



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

TEMA:

Análisis comparativo de las técnicas de modulación DPSK y QPSK en una red GPON-FTTH mediante simulación en Python.

AUTOR:

Ing. Cabrera Ulloa, Héctor Felipe.

**Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES.**

TUTOR:

MSc. Ubilla González, Ricardo Xavier

Guayaquil, Ecuador

13 de marzo de 2025



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Cabrera Ulloa, Héctor Felipe** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

MSc. Ubilla González, Ricardo Xavier

DIRECTOR DEL PROGRAMA

PhD. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo

Guayaquil, a los 13 días del mes de marzo del año 2025



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Cabrera Ulloa, Héctor Felipe**

DECLARO QUE:

El trabajo de titulación **Análisis comparativo de las técnicas de modulación DPSK y QPSK en una red GPON-FTTH mediante simulación en Python**, previa a la obtención del grado Académico de **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 científico del trabajo de titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, a los 13 días del mes de marzo del año 2025

EL AUTOR

Cabrera Ulloa, Héctor Felipe



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, **Cabrera Ulloa, Héctor Felipe**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría titulada: **Análisis comparativo de las técnicas de modulación DPSK y QPSK en una red GPON-FTTH mediante simulación en Python**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 13 días del mes de marzo del año 2025

EL AUTOR

Cabrera Ulloa, Héctor Felipe

REPORTE COMPILATIO



TESIS FELIPE CABRERA MET 2024 UCSG_2025-02-05 04_08_11



Nombre del documento: TESIS FELIPE CABRERA MET 2024 UCSG_2025-02-05 04_08_11.docx
ID del documento: 9098b8d23ed0bba9fed94023dce9f05979d3fcbc
Tamaño del documento original: 2,27 MB
Autores: []

Depositante: Ricardo Xavier Ubilla Gonzalez
Fecha de depósito: 4/2/2025
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 4/2/2025

Número de palabras: 14,411
Número de caracteres: 93.231

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	localhost Diseño de escenarios de simulación de la transmisión ascendente/desce... http://localhost:8080/vmlu/bltstream/3317/17646/3/T-UCSG-POS-MTEL-206.pdf.txt 83 fuentes similares	3%		🔗 Palabras idénticas: 3% (451 palabras)
2	localhost Evaluación del rendimiento del sistema de multiplexación por división de ... http://localhost:8080/vmlu/bltstream/3317/17672/3/T-UCSG-POS-MTEL-210.pdf.txt 73 fuentes similares	3%		🔗 Palabras idénticas: 3% (444 palabras)
3	localhost Análisis comparativo de esquemas de modulación y codificación binaria e... http://localhost:8080/vmlu/bltstream/3317/17873/3/T-UCSG-POS-MTEL-215.pdf.txt 70 fuentes similares	3%		🔗 Palabras idénticas: 3% (445 palabras)
4	localhost Diseño y cuantificación para el despliegue de una red de planta externa ... http://localhost:8080/vmlu/bltstream/3317/7396/3/T-UCSG-POS-MTEL-65.pdf.txt 72 fuentes similares	3%		🔗 Palabras idénticas: 3% (447 palabras)
5	localhost Implementación de escenarios de simulación mediante técnicas de modu... http://localhost:8080/vmlu/bltstream/3317/15879/3/T-UCSG-POS-MTEL-186.pdf.txt 66 fuentes similares	3%		🔗 Palabras idénticas: 3% (431 palabras)

Ing. Ricardo Xavier Ubilla González, Msc
DOCENTE-TUTOR

Agradecimientos

Quisiera comenzar agradeciendo a Dios por brindarme la sabiduría y entendimiento para poder lograr esta inmensa meta.

Agradezco a mi tutor de tesis, el M. Sc. Ricardo Ubilla, cuya experiencia, paciencia y apoyo fueron fundamentales para la realización del presente trabajo.

Agradezco a mis padres y hermanos por su amor incondicional y su apoyo constante.

Finalmente, a mi esposa e hijos, su fe en mí ha sido el motor que me permitió culminar este proceso.

Cabrera Ulloa, Héctor Felipe

Dedicatoria

A Dios por ser lo primordial en este proceso de aprendizaje y superación académica, a mi amada esposa e hijos por acompañarme en cada paso dado y no soltar mi mano, a mis padres y hermanos por todo su amor, sacrificio y motivación para seguir adelante.

Cabrera Ulloa, Héctor Felipe



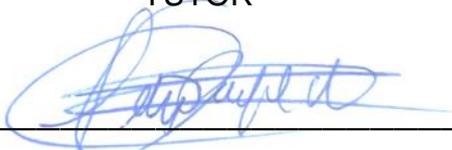
**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

MSc. Ubilla González, Ricardo Xavier

TUTOR

f. 

MSc. Peñafiel Olivo, Kety Jenny

REVISOR

f. 

MSc. Bohórquez Heras, Daniel Bayardo

REVISOR

f. 

PhD . Bohórquez Escobar, Celso Bayardo

DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas.....	XI
Resumen	XIV
Abstract.....	XV
Capítulo 1: Descripción del proyecto de intervención	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes del problema a investigar.	2
1.3. Definición del problema.	3
1.4. Justificación del problema.	3
1.5. Objetivos.	4
1.5.1. Objetivo general.....	4
1.5.2. Objetivos específicos.....	4
1.6. Hipótesis.....	4
1.7. Metodología de investigación.	4
Capítulo 2: Redes de acceso óptico	6
2.1. Visión general del capítulo.	6
2.2. Despliegues de acceso basados en fibra.....	6
2.3. Redes de acceso basadas en fibra	7
2.3.1. Redes Punto a Punto (PtP)	8
2.3.2. Redes ópticas activas (AON).....	9
2.3.3. Redes ópticas pasivas (PON).....	10
2.3.3.1. PON basadas en TDM (TDM-PON).....	10
2.3.3.2. PON basadas en WDM (WDM-PON)	14
2.3.3.3. PON basadas en TWDM híbrida (TWDM-PON)	15
2.3.3.4. Otras tecnologías de multiplexación.	16
2.4. Estandarización.....	18
2.4.1. Primeras redes ópticas pasivas.....	19
2.4.2. Red óptica pasiva con capacidad Gigabit (GPON)	21
2.5. Condiciones de canales PON.....	29

CAPÍTULO 3: Desarrollo y Resultados obtenidos.....	33
3.1. Descripción general sobre las modulaciones DPSK y QPSK en redes GPON-FTTH,	33
3.2. Diseño del modelo de simulación de la red GPON-FTTH	33
3.3. Diseño de pseudocódigos para los escenarios de simulación en la red GPON-FTTH.	35
3.4. Análisis de resultados obtenidos en la simulación de GPON-FTTH...38	
3.4.1. Análisis de resultados obtenidos de la BER en función de la SNR	38
3.4.2. Análisis de resultados obtenidos de la BER en función de la OSNR	40
Conclusiones	43
Recomendaciones	44
Bibliografía	45

Índice de Tablas

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Características de la capa física en los diferentes estándares PON.	19
Tabla 2. 2: Atenuaciones admisibles entre transmisores en estándares PONs.	31
Tabla 2. 3: Características de los dos conjuntos de datos de los despliegues GPON de INEA.	31

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Resumen de la comparativa para la BER vs SNR.	39
Tabla 3. 2: Resumen de la comparativa para la BER vs OSNR.	41

Índice de Figuras

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Terminología utilizada una PON.	8
Figura 2. 2: Arquitectura de una PON punto a punto.	8
Figura 2. 3: Arquitectura de una PON multiplexada por división de tiempo (TDM-PON).....	11
Figura 2. 4: Intervalo de alcance (ranging) temporal en una TDM-PON.	12
Figura 2. 5: Arquitectura de una PON multiplexada por división de longitud de onda.....	15
Figura 2. 6: Estructura de trama descendente GPON.	16
Figura 2. 7: Arquitectura de una PON multiplexada por división de longitud de onda.....	20
Figura 2. 8: Arquitectura de GPON.	21
Figura 2. 9: Rangos de potencia de transmisión y recepción para GPON y XGSPON.	22
Figura 2. 10: Estructura de trama descendente GPON.	23
Figura 2. 11: Estructura de trama ascendente GPON.	23
Figura 2. 12: Formato de trama EPON	25

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Esquemático para el diseño de la red GPON-FTTH.....	33
Figura 3. 2: Estructura jerárquica del paquete OptiComPy de código abierto.	34
Figura 3. 3: Pseudocódigo 1 para la generación de señal modulada por DPSK.	35
Figura 3. 4: Pseudocódigo 2 para la generación de señal modulada por QPSK.	36
Figura 3. 5: Comportamiento de las señales moduladas QPSK y DPSK ante variaciones de la frecuencia de portadora.	37

Figura 3. 6: Pseudocódigo 3 para la transmisión de la señal modulada en el canal óptico.....	37
Figura 3. 7: Pseudocódigo 4 para la decodificación de la señal modulada y obtención de la BER.	38
Figura 3. 8: Gráfica comparativa del rendimiento de la BER frente a la SNR.	39
Figura 3. 9: Gráfica comparativa del rendimiento de la BER frente a la OSNR.	40
Figura 3. 10: Diagramas de constelación para los esquemas de modulación QPSK y DPSK.	42

Resumen

En el presente documento se presenta el “Análisis comparativo de las técnicas de modulación DPSK y QPSK en una red GPON-FTTH mediante simulación en Python”. El tema fue propuesto con la finalidad de demostrar que no es necesario adquirir una herramienta de simulación, como por ejemplo OptiSystem, en su lugar se utilizará el lenguaje de programación Python y su librería OpticomPy, la cual permite simular entornos optimizando parámetros de redes de comunicación y así brindar eficiencia en la transmisión de datos. En el capítulo 1, se presenta la descripción general del trabajo de titulación, entre lo temas que más se destacan es la definición del problema a investigar, el objetivo general, los objetivos específicos y la metodología de investigación que se utilizó. En el capítulo 2, se presenta la revisión de literatura de las redes de acceso óptico, con sus respectivos estándares. En el capítulo 3, se presente el diseño de algoritmos de simulación en Python y también se utiliza un paquete computacional muy utilizado por investigadores de comunicaciones ópticas, que se denomina “OptiComPy”. Además, se muestran gráficamente y se analizan los resultados obtenidos para evaluar el rendimiento de la red GPON-FTTH y elegir adecuadamente el formato de modulación que se adapte mejor y muestra robustez.

Palabras claves: Modulación, Fase, Comunicaciones, GPON, FTTH, Python

Abstract

This paper presents the “Comparative analysis of DPSK and QPSK modulation techniques in a GPON-FTTH network using Python simulation”. The topic was proposed in order to demonstrate that it is not necessary to acquire a simulation tool, such as OptiSystem, instead the Python programming language and its OpticomPy library will be used, which allows simulating environments by optimizing communication network parameters and thus provide efficiency in data transmission. In chapter 1, the general description of the degree work is presented, among the most important topics are the definition of the research problem, the general objective, the specific objectives and the research methodology used. Chapter 2 presents the literature review of optical access networks, with their respective standards. In chapter 3, the design of simulation algorithms in Python is presented and a computational package called “OptiComPy”, which is widely used by optical communications researchers, is also used. Furthermore, the results obtained are graphically displayed and analyzed to evaluate the performance of the GPON-FTTH network and to properly choose the modulation format that best suits and shows robustness.

Keywords: Modulation, Phase, Communications, GPON, FTTH, Python, Python

Capítulo 1: Descripción del proyecto de intervención

1.1. Introducción

La fibra óptica y su uso en sistemas de comunicación digitales han revolucionado las telecomunicaciones. Este medio de transmisión de señales ha ido ganando protagonismo sobre los cables de cobre, los enlaces de microondas y los satélites, que se utilizaban para las comunicaciones telefónicas y los inicios de Internet. La llegada de la fibra óptica a la red de acceso, el último segmento de la red entre el cliente y operador ha permitido democratizar las transmisiones de muy alta velocidad en el hogar.

La Fibra hasta el Hogar (Fiber To The Home, FTTH) se está desplegando a gran escala en muchos países, impulsada por el deseo de los operadores de sustituir la histórica infraestructura de cobre y ser competitivos, pero también por la motivación de los gobiernos de ofrecer conexiones de alta velocidad a sus ciudadanos como prueba de su poder político.

Esta tesis se centra en el uso de fibra específicamente en la red de acceso. La fibra óptica permite transferir una señal en forma óptica a lo largo de todo el trayecto entre una entidad perteneciente al operador (la central) y un terminal individual situado lo más cerca posible del abonado, o incluso en las instalaciones del abonado. El despliegue de la fibra óptica está sustituyendo a tecnologías más antiguas, la más extendida de las cuales era la Línea de Abonado Digital Asimétrica (ADSL), cuyo soporte era el par trenzado. Estas tecnologías se conocen comúnmente como xDSL.

Existen varias soluciones de arquitectura de fibra. Este estudio se enfoca en la arquitectura de red óptica pasiva (Passive Optical Network, PON). Esta arquitectura se basa en la transmisión punto a multipunto, en la que los distintos abonados comparten una línea común en una parte de la transmisión. Las comunicaciones se basan en el tiempo compartido del canal.

PON no tiene equipos que necesiten energía para funcionar entre la central y el abonado, lo que define el carácter pasivo de la red.

Existen varias dimensiones y configuraciones posibles para las PONs. En Ecuador, la más extendida implica una distancia máxima de transmisión de 20 km, con cada enlace óptico compartido entre 64 abonados. Esto permite alcanzar velocidades de hasta 750 Mbps por hogar y garantizar una conexión de “muy alta velocidad” (superior a 60 Mbps) a todos los conectados a la fibra.

La red de acceso de fibra óptica puede soportar varios tipos de tecnología. Una de ellas es la tecnología PON con capacidad Gigabit (Gigabit PON, GPON), que permite compartir transmisiones ópticas de 2.5 Gbps entre abonados. En los próximos años, la tecnología 10-Gigabit Cable (simétrica) (XG(S) PON) podrá ofrecer velocidades de línea de 10 Gbps. Por ello, los organismos de normalización y la comunidad investigadora se centran en las características y velocidades específicas que ofrecerán las próximas generaciones de redes de acceso óptico. Los trabajos realizados en esta tesis tienen un tema común: Analizar comparativamente las técnicas de modulación DPSK y QPSK en una red GPON-FTTH mediante simulación en Python

1.2. Antecedentes del problema a investigar.

GPON, combinada con la tecnología FTTH, resulta fundamental para atender la demanda creciente de Internet de alta velocidad y transmisión eficiente de datos en aplicaciones residenciales y comerciales. En este sentido, hay técnicas de modulación como DPSK (Differential Phase-Shift Keying) y QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) que contribuyen en gran medida a determinar el rendimiento del sistema de comunicaciones ópticas. Además, el análisis comparativo de estas técnicas en redes GPON-FTTH demuestra la importancia de la eficiencia del ancho de banda, la resistencia al ruido y la complejidad de la implementación. (Khan, 2022; Musumeci et al., 2018)

Diversos estudios en redes ópticas destacan la eficacia de QPSK para obtener mayores velocidades de datos debido a su capacidad para la

transmisión de dos bits por símbolo, lo que lo hace adecuado para escenarios con limitaciones de ancho de banda. Por otra parte, DPSK destaca por su arquitectura de receptor más sencilla y una mayor resistencia al ruido de fase, aspecto crítico en sistemas GPON con distancias largas y múltiples splitters (Meng, 2018). Gracias a estas características, las compensaciones de rendimiento entre DPSK y QPSK son un tema de gran interés en los despliegues de redes FTTH modernas.

Además, las investigaciones indican un creciente interés en aprovechar estas técnicas de modulación en redes ópticas con limitaciones realistas, tales como cargas de red variables y otros factores del entorno, para lo cual las herramientas de simulación desempeñan un rol determinante. Diversas publicaciones en IEEE y otras plataformas académicas han destacado los avances en las herramientas de simulación, que han permitido realizar comparaciones precisas del rendimiento y han contribuido a la optimización de redes para despliegues FTTH (Khan, 2022; Meng, 2018). En este trabajo de tesis se realiza una comparativa basada en simulaciones de las técnicas de modulación DPSK y QPSK sobre una GPON-FTTH.

1.3. Definición del problema.

Necesidad de implementar algoritmos de las técnicas de modulación DPSK y QPSK usadas en redes GPON-FTTH mediante el uso de la librería OptiComPy de Python enfocado al estudio de redes de comunicaciones ópticas, y poder analizar por medio de una comparación ambas técnicas de modulación y así identificar la más idónea en cuestión de rendimiento de la red.

