



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN COMO REQUISITO PREVIO PARA LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN TECNOLOGÍAS DE LA
INFORMACIÓN MENCIÓN REDES DE COMUNICACIONES**

**COMPARACIÓN DEL COSTO DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS
REDES GPON, NGPON2 Y 50GPON EN DISTINTOS ESCENARIOS
DE DEMANDA DE ANCHO DE BANDA.**

AUTOR: CYNTHIA PAMELA PINEDA PASQUEL

DIRECTOR: GERMAN ARÉVALO, PhD.

QUITO – ECUADOR

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, CYNTHIA PAMELA PINEDA PASQUEL, con CI. 1004424956, autor del trabajo de graduación titulado: “COMPARACIÓN DEL COSTO DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS REDES GPON, NGPON2 Y 50GPON EN DISTINTOS ESCENARIOS DE DEMANDA DE ANCHO DE BANDA”, previo a la obtención del título profesional de Magister en Tecnologías de la Información mención Redes de comunicación, de la Facultad de Ingeniería.

1.- Declaro tener conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, en 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 graduación 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 Pontificia Universidad Católica del Ecuador a difundir a través de su sitio web de la biblioteca el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual de la Universidad.

Quito, 2023



Cynthia Pamela Pineda Pasquel
CI: 1004424956

APROBACION DEL TUTOR

En mi carácter de Director (a) - Tutor (a) del Trabajo de Posgrado Titulado: “COMPARACIÓN DEL COSTO DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS REDES GPON, NGPON2 Y 50GPON EN DISTINTOS ESCENARIOS DE DEMANDA DE ANCHO DE BANDA”, presentado por el maestrante CYNTHIA PAMELA PINEDA PASQUEL, titular de la Cédula de Identidad N° 1004424956 para optar al Grado de Magíster en Tecnologías de la Información mención Redes de comunicación, considero que dicho Trabajo de Investigación reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación por parte de los Lectores – Evaluadores que se designen para tal fin por parte de las autoridades de la Facultad de Ingeniería.

En la ciudad de Quito, a los 29 días de agosto de 2023.



GERMÁN VICENTE ARÉVALO BERMEO C.I. 0103152500
garevalo893@puce.edu.ec
NRO TELEFONO: 0991572515

NOTA:

Se comunica que en el servicio de análisis Turnitin, el referido trabajo de titulación alcanzó el siguiente resultado: 9 % índice de similitud con otras fuentes.

TURNITIN: INCLUIR HOJA DEL INFORME CON EL PORCENTAJE

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%	8%	2%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	openaccess.uoc.edu Fuente de Internet	3%
2	Submitted to Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) - Sede Ecuador Trabajo del estudiante	2%
3	repositorio.ucsg.edu.ec Fuente de Internet	1%
4	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Infile Trabajo del estudiante	1%
6	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet	1%
7	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
8	Submitted to Universidad San Francisco de Quito	1%
	Trabajo del estudiante	
9	docplayer.es Fuente de Internet	1%

Excluir citas Activo
Excluir bibliografía Activo

Excluir coincidencias < 1%

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Cynthia Pamela Pineda Pasquel, con cédula de ciudadanía 1004424956, declaro que todos los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo de titulación, previo a la obtención del grado de Magister en Tecnologías de la Información mención Redes de Comunicación, son de mi autoría, auténticos y originales.

Por lo que declaro que el contenido, las conclusiones y los efectos legales y académicos, que se desprendan de este trabajo son y serán de mi sola y exclusiva responsabilidad legal y académica.

Declaro que todo resultado académico que continúe con esta investigación y que se difunda tendrá como filiación la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, reconociendo al director de este trabajo de titulación en la autoría.



Cynthia Pamela Pineda Pasquel
CI: 1004424956

INDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN.....	II
APROBACION DEL TUTOR.....	III
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD.....	V
INDICE DE CONTENIDO.....	VI
INDICE DE TABLAS.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRAC.....	XII
AGRADECIMIENTO.....	14
DEDICATORIA.....	15
CAPITULO I.....	16
1.1. Introducción.....	16
1.1.1. Justificación.....	16
1.1.2. Planteamiento del problema.....	16
1.1.3. Objetivos.....	18
Objetivo general:.....	18
Objetivo específico:.....	18
CAPITULO II.....	19
2.1. Revisión de la literatura.....	19
2.1.1. Antecedentes.....	19
2.1.2. Fundamentos teóricos.....	20
Comunicación óptica.....	20
Redes ópticas pasivas (PON).....	22
Redes GPON.....	24
Arquitectura.....	25
Estándar ITU-T 984.....	28
Redes NGPON2.....	30
Arquitectura:.....	31
Estándar ITU-T G.989.....	32
Redes 50GPON.....	36
Arquitectura.....	37

Estándar ITU-T G.9804	38
Algoritmo OTS	41
CAPITULO III	43
3.1. Metodología.....	43
3.1.1. Definición de parámetros de estudio	43
3.1.2. Simulación y evaluación de las tecnologías	46
Simulación GPON	47
Simulación NGPON2	48
Simulación 50GPON	49
CAPITULO IV	51
4.1. Resultados.....	51
4.1.1. Resultados Obtenidos	51
Tecnología GPON	51
Tecnología NGPON2.....	54
Tecnología 50GPON	57
4.1.2. Análisis de costos de implementación.....	61
CAPITULO V	64
5.1. Conclusiones	64
5.2. Recomendaciones.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Atenuaciones según ITU-T 984	29
Tabla 2 Velocidad nominal por canal NGPON2	32
Tabla 3 Pérdidas de trayecto óptico NGPON2	33
Tabla 4 Niveles de potencia y sensibilidad OLT y ONU NGPON2.....	34
Tabla 5 Longitudes de onda NGPON2	35
Tabla 6 Plan de frecuencias para TWDM.....	35
Tabla 7 Velocidad nominal 50GPON	38
Tabla 8 Niveles de potencia y sensibilidad de OLT y ONT 50GPON	39
Tabla 9 Atenuaciones 50GPON, con MPM.....	39
Tabla 10 Atenuaciones 50GPON, con CEx.....	39
Tabla 11 Resumen GPON, NGPON2 y 50GPON	41
Tabla 12 Parámetros a utilizar	44
Tabla 13 Demanda Máxima de BR (Gb/s)	45
Tabla 14 Potencia óptica recibida en GPON	52
Tabla 15 Valores del diagrama del ojo en distintos escenarios	54
Tabla 16 Potencia óptica recibida en NGPON2	55
Tabla 17 Valores del diagrama del ojo en distintos escenarios	57
Tabla 18 Potencia óptica recibida en 50GPON	58
Tabla 19 Valores del diagrama del ojo en distintos escenarios	60

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fibra óptica.....	21
Figura 2 Sistema de comunicación óptico	21
Figura 3 Estructura de una red PON	23
Figura 4 Arquitectura básica PON a) TDM, b) WDM	24
Figura 5 Arquitectura de una red GPON	25
Figura 6 Arquitectura funcional NGPON2 y su coexistencia con otros sistemas PON .	31
Figura 7 Arquitectura 50G TDM PON	37
Figura 8 Arquitectura 50G TWDM PON	37
Figura 9 Longitudes de onda de 50GPON	40
Figura 10 Área seleccionada de Quito	46
Figura 11 Simulación GPON en OptiSystem	47
Figura 12 Simulación NGPON2 en OptiSystem	48
Figura 13 Simulación 50GPON en OptiSystem	49
Figura 14 Espectro óptico de la señal recibida en GPON.....	52
Figura 15 Diagrama del ojo GPON con 0dB de atenuación.....	53
Figura 16 Ancho de pulso de banda modulada NGPON2	55
Figura 17 Diagrama del ojo NGPON2 con 0dB de atenuación.....	56
Figura 18 Ancho de pulso de banda modulada 50GPON	57
Figura 19 Diagrama del ojo 50GPON con 0dB de atenuación.....	59
Figura 20 Relación Potencia/BER de las tres tecnologías	61
Figura 21 Grafica de despliegue de las tecnologías con OTS	61
Figura 22 Resultados de costos de implementación	62

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRIA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN MENCIÓN REDES DE
COMUNICACIÓN

COMPARACIÓN DEL COSTO DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS REDES GPON,
NGPON2 Y 50GPON EN DISTINTOS ESCENARIOS DE DEMANDA DE ANCHO DE
BANDA

Autor: Cynthia Pamela Pineda Pasquel

Director -Tutor: Germán Vicente Arévalo Bermeo, PhD.

Fecha: 29-08-2023

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es realizar una comparación de los costos asociados a la implementación de tecnologías PON avanzadas en contraste con la tecnología actualmente en uso en Ecuador.

Las crecientes demandas de ancho de banda por parte de los usuarios, impulsadas por las nuevas aplicaciones, están ejerciendo una presión constante sobre la capacidad de las infraestructuras de comunicación existentes. Para abordar este aumento en el tráfico de datos en las redes de telecomunicaciones, se están explorando diversas tecnologías, y entre las opciones más prometedoras destacan NGPON2 y 50GPON como estándares de acceso con un gran potencial.

En una primera etapa, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de las tecnologías PON actualmente en uso, con el fin de identificar las características y mejoras específicas de cada una de ellas. Esto permite definir los parámetros de estudio en función de las demandas actuales de los usuarios en términos de tasas de bits requeridas.

Dado que la selección de la tecnología por parte de los proveedores de servicios está fuertemente influenciada por consideraciones de costos de inversión en infraestructura, se presta especial atención a tecnologías que puedan ser implementadas en redes preexistentes. Para evaluar su viabilidad, se realiza una simulación de estas tecnologías, teniendo en cuenta

aspectos como los requisitos de potencia, el rendimiento en términos de tasa de error de bits (BER) y, fundamentalmente, el análisis de los costos asociados a su implementación. Este análisis de costos se lleva a cabo mediante el uso del algoritmo OTS (Optimal Topology Search).

Palabras clave: GPON, NGPON2, 50GPON, OLT, ONT, fibra óptica, splitter, NAP, factibilidad, Optisystem, diagrama de ojo, BER, longitud de onda, simulación, FTTH, coexistencia, costos, OTS.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRIA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN MENCIÓN REDES DE
COMUNICACIÓN

COMPARACIÓN DEL COSTO DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS REDES GPON,
NGPON2 Y 50GPON EN DISTINTOS ESCENARIOS DE DEMANDA DE ANCHO DE
BANDA

Autor: Cynthia Pamela Pineda Pasquel

Director -Tutor: Germán Vicente Arévalo Bermeo, PhD.

Fecha: 29-08-2023

ABSTRAC

The main objective of this work is to carry out a comparison of the costs associated with the implementation of advanced PON technologies in contrast to the technology currently in use in Ecuador.

The increasing bandwidth demands from users, driven by new applications, are exerting constant pressure on the capacity of existing communication infrastructures. To address this increase in data traffic in telecommunications networks, various technologies are being explored, and among the most promising options are NGPON2 and 50GPON as access standards with great potential.

In a first stage, a comprehensive analysis of the PON technologies currently in use is conducted to identify the specific features and improvements of each. This allows defining the study parameters based on current user demands in terms of required bit rates.

Since the selection of technology by service providers is heavily influenced by infrastructure investment costs, special attention is paid to technologies that can be implemented in pre-existing networks. To evaluate their feasibility, a simulation of these technologies is carried out, taking into account aspects such as power requirements, performance in terms of bit error rate (BER), and, fundamentally, the analysis of the costs associated with their implementation. This cost analysis is performed using the OTS (Optimal Topology Search) algorithm.

Keywords: GPON, NGPON2, 50GPON, OLT, ONT, optical fiber, splitter, NAP, factibility, Optisystem,, eye diagram, BER, wavelength, simulation, FTTH, coexistence, costs., OTS:

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme avanzar un escalón más, por fortalecerme todos los

días y por permitirme crecer cada día,

A mis padres por haberme forjado a ser la persona que soy,

A mis hermanos por su apoyo incondicional,

Y a mi tutor Ing. Germán Arévalo, PhD, por su asesoría e instrucción.

DEDICATORIA

Este logro es en honor a mi Madre, porque fue gracias a tu amor y dedicación que aprendí a nunca rendirme. Te extraño profundamente y esta dedicatoria es mi pequeña

forma de decirte que nunca te olvidaré.

A mi padre y hermanos con inmenso amor.

CAPITULO I

1.1. Introducción

1.1.1. Justificación

En los últimos años, diversas situaciones en el país han hecho que el uso de medios electrónicos sea esencial en la vida diaria y con ello la demanda por aplicaciones en tiempo real crece exponencialmente generando en los usuarios requerir un mayor ancho de banda debido a la gran cantidad de información que generan.

Las tecnologías que confían en el uso del cobre, al ser naturalmente limitadas, resultan inadecuadas para atender las crecientes demandas de los usuarios que requieren velocidades de ancho de banda cada vez más elevadas. Esta limitación se vuelve más acentuada a medida que aumenta la distancia entre el usuario y el centro de operaciones. En contraste, las redes de fibra óptica se presentan como una solución efectiva para este desafío. Esto se debe principalmente a su capacidad de ancho de banda sustancialmente superior en comparación con las infraestructuras basadas en cobre. Además, la continua reducción de los costos relacionados con la fabricación de componentes ópticos, como los láseres, ha fortalecido aún más la viabilidad económica de las redes ópticas.

A pesar de que la tecnología PON (Red Óptica Pasiva) ha permitido mejorar significativamente las velocidades de transmisión de información, es necesario optimizarla aún más mediante el análisis de costos y la implementación de nuevas tecnologías basadas en el mismo principio. Esto permitirá solucionar problemas de administración y ancho de banda requeridos en aplicaciones de tiempo real, mejorando aún más la experiencia del usuario.

Comparar el costo de implementación de las redes GPON, NGPON2 y 50GPON en diferentes escenarios de demanda de ancho de banda permitirá a los proveedores de servicios evaluar las ventajas y desventajas de cada tecnología en términos de costos, capacidad, eficiencia y escalabilidad. Esta información puede ser valiosa para tomar decisiones informadas sobre cómo invertir en la infraestructura de red para mejorar la calidad del servicio y la satisfacción del cliente, al mismo tiempo que se optimiza la rentabilidad.

1.1.2. Planteamiento del problema

El aumento de la demanda de ancho de banda en las redes de acceso de los proveedores de servicios de telecomunicaciones ha llevado a la necesidad de invertir en nuevas tecnologías para satisfacer las necesidades de los usuarios finales. Una de las tecnologías más utilizadas son las redes de acceso óptico para proporcionar servicios de alta velocidad y mayor capacidad, existen diversas propuestas topológicas para las redes de acceso óptico de nueva generación, pero la topología PON es la más utilizada en los grandes despliegues de FTTH (Fiber To The Home). Esta topología se caracteriza por su estructura óptica en forma de árbol que se basa en el uso de divisores ópticos (Arévalo Germán, 2017).

