, L. (2024). Diseño de un sistema distribuido para gestión de OLT. *Revista Ingeniería*, 8(22), 163–175.  
<https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v8i22.125>
- Rashed, A. N. Z., & Tabbour, M. S. F. (2019). The Engagement of Hybrid Dispersion Compensation Schemes Performance Signature for Ultra Wide Bandwidth and Ultra Long Haul Optical Transmission Systems. *Wireless Personal Communications*, 109(4), 2399–2410. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06687-2>
- Rashed, A. N. Z., Tabbour, M. S. F., & El-assar, M. (2019). 20 Gb/s Hybrid CWDM/DWDM for Extended Reach Fiber to the Home Network Applications. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 89(4), 653–662. <https://doi.org/10.1007/s40010-018-0526-2>
- Rentería B., L. F., Haro M., E. D., Mayacela R., C. M., & Jínez T., J. L. (2025). Estudio del efecto de la modulación en la tasa de error de la transmisión de datos usando la técnica Data Over Sound sobre FM (DoS FM). *Tesla Revista Científica*, 5(1), e470. <https://doi.org/10.55204/trc.v5i1.e470>
- Roperó T., D., Puerto L., K., & Guevara I., D. (2020). Evaluación de un sistema de comunicación óptico empleando modulación por desplazamiento de fase QPSK, 8PSK y 16PSK utilizando la técnica FDM. *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 8(2), 76–83.  
<https://doi.org/10.15649/2346030X.709>
- Saliou, F. (2010). *Study of solutions to extend the reach of optical access networks* [PhD Thesis, Télécom ParisTech]. <https://pastel.hal.science/pastel-00566249>

- Sánchez-Azqueta, C., Guerrero, E., Gimeno, C., & Celma, S. (2019). A Reconfigurable Radio-Frequency Converter IC in 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS. *Electronics*, 8(10), 1146.  
<https://doi.org/10.3390/electronics8101146>
- Sapundzhi, F., Zarev, B., Georgiev, S., Zaharieva, S., Popstoilov, M., & Lazarova, M. (2025). Design and Implementation of a Passive Optical Network for a Small Town. *The 14th International Scientific Conference TechSys 2025—Engineering, Technologies and Systems*, 40.  
<https://doi.org/10.3390/engproc2025100040>
- Singh, R., & Kumar, M. (2025). Performance analysis of NGPON using hybrid GPON-XGPON based robust long-haul passive optical communication network. *Journal of Optical Communications*, 45(s1), s2467–s2474.  
<https://doi.org/10.1515/joc-2023-0235>
- Straullu, S., Abrate, S., & Gaudino, R. (2015). Self-Coherent Reflective Passive Optical Networks. En Moh. Yasin, H. Arof, & S. W. Harun (Eds.), *Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications*. InTech.  
<https://doi.org/10.5772/58999>
- 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)
- Tene M., Y. M. (2021). *Análisis comparativo de las variantes de la modulación por desplazamiento de fase en sistemas de radio sobre fibra en redes GPON*.

[Trabajo de Titulación de Maestría, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/16582>

- Torres-Ferrera, P., Effenberger, F., Faruk, M. S., Savory, S. J., & Gaudino, R. (2022). Overview of high-speed TDM-PON beyond 50 Gbps per wavelength using digital signal processing [Invited Tutorial]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 14(12), 982. <https://doi.org/10.1364/JOCN.468920>
- Tripathy, A., & Dash, A. (2023). A Comparative Analysis of Linear Modulation Schemes in the Presence of FLI in Wireless Optical Systems. En T. A. Tabbakh (Ed.), *Optical Fiber and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109841>
- Ullah, R., Ullah, S., Khan, J., Al-Atawi, A. A., & Alwageed, H. S. (2024). Efficient optical fiber communication in the metro access domain based on an optical multicarrier source. *Microwave and Optical Technology Letters*, 66(1), e33883. <https://doi.org/10.1002/mop.33883>
- Vásquez B., F. J. (2020). *Análisis del comportamiento de la señal OFDM al pasar por un canal óptico con receptor no coherente en redes pon* [bachelorThesis, Quito, 2020.]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20750>
- Xin, X., Liu, B., Zhang, L., & Yu, J. (2011). 40-Gb/s FSK modulated WDM-PON with variable-rate multicast overlay. *Optics Express*, 19(13), 12515. <https://doi.org/10.1364/OE.19.012515>
- Zuñiga G., I. G. (2023). *Análisis del rendimiento de una red FTTH basada en la arquitectura GPON-WDM utilizando el simulador OptiSystem* [Trabajo de Titulación, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil].

<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/20897/1/T-UCSG-PRE-TEC-ITEL-434.pdf>