1.4. Justificación del problema.

Este proyecto de titulación tiene como objetivo principal la comparación de dos técnicas de modulación digital, DPSK y QPSK, basadas en la tecnología FTTH sobre una GPON mediante el uso del software de programación y simulación Python. Sobre este software se desarrollará el modelo de red GPON-FTTH, en el cual se implementarán algoritmos de las técnicas de modulación ya mencionadas para evaluar su desempeño bajo

diversas condiciones de la red. Además, el presente estudio se basa en analizar las métricas de la red, tales como, eficiencia espectral, relación señal-ruido (Signal-to-Noise Rate, SNR), tasa de error de bits (Bits Error Rate, BER), y la capacidad de la red.

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo general.

Realizar el análisis comparativo de las técnicas de modulación DPSK y QPSK en una red GPON-FTTH mediante simulación en Python para identificar la técnica más apropiada para un mejor rendimiento de la red.

1.5.2. Objetivos específicos.

- ✓ Describir los fundamentos teóricos de las redes de acceso óptico, estándares y arquitecturas de las redes ópticas pasivas (PON).
- ✓ Implementar el modelo de simulación de GPON-FTTH mediante algoritmos en Python utilizando la librería OptiComPy.
- ✓ Análisis y comparación de los resultados obtenidos de las técnicas de modulación DPSK y QPSK en una GPON-FTTH.

1.6. Hipótesis.

En el presente trabajo se propone la hipótesis de que la QPSK supera a la DPSK en términos de eficiencia de ancho de banda y velocidad de transmisión de datos en redes GPON-FTTH, a pesar de que DPSK presenta una mayor resistencia al ruido y simplicidad de implementación. Para ello, se llevarán a cabo simulaciones basadas en Python en las que se evaluarán métricas de rendimiento tales como, la BER, la SNR y la capacidad de la red.

1.7. Metodología de investigación.

En esta tesis se adopta un enfoque basado en simulaciones con el que se comparan las técnicas de modulación DPSK y QPSK en una red GPON-FTTH. A continuación, se presentan las etapas del proceso:

1. Fundamentos teóricos: la revisión de literatura de trabajos publicados para establecer los fundamentos teóricos e identificar las

métricas de rendimiento en redes ópticas para DPSK y QPSK (Musumeci et al., 2018; Meng, 2019).

2. Modelado del sistema: Diseño del entorno de simulación basado en Python que permita modelar de forma sencilla redes GPON-FTTH con esquemas de modulación DPSK y QPSK incorporados.
3. Métricas de rendimiento: Análisis de métricas tales como BER, SNR, eficiencia espectral

Esta metodología permite realizar una evaluación exhaustiva y coherente de las dos técnicas de modulación, proporcionando información útil para optimizar las redes GPON-FTTH.

Capítulo 2: Redes de acceso óptico

2.1. Visión general del capítulo.

Este capítulo ofrece una visión general de las redes de acceso. En primer lugar, se analizan la historia y la penetración en el mercado de las redes de acceso basadas en fibra, seguidas de las distintas topologías de redes de acceso basadas en fibra. Como la mayoría de estas topologías implican la comunicación con múltiples usuarios a través del mismo canal, se requieren técnicas de multiplexación. Por la misma razón, se requiere la interoperabilidad de los componentes, que sólo puede lograrse mediante la normalización. Una vez analizado el entorno de las redes de acceso, se muestra la aplicabilidad de la adaptación de enlaces en las PON, presentando estadísticas sobre la gama de calidades de canal en una PON. Por último, se ofrece una visión general de las técnicas de adaptación de enlaces en otros campos.

2.2. Despliegues de acceso basados en fibra.

Los primeros modelos experimentales de soluciones basadas en fibra para las redes de acceso se realizaron hace más de 40 años (Zacharias et al., 2018). La primera prueba de este tipo con consumidores finales se instaló cerca de Nara (Japón) en 1977. En los años siguientes, se realizaron muchas otras pruebas en varios países, como Inglaterra, Alemania, Francia, Estados Unidos y Canadá. (Ali et al., 2021)

Las pruebas supusieron un éxito desde el punto de vista técnico, sin embargo, los elevados costes de instalación ocasionaron un fuerte retraso respecto a la incorporación y uso generalizado de la tecnología de fibra a las redes de acceso. Dado que los componentes ópticos eran una tecnología nueva y de bajo volumen, los costes por consumidor eran muy elevados. (Asgarirad & Jahromi, 2020; Uzunidis et al., 2022)

Frente a los costes de instalación de las tecnologías de la competencia, situados en torno a los \$ 1,000.00 por consumidor, los costes de instalación de estas primeras pruebas se situaban entre unos pocos miles de dólares e

incluso \$ 100,000.00 por consumidor (Abdellaoui et al., 2021). Mientras en las redes metropolitanas y de largas distancias dichos costes podían ser repartidos entre varios consumidores, las FTTH tenían que cubrirse con ingresos generados por un número limitado de consumidores, o incluso por uno solo. (Hutcheson, 2008; Weis et al., 2009)

Los operadores se mostraban indecisos ante la transición a redes de acceso basadas en fibra, teniendo en cuenta las elevadas inversiones que ya habían realizado en sus actuales redes de cobre. Lo que retrasó aún más la incorporación de la fibra fue la falta de certeza en cuanto al posible aumento de los ingresos. Puesto que Internet se encontraba aún en sus primeras fases de desarrollo, tales como, la televisión y telefonía constituían las principales aplicaciones, y se contemplaban limitadas aplicaciones que requirieran el mayor ancho de banda (Bandwidth, BW) simétrico proporcionado por las redes de fibra. (Sudtasan, 2018)

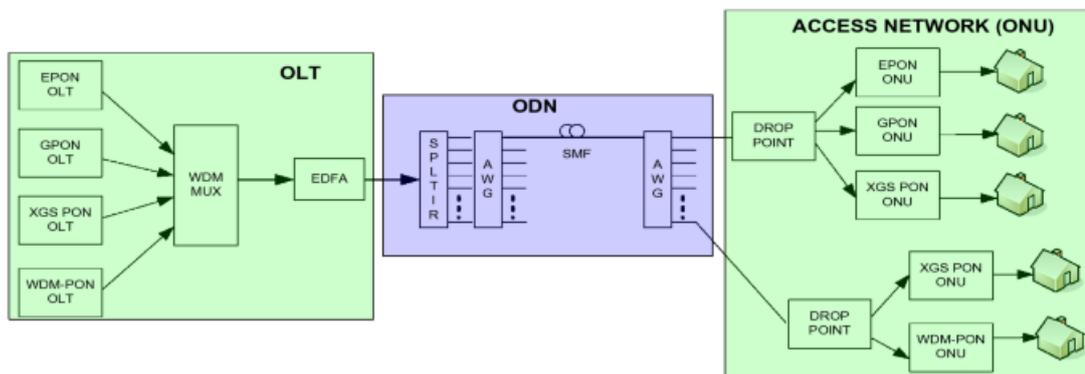
Pese a este lento desarrollo, la tecnología FTTH ha adquirido un gran protagonismo, sobre todo en Asia y la región del Pacífico. El 77% de los consumidores de la FTTH/B en todo el mundo se encuentra en Asia/Pacífico, el 15% en Europa y el 5% en Norteamérica (Kazovsky et al., 2011). Se trata del medio de acceso predominante, como en China, Japón y Corea del Sur (Thygesen, 2015). En Europa, FTTH tiene una cobertura del 45% de los hogares, de los cuales el 30% de esta terminan formando parte de la clientela, y ambos porcentajes están creciendo. (Briglaue & Gugler, 2013; Muciaccia et al., 2014)

2.3. Redes de acceso basadas en fibra

Las redes de acceso basadas en fibra pueden categorizarse en tres tipos de arquitecturas: (1) PON basadas en multiplexación por división de tiempo (Time Division Multiplexing PON, TDM-PON), (2) PON basadas en Punto a Punto (Point to Point, PtP), (3) PON basadas en multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing PON, WDM-PON). Por ejemplo, las redes PtP conectan a cada usuario con una fibra individual (Lam et al., 2022; Pfeiffer, 2020).

Las redes ópticas activas (Active Optical Network, AON) permiten conectar varios usuarios mediante una única fibra de alimentación y requieren componentes activos desplegados sobre el terreno (Skubic & Wosinska, 2020). Por último, las PON también conectan a múltiples usuarios con una única fibra, pero no precisan componentes activos externos (Horvath et al., 2020). La terminología de las distintas partes de una PON se muestra en la Figura 2.1.

Figura 2. 1: Terminología utilizada una PON.

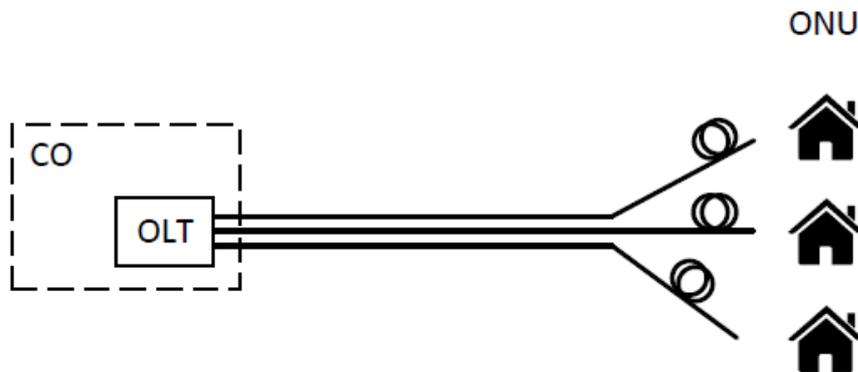


Fuente: (Verma & Garg, 2023)

2.3.1. Redes Punto a Punto (PtP)

Las redes punto a punto son las más simples en cuanto a la arquitectura de esta. Una fibra dedicada enlaza la OLT con cada ONU, tal como se ilustra en la Figura 2.2. No se insertan componentes adicionales. El tráfico ascendente (desde OLT hacia ONU) y el descendente (desde ONU hacia OLT) emplean dos longitudes de onda distintas en la misma fibra. (Koonen, 2006; Lam, 2007; Lam et al., 2022)

Figura 2. 2: Arquitectura de una PON punto a punto.



Fuente:(Koonen, 2006)

A veces se utilizan dos fibras distintas para la comunicación ascendente y descendente. La ventaja de las redes PtP es que cada enlace es totalmente independiente, de manera que las conexiones pueden modificarse o suprimirse sin interferir con los demás usuarios. Las actualizaciones de los componentes pueden hacerse por usuario. Además, la seguridad de los datos es otra gran ventaja: al tener cada usuario su propia fibra, los usuarios cercanos no podrán interceptar los datos. (Aweya, 2024; Caruso, 2024)

Una ventaja a menudo citada de las redes PtP es el BW dedicado disponible para cada usuario entre la OLT y la ONU, si bien debe tenerse en cuenta que los datos que salen de la OLT hacia las redes metropolitanas y centrales continúan multiplexados con otros flujos de datos, lo cual anula en gran medida esta mencionada ventaja en una red bien gestionada. (Bala, 2021; Lam & Yin, 2020)

Sus desventajas son el gran número de fibras requeridas y, aún más importante, el elevado número de transceptores (transmisores-receptores) en la OLT. En una sola oficina central (Central Office, CO) pueden conectarse hasta miles de usuarios, lo que exige la misma cantidad de transceptores, con el correspondiente consumo de espacio y energía. Es más, si un conducto de fibra próximo a la CO resulta afectado, por ejemplo, por obras de construcción, habrá que identificar y reparar miles de fibras. (Harstead & Van Heyningen, 2002; Turna, 2014)

A pesar de que otras tecnologías de acceso de red basadas en fibra han ganado popularidad, la PtP se ha desplegado de forma significativa, en nuestro país este tipo de red PtP se utiliza en servicios corporativos.

2.3.2. Redes ópticas activas (AON)

Dentro de las redes ópticas activas, una única fibra de alimentación une la OLT a un conmutador activo ubicado en el nodo remoto (Remote Node, RN) más cercana a los usuarios o clientes. A su vez, este conmutador activo conecta las diversas fibras de distribución a la fibra de alimentación. De este modo se reducen los costes, ya que sólo se precisa una única fibra de

alimentación y varias fibras de distribución cortas. (Loong, 2018; Uzunidis et al., 2022)

Esta estructura facilita una mejor utilización de la fibra de alimentación y de los transceptores a través de la agregación estadística de las demandas de tráfico de los usuarios. Por otra parte, requiere energía eléctrica en la RN. Puesto que el RN suele constar de un armario en la calle, puede que no se disponga fácilmente de energía eléctrica. Además, la RN no se suele climatizar, lo que pone a prueba los componentes instalados (Forzati & Gavler, 2013; Lallukka & Raatikainen, 2006). A diferencia de la Fibra hasta la Cabina (Fiber To The Cabinet, FTTC), la fibra termina en la residencia del usuario y no en el nodo remoto. (Muciaccia et al., 2014)

Las diferencias entre redes AON y PtP no siempre están claramente definidas; muchas instalaciones prácticas pueden agruparse en cualquiera de las dos categorías. Una red puede componerse de varios puntos de presencia (Points of Presence, PoP) con conmutadores activos incorporados. El último conmutador puede ser considerado el nodo remoto, lo que clasifica la red como AON, o puede tratarse del último conmutador de la CO, lo que clasifica la red como PtP. (Mahloo et al., 2015; Wang et al., 2016)

2.3.3. Redes ópticas pasivas (PON)

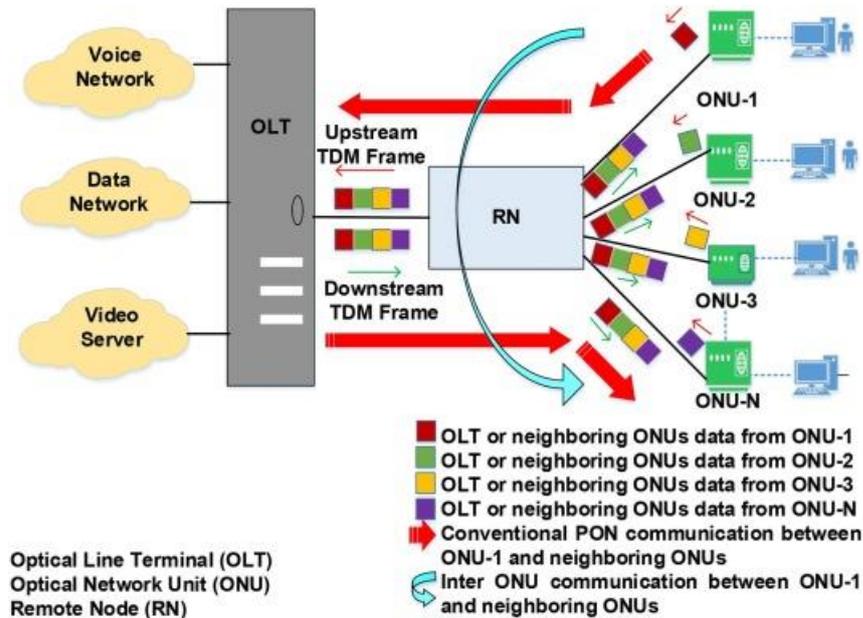
Finalmente, las PONs reemplazan el conmutador activo en la RN por un componente pasivo. Un protocolo adicional es requerido a fin de facilitar la multiplexación de canales de datos procedentes de múltiples usuarios en la fibra de alimentación. Las PONs pueden ser subdivididas en base a la forma en que se efectúa esta multiplexación. En la siguiente sección se examinan los tres métodos más comunes: TDM, WDM y multiplexación por división de tiempo y longitud de onda (Time Wavelength Division Multiplexing, TWDM). Asimismo, se describen brevemente las próximas técnicas de multiplexación.

2.3.3.1. PON basadas en TDM (TDM-PON)

El componente que habilita la PON multiplexada por división de tiempo (TDM-PON) es el divisor de potencia pasivo de la RN, tal y como se muestra

en la Figura 2.3. El divisor de potencia reparte la potencia óptica por igual entre las distintas ONU. Esta característica de paso total del divisor de potencia requiere, que las ONU compartan un mismo canal de comunicación (Esmail & Fathallah, 2013; Turna, 2014).

Figura 2. 3: Arquitectura de una PON multiplexada por división de tiempo (TDM-PON).