En todo el mundo, una cifra que supera los 700 millones de usuarios emplea servicios que se basan en tecnologías de redes PON, y este número continúa en aumento conforme los proveedores de servicios efectúan la transición de sus antiguas redes de cobre a infraestructuras de fibra óptica, lo que demanda una mayor capacidad de procesamiento de datos a través de esta vía de comunicación.

A partir del año 2010 en el Ecuador comenzó el despliegue masivo de redes GPON para ofrecer servicios de internet de alta velocidad, conservando su implementación hasta la actualidad como medio de transmisión que presenta mejores características de velocidad. Sin embargo, aunque esta tecnología ha mejorado la velocidad, su capacidad en términos de administración, escalabilidad, flexibilidad y ancho de banda no es suficiente para manejar la cantidad de información generada, lo que no proporciona una mejor experiencia de usuario. Es necesario explorar y adoptar tecnologías más avanzadas para poder satisfacer la creciente demanda de servicios de internet de alta velocidad y ofrecer una experiencia de usuario óptima. No obstante, los proveedores de servicios de telecomunicaciones enfrentan el desafío de evaluar los gastos asociados a la adopción de cada tecnología en relación con las diversas necesidades de ancho de banda que pretenden abordar en distintos contextos, y deben discernir cuál alternativa representa la elección más adecuada considerando factores de costos y eficiencia.

En Ecuador, la falta de investigaciones en el área de nuevas tecnologías PON y la limitación de recursos económicos han impedido una constante evolución y mantenido el despliegue de tecnología GPON. Esto ha planteado desafíos en la evaluación e implementación de tecnologías más avanzadas como NGPON2 y 50GPON, las cuales tienen el potencial de elevar notablemente la calidad del servicio y la experiencia del usuario en el país.

Es necesario fomentar y apoyar la investigación y desarrollo en el área de tecnologías PON en el Ecuador para lograr una constante evolución y mantenerse a la par con los avances tecnológicos globales. Además, se deben buscar alternativas de financiamiento y colaboración entre el sector público y privado para asegurar la implementación de tecnologías más avanzadas y mejorar la calidad del servicio de internet para los usuarios.

1.1.3. Objetivos

Objetivo general:

Comparar el costo de implementación de las redes GPON, NGPON2 y 50GPON en distintos escenarios de demanda de ancho de banda mediante el uso del algoritmo OTS.

Objetivo específico:

- Estudiar en la bibliografía las redes PON mediante publicaciones científicas para comprender las nuevas tecnologías.
- Definir los parámetros de estudio mediante los estándares de las tecnologías PON para la demanda de bit-rate por usuarios.
- Simular la implementación de los escenarios de las nuevas tecnologías PON estudiadas mediante el uso del algoritmo OTS.
- Evaluar los resultados obtenidos mediante la simulación para la comparación de costos de implementación de las distintas redes PON.

CAPITULO II

2.1. Revisión de la literatura

El presente capítulo tiene como objetivo la comprensión detallada de las investigaciones previas y los trabajos relacionados que se han llevado a cabo en el campo de las redes de fibra óptica y tecnologías PON. Obteniendo las bases conceptuales necesarias mediante artículos científicos, tesis, informes técnicos y otros documentos relevantes que aborden temas relacionados con las tecnologías GPON, NGPON2 y 50GPON.

2.1.1. Antecedentes

Desde principios de la década de 2000, la fibra óptica se ha convertido en un elemento clave en las grandes redes de comunicaciones y ha llegado a la mayoría de los hogares. La cantidad de información que generamos sigue aumentando exponencialmente gracias a servicios en la nube, el Internet de las cosas y contenidos audiovisuales, lo que demanda una mayor velocidad y capacidad de transmisión en la red.

Para atender a estas necesidades actuales y futuras, las tecnologías FTTH deben adaptarse constantemente. La tecnología FTTH (Fiber To The Home) se fundamenta en la implementación de redes de fibra óptica que se despliegan hasta los hogares de los usuarios para ofrecer servicios avanzados de telecomunicaciones. La introducción de esta tecnología está asociada al uso de redes ópticas pasivas conocidas como PON (Passive Optical Network). Estas redes reducen los costos de operación e implementación, ya que constan únicamente de componentes pasivos que enrutan el tráfico a través de la red. Además, son más económicas que una red directa, proporcionan más ancho de banda a los usuarios finales y pueden cubrir mayores distancias que tecnologías anteriores como ADSL.

La tecnología FTTH con redes PON representa una solución escalable y rentable para proveer de servicios avanzados de telecomunicaciones a los usuarios finales, permitiendo el acceso a servicios de alta velocidad y mejorando la experiencia del usuario final.

En la actualidad, la mayoría de los sistemas PON utilizados son del tipo Gigabit, siguiendo el estándar ITU-T GPON o el estándar IEEE GEPON. Con una base de usuarios que supera los 700 millones en todo el mundo, las infraestructuras de redes

PON siguen expandiéndose a medida que los proveedores de servicios modernizan sus redes de cobre para satisfacer la creciente necesidad de ancho de banda. En respuesta a este incremento en la demanda, organismos internacionales como ITU-T, FSAN y IEEE han estado colaborando en el desarrollo de soluciones que permitan ampliar la capacidad de las redes existentes y en la definición de los requisitos para sistemas de próxima generación basados en tecnologías de redes ópticas pasivas.

La tecnología GPON y XGPON posibilita el uso compartido de canales mediante la técnica de TDM (multiplexación por división en el tiempo) y puede servir para conectar hasta 64 usuarios. Tras la aparición del estándar XGPON (10 Gb/s), se comenzó a explorar la tecnología NGPON, aunque su implementación comercial se retrasó debido al alto costo de los dispositivos ópticos sintonizables y a la falta de madurez del sistema. El estándar NGPON2, pionero en utilizar una combinación de transmisión TDM/WDM con cuatro o más longitudes de onda DWDM tanto para la transmisión descendente (DS) como ascendente (US), se introdujo para mejorar la capacidad de las redes y al mismo tiempo mantener la compatibilidad con la infraestructura de ODN existente (Arévalo Germán, 2017).

En comparación con la técnica de multiplexación de múltiples longitudes de onda, este nuevo estándar de próxima generación posibilita enlaces ascendentes y descendentes utilizando la misma longitud de onda, lo que resulta en un ancho de banda cinco veces superior al ofrecido por el 10G PON. En septiembre de 2021, ITU-T presentó la Recomendación G.9804.3, que describe un sistema basado en una red óptica pasiva con una capacidad de 50 Gb/s. Dicha recomendación resalta el potencial de la tecnología 50GPON para convertirse en el estándar líder de la industria en el acceso óptico de próxima generación.

2.1.2. Fundamentos teóricos

Comunicación óptica

La comunicación óptica consiste en la transmisión de información mediante pulsos de luz utilizando cables de fibra óptica. La fibra óptica está diseñada para transmitir la luz a través de un núcleo central hecho de vidrio o plástico. En la Figura 1 se puede observar como la luz se refleja dentro del núcleo y se propaga a través de la fibra sin perder energía, hasta que llega al otro extremo de la fibra, donde se detecta y se convierte de nuevo en información digital por un dispositivo receptor. Este

principio permite ser el medio de transmisión de todas las comunicaciones ópticas (Moreno, 2018).

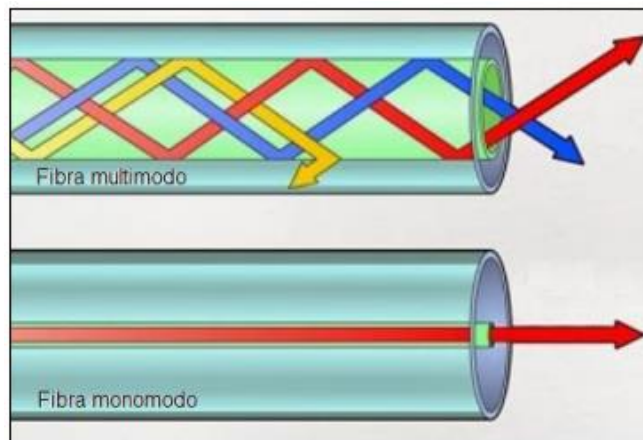


Figura 1 Fibra óptica

Fuente: (Moreno,2018)

La Figura 2 muestra un esquema de la comunicación óptica, resaltando sus componentes clave que incluyen la fuente emisora, el medio de transmisión compuesto por fibra óptica y el receptor o dispositivo detector de luz.

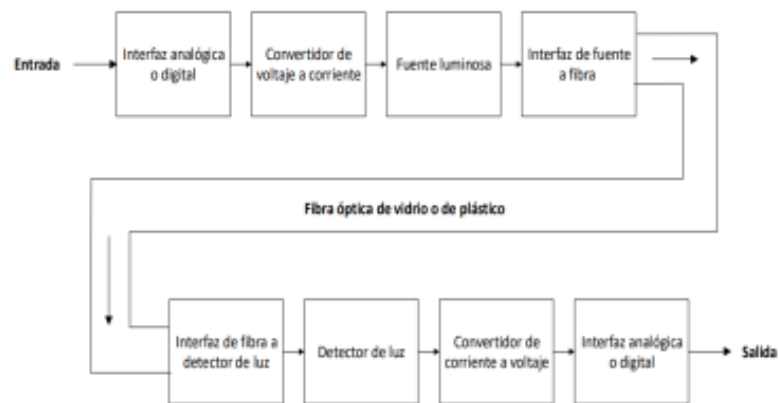


Figura 2 Sistema de comunicación óptico

Fuente: (Brito, 2022)

El transmisor convierte una señal eléctrica en una señal óptica utilizando un dispositivo llamado LED o láser. La señal óptica se transmite a través de una fibra óptica, que es un cable hecho de vidrio o plástico que se utiliza para transportar la señal óptica a largas distancias con muy poca pérdida de señal. En el extremo receptor, la señal óptica se convierte nuevamente en una señal eléctrica utilizando un dispositivo llamado fotodetector (Brito, 2022).

En un sistema de comunicación óptico más complejo, puede haber varios componentes adicionales, como amplificadores ópticos, divisores ópticos, acopladores de fibra óptica, filtros ópticos, etc., según las necesidades del sistema (Espinoza & Baque, 2010).

Los sistemas de comunicación ópticos se utilizan en diversas aplicaciones, como en redes de telecomunicaciones, televisión por cable, medicina y en sistemas de seguridad, entre otros. La tecnología de comunicación óptica se ha convertido en una de las formas más rápidas y eficientes de transmitir información a través de largas distancias.

Para el éxito en tecnología de las telecomunicaciones debe adaptarse a las demandas futuras y ser compatible con su tecnología predecesora. Las redes pasivas tienen varias propuestas y caminos de desarrollo. Las redes ópticas tienen la capacidad de resolver los problemas de congestión que suelen surgir en las redes de acceso, especialmente en la última milla, al proporcionar un ancho de banda adaptable capaz de respaldar los servicios de telecomunicaciones más recientes. Esto conduce a una mejora sustancial en la calidad de los servicios ofrecidos y garantiza a los usuarios un aumento significativo en la capacidad de la red de acceso, que puede alcanzar varios cientos de gigabits por segundo.

Redes ópticas pasivas (PON)

Una red óptica pasiva es una tecnología de comunicación óptica ampliamente empleada en la actualidad. Se caracteriza por utilizar fibras ópticas como medios de transmisión, conectando centrales con dispositivos pasivos intermedios y alcanzando a múltiples usuarios.

La tecnología PON (Passive Optical Network) permite la compartición de un solo cable de fibra óptica entre un grupo de hogares o usuarios, conectando a 32, 64 e incluso 128 usuarios mediante el uso de divisores ópticos. Además, esta tecnología es capaz de superar las distancias de cobertura logradas por las operadoras que utilizan tecnología DSL (Digital Subscriber Line), alcanzando distancias que varían entre 20 y 60 km, con velocidades de 2.5 y 10 Gbps (Sarango, 2015).

Esta tecnología emplea una topología punto a multipunto, donde la infraestructura parte de una terminal de línea óptica (OLT, por sus siglas en inglés, Optical Line Terminal) ubicada en el lado del proveedor. Desde la OLT, la señal se divide mediante un divisor de potencia y se distribuye hasta las unidades de red óptica (ONU, por sus

siglas en inglés, Optical Network Unit) o terminales de red óptica (ONT, por sus siglas en inglés, Optical Network Terminal) que reciben la misma señal de la OLT (Brito, 2022). La Figura 3 ilustra esta estructura básica de una red PON.

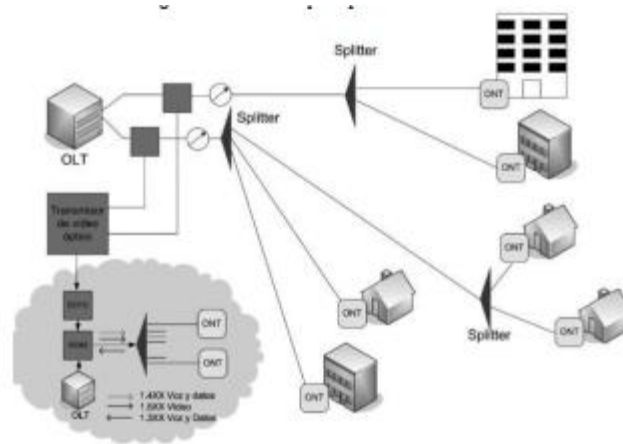


Figura 3 Estructura de una red PON

Fuente: (Brito, 2022)

Entonces se puede decir que en el lado del proveedor de servicios el transmisor-receptor de datos ópticos se denomina OLT y en el lado del usuario el transmisor-receptor de datos ópticos es ONU u ONT (Jama Gómez, 2017).

En el canal descendente, una red PON se configura como una red punto-multipunto, donde la OLT emite una serie de contenidos hacia el divisor. El divisor, a su vez, se encarga de distribuir estos contenidos a todas las unidades ONU presentes. Durante este proceso, el divisor realiza una filtración y transmite exclusivamente los contenidos destinados al usuario específico correspondiente. Para llevar a cabo esta transmisión de información, se utiliza la técnica de multiplexación por división en el tiempo (TDM), lo que permite transmitir los datos en diferentes intervalos temporales. En el canal ascendente, una PON funciona como una red punto a punto, en la que las diversas ONUs transmiten datos hacia la OLT. Debido a esta configuración, se hace necesario también aplicar TDM para que cada ONU envíe sus datos en momentos temporales diferentes, y esta gestión temporal está bajo el control de la OLT. Para evitar interferencias entre los contenidos en el canal descendente y ascendente, se utilizan dos longitudes de onda diferentes mediante técnicas de WDM. Al utilizar longitudes de onda distintas, es necesario el uso de filtros ópticos para separarlas posteriormente (Velásquez, 2019).

En los últimos años, muchos grupos de investigación han explotado las arquitecturas PON, principalmente inspiradas en la TDM (Multiplexación por división de tiempo) y WDM (Multiplexación por división de longitud de onda), los cuales se muestra en la Figura 4 (Velásquez, 2019).

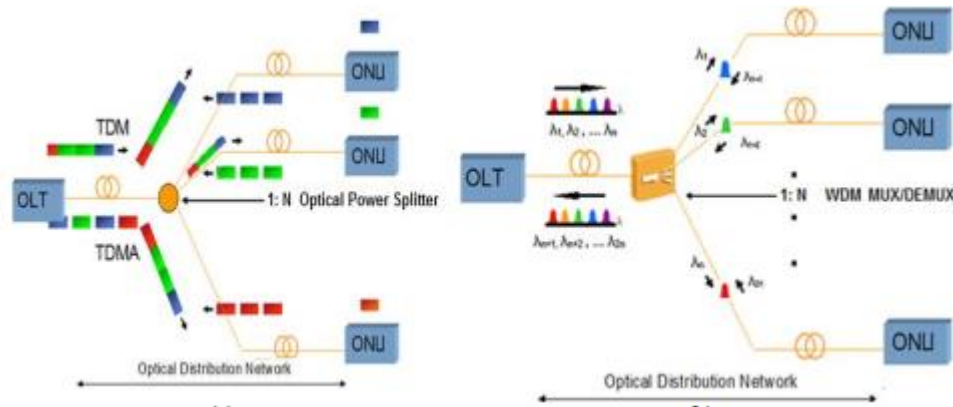


Figura 4 Arquitectura básica PON a) TDM, b) WDM

Fuente: (Velásquez, 2019)

Los estándares PON como EPON, GPON/EPON y XG(S)PON/10GEPON, utilizan arquitectura TDM. Los primeros estándares PON, anteriores al año 2004, utilizaban PON basados en ATM (APON y BPON), con anchos de banda agregados del orden de 155 Mbit/s hasta 622 Mbit/s. Más tarde, con el uso de protocolos de TDM y Ethernet, se alcanzaron capacidades agregadas en torno a 2,5 Gbit/s y 1,25 Gbit/s según los estándares GPON/EPON. En la actualidad, estas son las soluciones FTTH desplegadas. Sin embargo, los organismos de estandarización de PON han impulsado el esfuerzo hacia sistemas FTTH de mayor capacidad, provocando la aparición de las PON de Nueva Generación NGPON. En 2010, la UIT (XGPON) y el IEEE (10GEPON) estandarizaron sistemas avanzados de acceso óptico de alta velocidad basados en TDM de hasta 10 Gbit/s, con capacidades asimétricas (DS: 10G y US: 1G) (Velásquez, 2019).

El costo de implementación de una red óptica pasiva depende de varios factores, como la capacidad de transmisión de datos, la distancia de transmisión, la densidad de usuarios, entre otros.

Redes GPON

GPON (Gigabit capable Passive Optical Network) es un estándar de red PON que se define en la recomendación emitida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU-T G-984: las Características Generales de GPON en G.984.1, la Especificación de

la Capa Dependiente de los Medios Físicos PMD (Physical Medium Dependent) en G.984.2, la Especificación de la Capa de Transmisión en G.984.3 y la Especificación de Gestión y Control de la ONT en G.984.4 (Melo, Toledo, Gómez, & Velasco, 2018).

GPON proporciona un sistema de velocidades de transmisión que varía desde 622 Mbps hasta 2.5 Gbps, con la capacidad de adaptarse y escalarse según sea necesario (Larrea & Rivera, 2010), las más utilizadas son:

- 2.488 Gbps de descarga y 1.244 Gbps de carga
- 2.488 Gbps de descarga y 2.488 Gbps de carga

Una de las características fundamentales de las redes GPON es su alcance físico, que está definido por las recomendaciones de la ITU-T y varía en un rango de 10 km a 20 km, especificando la distancia entre la OLT y la ONT. Además, otro aspecto relevante de la red GPON es su retardo máximo de transferencia de la señal, que tiene un límite de 1,5 ms como máximo, teniendo en cuenta que el retardo de transmisión óptica en la fibra es de 5 ns por metro (Rábano, 2022).

Arquitectura

La estructura de una red GPON se compone principalmente de la red de acceso pasiva PON, como se ilustra en la Figura 3, que se extiende desde la OLT hasta la ONT. No obstante, utiliza diferentes arquitecturas, como FTTH, FTTN, FTTC, FTTB, y emplea el método de encapsulamiento basado en GEM (Generalized Encapsulation Method), lo que le permite ser compatible con una variedad de servicios como TDM, Ethernet, ATM, entre otros. En la Figura 5 se detalla la división principal de la red GPON en Red de Feeder, Red de Distribución y Red de Acometida o Dispersión.

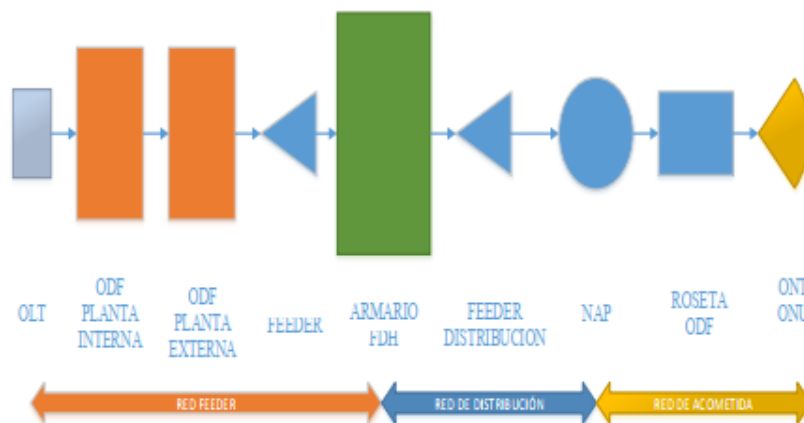


Figura 5 Arquitectura de una red GPON

Fuente: (Endara, 2021)

Red Feeder:

En una red GPON, la red de feeder se refiere a la sección que establece la conexión entre la OLT y los armarios que albergan los splitters. La OLT, que se encuentra en la central, asume la responsabilidad de transmitir y recibir información a través de la fibra óptica, mientras que los splitters tienen la tarea de dividir la señal óptica en múltiples señales que se dirigen a las ONU. La red de feeder utiliza fibras ópticas de alta capacidad, con una tasa de 10 Gbps o superior, para transportar la información entre la OLT y los splitters. Los cables comúnmente empleados tienen capacidades de 96 hilos, 144 hilos o 288 hilos, y están diseñados en conformidad con el estándar de fibra monomodo G.652. La elección del tipo de cable depende de la densidad de población en el área donde se implementará la ODN (Prado, 2021). Es importante destacar que esta sección de la red es propiedad de la compañía de telecomunicaciones y es la que brinda el servicio a los usuarios finales a través de las ONU.

En la red de feeder, podemos identificar la presencia de componentes tanto activos como pasivos. La OLT, que es un dispositivo activo, requiere una fuente de alimentación eléctrica y dispone de múltiples puertos GPON, cada uno de los cuales tiene la capacidad de atender a un máximo de 64 ONU, es decir, puede satisfacer las necesidades de hasta 64 usuarios finales (Endara, 2021). Además, existen OLT modulares que permiten la ampliación del número de usuarios mediante la adición de tarjetas adicionales. En cuanto a elementos pasivos se tiene ODF (Optical Distribution Frame) en la central, racks de planta externa, mangas de empalme, FDB (Fiber Distribution Box), FDF (Fiber Distribution Frame), FDH (Fiber Distribution Hub) y splitters.

Red Distribución:

La red de distribución se origina a partir de un FDH o una manga porta splitter, los cuales se conectan directamente al cable de feeder mediante mangas. Esta red incluye diversos componentes pasivos, como NAP, splitters secundarios y cables de fibra óptica con distintas capacidades, ya sean instalados en tendidos aéreos o canalizados. Su función principal es facilitar la conexión entre la red de feeder y la red de dispersión. La propiedad de la red de distribución puede corresponder tanto a la compañía de telecomunicaciones como al propietario del edificio, dependiendo del contexto. Para esta red, se emplea típicamente fibra óptica monomodo G652D, que está optimizada para operar en la banda de los 1310 nm. Esta fibra es capaz de transmitir señales de luz a largas distancias con

una atenuación mínima y sin degradación significativa de la calidad de la señal (Prado, 2021).

Los componentes pasivos ópticos que integran la red de distribución en una Optical Distribution Network (ODN) incluyen principalmente armarios de distribución FDH (Fiber Distribution Hub), splitters secundarios, NAP, divisores, acopladores, conectores y núcleos de parcheo de fibra óptica. Además de estos elementos ópticos, también se emplean componentes no ópticos, como anclajes y herrajes de tipo A, utilizados en áreas urbanas, y herrajes de tipo B, empleados en zonas de carretera. Estos componentes no ópticos desempeñan un papel crucial en la sujeción y despliegue de la fibra óptica. Asimismo, la infraestructura de la red de distribución puede comprender armarios, pedestales, paneles de conexión, postes, entre otros (Espinoza & Baque, 2010).

Red Dispersión:

La red de dispersión está formada por cables de fibra óptica que se extienden desde la NAP hasta la roseta óptica ubicada en la residencia del usuario. En esta parte de la red, se emplean cables drop que se distinguen por contener dos hilos en su interior, y son adecuados tanto para aplicaciones en interiores como en exteriores. El hilo principal se utiliza para la transmisión de datos, mientras que el segundo actúa como una medida de respaldo en caso de fallo en el primero. Es importante destacar que en la red de dispersión se requiere el uso de cables drop que cumplan con los estándares G.657.A1 o G.657.A2. Estos estándares aseguran que el cable tenga una mayor flexibilidad y resistencia a la curvatura, reduciendo así la atenuación de la señal. Las fibras ópticas que cumplen con estos estándares están diseñadas para soportar tanto grandes como pequeñas curvaturas sin sufrir pérdidas en la calidad de la señal. Además, las fibras G.657 están optimizadas para reducir la pérdida de macro reflexión en comparación con las fibras ITU-T G.652D, lo que las hace ideales para su uso en toda la red de acceso (Prado, 2021).

Dentro de la red de dispersión, se incluyen tanto elementos pasivos como activos, siendo la roseta óptica un componente pasivo clave que actúa como el punto de terminación de la ODN. Esta roseta se instala en la residencia del cliente, en cercanía al equipo activo ONT, y se establece la conexión entre la roseta y la ONT mediante un patchcord SC/APC. Esta conexión permite brindar servicios como telefonía o acceso a Internet al cliente.

Estándar ITU-T 984

El sistema de transmisión en una red PON es bidireccional y utiliza una única fibra óptica para transmitir tanto la información descendente como ascendente. Dentro del marco de la norma ITU-T G.984, en una red GPON, se establece la asignación de distintas longitudes de onda para diferentes tipos de tráfico. La longitud de onda de 1.490 nm se reserva para el tráfico descendente, que comprende servicios como Internet, VoIP y IPTV. Por otro lado, la longitud de onda de 1.310 nm se dedica al tráfico ascendente. Además, mediante el uso de WDM, se designa una tercera longitud de onda específica (1.550 nm) destinada exclusivamente para la transmisión de señales de vídeo RF en formato de broadcast, abarcando tanto la transmisión analógica como digital, HDTV y servicios de vídeo bajo demanda. En la transmisión descendente, la información se envía en modo broadcast, lo que significa que todos los usuarios de la red reciben la misma información. Para garantizar la privacidad de las comunicaciones, se utiliza un sistema de encriptamiento. En cambio, en la transmisión ascendente se utiliza el protocolo de acceso múltiple TDMA, que asigna un período de tiempo específico a cada usuario para transmitir su información, permitiendo que varios usuarios compartan el mismo canal de transmisión (es decir, la misma longitud de onda). De esta forma, se optimiza el uso del ancho de banda disponible (Espinoza & Baque, 2010).

En la Tabla 1, se detallan los rangos de potencia mínima y máxima, así como la sensibilidad mínima de potencia y la sobrecarga mínima tanto para la OLT como para la ONT. También se proporcionan las atenuaciones o pérdidas de inserción de los componentes pasivos de la red y se indica la pérdida total del presupuesto óptico para sistemas GPON, conforme a las directrices de la recomendación ITU-T G.984.2.

Tabla 1 Atenuaciones según ITU-T 984

	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PARÁMETRO
OLT	Mean launched power MIN	dBm	+1.5
	Mean launched power MAX	dBm	+5
	Minimum sensitivity	dBm	-28
	Minimum overload	dBm	-8
	Downstream optical penalty	dB	0.5
ONU	Mean launched power MIN	dBm	+0.5
	Mean launched power MAX	dBm	+5
	Minimum sensitivity	dBm	-27
	Minimum overload	dBm	-8
	Upstream optical penalty	dB	0.5
Optical Loss	MIN at 1490nm	dB	13
	MAX at 1490nm	dB	28
	MIN at 1310nm	dB	13
	MAX at 1310nm	dB	28
SPLITTER	1:2	dB	3.25
	1:4	dB	6.5
	1:8	dB	9.75
	1:16	dB	13
	1:32	dB	16.25
	1:64	dB	19.50
FIBRA	1310nm	dB	0.35
	1490nm	dB	0.30
	1550nm	dB	0.25
	FUSIONES	dB	0.1
	CONECTORES	dB	0.5
	ODF	dB	0.5

Fuente: (Prado, 2021)

La potencia atenuada es la cantidad de energía perdida a lo largo del recorrido de la señal óptica debido a diversas causas, como pérdidas en la fibra óptica, acoplamientos, conectores, fusiones y splitters ópticos. La norma ITU-T G984.2 establece los valores máximos permitidos para la potencia atenuada en un enlace de fibra óptica. Es importante tener en cuenta estas pérdidas para garantizar la calidad y la eficiencia de la transmisión de la señal en la red GPON (Endara, 2021).

El protocolo OMCI (Instrumentación de Cliente de Gestión Abierta) se configura durante la fase de inicio de la ONT y se implementa a través de una conexión GEM entre la controladora del OLT y la controladora de la ONT. Este protocolo opera de manera asimétrica, donde el OLT desempeña el rol de maestro y la ONT el de esclavo. Un único

OLT tiene la capacidad de gestionar múltiples ONTs mediante diversas instancias del protocolo que operan en canales de control independientes. La recomendación G.984.4 de la ITU-T establece los requisitos de la OMCI para manejar la ONT en áreas como la gestión de la configuración, la gestión de fallos, la gestión del rendimiento y la gestión de la seguridad (Espinoza & Baque, 2010).