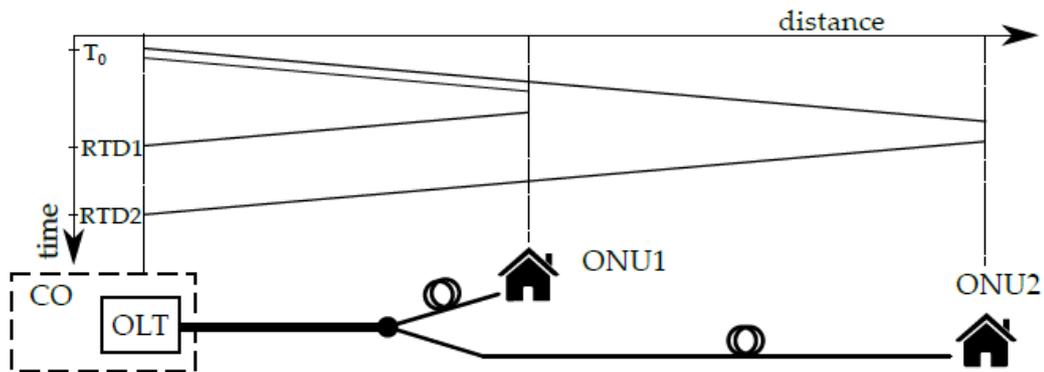
Fuente: (Ahmed et al., 2024)

La capa MAC asigna ranuras horarias a los distintos ONUs, y los ONUs decodifican la información en su franja horaria asignada. Del mismo modo, en la sentido ascendente, se asigna a las ONU una franja horaria específica durante la cual pueden transmitir. Durante este proceso de “alcance o ranging”, la capa MAC debe asignar los desfases de propagación entre las distintas ONUs y la OLT para evitar colisiones en la OLT a causa de las distintas longitudes de fibra en un proceso de alcance. (Zheng & Mouftah, 2009)

Dicho proceso mide el retardo de ida y vuelta entre la OLT y las distintas ONUs. Para ello, la OLT emite una subvención de ranging a cada ONU; una vez recibida, la ONU responde con una celda de ranging a la OLT, tal como se observa en el esquemático de la Figura 2.4. Posteriormente, la OLT ajusta la sincronización de las concesiones a las ONUs, de tal forma que todas las ONUs estén sincronizadas dentro de la distancia máxima soportada. Si bien

este proceso evita las colisiones, su precisión es limitada. No es capaz de sincronizar exactamente los relojes y la llegada de símbolos a nivel de subsímbolo. En la sección 2.4 se tratan más detalles sobre la capa MAC para dos estándares de TDM-PON.

Figura 2. 4: Intervalo de alcance (ranging) temporal en una TDM-PON.



Fuente:(Koonen, 2006)

El requisito de operación de modo ráfaga se aplica específicamente a las direcciones ascendentes. Idealmente, ninguna de las ONU debe transmitir potencia cuando no existe una franja horaria asignada, para evitar distorsiones a los demás usuarios. Únicamente cuando se asigna una franja horaria se enciende el láser de la ONU, lo que plantea rigurosos requisitos a los efectos transitorios de los transmisores de la ONU. (Hossain & Hossain, 2019)

Por ejemplo, en la normativa GPON, los transmisores ONU se deben encender y apagar en 13 ns (Esmail & Fathallah, 2013). Dicha norma se describe con más detalle en el apartado 2.4.2. Como consecuencia de las diferentes pérdidas en la red óptica y de las potencias de transmisión, las ráfagas de los ONUs se reciben con distintos niveles de potencia en el receptor OLT. (Uzunidis et al., 2022)

El OLT receptor debe poder adaptarse a estos paquetes que varían en cuanto a niveles de potencia, frecuencia de reloj y fase. Esto implica que se precisa un gran rango dinámico y una rápida recuperación reloj-datos (Clock-Data Recovery, CDR). Para facilitar esto, cada paquete arranca con un preámbulo que alivia los transitorios del transmisor y sirve de secuencia de

entrenamiento para el receptor. Además, se inserta un tiempo de protección entre las ráfagas de diferentes ONU. Tanto el preámbulo como el tiempo de guarda reducen la eficiencia, ya que durante ese tiempo no pueden transmitirse datos de usuario. (Houtsma & Van Veen, 2024)

Una desventaja de la tecnología TDM-PON es la alta pérdida del divisor de potencia. Con proporciones de división típicas de hasta 1:64, cada ONU recibe sólo una parte de la potencia transmitida, lo que plantea estrictos requisitos al presupuesto de potencia del enlace (Turna, 2014; Uzunidis et al., 2022). Asimismo, los transceptores operan con la velocidad de datos agregada, que habitualmente es mucho mayor que la velocidad de datos requerida por un solo usuario.

Por consiguiente, se incrementa el consumo de energía y el BW que requiere el transceptor de la ONU. Se han llevado a cabo algunas investigaciones para reducir este incremento, como por ejemplo mediante el intercalado de bits, que permite que la electrónica posterior al front-end funcione a una frecuencia de reloj más baja.

Estas desventajas se ven contrastadas por amplias ventajas. El algoritmo de Asignación Dinámica del Ancho de Banda (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA) proporciona gran flexibilidad en la distribución del BW disponible, en función de la demanda de datos de las ONUs, la calidad de servicio (Quality of Service, QoS) y los acuerdos de nivel de servicio (Banerjee et al., 2005). De esta forma se consigue una multiplexación estadística eficaz.

La eficiencia de la red puede verse enormemente mejorada, en especial para el tráfico en ráfagas, como la navegación por Internet y los vídeos que pueden almacenarse en búfer. Por lo tanto, la tecnología TDM-PON suele tener costes de operación y capital más bajos. Más aún, la ODN es totalmente transparente respecto a las diferentes longitudes de onda o formatos de modulación, lo que asegura la posibilidad de actualización a nuevos estándares.

TDM-PON son, con gran diferencia, el tipo más común de PON desplegadas. La primera PON, presentada por British Telecom en 1987, fue una TDM-PON denominada Telefonía sobre PON (Telephony over PON, TPON) (Kani & Van Veen, 2020). Su proyecto consistía en un esquema TDM/TDMA capaz de alcanzar 20.48 Mbps, y unos años más tarde se realizó una prueba de campo en Bishop's Stortford. Treinta años después, la gran mayoría de las PON desplegadas siguen basándose en esquemas TDM.

El despliegue de redes AON/PtP o TDM-PON es una decisión que depende del escenario. Por ejemplo, diferentes zonas geográficas, costes de instalación de cables, espacio disponible para fibras adicionales y densidad de la población, la mejor solución puede ser cualquiera de las dos opciones. En general, cuando hay más consumidores, los costes por usuario son menores para las tecnologías basadas en PON (Mahloo et al., 2015; Uzunidis et al., 2022). Las tecnologías de redes basadas en PON continúan evolucionando.

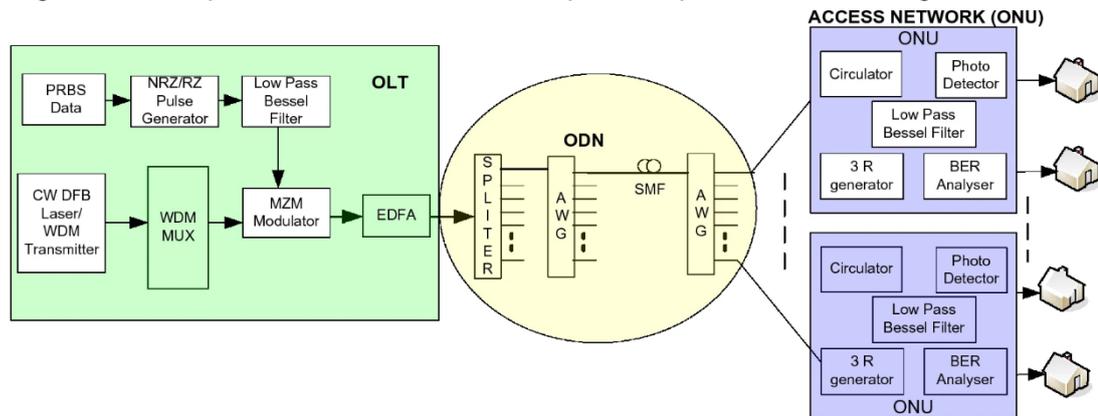
Un acercamiento bastante interesante es la integración de equipos TDM-PON junto con una topología de fibra PtP. Aquí, el divisor de potencia PON se sitúa en la CO, lo que transforma la topología PON en una topología PtP. Este enfoque híbrido brinda una flexibilidad total para futuras implantaciones, ya que cada usuario dispone de una fibra dedicada hacia la CO. Por lo tanto, los usuarios individuales pueden disfrutar de velocidades binarias más altas gracias a las mejoras tecnológicas. Las OLTs se utilizan de forma más eficiente, ya que sólo los consumidores actuales se conectan a la OLT con un cable de conexión. (Skubic et al., 2012; Skubic & Wosinska, 2020)

2.3.3.2. PON basadas en WDM (WDM-PON)

En los PON con multiplexación por división de longitud de onda, se sabe que los usuarios se comunican en diferentes longitudes de onda. Generalmente, se instala una rejilla de guía de ondas (Arrayed Waveguide Grating, AWGr) en la RN (Garg & Janyani, 2017; Hammadi, 2016), tal como se muestra en la Figura 2.5.

Puesto que cada longitud de onda se orienta a una única ONU, se generan conexiones PtP virtuales independientes. Esto quiere decir que cada ONU cuenta con su propio BW propio. La velocidad de datos soportada por el transceptor sólo tiene que satisfacer la velocidad de datos requerida por el usuario, mas no la velocidad de datos agregada de la red. El consumo de energía y la relación de división son mucho menos estrictos, ya que la pérdida de energía en la AWGr es mucho menor y casi independiente al número de ONUs conectadas. (Sales et al., 2016; Tran, 2013)

Figura 2. 5: Arquitectura de una PON multiplexada por división de longitud de onda.



Fuente: (Verma & Garg, 2023)

La asignación fija de una longitud de onda al usuario implica que cada ONU tiene que operar en una longitud de onda diferente. Esto puede lograrse mediante el uso de componentes específicos de longitud de onda en la ONU, lo que puede ocasionar problemas de inventario para el operador, ya que entonces tendrá que disponer de múltiples versiones de la ONU y facilitar la logística necesaria para darles soporte. (Garg et al., 2019)

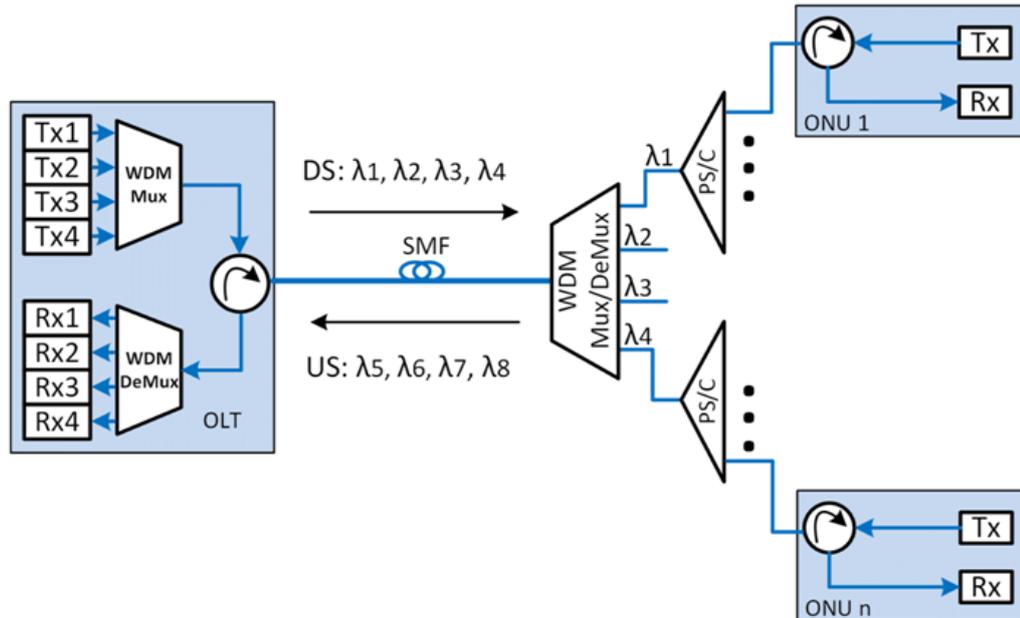
Como alternativa, se puede recurrir a una solución independiente, por ejemplo, transceptores sintonizables, transceptores alimentados externamente, transceptores reflectantes y transceptores autoalimentados, aun cuando estas soluciones independientes del color suelen exigir componentes caros.

2.3.3.3. PON basadas en TWDM híbrida (TWDM-PON)

Las dos técnicas que se acaban de describir se mezclan en una PON con multiplexación por división de tiempo y longitud de onda, tal como se

muestra la Figura 2.6. Una primera implementación consiste en superponer varias redes TDM a través de un WDM fijo, lo que puede resultar más económico que operar en distintas ODN. El uso de amplificación óptica en la OLT junto con una mayor cobertura en el alcance de la red implica menos instalaciones de CO y, por tanto, una reducción de costes. (Luo et al., 2013; Uzunidis et al., 2022)

Figura 2. 6: Estructura de trama descendente GPON.



Fuente: (Elmagzoub et al., 2020)

Una segunda implementación es por medio de una red TWDM flexible en longitud de onda, donde la ODN basada en divisor de potencia se mantiene transparente a las longitudes de onda y la selección se realiza en la ONU. Además, emplear un divisor de potencia garantiza que la ODN resulte compatible con las antiguas TDM-PON y siga manteniéndose transparente para cualquier tecnología futura. Por ello, la tecnología TWDM-PON se perfilan como la arquitectura preferida para los nuevos estándares (Harstead et al., 2018; Lam & Yin, 2020) (que se explica en la sección 2.4).

2.3.3.4. Otras tecnologías de multiplexación.

También existen otras alternativas importantes que han suscitado un gran interés en la investigación. La multiplexación por división de código (Code Division Multiplexing, CDM) y de acceso múltiple (Code Division Multiple Access, CDMA) cuyo empleo se ha generalizado en la comunicación

inalámbrica, por ejemplo, en 3G UMTS. En CDMA, se codifica los datos de cada usuario con un código exclusivo, ortogonal al de los demás usuarios, lo que permite la decodificación en el receptor. (Kumar & Srivastava, 2015; Uzunidis et al., 2022)

Los CDMA-PON típicamente operan en un PON basada en un divisor de potencia, similar a los TDM-PON. Por lo general, el BW requerido resulta muy superior a la velocidad de transmisión de datos. El número de códigos ortogonales está limitado, lo que dificulta la ampliación a un mayor número de usuarios. (Chen et al., 2016)

La multiplexación por división de frecuencia ortogonal/acceso múltiple (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) y de acceso múltiple (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) alcanza un gran rendimiento agregado al combinar múltiples subportadoras ortogonales que se modulan individualmente con sus propios formatos de modulación. (Gill et al., 2018)

Debido a la ortogonalidad de las subportadoras, éstas pueden solaparse sin interferencias y se logra una alta eficiencia de espectro. La tecnología OFDM-PON acostumbra a basarse en divisores de potencia. El principal obstáculo de OFDMA es la complejidad de los transceptores, que dependen en gran medida del procesamiento digital de señales (Liu et al., 2014; Uzunidis et al., 2022). OFDM se utiliza ampliamente en canales con características variables, como DSL, IEEE 802.11 (WiFi) y 4G LTE. (Shahpari et al., 2017)

La tecnología PON con multiplexación por división de longitud de onda ultra densa (Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing PON, UDWDM-PON) está basada en la recepción coherente. La recepción coherente presenta mejoras sustanciales en la sensibilidad de los receptores en contraste con las técnicas tradicionales de modulación de intensidad y detección directa (IM/DD) empleadas en las redes de acceso. (Sales et al., 2016; Teixeira et al., 2020)

El estrecho filtrado sintonizable intrínseco a la recepción coherente permite un espaciado denso de las longitudes de onda y, por tanto, la combinación a gran escala de usuarios en una única PON. Sin embargo, la técnica acostumbra a ser compleja y costosa, en parte debido a que en el mismo receptor se requiere una fuente de luz estabilizada de bajo ancho de línea a modo de oscilador local, y posiblemente de láser de transmisión regular. (Mohammadani et al., 2022)

En las redes de larga distancia, la recepción coherente es técnica predominante, pero los costes de los componentes no se adaptan bien a las redes de acceso. Dado su potencial, se han realizado varias pruebas de campo, pero no se ha producido ninguna estandarización ni planes de despliegue con fines comerciales (Cvijetic, 2012; Shahpari et al., 2017). Sin embargo, con la creciente presión sobre los presupuestos de potencia para tasas de datos más altas, el paso hacia la recepción coherente, y posteriormente hacia UDWDM-PONs, podría ser una posibilidad real. (Mukherjee et al., 2020)

2.4. Estandarización

Desde los primeros esfuerzos de despliegue de las redes FTTH, se vio que las redes de acceso únicamente podrían tener éxito a través de la colaboración y la estandarización. La estandarización propicia un diseño común de múltiples proveedores y favorece la producción de grandes volúmenes de componentes, con la consiguiente reducción de costes. La interoperabilidad de los proveedores disminuye los posibles riesgos de despliegue de las redes. (Effenberger et al., 2010; Uzunidis et al., 2022)

Todo ello ha conducido a la situación actual, donde tanto el FSAN/ITU-T como el IEEE establecen normas para las redes de acceso óptico. Se están realizando esfuerzos para coordinar y combinar los esfuerzos de ambos organismos. Esta sección contiene un breve resumen de las normas definidas por estos dos organismos de normalización. (Maeda et al., 2001; Teixeira, 2010)

En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de varias características de la capa física de las distintas normas.

Tabla 2. 1: Características de la capa física en los diferentes estándares PON.

Estándar/Red	EPON G.983	GPON G.984	G-EPON 802.3ah	10G-EPON 802.3av	XG(S)- PON G.98(0)7	NG-PON2 G.989
Distancia nominal (km)	20	20 (LR60)	10/20	10/20	20	20/40
División máxima nominal	32	64	64	64	64	64
Rango de atenuación (dB)	A: 5–20 B: 10–25 C: 15–30	A: 5–20 B: 10–25 C: 15–30	PX: 5–20 PX20: 10–24 PX40: 18–33	PR(X)10: 5–20 PR(X)20: 10–24 PR(X)40: 18–33	N1: 14–29 N2: 16–31 E1: 18–33 E2: 20–35	N1: 14–29 N2: 16–31 E1: 18–33 E2: 20–35
Pérdida de trayectoria diferencial (dB)	15	15	14–15	14–15	15	15
Descendente						
Tasa de bits (Gbps)	0.155, 0.622, 1.244	1.244, 2.488	1.25	10.31	9.953	9.953
Longitud de onda (nm)	1480–1580	1480–1500	1480–1500	1575–1580	1575–1580	1596–1603
BER antes de FEC	10^{-10}	10^{-10}	10^{-12}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
Ascendente						
Tasa de bits (Gbps)	0.155, 0.622	1.244, 2.488	1.25	1.25, 10.31	2.488, 9.953	2.488, 9.953
Longitud de onda (nm)	1260–1360	1260–1360 (regular) 1290–1330 (reducido)	1260–1360 1290–1330 (reducido)	1260–1280	1524–1544	1528–1603
BER antes de FEC	10^{-10}	10^{-10}	10^{-12}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}

Fuente: (Aweya, 2024; Elragaiee, 2021)

2.4.1. Primeras redes ópticas pasivas.

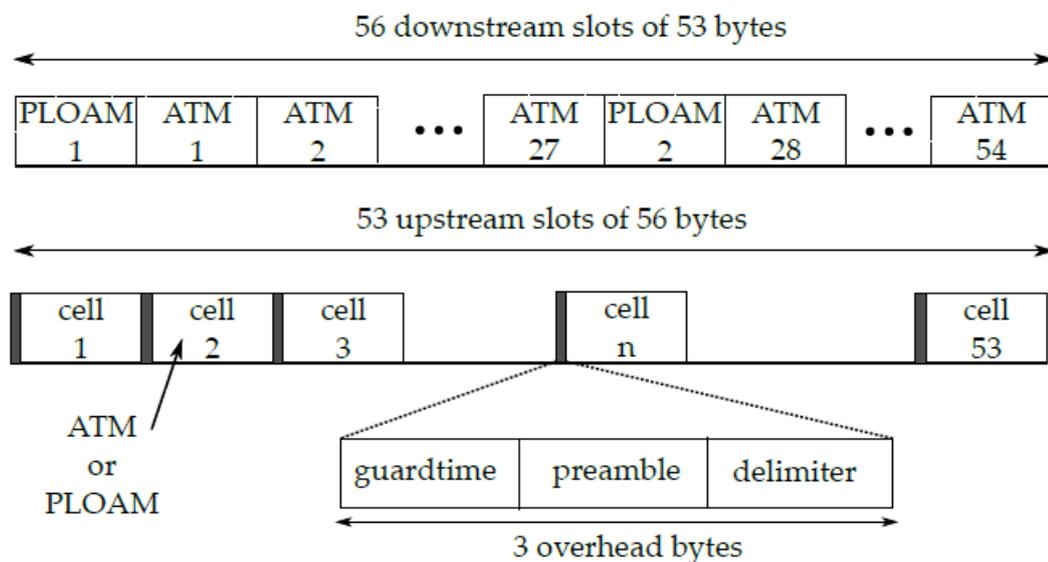
La PON basada en modo de transferencia asíncrona (Asynchronous Transfer Mode PON, ATM-PON) venía siendo impulsada por la FSAN desde 1995 y, más tarde, fue estandarizada, con ligeros ajustes y un nuevo nombre, BPON, por el (ITU-T) en la recomendación G.983 en 1998. ATM destaca por

la transmisión de pequeñas celdas de dimensión fija. El estándar B-PON se ha ido actualizando en varias ocasiones, siendo la última en 2005. B-PON no es más que una TDM-PON con una tasa de bits de bajada de 155, 622 o 1244 Mbps (normalmente 622 Mbps) y una tasa de bits de subida de 155 o 622 Mbps (normalmente 155 Mbps). (Uzunidis et al., 2022)

El tráfico descendente se emite en la banda de 1.5 μm y el ascendente en 1.3 μm . La opción de la banda de 1.5 μm permite la amplificación mediante amplificadores de fibra dopada con erbio (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA), y la fibra monomodo estándar (Standard Single-Mode Fiber, SSMF) experimentaba la atenuación más baja en estas longitudes de onda (Effenberger et al., 2010). La comunicación ascendente a 1.3 μm se situaba en la ventana de dispersión cero de la SSMF, lo que permite utilizar láseres sin refrigeración de bajo coste y amplio espectro. La proporción de división típica es de 1:16 o 1:32.

Esta primera versión de PON estaba pensada para su uso con celdas ATM de tamaño fijo, dicha estructura se ilustra en la Figura 2.7. A la velocidad base de 155 Mbps, cada trama descendente consta de 56 intervalos de tiempo, 54 de los cuales contienen celdas ATM de 53 bytes de longitud. (Shanana & Ciydem, 2022)

Figura 2. 7: Arquitectura de una PON multiplexada por división de longitud de onda.



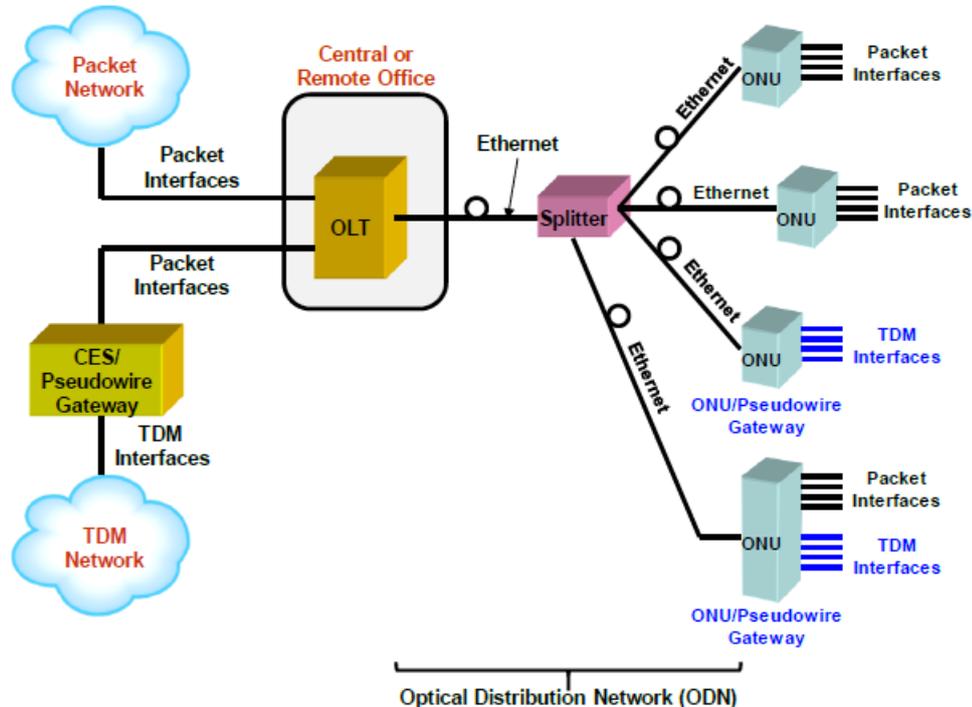
Fuente: (Tran, 2013)

En cada 28 intervalos de tiempo se introduce una celda de operación, administración y mantenimiento de la capa física (PLOAM). En la celda PLOAM hay 53 concesiones de subida para las ONU. A tasas de datos más altas, de 622 y 1244 Mbps, el total de celdas por trama se multiplica por 4 y 8, respectivamente. Además, cada celda ascendente contiene 53 bytes de datos y 3 bytes de sobrecarga para admitir la recepción en modo ráfaga. (Turna, 2014)

2.4.2. Red óptica pasiva con capacidad Gigabit (GPON)

Esta sección describe la arquitectura GPON y sus principales funcionalidades. La Figura 2.8 muestra una vista de alto nivel de la arquitectura GPON. El ONU, también llamado terminal de red óptica (ONT), es un dispositivo desplegado en el extremo de las instalaciones del cliente que tiene conexiones que conducen a los dispositivos del usuario final (ordenadores, teléfonos, televisores, etc.). El ONU se conecta al OLT en la GPON a través de fibras ópticas, divisores y filtros. (Elragaiie, 2021)

Figura 2. 8: Arquitectura de GPON.



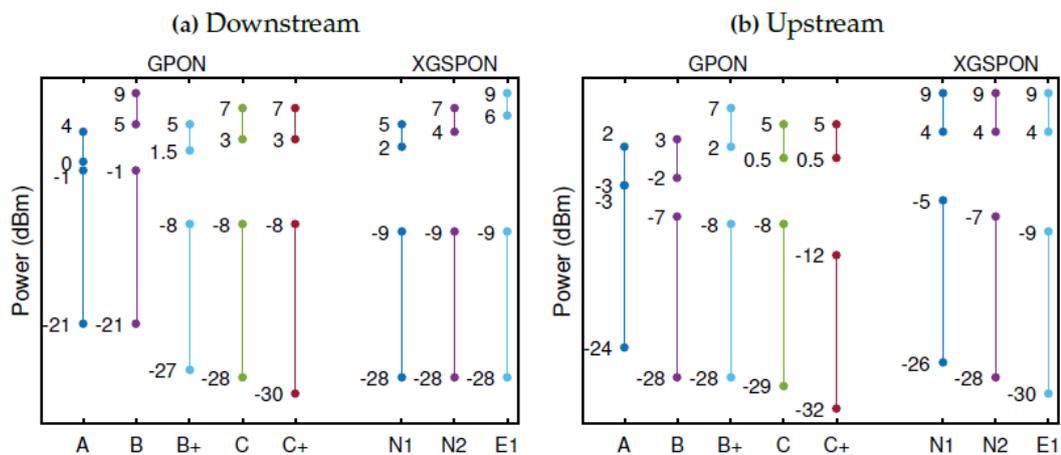
Fuente: (Aweya, 2024)

Tanto el ITU-T como el IEEE diseñaron una mejora para velocidades de rango Gigabit. El UIT-T estandarizó la GPON en 2003 bajo la norma G.984.

Las velocidades de datos típicas de bajada y subida son de 2.5/1.25 Gbps. Similar a BPON, se definen tres presupuestos de potencia (A, B y C) con el objeto de favorecer situaciones de implementación con distancias y ratios de división diferentes y con distintas exigencias de inversión. (Budiman et al., 2018; Lam & Yin, 2020)

En una posterior revisión, en respuesta a las demandas de la industria, se establecieron dos presupuestos de potencia adicionales (B+ y C+) (Caruso, 2024). Los presupuestos de potencia y los correspondientes rangos de potencia de transmisión y de recepción se presentaron en la Tabla 2.1 y que se muestran en la Figura 2.9. La máxima pérdida óptica, incluyendo la dispersión, es de 1.0 dB en el sentido descendente. En el sentido ascendente, se permite una penalización por camino óptico mayor si el transmisor tiene una potencia de transmisión aumentada equivalente.

Figura 2. 9: Rangos de potencia de transmisión y recepción para GPON y XGSPON.

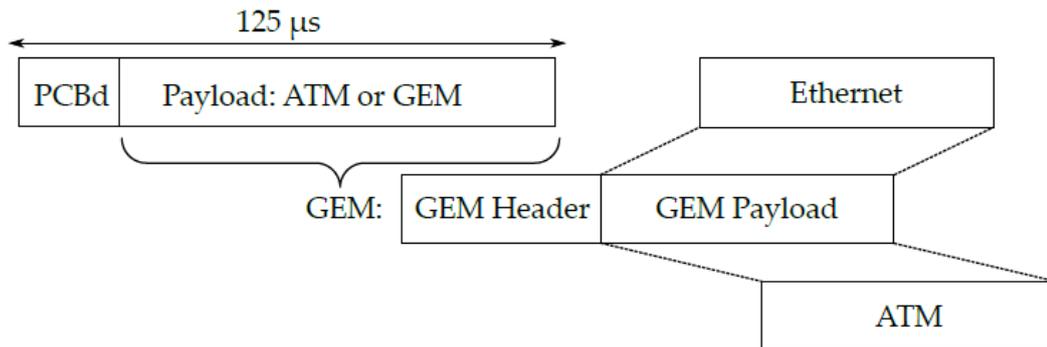


Fuente: (Tran, 2013)

La estructura de la trama descendente GPON se muestra en la Figura 2.10. GPON presentó el método de encapsulación GPON (GEM) a modo de alternativa a la transmisión basada en ATM. Los dispositivos admiten la transmisión por ATM o por GEM; en la práctica, la gran mayoría de los sistemas GPON sólo admiten la transmisión por GEM. En una carga útil GEM se soportan múltiples paquetes, incluyendo ATM y Ethernet.

En contraste con Ethernet nativa, GEM sí permite la fragmentación de paquetes Ethernet. La capa de convergencia de transmisión GPON (GTC) G.984.3 establece tramas de 125 μ s de longitud. Una trama descendente inicia con un bloque de control físico para tramas descendentes (PCBd) que comprende, entre otras cosas, características de sincronización, el mensaje PLOAM y el mapa de asignación de BW ascendente.

Figura 2. 10: Estructura de trama descendente GPON.

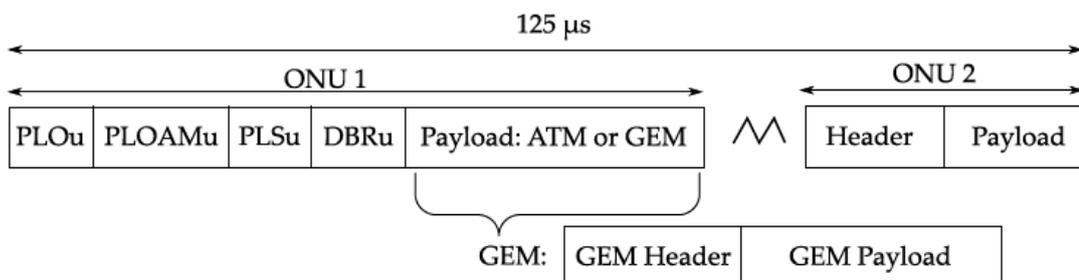


Fuente: (Angelopoulos et al., 2004; Tran, 2013)

La carga útil puede incluir un segmento ATM o un segmento GEM. El segmento GEM consta de la cabecera GEM y la carga útil GEM. Estas diferentes cabeceras se muestran en la Figura 2.10 para el sentido descendente. Para mayor claridad, existen diferencias entre los paquetes ATM contenidos en la carga útil GTC y los contenidos en la carga útil GEM.

La trama GTC ascendente también tiene una duración de 125 μ s y sigue el mismo principio que las tramas descendentes, se muestra en la Figura 2.11. En cada trama pueden aparecer ráfagas procedentes de varias ONU.

Figura 2. 11: Estructura de trama ascendente GPON.