GPON representa una innovadora tecnología que permite la total unificación de todos los servicios de telecomunicaciones en una sola infraestructura de red basada en IP. Este enfoque se traduce en una notable reducción de los costos para los operadores, ya que elimina la necesidad de mantener redes separadas para cada tipo de servicio. Este ahorro potencial se traduce en la posibilidad de ofrecer tarifas más asequibles a los suscriptores, brindándoles servicios mucho más avanzados, como voz sobre IP, televisión digital en alta definición, contenido bajo demanda, acceso a internet de banda ancha sin limitaciones geográficas ni de velocidad, juegos en línea, entre otros. Sin embargo, su velocidad es limitada en comparación con otras tecnologías PON más avanzadas.

Para hacer frente a las crecientes demandas de ancho de banda, se han desarrollado soluciones como NGPON2 y 50GPON, que permiten velocidades de transmisión mucho más altas. El costo de implementación de estas tecnologías es mayor, pero pueden resultar más rentables a largo plazo debido a su mayor capacidad y velocidad.

Redes NGPON2

Las redes ópticas pasivas de próxima generación pueden ofrecer velocidades de transmisión de datos superiores a 10 Gb/s, tal como se evidencia en las normas de la serie ITU-T G989, también conocidas como normas NGPON2 (Next-Generation Passive Optical Network 2). El estándar NGPON2 fue introducido por primera vez en las normas PON en 2013, utiliza una transmisión híbrida TDM/WDM (TWDM PON) con cuatro u ocho longitudes de onda DWDM para DS y para US, manteniendo la compatibilidad con la ODN heredada (Arévalo, 2016).

En los sistemas NGPON2, la red de alimentación (conocida como red feeder) tiene la capacidad de soportar una velocidad mínima adicional de 10 [Gbps] en la dirección ascendente y 40 [Gbps] en la dirección descendente utilizando una arquitectura TWDM con 4 longitudes de onda (λ). Además, puede alcanzar velocidades máximas de hasta 80

[Gbps] tanto en la dirección ascendente como en la descendente mediante un diseño que utiliza una multiplexación tipo TWDM con 8 longitudes de onda (λ) (Brito, 2022).

Arquitectura:

La arquitectura de un sistema NGPON2 guarda similitudes fundamentales con los estándares GPON y XGPON al seguir una configuración pasiva que emplea una topología punto a multipunto, similar a la de sus predecesores. Esto implica la preservación de la red de alimentación, distribución y dispersión. Sin embargo, NGPON2 presenta mejoras y características avanzadas en sus dispositivos activos. Estos sistemas son compatibles con nuevas ODN que pueden incluir filtros de longitud de onda exclusivamente o una combinación de divisores de potencia y longitud de onda.

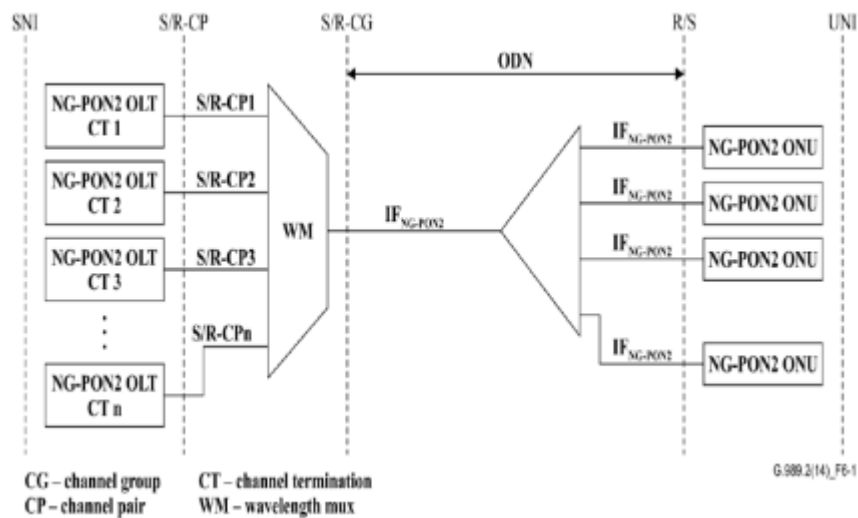


Figura 6 Arquitectura funcional NGPON2 y su coexistencia con otros sistemas PON

Fuente: (Cando, 2020)

La Figura 6 ilustra la estructura fundamental de una red NGPON2 que hace uso de múltiples longitudes de onda. En esta configuración, la OLT está compuesta por varias Terminaciones de Canal (CT) y se conecta al Multiplexor de Longitud de Onda (WM) mediante un par de canales identificados como S/R-CP. El punto de referencia S/R-CG, ubicado en la salida del multiplexor, permite la convergencia y divergencia de las diversas longitudes de onda para el enlace descendente y ascendente, respectivamente. En consecuencia, la parte pasiva de la red, que abarca la Red de Distribución Óptica (ODN), se sitúa entre los puntos de referencia S/R-CG y R/S (localizado en la entrada de la ONU). Los puntos S/R y R/S actúan como interfaces de transmisión y recepción de la red, y hacen referencia a la OLT y la ONU, respectivamente. Es importante señalar que las

ONUs empleadas en este sistema son del tipo sintonizable o incoloras, ya que NGPON2 opera con múltiples longitudes de onda.

Estándar ITU-T G.989

De acuerdo a ITU-T G.989 como recomendación para la NGPON2 define tres sistemas diferentes, conocidos como Sistema 1, Sistema 2 y Sistema 3, cada uno de los cuales tiene diferentes requisitos de velocidad de transmisión de datos y alcance de la red. Cada sistema también tiene cuatro clases diferentes, conocidas como Clase N1, Clase N2, Clase E1 y Clase E2, que se utilizan para especificar diferentes requisitos técnicos y niveles de rendimiento para la red. Las clases N1 y N2 están destinadas a su uso en aplicaciones de red residenciales y empresariales, mientras que las clases E1 y E2 están diseñadas para su uso en aplicaciones de red empresariales y de transporte.

Los sistemas definen los requisitos de velocidad y alcance de la red, mientras que las clases definen los requisitos técnicos y niveles de rendimiento para diferentes aplicaciones de red. Los proveedores de servicios pueden seleccionar la combinación adecuada de sistema y clase para satisfacer las necesidades específicas de sus clientes y aplicaciones de red.

En la tabla 2 se muestra la recomendación de velocidad nominal tanto de forma descendente como ascendente para cada sistema de acuerdo a la normativa ITU-T G.989.

Tabla 2 Velocidad nominal por canal NGPON2

	Upstream (Gbps)	Downstream (Gbps)
Sistema 1	2,5	2,5
Sistema 2	10	2,5
Sistema 3	10	10

Fuente: (ITU, MARzo 2013)

Las clases N1, N2, E1 y E2 son categorías que definen la tasa de datos simétrica y asimétrica soportada por las ONU en una red NGPON2.

- Clase N1: soporta una tasa de datos simétrica de hasta 2,5 Gbps.
- Clase N2: soporta una tasa de datos simétrica de hasta 10 Gbps.
- Clase E1: soporta una tasa de datos asimétrica de hasta 20 Gbps en el enlace descendente (desde la OLT hacia la ONU) y 10 Gbps en el enlace ascendente (desde la ONU hacia la OLT).

-Clase E2: soporta una tasa de datos asimétrica de hasta 40 Gbps en el enlace descendente y 10 Gbps en el enlace ascendente.

Estas clases permiten a los proveedores de servicios adaptar la capacidad de la red a las necesidades de los usuarios, ofreciendo diferentes opciones de velocidad y ancho de banda en función de las demandas de los clientes. Cada clase presenta un valor máximo y mínimo de pérdida por trayectoria de acuerdo a ITU-T G.989.2, tal y como se especifica en la Tabla 3.

Tabla 3 Pérdidas de trayecto óptico NGPON2

	N1	N2	E1	E2
MIN pérdida de trayectoria	14 dB	16dB	18 dB	20 dB
MAX pérdida de trayectoria	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB
MAX pérdida diferencial del camino óptico	15 dB			

Fuente: (Cando, 2020)

La ODN incluye elementos de ganancia, acopladores de longitud de onda o divisores de potencia de baja relación pueden tener pérdidas en el camino óptico inferiores a los valores de pérdidas mínimas indicados anteriormente. En tal caso, la ODN debe contener medidas (por ejemplo, atenuadores ópticos) que garanticen la pérdida mínima del camino óptico para la clase dada, a fin de evitar la tasa de errores de bits (VER) y/o posibles daños a los receptores.

La Tabla 4 presenta los niveles de potencia de transmisión y la sensibilidad del sistema 3, seleccionado como la opción más prometedora, que utiliza una configuración de transmisión simétrica a través de canales TWDM. Las referencias están estipuladas tanto para las ONUs como para las OLTs, con relación a los diferentes tipos de ODN establecidos para NGPON2 y de los modelos de posibles enlaces.

Tabla 4 Niveles de potencia y sensibilidad OLT y ONU NGPON2

Elemento	Uni	Valor Nominal			
OLT					
Clase ODN		N1	N2	E1	E2
Potencia media de transmisión (MIN)	dBm	+3	+5	+7	+9
Potencia media de transmisión (MAX)	dBm	+7	+9	+11	+11
Sensibilidad mínima (S/R-CG*)					
Enlace Tipo A	dBm	-26.5	-28.5	-31.0	NA
Enlace Tipo B	dBm	-28.5	-30.5	-33.0	-33.0
ONU					
Clase ODN		N1	N2	E1	E2
Potencia media de transmisión (MIN)					
Enlace Tipo A	dBm	+4	+4	+4	NA
Enlace Tipo B	dBm	+2	+2	+2	+4
Potencia de transmisión (MAX)					
Enlace Tipo A	dBm	+9	+9	+9	NA
Enlace Tipo B	dBm	+7	+7	+7	+9
Sensibilidad mínima	dBm	-28	-28	-28	-28

Fuente: (Santiana, 2022)

El alcance de fibra pasiva para NGPON2 es desde 20 km hasta 40km sin extensores de alcance, sin embargo, con extensores de alcance se logra llegar a tener una cobertura máxima de 60 km. Las redes de distribución óptica que emplean divisores de potencia suelen implementarse actualmente con relaciones de división que varían entre 1:16 y 1:128. Los sistemas NGPON2 son versátiles y pueden funcionar en ODN con división de potencia convencional, enrutamiento de longitud de onda o una combinación de ambos. Para asegurar su flexibilidad y capacidad de adaptación, las OLT NGPON2 deben admitir una relación de división de al menos 1:256. En algunas situaciones específicas o en casos de configuraciones de red personalizadas, es posible que se requieran relaciones de división aún más altas. Por lo tanto, el diseño central de las OLT NGPON2 debe ser compatible con diversas relaciones de división. El soporte de un mayor número de ONUs por ODN permite un alto grado de compartición de infraestructura y consolidación de nodos si se utiliza junto con un mayor alcance. Sin embargo, se reconoce que puede ser necesario compensar la ganancia de compartición con la creciente complejidad del sistema y las limitaciones del presupuesto de energía. En algunos escenarios de despliegue, la proporción de división física puede aumentarse utilizando la ampliación del alcance para mejorar el balance de pérdidas.

La Tabla 5 especifica los planes de longitud de onda tanto para TWDM PON como para PtP WDM PON. El plan de longitud de onda de NGPON2 se especifica para permitir la coexistencia mediante superposición de longitud de onda con sistemas PON heredados. El espectro compartido permite la plena coexistencia con GPON, XGPON1, la superposición de vídeo por radiofrecuencia y TWDM.

Tabla 5 Longitudes de onda NGPON2

Sistemas PON Heredados	TWDM PON		PtP WDM PON
	Descendente	Ascendente	Ascendente/Descendente
XGPON, GPON y Video RF	1596nm – 1603nm	Banda ancha: 1524 nm – 1544nm	Espectro expandido: 1524nm – 1625nm
		Banda reducida: 1528nm – 1540nm	Espectro compartido: 1603nm – 1625nm
		Banda estrecha: 1532nm – 1540 nm	

Fuente: (Paucar, 2021)

La Tabla 6 especifica el plan de frecuencias de TWDM, los canales 1-4 están asignados a TWDM con cuatro longitudes de onda descendentes. Los canales 5-8 pueden ser asignados de manera opcional a la tecnología TWDM y están disponibles para su utilización en sistemas PtP WDM u otros fines si no se reservan específicamente para la expansión de TWDM. Es importante destacar que los valores de frecuencia en esta tabla son normativos, mientras que los valores de longitud de onda se proporcionan únicamente con fines informativos.

Tabla 6 Plan de frecuencias para TWDM

Canal	Frecuencia central (THz)	[nm]
1	187.8	1596.34
2	187.7	1597.19
3	187.6	1598.04
4	187.5	1598.89
5	187.4	1599.75
6	187.3	1600.60
7	187.2	1601.46
8	187.1	1602.31

Fuente: (Paucar, 2021)

La transmisión de bajada (DS) depende del equipo en el terminal de línea óptica y, por lo tanto, es menos sensible a los costos que la transmisión de subida (US), que depende del equipo en la ONU. No obstante, el equipo OLT también debe ser económicamente atractivo para los proveedores de servicios. Por lo tanto, uno de los desafíos más importantes relacionados con el despliegue comercial de estas redes es el desarrollo de equipos ópticos incoloros de bajo costo y alta velocidad para implementar tanto el OLT como la ONU (Arévalo, 2016). Una de las características más destacadas de NGPON2 es que permite la transmisión simultánea de múltiples servicios, incluyendo servicios de banda ancha, servicios de acceso móvil y servicios de IoT, en una misma fibra óptica.

En la actualidad, los sistemas NGPON2 se perfilan como una de las opciones más prometedoras para atender la cada vez mayor demanda de servicios móviles 5G, particularmente en lo que se refiere a la infraestructura de enlace y transporte de datos móviles. A pesar de que los estándares GPON y XGPON pueden ser adecuados para los servicios 4G, no cuentan con la capacidad necesaria para respaldar la nueva tecnología celular.

Redes 50GPON

La recomendación ITU-T G.9804, asociada a este estándar y desarrollada en septiembre de 2021, se ha centrado en lograr la coexistencia con las normas previas. Esto posibilita la reutilización de la infraestructura óptica existente y simplifica el proceso de actualización de las redes FTTx para los proveedores de servicios. En otras palabras, los sistemas NGPON2 pueden adaptarse al aumento en la demanda de servicios y ancho de banda sin requerir inversiones considerables ni causar interrupciones significativas para los clientes. Permite una velocidad de transmisión de datos de hasta 50 Gbps en el enlace descendente (de la OLT a la ONU) y hasta 10 Gbps en el enlace ascendente (de la ONU a la OLT).