Fuente: (Angelopoulos et al., 2004; Tran, 2013)

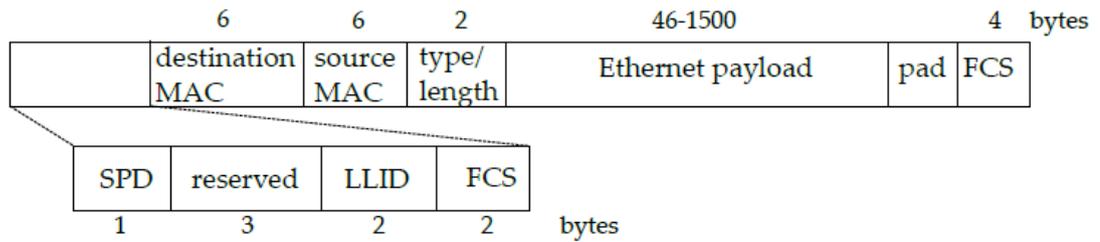
La ráfaga arranca con las diferentes cabeceras de la capa física. El primer mensaje (PLOu) incluye el preámbulo del CDR. El mensaje ascendente de operación, administración y gestión de la capa física (PLOAMu) organiza las funciones básicas de gestión. La secuencia de nivelación de potencia ascendente (PLSu) proporciona información sobre la potencia de transmisión láser de la ONU. Finalmente, el informe de ancho de banda dinámico ascendente (DBRu) indica la longitud de la cola de espera en la ONU. La sección de carga útil puede estar basada en ATM o en GEM. La carga útil GEM es más común y consta de su propia cabecera GEM y carga útil GEM.

El algoritmo DBA adjudica el caudal disponible entre los usuarios. En general, un algoritmo DBA tiene que ser equitativo, ofrecer un bajo retraso y una elevada eficiencia. El BW se ajusta a las condiciones del QoS. Pueden existir tres tipos de perfiles de BW. El primero consiste en el BW dedicado, asignado a una ONU ya sea que la ONU lo requiera o no. En el segundo, se asegura la disponibilidad del BW para la ONU cuando ésta lo solicite; de lo contrario, se asigna a otra ONU o flujo. Tercero, con un enfoque de mejor esfuerzo, se atribuye el máximo BW, pero si otras ONU también lo requieren, puede ocurrir una congestión. Un ONU puede disponer de un perfil de BW que combine uno o varios tipos. Además, también pueden tenerse en cuenta las aplicaciones de latencia crítica.

El IEEE preparó su primera norma basándose en el protocolo Ethernet en 2004. EPON aporta una velocidad de datos de 1.25 Gbps tanto en el sentido descendente como ascendente, inicialmente especificada en la norma IEEE Std 802.3ah y más tarde fusionada con la norma principal IEEE Std 802.3. El IEEE adoptó varios elementos de la norma precedente del UIT-T para alcanzar una topología de fibra similar. La mayor diferencia con respecto a B/GPON, además de la velocidad de datos, radica en la capa de protocolo. Ethernet está pensada para paquetes IP de longitud variable, en cambio B/GPON estaba concebida en principio para paquetes ATM de longitud fija, como es frecuente en las redes ópticas síncronas/jerarquía digital síncrona (SONET/SDH), no obstante GEM resuelve en parte esta discrepancia.

La estructura de trama EPON se muestra en la Figura 2.12. La estructura de la trama es muy parecida a la de los paquetes Ethernet estándar, con modificaciones en la sección del preámbulo. La trama EPON consta de las siguientes secciones. La primera, el delimitador de inicio de paquete (SPD) que sincroniza las ONUs y la OLT.

Figura 2. 12: Formato de trama EPON



Fuente: (Angelopoulos et al., 2004; Tran, 2013)

El identificador de enlace lógico (LLID) contiene el destino del paquete dentro de la propia PON. Por su parte, las secuencias de comprobación de tramas (FCS) incorporan funciones de detección de errores. Puesto que los paquetes Ethernet poseen una longitud variable, el campo de longitud permite indicar la longitud del paquete de carga útil Ethernet variable, que habitualmente puede estar comprendida entre 46 y 1500 bytes. Como alternativa, el campo de longitud también puede especificar un tipo especial de carga útil de Ethernet. En caso de que los datos reales que se van a transmitir sean demasiado cortos, se completan hasta alcanzar la longitud mínima típica de 46 bytes. EPON no define la estrategia DBA, ya que permite a los proveedores elaborar su propia estrategia.

2.4.3. 10G-EPON

El IEEE estableció su estándar 10G-EPON en 2009, por primera vez especificado en IEEE Std 802.3av y actualmente parte de IEEE Std 802.3. Desde su creación, 10G-EPON admite velocidades de datos de bajada y subida de 10/10 y 10/1 Gbps. Su compatibilidad con EPON se garantiza mediante el uso de diferentes bandas de longitud de onda. El UIT-T estandarizó la PON con capacidad de 10 Gigabits como XG-PON en G.987 en 2010.

Se preveía el uso simultáneo con GPON, por lo que se debe utilizar un módulo de coexistencia (WDM1r) en la OLT, separando así las bandas de longitud de onda. Se mantiene al mínimo la pérdida de inserción en la banda GPON existente, mientras que en la banda XG-PON será mayor. Para compensar las mayores pérdidas, se ha establecido un nuevo conjunto de presupuestos de potencia. El N1 es equiparable a la conocida clase B+ para GPON, dado que la pérdida del divisor WDM1r es mayor.

Como puede apreciarse en la Fig. 2.5, se optó por tener una potencia de transmisión y una sensibilidad de receptor constantes en la ONU en todos los balances de potencia N1, N2 y E1, únicamente difiriendo la óptica de la OLT. La máxima penalización del camino óptico, incluyendo la dispersión, es de 1,0 dB en sentido descendente y de 0,5 dB en sentido ascendente. Al aumentar la velocidad de transmisión de datos, el uso de la corrección de errores hacia delante (FEC) se hizo más frecuente. La FEC puede detectar y corregir un número limitado de errores mediante la transmisión de bits suplementarios redundantes.

Ante la demanda popular de una tasa simétrica de 10 Gbps dentro de la familia UIT, se ratificó la XGS-PON en G.9807 en 2016. XGS-PON es en gran parte una consolidación de los estándares XG-PON, 10G-EPON y NG-PON2, tal y como se explica en la siguiente sección, y por tanto podría finalizarse en poco tiempo. XGS-PON incorpora soporte para el funcionamiento simétrico a 10 Gbps y establece un segundo conjunto de longitudes de onda en las bandas anteriores de GPON (Downstream: 1480-1500, Upstream: 1300-1320) paralelas al conjunto básico de longitudes de onda en la banda XG-PON (Downstream: 1575-1580, Upstream: 1260-1280).

Es posible utilizar ambas bandas simultáneamente, lo que permite un funcionamiento simétrico de 20 Gbps. En la banda XG-PON, la retrocompatibilidad de XGS-PON con XG-PON está cubierta por un receptor de doble velocidad en la OLT. La compatibilidad con versiones anteriores en la banda GPON no está disponible. Con el fin de hacer coincidir las normas UIT-T e IEEE y ahorrar costes de desarrollo de nuevos transceptores, en las

XGS-PON podrían utilizarse transceptores 10G-EPON, aunque para ello habría que tener en cuenta que la velocidad de línea y la codificación de línea son ligeramente diferentes.

2.4.4. NG-PON2

La próxima generación PON2 (NG-PON2) se estandarizó por el ITU-T en G.989 en 2015. Se trata de la primera desviación de un estándar basado puramente en TDM. Después de examinar varias tecnologías, la mayoría de ellas analizadas en la sección 2.3.3, se optó por TWDM como técnica para NG-PON2. La compatibilidad con las ODN ya implementadas, la poca complejidad de los componentes necesarios y el respaldo de los principales actores de la industria fueron las razones principales que se tuvieron en cuenta. NG-PON2 se compone de 4 a 8 longitudes de onda de 10 Gbps en sentido descendente y 2.5 Gbps en sentido ascendente cada una. De esta manera, se dispone de una velocidad de datos agregados en sentido descendente de 40-80 Gbps.

Tanto la longitud de onda como las ranuras de tiempo pueden asignarse a los usuarios de manera dinámica. La OLT cuenta con un conjunto de transmisores y receptores de longitud de onda fija. En las ODN basadas en divisores de potencia, todas las unidades OND reciben todo el tráfico descendente. Un filtro óptico sintonizable se encarga de elegir la longitud de onda en la ONU. En cuanto al tráfico ascendente, las ONU contienen un transmisor sintonizable en modo ráfaga. Tales láseres sintonizables, su control y filtros correspondientes son complejos de fabricar de forma rentable y requerirán grandes volúmenes para ello.

Además de la tecnología TWDM, NG-PON2 incorpora una superposición virtual PtP WDM en la banda de 1524 a 1625 nm. Esta superposición PtP permite asignar un canal de longitud de onda dedicado para situaciones de alta demanda, como en escenarios empresariales y de backhaul, donde no es conveniente compartir recursos mediante TDM. En este caso, también es necesario utilizar transceptores sintonizables.

2.4.5. 100G-EPON

El IEEE finalizó la redacción del estándar 100G-EPON IEEE 802.3ca en 2020, cumpliendo con el cronograma establecido. Este nuevo estándar marca un avance significativo en las redes ópticas, similar a NG-PON2, utilizando 4 longitudes de onda de 25 Gbps cada una, en una red ODN basada en divisores de potencia y con multiplexación por división de tiempo. Sin embargo, a diferencia de NG-PON2, 100G-EPON no requiere transceptores sintonizables, optando en su lugar por transceptores de longitud de onda fija.

El estándar ofrece tres velocidades: 25, 50 y 100 Gbps. La velocidad básica de 25 Gbps está disponible para todos los usuarios en una misma longitud de onda, con un fuerte enfoque en mantener los costos de los componentes lo más bajos posible para esta velocidad. A diferencia de NG-PON2, no se implementa la asignación dinámica de longitudes de onda. Para aquellos usuarios que necesiten mayores velocidades de datos, es posible utilizar una configuración de 2 o 4 transceptores en la ONU.

Un solo usuario puede aprovechar los 100 Gbps completos utilizando las 4 longitudes de onda mediante la técnica de unión de canales, lo que mejora significativamente la capacidad en comparación con NG-PON2, donde la velocidad máxima para un solo usuario está limitada a 10 Gbps en una sola longitud de onda. Además, los presupuestos de potencia para 100G-EPON son compatibles con los definidos anteriormente para 10G-EPON, facilitando una transición más sencilla hacia esta nueva tecnología.

Dado que la tasa de línea se elevó a 25 Gbps, fue necesario superar varios desafíos para suministrar estas velocidades con el presupuesto de energía adecuado. Las tecnologías de acceso, como se anticipaba, se basaron en tecnologías utilizadas en redes de larga distancia y centros de datos. Estas tecnologías fueron introducidas primero en esos campos, donde los elevados volúmenes permitieron reducir los costos y perfeccionar las técnicas, lo que facilitó su adaptación a los presupuestos de potencia más estrictos y al funcionamiento en modo ráfaga que requieren las PON.

Los transmisores de alta velocidad estuvieron disponibles a tiempo para los despliegues, beneficiándose del gran volumen de aplicaciones en centros de datos. Sin embargo, los fotodetectores de avalancha (APD) con capacidad de 25 Gbps no se produjeron en grandes volúmenes, ya que las aplicaciones de centros de datos se basan principalmente en receptores PIN. Por lo tanto, se propone una estructura de transmisión universal, en la cual la transmisión se produce como una modulación tipo OOK y es posible desplegar tres posibles estructuras de receptor.

Puede emplearse un receptor OOK de 25 Gbps, un receptor OOK de 10 Gbps con sólidas técnicas de ecualización o un sistema duobinario eléctrico. A pesar de ello, existen dificultades a la hora de alcanzar el presupuesto de potencia, razón por la cual se está considerando la amplificación óptica en la OLT tanto para subida como para bajada y el aumento de la complejidad de la FEC.

Incluso con el exigente presupuesto de potencia a 25 Gbps, se ha manifestado la preocupación ante la posibilidad de que el paso de 10 a 25 Gbps sea demasiado pequeño como para justificar las inversiones necesarias, motivo por el cual también se están investigando los 50 Gbps en una única longitud de onda, que requieren aproximadamente 3-5 dB adicionales de potencia recibida. Se está analizando en el Grupo Operativo si la velocidad soportada será de 25 Gbps, 50 Gbps o ambas, y si los 50 Gbps tendrán una o dos longitudes de onda. Asimismo, se podría argumentar que no existirá un gran mercado comercial para PON de 50 Gbps antes de 2025, ya que no existen dispositivos disponibles en el hogar que admitan una velocidad binaria superior a 10 Gbps.

2.5. Condiciones de canales PON

En el apartado 2.4 se han analizado las normas PON. En esta sección, se describen las posibles implicaciones de estas normas en lo que respecta a la variación de la calidad del canal experimentado por los usuarios. A continuación, se efectúan pruebas en una PON de uso comercial con el fin de

comprobar si la variación permitida en la norma se observa también sobre el terreno.

En una PON, la diferencia entre las características de los canales de los enlaces puede llegar a valores sustanciales. En los enlaces de comunicaciones se dan márgenes no asignados, márgenes de diseño y márgenes del sistema, que en conjunto constituyen el margen del enlace. Los márgenes no asignados provienen de la variedad de enlaces en cuanto a alcance y caudal requerido. Los de diseño son fruto de un enfoque de diseño basado en el peor de los casos, donde las penalizaciones exactas de cada componente se desconocen durante toda la fase de diseño. Los márgenes del sistema son márgenes intencionados que permiten tener en consideración el deterioro de los componentes durante la vida útil del enlace.

El margen no asignado corresponde a la pérdida de trayecto diferencial, según lo definido en las normas PON. La tabla 2.1 refleja que la pérdida de trayecto diferencial máxima admitida es de 15 dB para las normas UIT-T. En el caso de las normas IEEE, la pérdida es de 14 ó 15 dB, según el presupuesto de potencia. En cuanto a las normas IEEE, la pérdida es de 14 ó 15 dB, según el balance de potencia.

La pérdida óptica diferencial se denomina a la diferencia absoluta entre las pérdidas ópticas, representadas en decibelios, de dos trayectos cualquiera entre la OLT y los puntos de referencia de la ONU en una misma red de distribución óptica. Los márgenes de diseño y del sistema se establecen de manera combinada a través de un rango admisible de potencia óptica media lanzada. Dichos márgenes se muestran en la Tabla 2.2 para diferentes estándares.

En el sentido ascendente, se permite una diferencia mayor. Algunos estándares fijan un rango diferente para diferentes presupuestos de potencia. El rango de potencias de transmisión permitido se sitúa entre 2 y 6 dB, y la mayoría de las normas y presupuestos de potencia permiten entre 3 y 5 dB. Asimismo, cabe suponer una diferencia en el rendimiento del receptor, de

modo que algunos receptores sobrepasan el nivel de rendimiento mínimo garantizado en mayor medida que otros. Esta diferenciación del rendimiento del receptor no viene definida dentro de la norma, pero es de esperar que mejore a medida que vayan progresando las tecnologías de producción.

Tabla 2. 2: Atenuaciones admisibles entre transmisores en estándares PONs.

Estándar	Downstream (dB)	Upstream (dB)
GPON	3.5 - 4	5
XG(S)-PON	3	5
NG-PON2	2-4	2-4
G-EPON	4-6	5
10G-EPON	3-4	3-5

Fuente: Elaboración propia

Para algunos estándares, la dispersión es diferente según los presupuestos de potencia.

Tabla 2. 3: Características de los dos conjuntos de datos de los despliegues GPON de INEA.

Concepto	Set A	Set B
Número de ONUs	20,000	45,000
ONUs promedio / puerto OLT	20.2	18.6
Distancia media (km)	10.8	10.9
Potencia media downstream (dBm)	-19.8	-19.5
Potencia media upstream (dBm)	-22.6	-22.7
Desv. estándar de toda la potencia downstream (dB)	2.4	2.7
Desv. estándar de toda la potencia upstream (dB)	2.8	3.2
Media de la desv. estándar por puerto OLT, downstream (dB)	1.4	1.5
Media de la desv. estándar por puerto OLT, upstream (dB)	1.3	1.4

Fuente: Elaboración propia

En el sentido ascendente, se permite una diferencia mayor. Algunos estándares fijan un rango diferente para diferentes presupuestos de potencia.

El rango de potencias de transmisión permitido se sitúa entre 2 y 6 dB, y la mayoría de las normas y presupuestos de potencia permiten entre 3 y 5 dB. Asimismo, cabe suponer una diferencia en el rendimiento del receptor, de modo que algunos receptores sobrepasan el nivel de rendimiento mínimo garantizado en mayor medida que otros.

Esta diferenciación del rendimiento del receptor no viene definida dentro de la norma, pero es de esperar que mejore a medida que vayan progresando las tecnologías de producción. La combinación de estos tres factores (pérdida diferencial del camino óptico, potencia transmitida y rendimiento del receptor) puede resultar en un amplio margen de enlace entre la OLT y la ONU. En tal caso, se produce un gran excedente de potencia óptica recibida con respecto a la potencia mínima necesaria para sostener un enlace operativo por debajo del límite FEC.

CAPÍTULO 3: Desarrollo y Resultados obtenidos

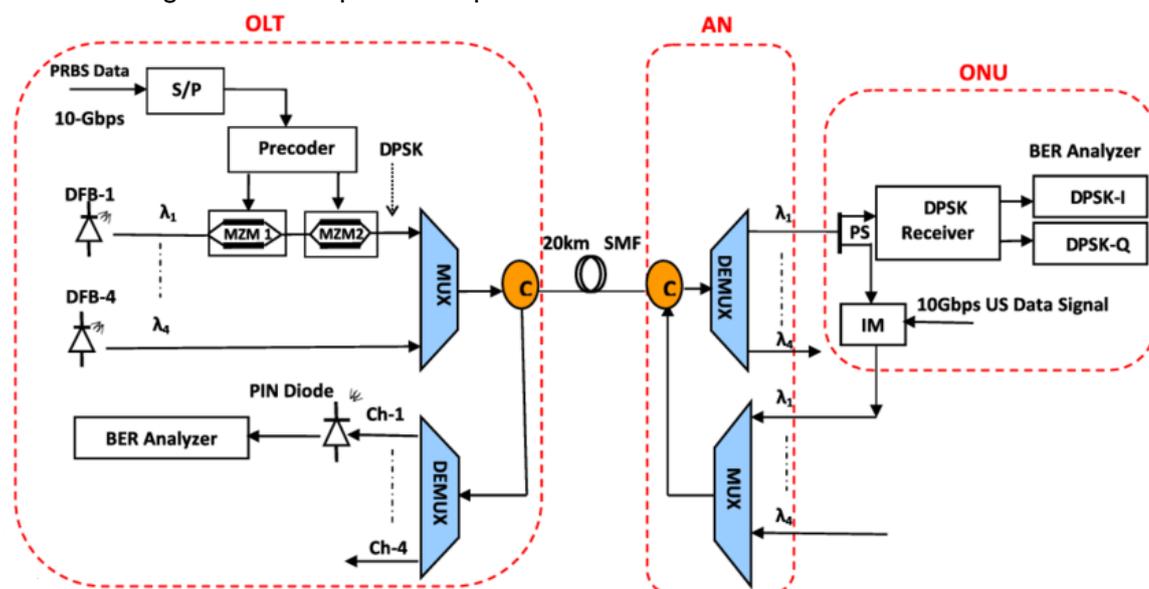
3.1. Descripción general sobre las modulaciones DPSK y QPSK en redes GPON-FTTH,

La técnica de modulación DPSK utiliza una señal como referencia de fase en lugar de utilizar una referencia de fase absoluta para los datos transmitidos. Contiene datos por cambio de fase de la portadora de la onda. La técnica DPSK tiene un ciclo y medio en comparación con la modulación por desplazamiento de fase (PSK), que sólo tiene un ciclo, y el canal tiene ventajas de sensibilidad lineal frente a la modulación por encendido y apagado (OOK). La técnica de modulación DPSK es atractiva por su alta sensibilidad de recepción, mejor tolerancia a la diafonía y mayor número de usuarios simultáneos mediante la asignación de diferentes códigos ópticos (Optical Codes, OCs).

3.2. Diseño del modelo de simulación de la red GPON-FTTH

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques de la red GPON-FTTH que nos permite generar los algoritmos de simulación que se describen más adelante. Para el desarrollo de los pseudocódigos se utilizó el programa Visual Studio Code basado en Python, y también la biblioteca OptiComPy.

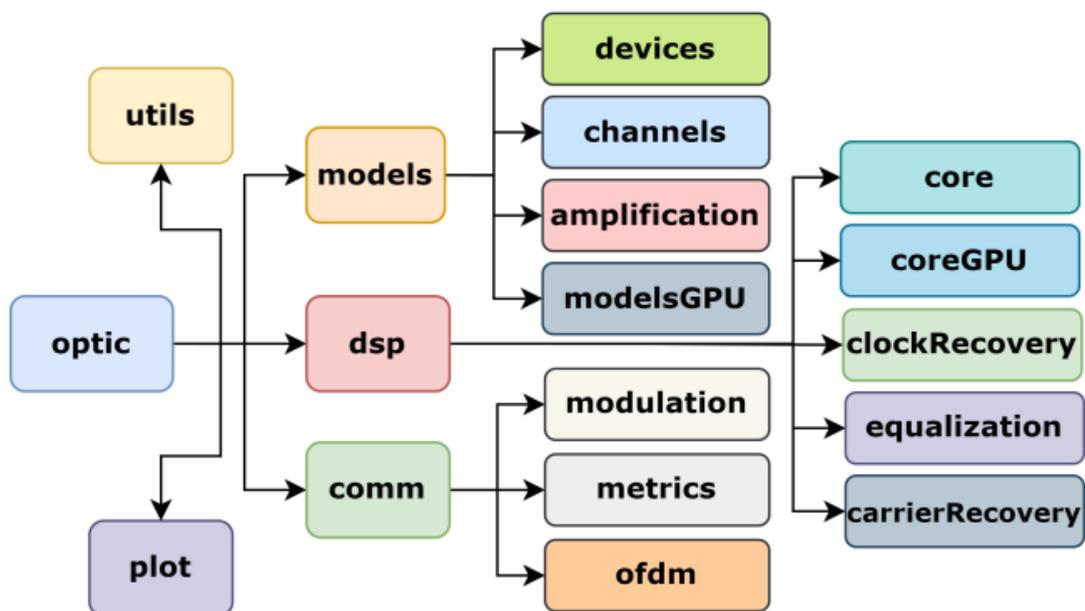
Figura 3. 1: Esquemático para el diseño de la red GPON-FTTH.



Elaborado por: Autor

OptiComPy es un paquete Python de código abierto creado para realizar simulaciones de sistemas y subsistemas de comunicaciones ópticas. La Figura 3.2 se muestra el diagrama jerárquico del paquete Python de código abierto OptiComPy. Este paquete es de libre acceso y proporciona gratuitamente herramientas a profesores, estudiantes e ingenieros para que puedan realizar simulaciones de redes de comunicaciones de fibra óptica en la capa física. Por otro lado, la Toolbox incorpora múltiples algoritmos de procesamiento digital de señales (DSP), muy necesarios en sistemas ópticos coherentes.

Figura 3. 2: Estructura jerárquica del paquete OptiComPy de código abierto.



Fuente:

Se puede observar que el paquete “Optic” consta de varios bloques que permiten: (1) “models” que se encarga de modelar el comportamiento de los dispositivos ópticos, canales, amplificadores ópticos, modelos utilizando la unidad de procesamiento gráfico (GPU). (2) “dsp” esta librería de procesamiento digital de señales (DSP) permite ejecutar la ecualización, recuperación del reloj y de la portadora. (3) “comm” permite ejecutar los esquemas de modulación, multiplexación OFDM y obtener las métricas de medición de sistemas de comunicaciones ópticas. (4) “plot” permite la visualización de los datos y resultados que se obtienen durante la ejecución de los algoritmos de simulación que se han propuesto en el presente trabajo de investigación.

3.3. Diseño de pseudocódigos para los escenarios de simulación en la red GPON-FTTH.

En la Figura 3.3 se muestra el algoritmo que permite generar la señal modulada por desplazamiento de fase (PSK), tal como se muestra en la Figura 3.3. Inicialmente, este algoritmo se encarga de convertir una secuencia de bits pseudoaleatorios (PRBS) de entrada en una señal modulada utilizando la modulación por desplazamiento de fase (PSK). Las variantes de PSK que se evalúa posteriormente, son la PSK binaria (BPSK) y la PSK diferencial (DPSK). Este algoritmo se encarga de modificar la fase de la señal portadora en función del bit actual y del bit anterior.

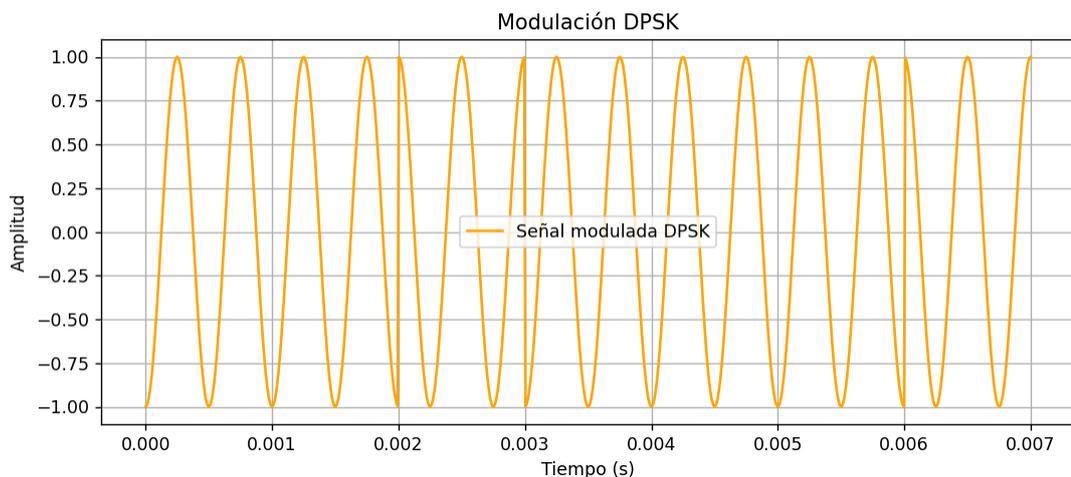
Figura 3. 3: Pseudocódigo 1 para la generación de señal modulada por DPSK.

Algorithm 1 Generación de señal modulada utilizando DPSK

Require: Secuencia de bits $\{b_i\}$ de entrada, Frecuencia de portadora f_c , Duración del bit T_b .

Ensure: Señal modulada $s(t)$ en DPSK.

- 1: $\Delta\phi \leftarrow \pi$ ▷ Diferencia de fase inicial
- 2: $\phi_{prev} \leftarrow 0$ ▷ Fase inicial acumulativa
- 3: **for** cada bit b_i en la secuencia $\{b_i\}$ **do**
- 4: **if** $b_i = 1$ **then**
- 5: $\phi_{curr} \leftarrow \phi_{prev} + \Delta\phi$
- 6: **else**
- 7: $\phi_{curr} \leftarrow \phi_{prev}$
- 8: **end if**
- 9: $s(t) \leftarrow A \cdot \cos(2\pi f_c t + \phi_{curr})$ ▷ Señal modulada
- 10: $\phi_{prev} \leftarrow \phi_{curr}$
- 11: **end for**



Elaborado por: Autor

Para el cálculo, este algoritmo empieza con una diferencia de fase inicial y mantiene un registro de la fase que se va acumulando cada vez que procesa

un bit. Por ejemplo, un “1” lógico permite lograr un desplazamiento de fase, en tanto, que “0” lógico, permite mantener la fase actual. Así, el resultado es una señal modulada que transmite información codificada (formato de onda continua), lo que permite su transmisión. Este método permite reducir la interferencia durante el proceso de decodificación de la señal.

En la Figura 3.4 se muestra el algoritmo que permite generar la señal modulada por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK), en este caso permite asignar pares de bits para diferentes valores de fase en un determinado conjunto de valores.

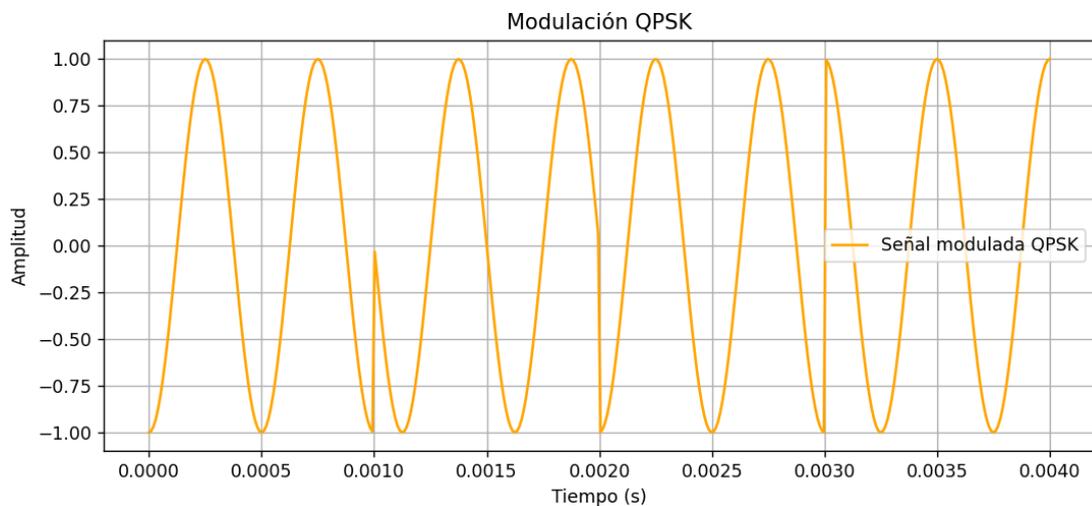
Figura 3. 4: Pseudocódigo 2 para la generación de señal modulada por QPSK.

Algorithm 2 Generación de señal modulada utilizando QPSK

Require: Secuencia de bits $\{b_i\}$ de entrada (pares de bits), Frecuencia de portadora f_c , Duración del bit T_b .

Ensure: Señal modulada $s(t)$ en QPSK.

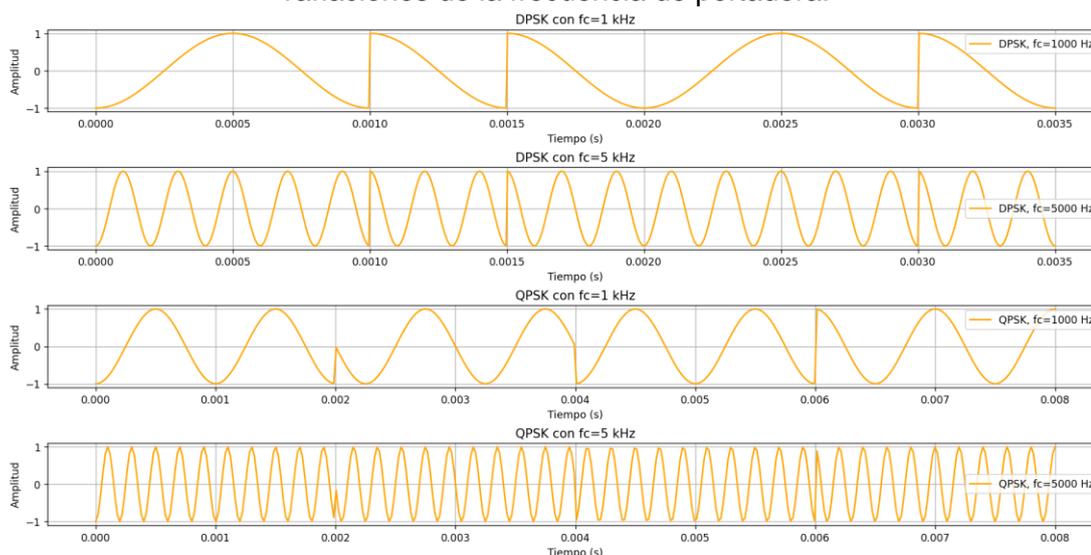
- 1: Definir constelación de fases $\Phi = \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$.
- 2: **for** cada par de bits (b_{2i}, b_{2i+1}) en la secuencia $\{b_i\}$ **do**
- 3: Determinar la fase $\phi_k \in \Phi$ según el par (b_{2i}, b_{2i+1}) .
- 4: $s(t) \leftarrow A \cdot \cos(2\pi f_c t + \phi_k)$ ▷ Señal modulada
- 5: **end for**



Elaborado por: Autor

En la Figura 3.5 se muestran las señales moduladas en QPSK y DPSK con variación de la frecuencia de portadora (f_c). Se observa que la variación de la f_c genera cambios significativos, por ejemplo, para una $f_c = 5 \text{ kHz}$ se refleja un incremento de la cantidad de ciclos y por ende la tasa de transmisión de datos va a requerir de un mayor ancho de banda (BW). Mientras que con una $f_c = 1 \text{ kHz}$ se logra estabilidad y claridad, siendo idóneo en GPON-FTTH.