50GPON se encuentra dentro del proyecto de redes denominada HSP (Higher Speed PON) y utiliza la misma arquitectura pasiva y divisores de potencia que GPON, pero utiliza técnicas de modulación avanzadas y una mayor cantidad de longitudes de onda para aumentar la capacidad de la red. Esto permite a los proveedores de servicios de telecomunicaciones ofrecer una mayor cantidad de servicios de alta velocidad a un mayor número de clientes utilizando la misma infraestructura óptica (Rábano, 2022).

Esta tecnología para facilitar su coexistencia con estándares predecesores, es capaz de implementarse en distancias desde 20 km hasta 60 km, con un límite de 10 km para el caso de aplicaciones inalámbricas.

Arquitectura

Dentro de 50GPON se hace referencia a tres tipos de tecnologías como solución para el aumento de velocidad de datos:

- 50G TDM PON: Es una evolución del estándar GPON, en la que se aumenta la velocidad de datos en el enlace descendente hasta 50 Gbps utilizando un par de canales con una longitud de onda mediante la técnica de modulación avanzada llamada TDM/TDMA, como se muestra en la Figura 7. El enlace ascendente sigue funcionando a 1.25 Gbps.

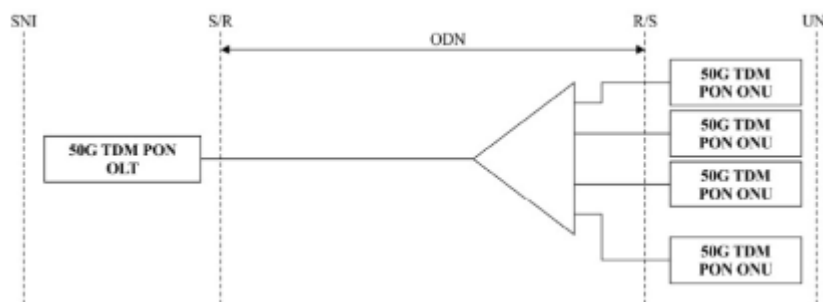


Figura 7 Arquitectura 50G TDM PON
Fuente: (Rábano, 2022)

- 50G TWDM PON: Es una tecnología que utiliza múltiples longitudes de onda en el enlace descendente y ascendente para lograr una velocidad total de 50 Gbps en ambos sentidos. En el enlace descendente se utilizan cuatro longitudes de onda de 10 Gbps, mientras que en el enlace ascendente se utilizan dos longitudes de onda de 10 Gbps. En esta situación, las ONTs cuentan con una asignación de ranura de tiempo, lo que permite lograr un acceso múltiple mediante tanto la división de longitud de onda como la división de tiempo.

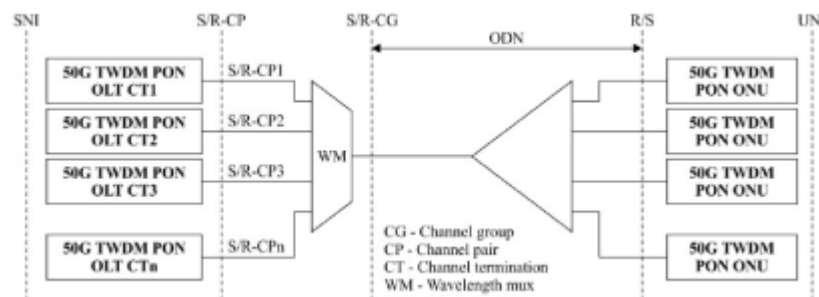


Figura 8 Arquitectura 50G TWDM PON
Fuente: (Rábano, 2022)

La OLT está compuesta por terminaciones de canal (CT) que se conectan a través de un multiplexor de longitudes de onda (WM). El punto de referencia S/R-CG es donde la OLT envía y recibe un conjunto de pares de longitudes de onda, denominados CG (Channel group), que están relacionados con los enlaces descendentes y ascendentes, como se muestra en la Figura 8.

- PtP WDM PON: Es una variante de PON basada en enlaces PtP (Punto a punto) en lugar de enlaces P2MP (Punto-multipunto) utilizados en la mayoría de las redes PON. Utiliza múltiples longitudes de onda para lograr una velocidad de datos de hasta 40 Gbps en ambos sentidos. Cada ONU tiene una longitud de onda dedicada para la comunicación con la OLT.

Para incorporar las tecnologías TWDM y PtP WDM en una red óptica, es esencial utilizar transmisores con capacidad de sintonización en longitud de onda y receptores controlados para garantizar la precisión del DWDM. En contraste, en el contexto de la tecnología TDM PON, tanto la OLT como la ONT operan con longitudes de onda predefinidas, aunque existe cierta flexibilidad dentro de una banda de longitudes de onda claramente especificada.

Estándar ITU-T G.9804

La recomendación para el estándar 50GPON presenta tres combinaciones de velocidades de transmisión presentadas en la Tabla 7:

Tabla 7 Velocidad nominal 50GPON

Upstream (Gbps)	Downstream (Gbps)
12,5	50
25	50
50	50

Fuente: Autoría propia

Se establecen los dos primeros conjuntos de categorías para la red ODN en base a los componentes presentes en esta infraestructura para facilitar la coexistencia.

Estos elementos pueden adoptar la forma de módulos multi-PON o dispositivos externos diseñados para la coexistencia. Es importante destacar que los valores de potencia y sensibilidad de los equipos externos varían dependiendo de si se aplican en configuraciones de tráfico descendente o ascendente. En la Tabla 8, se proporcionan los niveles de potencia y sensibilidad correspondientes al escenario de coexistencia mediante módulos multi-PON.

Tabla 8 Niveles de potencia y sensibilidad de OLT y ONT 50GPON

Elemento	Parámetro	Valor Nominal (dBm)	
		N1	C+
OLT	Clase	N1	C+
	Potencia Media (MIN)	+5.5	+8.5
	Potencia Media (MAX)	+11	+14
	Sensibilidad	-24.5	-27.5
ONT	Potencia Media (MIN)	+5	+5
	Potencia Media (MAX)	+9	+9
	Sensibilidad	-24	-24

Fuente: (Rábano, 2022)

La ITU-T G.9804 define los valores de atenuaciones máximos y mínimos con uso de MPM detallados en la Tabla 9, los cuales coinciden con los correspondientes a tecnologías anteriores.

Tabla 9 Atenuaciones 50GPON, con MPM

Atenuación	Clase	
	N1	C+
MIN (dB)	14	17
MAX (dB)	29	32

Fuente: (Rábano, 2022)

En situaciones en las que se requiera la coexistencia de sistemas externos (CEx) o cuando no sea necesaria la coexistencia y se realice una interconexión directa, como en la fase inicial de implementación de una red 50GPON, las directrices de la ITU-T establecen que los valores de potencia y sensibilidad para la clase N1 serán idénticos a los de la Tabla 8. Por otro lado, los márgenes de atenuación se encuentran definidos específicamente para cada clase, como se detalla en la Tabla 10.

Tabla 10 Atenuaciones 50GPON, con CEx

Atenuación	Clase			
	N1	N2	E1	E2
MIN (dB)	14	16	18	20
MAX (dB)	29	31	33	35

Fuente: (Rábano, 2022)

En 50G-TDM PON, el canal de transmisión descendente utiliza una longitud de onda estática de 1577 nm, mientras que el canal ascendente emplea una longitud de onda

fija de 1270 nm. Estas longitudes de onda constantes facilitan una transmisión más sencilla y rentable, aunque pueden estar expuestas a posibles interferencias de señales cercanas dentro de la misma banda de longitud de onda.

Para 50G-TWDM PON, se utilizan múltiples longitudes de onda para transmitir datos a través de la fibra óptica, lo que permite una mayor capacidad de transmisión en comparación con 50G-TDM PON. En concreto, se utilizan cuatro longitudes de onda de canal descendente, cada una de las cuales se sitúa en una banda de longitud de onda diferente para evitar la interferencia entre canales. Las longitudes de onda descendentes utilizadas son 1577 nm, 1593 nm, 1609 nm y 1625 nm. Para el canal ascendente, se utilizan dos longitudes de onda: 1270 nm y 1310 nm.

Mientras que para PtP WDM PON, se utiliza un enfoque punto a punto en lugar de una topología de red PON. En este esquema, se utilizan dos longitudes de onda diferentes para la transmisión: una longitud de onda descendente y una longitud de onda ascendente. La longitud de onda descendente se encuentra en el rango de 1575 nm a 1580 nm, mientras que la longitud de onda ascendente se encuentra en el rango de 1260 nm a 1280 nm. Al igual que con 50G-TDM PON, estas longitudes de onda fijas permiten una transmisión más simple y económica, pero pueden ser susceptibles a la interferencia de señales vecinas en la misma banda de longitud de onda.

Según (Rábano, 2022), las longitudes de onda asignadas para 50GPON que permiten la coexistencia entre los diferentes estándares son las mostradas en la Figura 9.

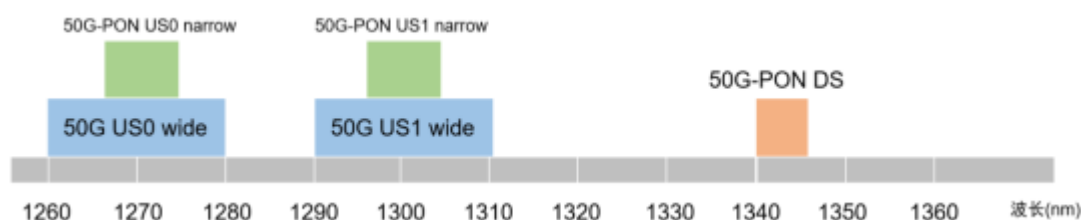


Figura 9 Longitudes de onda de 50GPON

Fuente: (Rábano, 2022)

La tecnología 50GPON es una evolución de las redes PON existentes, diseñada para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda y servicios de alta velocidad. La norma G.9804 define las especificaciones técnicas de la tecnología 50GPON, incluyendo la división de las longitudes de onda en la banda ascendente y descendente, así como la definición de las diferentes clases de transmisión.

La coexistencia con otras tecnologías PON y la reutilización de la infraestructura existente son elementos importantes de la norma, lo que permite una actualización suave

de las redes existentes sin una gran inversión en nuevos equipos o infraestructura. La coexistencia entre GPON y NGPON2 se logra mediante la multiplexación por división de tiempo (TDM), donde se asigna un intervalo de tiempo para la transmisión de datos descendente y otro intervalo de tiempo para la transmisión ascendente. La tecnología NGPON2 utiliza múltiples longitudes de onda para aumentar la capacidad de la red, mientras que GPON utiliza una sola longitud de onda. Por lo tanto, las ONT de ambas tecnologías deben ser compatibles con la multiplexación por división de tiempo y la frecuencia de transmisión correspondiente.

Por otro lado, la coexistencia entre GPON, NGPON2 y 50GPON se logra mediante WDM, donde se utiliza una longitud de onda específica para cada tecnología de acceso. Cada longitud de onda debe ser compatible con los equipos de red correspondientes y las ONT que se conectan a la red deben ser compatibles con la longitud de onda específica que se utiliza. En la Tabla 11 se muestra un resumen de las diferencias entre las tecnologías antes mencionadas.

Tabla 11 Resumen GPON, NGPON2 y 50GPON

	Velocidad Descendente (Gb/s)	Velocidad ascendente (Gb/s)	Longitud de onda descendente (nm)	Longitud de onda ascendente (nm)
GPON	2.488	1.244	1480-1500	1290-1330
NGPON2	4x9.952	4x9.952	1596-1603	1524-1544
50GPON	49.7664	49.7664	1340-1344	1260-1280
		24.8832		1290-1310
		12.4416		

Fuente: Autoría propia

Algoritmo OTS

El algoritmo OTS fue diseñado por el Dr. Germán Arévalo y es usado para resolver problemas de optimización en redes de telecomunicaciones, específicamente para el problema del Árbol Mínimo de Steiner. Este algoritmo utiliza una cadena de heurísticas para encontrar soluciones óptimas, y se basa en datos de OpenStreetMaps (OSM) para simular redes en cualquier parte del mundo.

Un aspecto crucial de cualquier modelo de planificación de redes es su capacidad para ayudar a elegir y dimensionar correctamente los componentes activos y pasivos de la red. En este sentido, el algoritmo OTS es una herramienta valiosa, ya que se basa en un conjunto eficaz de heurísticas para lograr el dimensionamiento óptimo de redes PON de forma segura. Además, OTS es muy versátil y puede utilizarse en escenarios urbanos reales, donde hay un gran número de usuarios con diferentes demandas de velocidad binaria (Arévalo Germán, 2017).

CAPITULO III

3.1. Metodología

El capítulo de metodología presenta el enfoque, parámetros y desarrollo llevado a cabo para realizar una comparación rigurosa y fundamentada de los costos de implementación de las redes GPON, NGPON2 y 50GPON en diferentes escenarios de demanda de ancho de banda.

3.1.1. Definición de parámetros de estudio

Para definir los parámetros de estudio en el presente escrito es importante considerar la infraestructura existente que se va a heredar, evaluar el número de usuarios, los servicios que se ofrecerán, la velocidad requerida y longitud máxima del enlace.

GPON (Gigabit Passive Optical Network):

- Número de usuarios: Generalmente se puede soportar un número máximo de usuarios típicamente de hasta 64 por puerto PON.
- Servicios ofrecidos: Internet de banda ancha, telefonía IP, IPTV (Televisión por Protocolo de Internet), videoconferencia, etc.
- Velocidad requerida por usuario: En general, se puede ofrecer velocidades simétricas o asimétricas de hasta 2.5 Gbps de bajada y 1.25 Gbps de subida.

NGPON2 (Next-Generation Passive Optical Network 2):

- Número de usuarios: Al ser una tecnología más avanzada, tiene una mayor capacidad de usuarios. Puede admitir hasta 128 usuarios por puerto PON. Similar a GPON, si una OLT tiene varios puertos PON, el número total de usuarios por OLT aumenta en consecuencia.
- Servicios ofertados: Internet de alta velocidad, servicios empresariales avanzados, servicios de video en alta definición (HD), servicios de realidad virtual/aumentada, etc.
- Velocidad requerida por usuario: NGPON2 puede ofrecer velocidades simétricas de hasta 10 Gbps para el enlace descendente y 2.5 Gbps para el enlace ascendente.