Figura 3. 5: Comportamiento de las señales moduladas QPSK y DPSK ante variaciones de la frecuencia de portadora.



Elaborado por: Autor

En la Figura 3.6 se presenta el algoritmo que permite el modelado de transmisión de datos previamente modulada a través del canal óptico en la red GPON-FTTH. Además, se incorpora los parámetros de las métricas, como, la atenuación (α), longitud del canal óptico, dispersión (D) y el ruido [$n(t)$]. Se puede ver que la señal óptica se ve reducida debido a la atenuación y longitud de la fibra óptica. Después, se aplica una dispersión para ver el efecto que tiene mientras se propaga en la fibra óptica. Posteriormente, se añade otro tipo de perturbación, como el caso del ruido gaussiano (AWGN). Finalmente, se muestra la señal recibida del lado de la ONU/ONT.

Figura 3. 5: Pseudocódigo 3 para la transmisión de la señal modulada en el canal óptico.

Algorithm 3 Transmisión de señal modulada en canal óptico

Require: Señal modulada $s(t)$, Parámetros del canal (atenuación α , longitud del canal L , dispersión D , ruido $n(t)$).

Ensure: Señal recibida $r(t)$ en el receptor.

- 1: $s_{opt}(t) \leftarrow s(t) \cdot e^{-\alpha L}$ ▷ Atenuación por distancia L
- 2: $s_{disp}(t) \leftarrow$ Aplicar efecto de dispersión D a $s_{opt}(t)$.
- 3: $n(t) \leftarrow$ Generar ruido gaussiano.
- 4: $r(t) \leftarrow s_{disp}(t) + n(t)$ ▷ Señal recibida

Elaborado por: Autor

El algoritmo que se muestra en la Figura 3.7 permite decodificar la señal y calcular la tasa de error de bits (BER) para cualquier tipo de modulación.

Figura 3. 6: Pseudocódigo 4 para la decodificación de la señal modulada y obtención de la BER.

Algorithm 4 Decodificación de señal y cálculo de BER

Require: Señal recibida $r(t)$, Secuencia de bits original $\{b_i\}$.
Ensure: Tasa de error de bit (BER).
1: Decodificar \hat{b}_i desde $r(t)$ utilizando el esquema de demodulación correspondiente (DPSK/QPSK).
2: Comparar \hat{b}_i con b_i para calcular errores e .
3: $BER \leftarrow \frac{e}{\text{Número total de bits}}$.

Elaborado por: Autor

3.4. Análisis de resultados obtenidos en la simulación de GPON-FTTH.

En esta sección se presenta el análisis o discusión de los resultados obtenidos de la tasa de error de bits (BER) en función de la relación señal/ruido (SNR) y en función de la relación señal/ruido óptico (OSNR). Para el análisis se agregaron diferentes variantes de orden superior de la modulación por amplitud en cuadratura (QAM).

3.4.1. Análisis de resultados obtenidos de la BER en función de la SNR

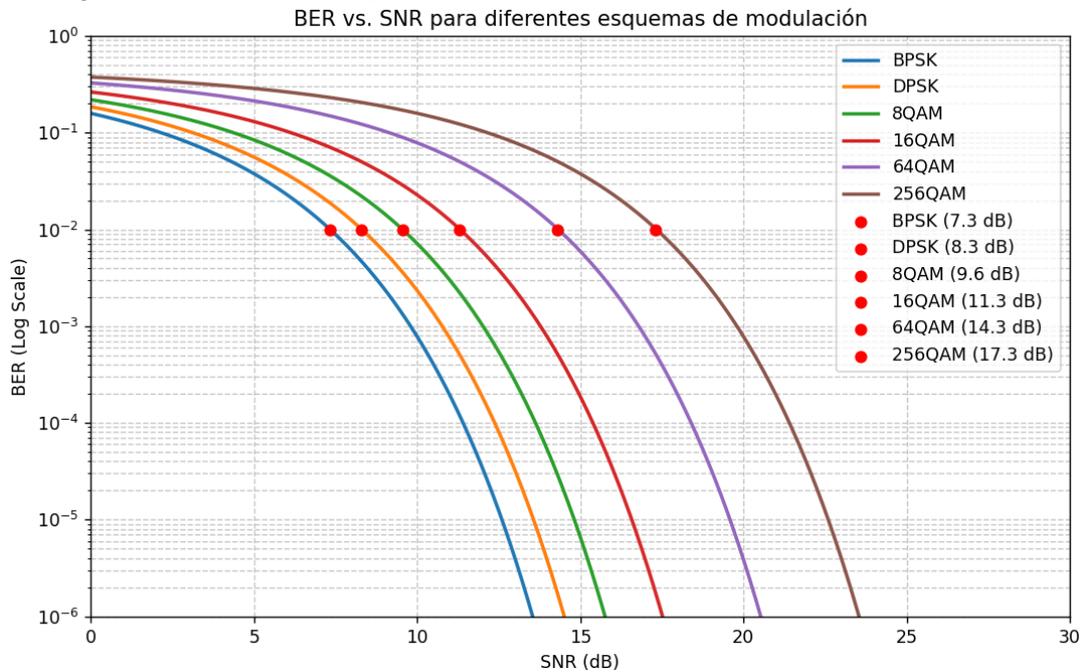
La Figura 3.8 muestra la gráfica comparativa de la BER vs SNR utilizando la modulación PSK y QAM para diferentes ordenes de modulación, tales como, QPSK, DPSK, 8QAM, 16QAM, 64QAM y 256QAM. Los resultados obtenidos en cada esquema nos permiten comprender e interpretar cual tiene el mejor rendimiento y robustez en función de la SNR.

En la Figura 3.8 se observa que en todos los esquemas de modulación de PSK y QAM, que mientras la SNR se incrementa, disminuye la BER de forma exponencial. Este resultado demuestra que la transmisión de la señal es más estable en situaciones en la que se tiene una SNR elevada. Además, en la leyenda se observan los valores mínimos de BER requeridos, y a medida que la SNR crece, la BER se hace más pequeña lo que pone de manifiesto que el rendimiento de la red GPON-FTTH es más eficiente.

Por ejemplo, la modulación, PSK binaria (BPSK) es una tecnología que necesita una SNR más baja, en este caso de 7.3 dB. La modulación PSK diferencial (DPSK) tiene una SNR de 8.3 dB (algo más alta que BPSK) lo que

permite conseguir un equilibrio entre eficiencia y robustez espectral especialmente en comunicaciones GPON-FTTH para enlaces de larga distancia. En la Tabla 3.1 se muestran el resumen de los datos obtenidos de la BER vs SNR

Figura 3. 7: Gráfica comparativa del rendimiento de la BER frente a la SNR.



Elaborado por: Autor

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

Modulación	SNR (dB) para una BER = 10 ⁻²	SNR (dB) para una BER = 10 ⁻⁶
QPSK	7.3	13.8
DPSK	8.3	14.3
8QAM	9.6	15.8
16QAM	11.3	17.5
64QAM	14.3	20.7
256QAM	17.3	26.4

Elaborado por: Autor

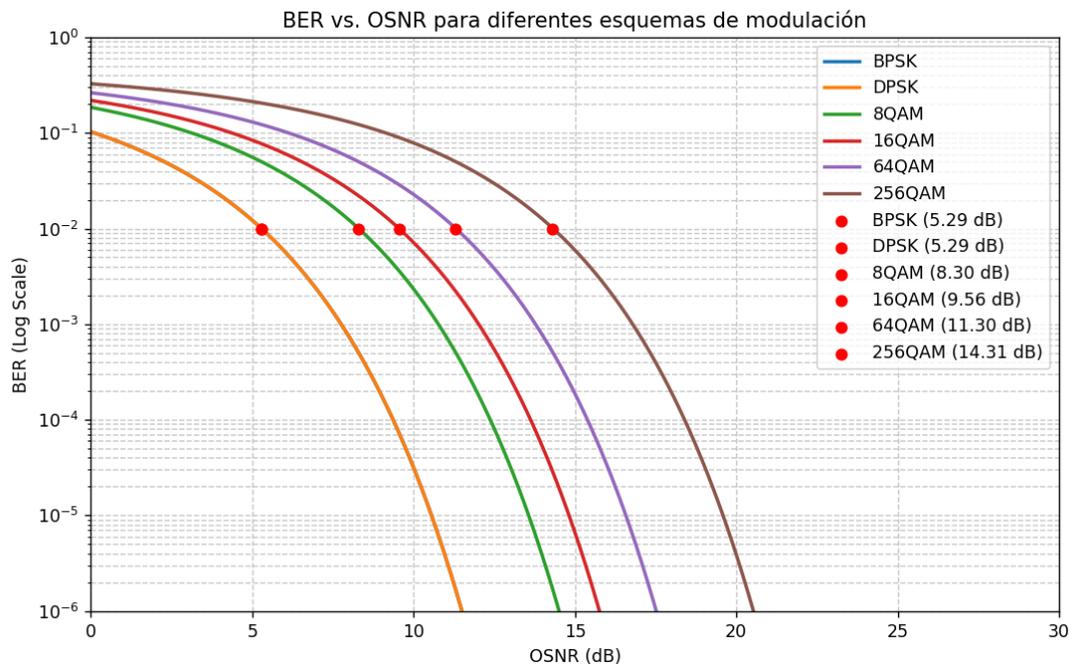
En el caso de las modulaciones QAM de orden superior 8QAM hasta 256QAM, requieren de una SNR significativamente más alta que los esquemas QPSK y DPSK. Se observa que en el esquema 8QAM la SNR de 9.6 dB para una BER de 10⁻², y que mientras el orden de QAM se incrementa,

la BER disminuye, pero la SNR aumenta. Para una BER de 10^{-2} se tiene que las SNR de 16QAM, 64QAM y 256QAM son 11.3 dB, 14.3 dB y 17.3 dB respectivamente. Este incremento es debido a la complejidad y sensibilidad de los esquemas QAM de orden superior en función de la SNR.

3.4.2. Análisis de resultados obtenidos de la BER en función de la OSNR

En la Figura 3.9 se muestra la gráfica comparativa de la BER vs OSNR utilizando la modulación PSK y QAM para diferentes ordenes de modulación, tales como, QPSK, DPSK, 8QAM, 16QAM, 64QAM y 256QAM. Los resultados obtenidos en cada esquema nos proporcionaron información sobre el mejor rendimiento en la red GPON-FTTH.

Figura 3. 8: Gráfica comparativa del rendimiento de la BER frente a la OSNR.



Elaborado por: Autor

De manera análoga como sucedió en la BER vs SNR (véase la Figura 3.7), se puede observar que la OSNR se incrementa a medida que la BER se hace más pequeña, lo que indica un mejor rendimiento en cada esquema de modulación. Este comportamiento es el esperado, ya que las comunicaciones ópticas, en este caso GPON-FTTH si la OSNR aumenta, mejora la calidad de la señal y minimiza los errores. En la Tabla 3.2 se muestran el resumen de los datos obtenidos de la BER vs OSNR

Tabla 3. 2: Resumen de la comparativa para la BER vs OSNR.

Modulación	SNR (dB) para una BER = 10^{-2}	SNR (dB) para una BER = 10^{-6}
QPSK	5.29	12.2
DPSK	5.29	12.2
8QAM	8.30	14.2
16QAM	9.56	15.8
64QAM	11.30	17.5
256QAM	14.31	20.4

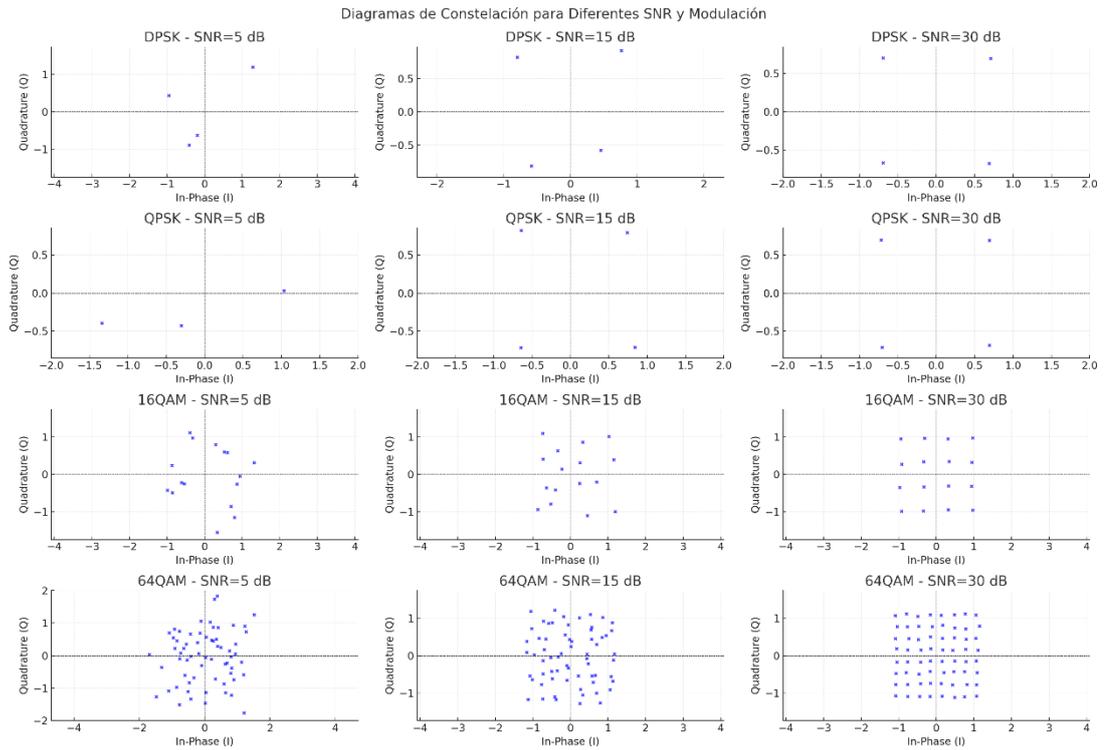
Elaborado por: Autor

En la Figura 3.9 se observa en todos los esquemas de modulación de PSK y QAM, que mientras la OSNR aumenta, la BER disminuye exponencialmente. Es decir, que un valor de OSNR alto, demuestra que la transmisión de la señal es más robusta ya que la BER es más pequeña, y su alta resistencia al ruido. En el caso de los esquemas BPSK y QPSK se obtuvo la misma SNR=5.29 dB para una BER mínima de 10^{-2} .

Mientras que para las modulaciones QAM de orden superior, se observó que para una OSNR progresivamente más alta se obtiene la misma BER mínima como sucedió en los esquemas BPSK y DPSK. En otras palabras, esto significa los esquemas QAM de orden superior son más vulnerables al ruido debido a que estos esquemas (8QAM, 16QAM, 64QAM y 256QAM) codifican más información por símbolo, razón por la cual son susceptibles al ruido y las distorsiones.

En la Figura 3.10 se muestran los diagramas de constelaciones de la red GPON-FTTH modelada en Python para diferentes ordenes de modulaciones PSK y QAM. Como se esperaba, la modulación QPSK sigue siendo la mejor opción con relación a DPSK y variantes de QAM. La modulación DPSK también es robusta y eficiente, aunque se los puntos de constelación no son homogéneos en separación con respecto a la modulación QPSK, que, si muestra una separación homogénea, por lo tanto, esta modulación es la mejor opción para trabajar en una red GPON-FTTH.

Figura 3. 9: Diagramas de constelación para los esquemas de modulación QPSK y DPSK.



Elaborado por: Autor

Las modulaciones 16QAM y 64QAM se observan que son más sensibles al ruido y requieren de una mayor SNR para tener un mejor rendimiento en relación con la modulación QPSK que resulta las adecuada en la red GPON-FTTH. Es decir, que la modulación QAM de orden superior son más apropiadas para canales ópticos de alta calidad, pero en este proyecto presentaron una limitación para SNR moderados.