50GPON (50 Gigabit Passive Optical Network):

- Número de usuarios: También conocida como XGSPON (10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network), es otra evolución de las tecnologías PON. Puede admitir hasta 128 usuarios por puerto PON, similar a NGPON2.
- Servicios ofrecidos: Internet ultrarrápido, transmisión de video 4K/8K, juegos en línea de alta calidad, servicios en la nube, etc.
- Velocidad requerida por usuario: 50GPON puede ofrecer velocidades simétricas de hasta 50 Gbps para el enlace descendente y 25 Gbps para el enlace ascendente.

Para el presente análisis se asumirá una red base heredada considerando el escenario más crítico posible con un feeder de 20 km, una red de distribución de 0.5 km y una red de dispersión de 0.5 km con fibra óptica de estándar G.652D con dos niveles de splitteo de 1:8 alcanzando 64 usuarios en la red, llevando al límite la red con la tecnología PON, con una pérdida típica por splitter de 10 dB.

Se establece en cada tecnología sus parámetros de configuración del transmisor y receptor dados por la Tabla 12:

Tabla 12 Parámetros a utilizar

PARÁMETROS	GPON	NGPON2	50GPON
POTENCIA OLT	4 dBm	4 dBm	4 dbm
FRECUENCIA	1490 nm	1601nm 1600nm 1599nm 1598nm	1340nm 1341nm
Bit rate	2.5 Gbps	10 Gbps	25 Gbps

Fuente: Autoría propia

Se considera una distancia máxima de 20km en todas las tecnologías debido a que es el alcance físico máximo que indica las recomendaciones de la ITU-T para la tecnología GPON, siendo esta la tecnología heredada base para este trabajo de investigación. Esto permite tener una idea de su capacidad para brindar servicios en áreas suburbanas o rurales, donde la cobertura puede ser un desafío.

Al comparar velocidades de downstream, se pueden identificar las capacidades de cada tecnología para brindar un acceso de alta velocidad a los usuarios finales. Esto es especialmente relevante debido al creciente consumo de contenidos y la demanda de

servicios con altas tasas de transferencia de datos. Como se muestra en la Tabla 12, cada tecnología tiene distintas frecuencias debido a la tecnología de WDM que permite combinar varias frecuencias de downstream en una sola fibra, lo que significa que diferentes longitudes de onda pueden coexistir y transportar datos simultáneamente.

El nivel de spliteo se refiere a cuántas veces se divide la señal óptica en el camino desde la OLT hacia las ONUs. Un nivel de spliteo más alto implica que la señal se divide más veces y, por lo tanto, se comparte entre un mayor número de usuarios. Comparar dos niveles de spliteo ayuda a entender cómo afecta la capacidad de la red y cómo influye en la calidad y velocidad de los servicios para los usuarios. En base a la capacidad y arquitectura de la red heredada GPON, para este trabajo de estudio se considera 64 usuarios por cada transceiver.

En términos generales, la velocidad de redes PON ofrecida en el Ecuador para clientes residenciales podría variar desde unos pocos Mbps (megabits por segundo) hasta velocidades de 100 Mbps o más, dependiendo del plan y del proveedor. Para clientes corporativos, las velocidades suelen ser aún más altas, ya que las empresas requieren conexiones más robustas para manejar sus operaciones y comunicaciones. En base a esta actual demanda se considera las velocidades descritas en la Tabla 13.

Tabla 13 Demanda Máxima de BR (Gb/s)

Max. BR demandado (Gb/s)		
Escenario	Residencial	Corporativo
1	0,1	0,5
2	0,25	1
3	0,5	2,5
4	1	10

Fuente: Autoría propia

El contexto en el que se realizará la simulación teórica de la implementación de las tres tecnologías a investigar puede ser definido en dos enfoques. El primero implica la reproducción de una infraestructura externa basada en datos geoespaciales reales, teniendo en cuenta la disposición de edificios, conductos, sistemas de alcantarillado, etc. Como alternativa, se podría seleccionar un modelo genérico basado en un entorno ficticio para llevar a cabo esta simulación. Este estudio se ha basado en el primer planteamiento para enfocarnos con datos reales y en una zona aplicable del país, apoyándonos de la herramienta Open StreetMaps.

Los mapas de OpenStreetMap son creados por una comunidad de voluntarios que contribuyen con información geográfica, como carreteras, edificios, cuerpos de agua, límites de ciudades, puntos de interés y más. Los usuarios pueden agregar, editar y actualizar datos en los mapas utilizando herramientas y aplicaciones específicas. Los datos recopilados pueden ser utilizados por cualquiera, desde individuos hasta empresas y gobiernos, para una variedad de propósitos, como navegación, planificación urbana, análisis geográficos, desarrollo de aplicaciones, y más. La Figura 10 muestra el área seleccionada para esta investigación, la cual representa una zona que cuenta con varias edificaciones siendo estas de uso mixto, es decir, se mezclan diferentes tipos de usos, como residencial, comercial, industrial, recreativo e incluso áreas verdes, todo dentro de una misma área geográfica lo que la hace contar con un número alto de clientes potenciales.

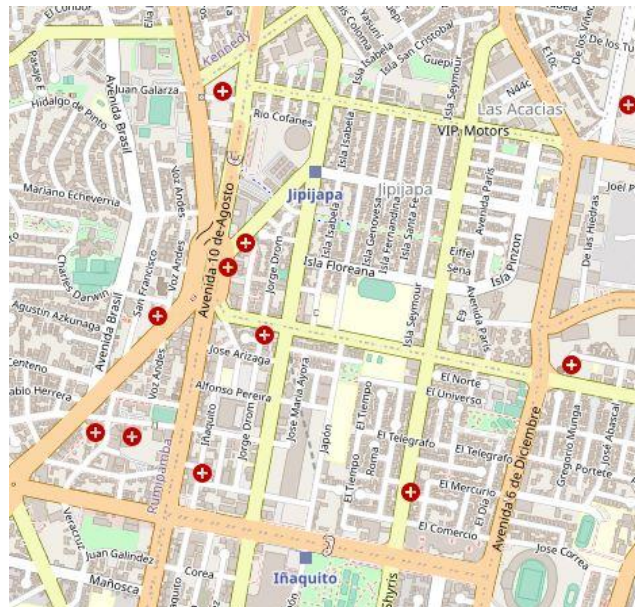


Figura 10 Área seleccionada de Quito
Fuente: Autoría propia

3.1.2. Simulación y evaluación de las tecnologías

Una vez que se han establecido los parámetros de análisis para cada una de las tecnologías, se procede a crear tres escenarios para llevar a cabo la comparación. El primer escenario implica la simulación de un enlace óptico de transmisión descendente que opera a una velocidad de 2.5 Gbps, correspondiente a la tecnología GPON. En el segundo escenario, se simula un enlace óptico de transmisión descendente que trabaja a

una velocidad de 40 Gbps, representando la tecnología NGPON2 que utiliza cuatro longitudes de onda de 10 Gbps cada una. Por último, el tercer escenario consiste en la simulación de un enlace óptico de transmisión descendente con una velocidad de 50 Gbps, basado en la tecnología 50GPON, que utiliza dos longitudes de onda, cada un operando a 25 Gbps. Esta herramienta permite a los profesionales del sector de las telecomunicaciones diseñar, simular y optimizar redes de comunicación óptica, lo que contribuye a mejorar la eficiencia y el rendimiento de estas redes, y facilita la toma de decisiones estratégicas para implementar tecnologías ópticas avanzadas en diferentes entornos y escenarios.

Simulación GPON

En el primer escenario se define como longitud de onda en la simulación de 1490 nm, trabajando a 2.5 Gbps como se observa en la Figura 11, correspondiente a la red GPON.

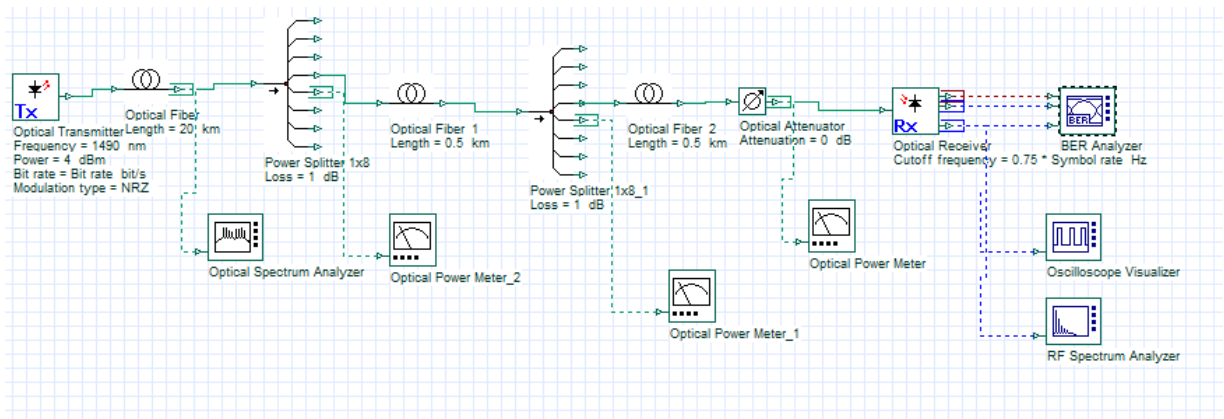


Figura 11 Simulación GPON en OptiSystem
Fuente: Autoría propia

Se crea el bloque de transmisión óptico como fuente de datos, ubicado en la hoja de trabajo del software con una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps configurado en banda S de acuerdo a la recomendación para las respectivas longitudes de onda de GPON aplicada en downstream.

Para crear la red ODN, se comienza por la red de feeder conectando al transmisor el medio de transmisión óptico correspondiente a un tramo de fibra óptica configurado a 20km de distancia seguido de un bloque del primer divisor de potencia óptica 1:8 con una atenuación de 10dB. Para la red de distribución se coloca otro tramo de fibra óptica de 0.5 km conectado con un segundo nivel de división de potencia óptica 1:8 con la misma atenuación del primero, utilizar un medidor de potencia en este tramo nos permite

identificar que el simulador está considerando correctamente las atenuaciones de cada elemento frente a la potencia transmitida. En la red de dispersión se considera un tramo más de fibra óptica de 0.5km y al final de la red ODN se coloca un atenuador óptico que nos permite simular las pérdidas reales y equilibrar las potencias de las señales, lo que ayuda a obtener resultados más precisos y realistas en la simulación.

Para finalizar, se configura el bloque de recepción óptica con una frecuencia de corte equivalente al 75% de la velocidad de transmisión establecida. Además, se incorporan dispositivos de medición en la salida del bloque de recepción con el fin de verificar el correcto funcionamiento del receptor, asegurando que la señal se esté recibiendo con mínima interferencia y dentro de los parámetros definidos para la red.

Simulación NGPON2

En el segundo escenario se configura las longitudes de onda de 1598nm hasta 1601nm, en la Figura 12 se visualiza el enlace óptico NGPON2 trabajando a 40 Gbps downstream en el software.

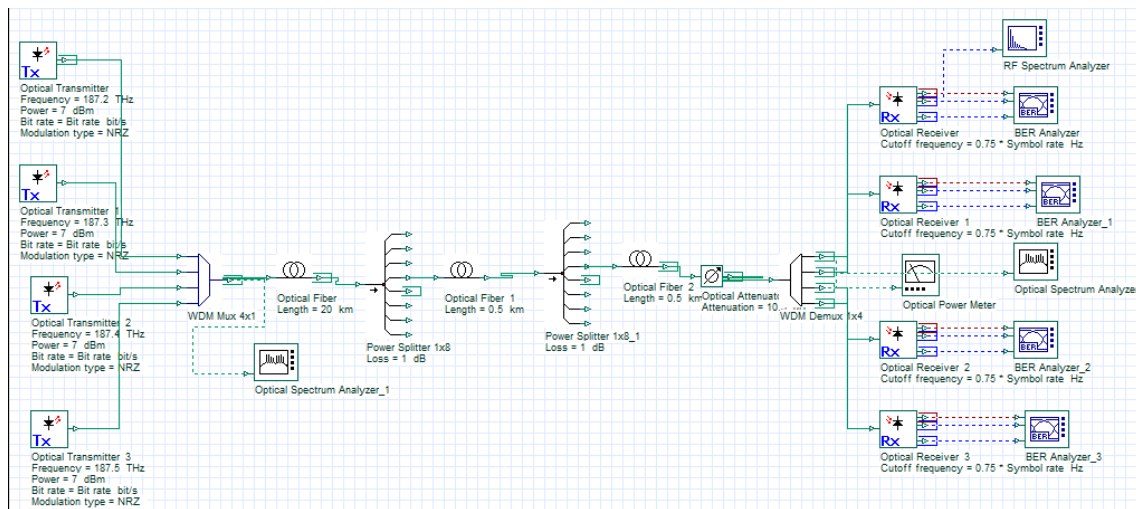


Figura 12 Simulación NGPON2 en OptiSystem
Fuente: Autoría propia

A diferencia de la anterior simulación, en el bloque de transmisión se agrega los 4 transmisores con longitudes de onda sucesivas cada una con una velocidad de 10 Gbps configuradas en banda L de acuerdo a la recomendación de longitud de onda para downstream, la separación de cada longitud de onda cumple con el espaciamiento de 100 GHz entre la frecuencia de cada canal.

Para el acceso a la red ODN, se introduce un combinador óptico de tipo 4:1 y se enlaza con el medio de transmisión óptico correspondiente, abarcando un tramo de fibra

óptica configurado a una distancia de 20 km. Este tramo está seguido por un módulo del primer divisor de potencia óptica, con una relación de 1:8 y una atenuación de 10 dB. La red de distribución y dispersión se mantiene con dos tramos adicional de fibra óptica de 0.5 km, que se conecta con un segundo nivel de división de potencia óptica 1:8, presentando la misma atenuación que el primero. Además, se implementa un atenuador óptico que cumple con la misma función especificada en la simulación de la tecnología GPON y para finalizar se coloca un divisor óptico de 1:4 para separar cada longitud de onda a ser recibida por el receptor.

Finalmente, se configura el bloque receptor óptico con una frecuencia de corte equivalente al 0.75 de la velocidad de transmisión predefinida. Luego, se incorporan dispositivos de medición a la salida del bloque receptor con el propósito de verificar la operatividad adecuada del receptor y evaluar si la señal se recibe con mínima interferencia y dentro de los rangos establecidos por los parámetros de la red.

Simulación 50GPON

La Figura 13 muestra el tercer escenario de enlace óptico 50GPON configurado con longitudes de onda de 1340nm y 1341nm, trabajando a 50 Gbps downstream en el software.

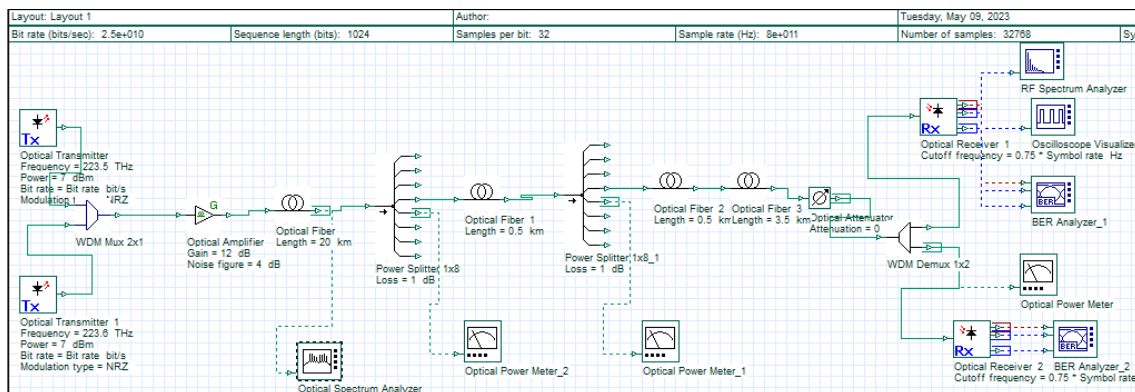


Figura 13 Simulación 50GPON en OptiSystem
Fuente: Autoría propia

El bloque de transmisión se forma por dos transmisores con longitudes de onda consecutivas, cada uno operando a una velocidad de 25 Gbps y configuradas en la banda O, de acuerdo con la recomendación de longitud de onda de 50GPON para el downstream. La separación entre las longitudes de onda está dada por 0.8nm que cumple con el espaciamiento de 100 GHz entre las frecuencias de cada canal.

Para la red ODN se introduce un combinador óptico en formato 2:1, seguido de un amplificador con una ganancia de 12dB conectado con el medio de transmisión óptico

correspondiente, cubriendo una extensión de fibra óptica configurada a una distancia de 20 km. La red de distribución y dispersión se mantienen de la tecnología simulada GPON con dos niveles de división de potencia de 1:8 con atenuación de 10 dB.

En la simulación de la tecnología de 50GPON se requiere de una fibra de compensación de dispersión (DCF) de 3.5km con -300pskm/nm para compensar la pérdida que se tiene por el total de la longitud del tramo de fibra de 20 km conectado al atenuador óptico que posibilita la simulación de las pérdidas genuinas y el ajuste de las potencias de las señales. Para concluir la red ODN, se agrega un divisor óptico 1:2 para separar cada longitud de onda, que será recibida por el receptor.

Al bloque de recepción óptico se ajusta la frecuencia de corte a un valor correspondiente al 0.75 de la velocidad de transmisión predefinida. Luego, se instalan dispositivos de medición en la salida del bloque receptor para verificar el correcto funcionamiento del receptor, evaluando si la señal se recibe con la menor interferencia posible y dentro de los márgenes establecidos por los parámetros de la red.

El algoritmo OTS nos permite la búsqueda de la Topología Óptima para encontrar la mejor configuración de elementos de red, como divisores ópticos y conexiones, de manera que se optimicen ciertos parámetros, como la eficiencia de transmisión, el costo o la escalabilidad.

En el contexto de esta investigación, el uso del algoritmo OTS implica determinar la disposición más eficiente y efectiva de los componentes pasivos y activos en la red para cumplir con ciertos objetivos. Esto puede incluir la ubicación de los splitters ópticos, la longitud de las fibras ópticas y la distribución de las conexiones. Dentro del algoritmo OTS se configura la cantidad de usuarios, los escenarios de BR y la velocidad en la que trabaja cada tecnología en base a los parámetros antes definidos.

CAPITULO IV

4.1. Resultados

En este capítulo, se procede a evaluar los resultados generados mediante el uso del software OptiSystem, centrándose en diferentes situaciones que involucran un aumento en la atenuación. Dentro del bloque de recepción, se lleva a cabo un análisis de varios aspectos, incluyendo la potencia recibida, la evaluación del diagrama del ojo, la correlación entre la tasa de error de bits (BER) y la potencia de recepción, así como la medición de los índices de calidad Q, el jitter y el BER para los protocolos GPON, NGPON2 y 50GPON.

Así mismo se presenta el análisis de los costos obtenidos por OTS donde se llevó a cabo las tres simulaciones correspondientes a cada tecnología estudiada: GPON, NGPON2 y 50 GPON con 4 escenarios de demanda de velocidad binaria diferente empleando el mapa de la ciudad de Quito recuperado de OSM.

4.1.1. Resultados Obtenidos

Se procede a examinar los datos relativos a la pérdida de potencia que surge durante la transmisión de datos, así como los resultados del BER y el factor de calidad Q en diferentes niveles de atenuación. Además, se lleva a cabo una comparación entre el BER y la potencia de recepción para su evaluación.

Tecnología GPON

Dentro del bloque receptor, se examina la potencia óptica y se realiza un análisis del espectro óptico en términos de frecuencia (THz) y longitud de onda (nm) en varios escenarios de atenuación. Se presta especial atención al diagrama del ojo, destacando los datos correspondientes al factor de calidad Q y el jitter, además de llevar a cabo una comparación entre el BER y la potencia de recepción.

De la simulación de la red GPON se derivó un espectro óptico en banda modulada, caracterizado por un doble del ancho de banda en banda base. En la Figura 14, se confirma mediante marcadores que el ancho espectral es de 5 GHz, y se constata que la señal recibida se encuentra en el mismo canal transmitido. Es importante señalar que la señal óptica llega con una mínima presencia de ruido, además el espectro óptico ilustra datos de la máxima frecuencia pico: 201.2 THz y la máxima potencia pico: -31.56 dBm.

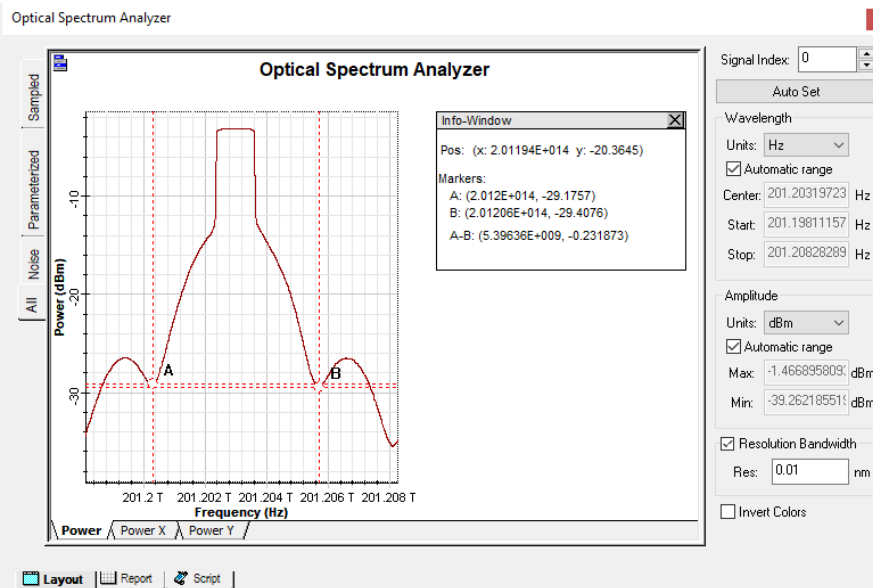


Figura 14 Espectro óptico de la señal recibida en GPON
Fuente: Autoría propia

Con el objetivo de diferenciar el comportamiento de la red, se modifica el índice de atenuación en la misma con el bloque de atenuador óptico en iteraciones desde 0 hasta 4 con separación de 0.5 cada uno, la Tabla 14 muestra la potencia óptica que llega del bloque del receptor para los diferentes escenarios de atenuación.

Tabla 14 Potencia óptica recibida en GPON

Atenuación (dB)	Potencia de la señal que llega al receptor
0	dBm -22.9
	mW 5.17
0.5	dBm -23.36
	mW 4.60
1	dBm -23.9
	mW 4.10
1.5	dBm -24.36
	mW 3.66
2	dBm -24.9
	mW 3.26
2.5	dBm -25.36
	mW 2.90
3	dBm -25.9
	mW 2.59
3.5	dBm -26.36
	mW 2.30
4	dBm -26.9
	mW 2.05

Considerando el escenario 1 de una red sin valor de atenuación, se obtiene el diagrama de ojo con buena apertura con mínima presencia de interferencia. Su nivel de calidad Q es elevado, lo que implica una disminución en la tasa de pérdida de energía, aunque con una presencia apreciable de ruido y un jitter que exhibe una oscilación en el tiempo mínima, tal como se ilustra en la Figura 15.

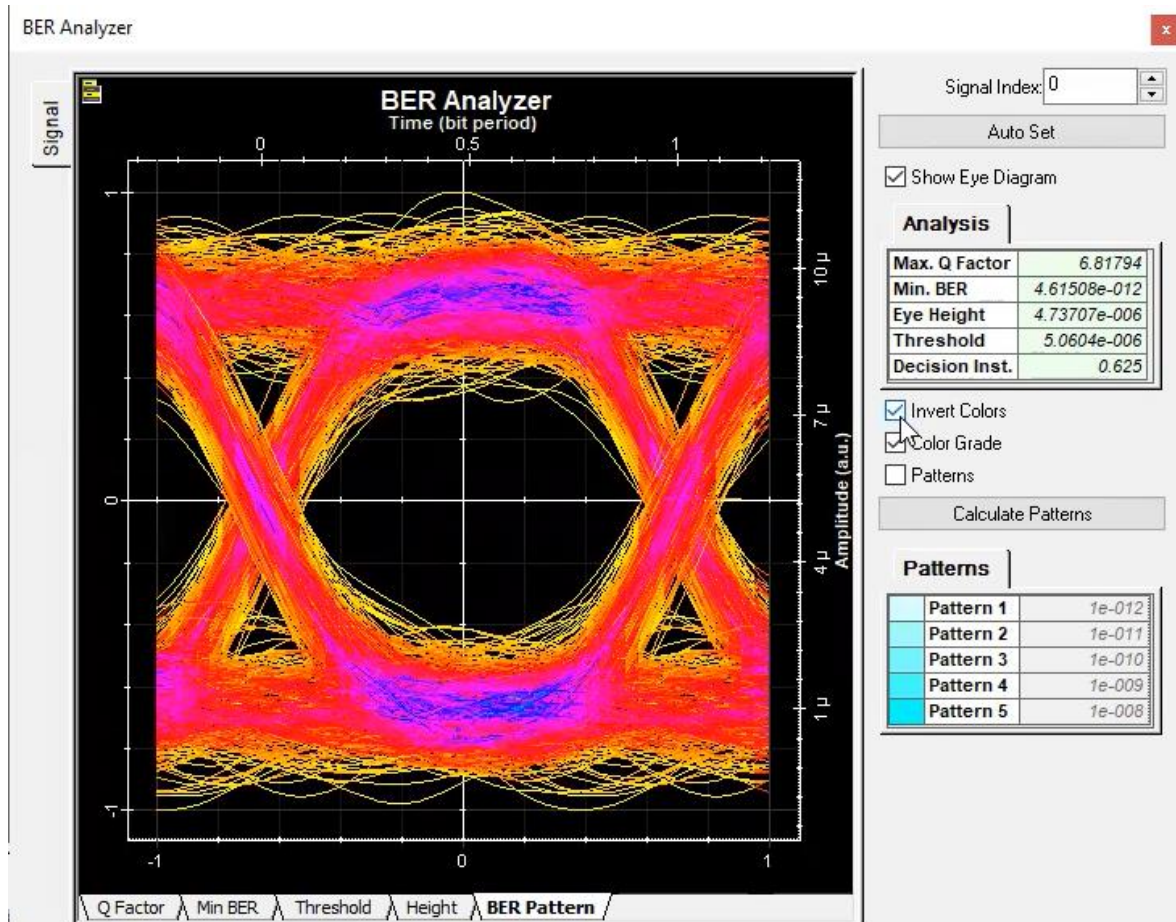


Figura 15 Diagrama del ojo GPON con 0dB de atenuación
Fuente: Autoría propia

El diagrama del ojo proporciona una representación visual en el dominio del tiempo de diversas combinaciones entre 1 lógico y 0 lógico. Al superponer estas combinaciones, se logra una evaluación más precisa de los factores de calidad Q, BER y el jitter, que contribuyen a corroborar el funcionamiento óptimo de la red. En la Tabla 15, se presentan los valores resultantes de estos parámetros para cada escenario de atenuación, obtenidos del análisis de los diagramas del ojo generados por la simulación GPON en el software.

Tabla 15 Valores del diagrama del ojo en distintos escenarios

Atenuación	Factor de Calidad Q	Jitter	BER
0	6.81	0.1831	4.6150x10-12
0.5	6.0797	0.2158	6.0139x10-10
1	5.4196	0.2472	2.9836x10-8
1.5	4.8296	0.2785	6.8355x10-7
2	4.3024	0.2959	8.4432x10-6
2.5	3.8314	0.3273	6.3660x10-5
3	3.4109	0.3551	3.2359x10-4
3.5	3.0333	0.4371	1.2083x10-3
4	0	0.7116	1

Fuente: Autoría propia

Tecnología NGPON2

En el módulo receptor, se evalúa la potencia óptica y el espectro óptico en términos de frecuencia (THz) y longitud de onda (nm) en diversos escenarios de atenuación. También se analiza el diagrama del ojo, donde se destacan los datos correspondientes al factor de calidad Q y al jitter. Además, se compara el BER con la potencia de recepción en estos análisis.

En la Figura 16 se puede visualizar el espectro óptico en banda modulada del canal 3 (tomado como estudio para este caso) definido por el doble del ancho de banda en banda base, así con el uso de los marcadores, se observa que el ancho espectral es de 20 GHz, y se constata que la señal recibida se encuentra en el mismo canal transmitido por el feeder y filtrado por canal en el bloque de recepción. Es importante señalar que la señal óptica llega con una presencia de ruido casi nula, además el espectro óptico ilustra datos de la máxima frecuencia pico: 187.4 THz y la máxima potencia pico: -20.77 dBm.