Conclusiones

- La revisión de literatura o estado del arte en las redes de acceso óptico ha permitido sentar las bases de los fundamentos teóricos para realizar el modelado de red GPON-FTTH utilizando formatos de modulación PSK y QAM.
- En el capítulo 3 se realiza el análisis de los resultados obtenidos destacando la relación entre eficiencia y robustez del sistema de modulación con el fin de mejorar las prestaciones del sistema de comunicación GPON-FTTH. Las gráficas obtenidas (Figuras 3.8 y 3.9) han demostrado visualmente los mejores resultados de rendimiento de la tasa de error de bits (BER) en función de la relación señal/ruido (SNR) y señal/ruido óptico (OSNR).
- La modulación QPSK es el formato que se recomienda utilizar en la implementación de una red GPON-FTTH con fibra monomodo (SMF), ya que se pudo observar que requiere una SNR=13.8 dB para una BER=10⁻⁶, mientras que los demás formatos de modulación presentan una SNR más alta para lograr el mismo valor de BER. A pesar de que QAM es una buena opción, sin embargo, en redes GPON-FTTH tiene una muy alta sensibilidad al ruido para lo cual generaría fluctuaciones en el canal óptico.

Recomendaciones

- Evaluar la asignación dinámica del ancho de banda en redes XG-PON utilizando inteligencia artificial.
- Análisis de la mitigación de dispersión cromática y ruido en redes XG-PON utilizando Deep Learning

Bibliografía

- Abdellaoui, Z., Dieudonne, Y., & Aleya, A. (2021). Design, implementation and evaluation of a Fiber To The Home (FTTH) access network based on a Giga Passive Optical Network GPON. *Array*, 10, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.array.2021.100058>
- Ahmed, S., Butt, R. A., & Aslam, M. I. (2024). Simultaneous upstream and inter optical network unit communication for long reach PON using single transmitter and self-phase modulation. *Optical Fiber Technology*, 82, 103639. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103639>
- Ali, M. H., ALkargole, H. M., & Hassan, T. A. (2021). A Review of immigration obstacles to PON-FTTH and its evolution around the world. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(2), 645. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v19i2.16444>
- Angelopoulos, J. D., Leligou, H.-C., Argyriou, T., Zontos, S., Ringoot, E., & Van Caenegem, T. (2004). Efficient transport of packets with QoS in an FSAN-aligned GPON. *IEEE Communications Magazine*, 42(2), 92–98. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1267106>
- Asgarirad, M., & Jahromi, M. N. (2020). *A Taxonomy-based Comparison of FTTH Network Implementation Costs*. 14(2).
- Aweya, J. (2024). Backhaul over Gigabit Passive Optical Networks (GPONs)— Network Architectures and Synchronization Issues. *EBTIC Technical Report*, 1–28.
- Bala, K. (2021). *An overview of passive optical networks and components* [Thesis, Toronto Metropolitan University]. <https://doi.org/10.32920/ryerson.14663847.v1>
- Banerjee, A., Park, Y., Clarke, F., Song, H., Yang, S., Kramer, G., Kim, K., & Mukherjee, B. (2005). Wavelength-division-multiplexed passive optical

network (WDM-PON) technologies for broadband access: A review [Invited]. *Journal of Optical Networking*, 4(11), 737. <https://doi.org/10.1364/JON.4.000737>

Briglauer, W., & Gugler, K. (2013). The deployment and penetration of high-speed fiber networks and services: Why are EU member states lagging behind? *Telecommunications Policy*, 37(10), 819–835. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2013.05.003>

Budiman, E., Haviluddin, Wati, M., Taruk, M., Setyadi, H. J., & Pakpahan, H. S. (2018). Feasibility Study of Fiber to the Home Networks for Optical Fiber Loss and Attenuation. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4), 105–109.

Caruso, G. (2024). *Ultra-high bitrates Next Generation Optical Architectures and Passive Optical Networks*. <https://iris.polito.it/handle/11583/2988623>

Chen, Y.-W., Lai, T.-N., Chang, M.-F., & Feng, K.-M. (2016). RF power fading mitigation for an IMDD multicarrier LR-PON. *Optics Express*, 24(17), 19311. <https://doi.org/10.1364/OE.24.019311>

Cvijetic, N. (2012). OFDM for Next-Generation Optical Access Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 30(4), 384–398. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2166375>

Effenberger, F., Kani, J., & Maeda, Y. (2010). Standardization trends and prospective views on the next generation of broadband optical access systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 28(6), 773–780. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2010.100802>

Elmagzoub, M. A., Shaikh, A., Alghamdi, A., & Rajab, K. (2020). A Review on MIMO Wireless Signals over Fibre for Next Generation Fibre Wireless (FiWi) Broadband Networks. *Electronics*, 9(12), 2014. <https://doi.org/10.3390/electronics9122014>

- Elragai, A. M. (2021, octubre 4). *Residential CO Re-Architected Datacenter, Services, Platforms, Architecture and Use Cases*. ERA. <https://doi.org/10.7939/r3-31xw-2c04>
- Esmail, M. A., & Fathallah, H. (2013). Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(2), 943–958. <https://doi.org/10.1109/SURV.2012.060912.00057>
- Forzati, M., & Gavler, A. (2013). Flexible next-generation optical access. *2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2013.6602912>
- Garg, A. K., & Janyani, V. (2017). Adaptive bandwidth mechanism using dual rate OLT for energy efficient WDM–TDM passive optical network. *Telecommunication Systems*, 66(4), 657–670. <https://doi.org/10.1007/s11235-017-0316-1>
- Garg, A. K., Janyani, V., Singh, G., Ismail, T., & Selmy, H. (2019). Dedicated and broadcasting downstream transmission with energy-efficient and latency-aware ONU interconnection in WDM-PON for smart cities. *Optical Fiber Technology*, 52, 101949. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.101949>
- Gill, H. S., Gill, S. S., & Bhatia, K. S. (2018). A novel approach for physical layer security in future-generation passive optical networks. *Photonic Network Communications*, 35(2), 141–150. <https://doi.org/10.1007/s11107-017-0738-4>
- Hammadi, A. A. (2016). *Future PON Data Centre Networks* [Phd, University of Leeds]. <https://etheses.whiterose.ac.uk/15677/>
- Harstead, E., & Van Heyningen, P. H. (2002). Optical Access Networks. En *Optical Fiber Telecommunications IV-B* (pp. 438–513). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012395173-1/50010-4>

- Harstead, E., Van Veen, D., Houtsma, V., & Dom, P. (2018). Technology Roadmap for Time Division Multiplexed Passive Optical Networks (TDM PONs). *Journal of Lightwave Technology*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2881933>
- 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>
- Hossain, A. D., & Hossain, A. R. (2019). A Distributed Control Framework for TDM-PON Based 5G Mobile Fronthaul. *IEEE Access*, 7, 162102–162114. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951581>
- Houtsma, V., & Van Veen, D. (2024). Higher-speed PONs based on data center technology and optics [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 16(2), A98. <https://doi.org/10.1364/JOCN.501410>
- Hutcheson, L. (2008). FTTx: Current Status and the Future. *IEEE Communications Magazine*, 46(7), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4557048>
- Kani, J., & Van Veen, D. (2020). Current TDM-PON Technologies. En B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. Winzer, & Y. Zhao (Eds.), *Springer Handbook of Optical Networks* (pp. 849–870). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16250-4_27
- Kazovsky, L. G., Cheng, N., Shaw, W., Gutierrez, D., & Wong, S. (2011). *Broadband Optical Access Networks* (1a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470910931>
- Khan, I. (2022). *Machine Learning for Multi-Layer Open and Disaggregated Optical Networks* [Doctoral thesis]. Politecnico Di Torino.

- Koonen, T. (2006). Fiber to the Home/Fiber to the Premises: What, Where, and When? *Proceedings of the IEEE*, 94(5), 911–934. <https://doi.org/10.1109/jproc.2006.873435>
- Kumar, P., & Srivastava, A. (2015). Electrical Spreading Code-Based OFDM Optical Access Networks for Budget Enhancement and Reduced System Bandwidth Requirement. *Journal of Optical Communications*, 36(4). <https://doi.org/10.1515/joc-2014-0081>
- Lallukka, S., & Raatikainen, P. (2006). *Passive optical networks: Transport concepts*. VTT.
- Lam, C. F. (Ed.). (2007). *Passive optical networks: Principles and practice*. Elsevier/Academic Press.
- Lam, C. F., & Yin, S. (2020). Evolution of fiber access networks. En *Optical Fiber Telecommunications VII* (pp. 827–865). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816502-7.00022-1>
- 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>
- Liu, Y., Yang, C., Yang, F., & Li, H. (2014). The application of cost-effective lasers in coherent UDWDM-OFDM-PON aided by effective phase noise suppression methods. *Optics Express*, 22(6), 6276. <https://doi.org/10.1364/OE.22.006276>
- Loong, C. C. (2018). *Hybrid Optical and Wireless Broadband Access Network Optimisation and Survivability* [Doctoral Thesis]. Universiti Tunku Abdul Rahman.
- Luo, Y., Zhou, X., Effenberger, F., Yan, X., Peng, G., Qian, Y., & Ma, Y. (2013). Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2). *Journal*

of *Lightwave Technology*, 31(4), 587–593.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2215841>

- Maeda, Y., Okada, K., & Faulkner, D. (2001). FSAN OAN-WG and future issues for broadband optical access networks. *IEEE Communications Magazine*, 39(12), 126–132. <https://doi.org/10.1109/35.968823>
- Mahloo, M., Chen, J., & Wosinska, L. (2015). PON versus AON: Which is the best solution to offload core network by peer-to-peer traffic localization. *Optical Switching and Networking*, 15, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2014.03.001>
- Meng, F. (2018). *Machine Learning in Optical Fibre Networking Under Uncertainty* [Doctoral Thesis, University of Bristol]. research-information.bris.ac.uk/ws/portalfiles/portal/193984369/
- Mohammadani, K. H., Hossen, M., Butt, R. A., Memon, K. A., & Shaikh, M. M. (2022). ONU migration using network coding technique in Virtual Multi-OLT PON Architecture. *Optical Fiber Technology*, 68, 102788. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102788>
- Muciaccia, T., Gargano, F., & Passaro, V. (2014). Passive Optical Access Networks: State of the Art and Future Evolution. *Photonics*, 1(4), 323–346. <https://doi.org/10.3390/photonics1040323>
- Mukherjee, B., Tomkos, I., Tornatore, M., Winzer, P., & Zhao, Y. (Eds.). (2020). *Springer Handbook of Optical Networks*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-16250-4>
- Musumeci, F., Rottondi, C., Nag, A., Macaluso, I., Zibar, D., Ruffini, M., & Tornatore, M. (2018). *An Overview on Application of Machine Learning Techniques in Optical Networks* (arXiv:1803.07976). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.07976>
- Pfeiffer, T. (2020). PON Architecture Enhancements. En B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. Winzer, & Y. Zhao (Eds.), *Springer Handbook*

of Optical Networks (pp. 913–949). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-16250-4_29

Sales, V., Segarra, J., Polo, V., Velásquez, J. C., & Prat, J. (2016). UDWDM-PON Using Low-Cost Coherent Transceivers With Limited Tunability and Heuristic DWA. *Journal of Optical Communications and Networking*, 8(8), 582. <https://doi.org/10.1364/JOCN.8.000582>

Shahpari, A., Ferreira, R. M., Luis, R. S., Vujicic, Z., Guiomar, F. P., Reis, J. D., & Teixeira, A. L. (2017). Coherent Access: A Review. *Journal of Lightwave Technology*, 35(4), 1050–1058.

Shanan, H., & Ciydem, M. (2022). Radio over Fiber Passive Optic Network Design. *2022 2nd International Conference on Computing and Machine Intelligence (ICMI)*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ICMI55296.2022.9873808>

Skubic, B., In De Betou, E., Ayhan, T., & Dahlfors, S. (2012). Energy-efficient next-generation optical access networks. *IEEE Communications Magazine*, 50(1), 122–127.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6122542>

Skubic, B., & Wosinska, L. (2020). Introduction to Optical Access Networks. In B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. Winzer, & Y. Zhao (Eds.), *Springer Handbook of Optical Networks* (pp. 831–848). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16250-4_26

Sudtasan, T. (2018). *Adoption and Diffusion of Optical Fiber Broadband in Thailand* [Doctoral Thesis, Waseda University].
<https://core.ac.uk/download/pdf/161813227.pdf>

Teixeira, A. (2010). Standardization in PONs: Status and possible directions. *2010 12th International Conference on Transparent Optical Networks*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2010.5549141>

- Teixeira, A., Lavery, D., Ciaramella, E., Schmalen, L., Iiyama, N., Ferreira, R. M., & Randel, S. (2020). DSP Enabled Optical Detection Techniques for PON. *Journal of Lightwave Technology*, 38(3), 684–695.
- Thygesen, Ø. B. (2015). *A Case Study of a National Open Access Network in Norway* [Master Thesis]. Norwegian University of Science and Technology.
- Tran, N. K. (2013). *Wavelength reconfigurability for next generation optical access networks*. Technische Universiteit Eindhoven. <https://doi.org/10.6100/IR751519>
- Turna, Ö. C. (2014). *Bandwidth allocation and energy efficiency solutions in optical access networks* [Phdthesis, Institut National des Télécommunications]. <https://theses.hal.science/tel-01172614>
- Uzunidis, D., Logothetis, M., Stavdas, A., Hillerkuss, D., & Tomkos, I. (2022). Fifty Years of Fixed Optical Networks Evolution: A Survey of Architectural and Technological Developments in a Layered Approach. *Telecom*, 3(4), 619–674. <https://doi.org/10.3390/telecom3040035>
- Verma, D. K., & Garg, A. K. (2023). Analysis with gain and power for better coverage of FTTH network using WDM-PON architecture. *Journal of Optics*, 52(4), 1903–1911. <https://doi.org/10.1007/s12596-023-01098-w>
- Wang, K., Gavler, A., Machuca, C. M., Wosinska, L., Brunnström, K., & Chen, J. (2016). Migration strategies for FTTx solutions based on active optical networks. *IEEE Communications Magazine*, 54(2), 78–85. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7402265>
- Weis, E., Hölzl, R., Breuer, D., & Lange, C. (2009). GPON FTTH trial—Lessons learned. *2009 Asia Communications and Photonics conference and Exhibition (ACP), 2009-Supplement*, 1–7. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5405442>

Zacharias, J., Supriya, S. S., & Narayanan, V. (2018). Full-duplex hybrid FTTH and RoF transport system based on polarization modulators. *Optik*, 175, 256–262. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.09.001>

Zheng, J., & Mouftah, H. T. (2009). A survey of dynamic bandwidth allocation algorithms for Ethernet Passive Optical Networks. *Optical Switching and Networking*, 6(3), 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2009.03.003>



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Cabrera Ulloa, Héctor Felipe** con C.C: # **0920566304** autor del trabajo de titulación: Análisis comparativo de las técnicas de modulación DPSK y QPSK en una red GPON-FTTH mediante simulación en Python, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 13 marzo del 2025

f. _____

Nombre: **Cabrera Ulloa, Héctor Felipe**

C.C: 092056630-4



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis comparativo de las técnicas de modulación DPSK y QPSK en una red GPON-FTTH mediante simulación en Python		
AUTOR(ES)	Cabrera Ulloa, Héctor Felipe		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Peñañiel Olivo, Kety Jenny; Bohórquez Heras, Daniel Bayardo; Ubilla González, Ricardo Xavier		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	13 marzo del 2025	No. DE PÁGINAS:	52 p.
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Ópticas, Fundamentos de Comunicaciones, Tecnología, Programación informática.		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Modulación, Fase, Comunicaciones, GPON, FTTH, Python		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>En el presente documento se presenta el “Análisis comparativo de las técnicas de modulación DPSK y QPSK en una red GPON-FTTH mediante simulación en Python”. El tema fue propuesto con la finalidad de demostrar que no es necesario adquirir una herramienta de simulación, como por ejemplo OptiSystem, en su lugar se utilizará el lenguaje de programación Python y su librería OpticomPy, la cual permite simular entornos optimizando parámetros de redes de comunicación y así brindar eficiencia en la transmisión de datos. En el capítulo 1, se presenta la descripción general del trabajo de titulación, entre lo temas que más se destacan es la definición del problema a investigar, el objetivo general, los objetivos específicos y la metodología de investigación que se utilizó. En el capítulo 2, se presenta la revisión de literatura de las redes de acceso óptico, con sus respectivos estándares. En el capítulo 3, se presente el diseño de algoritmos de simulación en Python y también se utiliza un paquete computacional muy utilizado por investigadores de comunicaciones ópticas, que se denomina “OptiComPy”. Además, se muestran gráficamente y se analizan los resultados obtenidos para evaluar el rendimiento de la red GPON-FTTH y elegir adecuadamente el formato de modulación que se adapte mejor y muestra robustez.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593 98 223 8776	E-mail: filocab@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Ph.D. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo		
	Teléfono: +593 995147293		
	E-mail: celso.bohorquez@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			