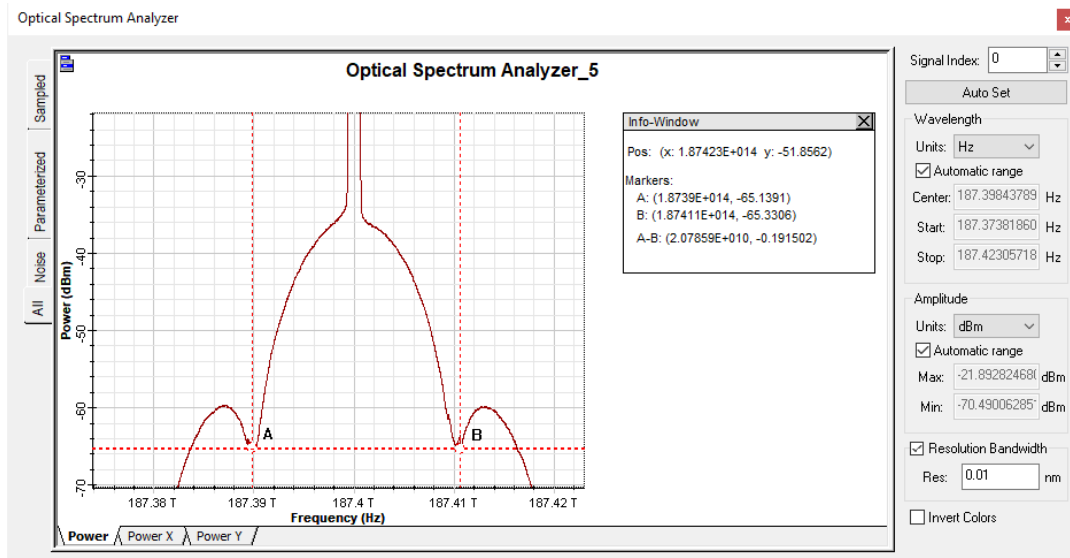


Figura 16 Ancho de pulso de banda modulada NGPON2

Fuente: Autoría propia

La Tabla 16 exhibe la potencia óptica que alcanza el bloque receptor en los distintos escenarios de variación del índice de atenuación, mediante el uso del bloque de atenuador óptico, en iteraciones que varían desde 0 hasta 4, con un incremento de 0.5 en cada caso.

Tabla 16 Potencia óptica recibida en NGPON2

Atenuación (dB)	Potencia de la señal que llega al receptor
0	dBm -20.04
	mW 9.90
0.5	dBm -20.54
	mW 8.83
1	dBm -21.04
	mW 7.87
1.5	dBm -21.54
	mW 7.01
2	dBm -22.04
	mW 6.25
2.5	dBm -22.54
	mW 5.57
3	dBm -23.04
	mW 4.96
3.5	dBm -23.54
	mW 4.43
4	dBm -24.04
	mW 3.94

Fuente: Autoría propia

En el primer escenario del canal 3, se logra un diagrama del ojo con una abertura óptima, aunque presenta interferencia. El factor de calidad Q no muestra una diferencia

significativa en comparación con lo obtenido en la simulación de la tecnología GPON, lo que indica una menor tasa de pérdida de energía. A pesar de esto, se observa la presencia de ruido y un jitter con una oscilación en el tiempo mínima, tal como se ilustra en la Figura 17.

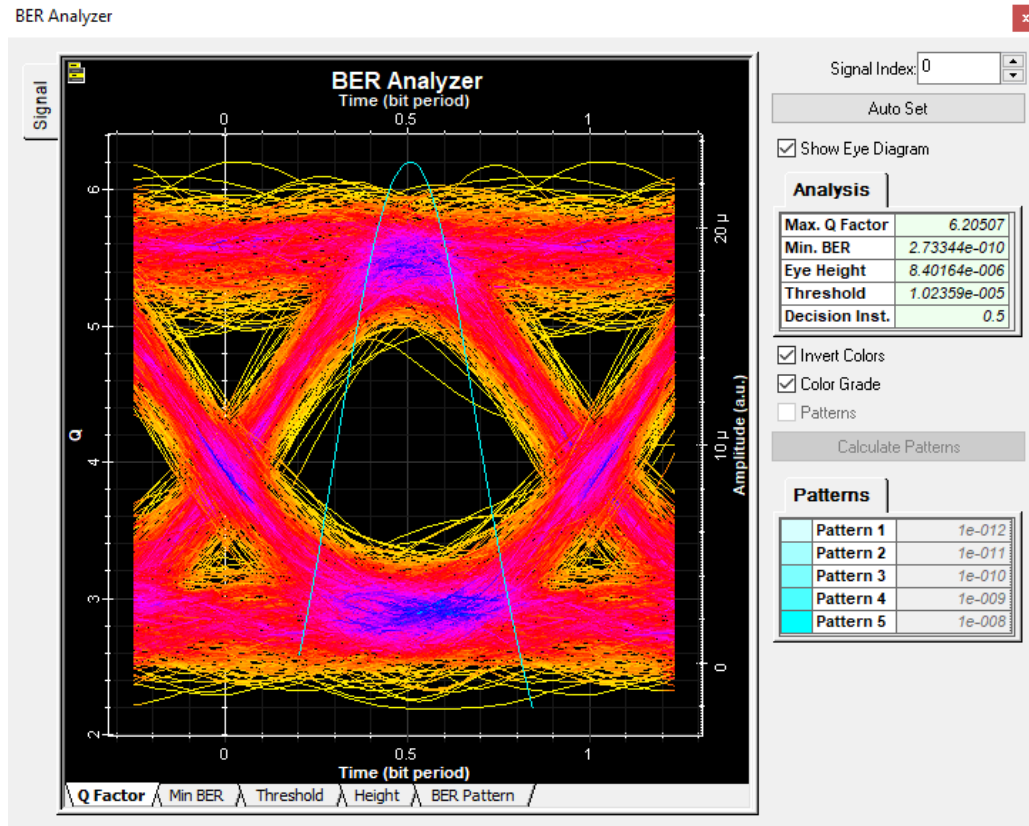


Figura 17 Diagrama del ojo NGPON2 con 0dB de atenuación
 Fuente: Autoría propia

El diagrama del ojo proporciona una representación visual en el dominio del tiempo de diversas combinaciones entre 1 lógico y 0 lógico. Al superponer estas combinaciones, se logra una evaluación más precisa de los factores de calidad Q, BER y el jitter, que contribuyen a corroborar el funcionamiento óptimo de la red. En la Tabla 17, se presentan los valores resultantes de estos parámetros para cada escenario de atenuación, obtenidos del análisis de los diagramas del ojo generados por la simulación NGPON2 en el software.

Tabla 17 Valores del diagrama del ojo en distintos escenarios

Atenuación	Factor de Calidad Q	Jitter	BER
0	6.21	0.3047	2.7334e-10
0.5	5.5616	0.3168	1.3364e-8
1	4.980	0.3452	3.1789e-7
1.5	4.4557	0.4021	4.18e-6
2	3.9842	0.4427	3.3852e-5
2.5	3.5608	0.5199	1.8482e-4
3	3.1813	0.5239	7.3308e-4
3.5	2.8341	0.5483	2.2970e-3
4	0	0.9248	1

Fuente: Autoría propia

Tecnología 50GPON

En el módulo receptor, se lleva a cabo un análisis de la potencia óptica y el espectro óptico en términos de frecuencia (THz) y longitud de onda (nm), considerando diferentes niveles de atenuación. Además, se explora el diagrama del ojo, resaltando datos clave como el factor de calidad Q, el jitter y la relación de error de bits (BER) frente a la potencia de recepción.

En la Figura 18, se muestra el espectro óptico de la banda modulada del canal 1, seleccionado para este estudio. Este espectro se define por el doble del ancho de banda en la banda base. Utilizando marcadores, se verifica que el ancho espectral es de 50 GHz, y se confirma que la señal recibida coincide con el canal transmitido a través del feeder y luego filtrado en el bloque de recepción. Es esencial notar que la señal óptica llega con una presencia de ruido casi imperceptible. Además, el espectro óptico presenta información sobre la frecuencia pico máxima: 193.5 THz y la potencia pico máxima: -20.88 dBm.

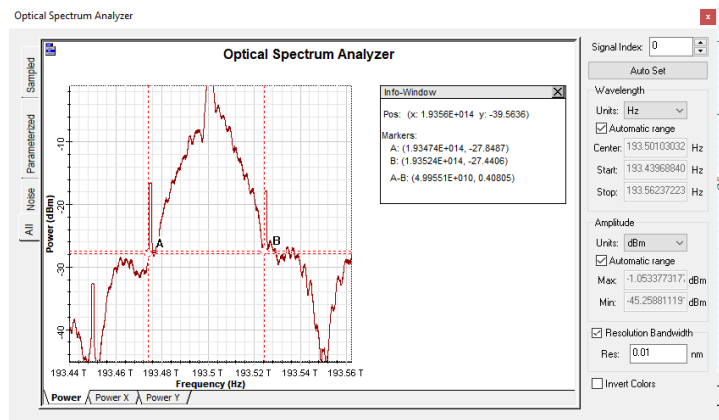


Figura 18 Ancho de pulso de banda modulada 50GPON

Fuente: Autoría propia

La Tabla 18 presenta los niveles de potencia óptica que alcanzan el bloque receptor en diversos escenarios, variando el valor del índice de atenuación. Estos escenarios se han evaluado en incrementos de 0.5, abarcando desde 0 hasta 9.5 en el índice de atenuación.

Tabla 18 Potencia óptica recibida en 50GPON

Atenuación (dB)	Potencia de la señal que llega al receptor	
0	dBm	-11.70
	mW	0.067
0.5	dBm	-12.20
	mW	0.060
1	dBm	-12.70
	mW	0.053
1.5	dBm	-13.20
	mW	0.047
2	dBm	-13.70
	mW	0.042
2.5	dBm	-14.20
	mW	0.038
3	dBm	-14.70
	mW	0.033
3.5	dBm	-15.20
	mW	0.030
4	dBm	-15.70
	mW	0.026
4.5	dBm	-16.20
	mW	0.023
5	dBm	-16.70
	mW	0.021
5.5	dBm	-17.20
	mW	0.019
6	dBm	-17.70
	mW	0.016
6.5	dBm	-18.20
	mW	0.015
7	dBm	-18.70
	mW	0.013
7.5	dBm	-19.20
	mW	0.012
8	dBm	-19.70
	mW	0.010
8.5	dBm	-20.20
	mW	0.009
9	dBm	-20.70
	mW	0.008
9.5	dBm	-21.20
	mW	0.007

Fuente: Autoría propia

En el escenario 1 del canal 1 se obtiene el diagrama de ojo con una abertura casi perfecta con presencia de interferencia baja. Su factor de calidad Q no difiere demasiado del obtenido en la simulación de la tecnología GPON, sin embargo, el ruido y el jitter se presentan con una oscilación en el tiempo muy baja casi nula como se muestra en la Figura 19.

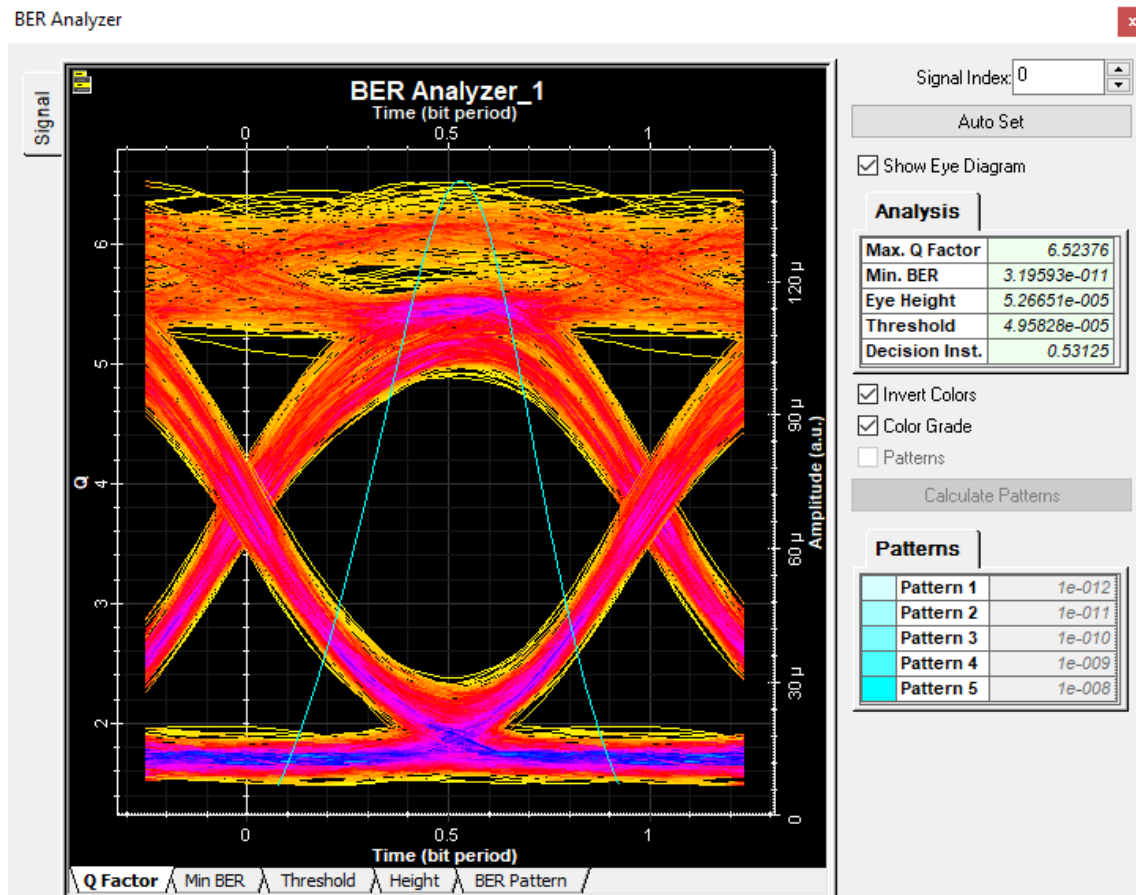


Figura 19 Diagrama del ojo 50GPON con 0dB de atenuación
Fuente: Autoría propia

El diagrama del ojo proporciona una representación visual en el dominio del tiempo de diversas combinaciones entre 1 lógico y 0 lógico. Al superponer estas combinaciones, se logra una evaluación más precisa de los factores de calidad Q, BER y el jitter, que contribuyen a corroborar el funcionamiento óptimo de la red. En la Tabla 19, se presentan los valores resultantes de estos parámetros para cada escenario de atenuación, obtenidos del análisis de los diagramas del ojo generados por la simulación 50GPON en el software.

Tabla 19 Valores del diagrama del ojo en distintos escenarios

Atenuación	Factor de Calidad Q	Jitter	BER
0	6.5237	0.1605	3.1959e-11
0.5	6.4461	0.1656	5.3619e-11
1	6.3737	0.1845	8.6517e-11
1.5	6.2636	0.1893	1.7702e-10
2	6.1412	0.2082	3.8719e-10
2.5	6.0055	0.2035	9.0549e-10
3	5.8456	0.2177	2.4082e-9
3.5	5.6663	0.2366	6.9982e-9
4	5.4642	0.2319	2.2414e-8
4.5	5.2355	0.2413	7.9728e-8
5	4.9933	0.2650	2.8907e-7
5.5	4.7287	0.2745	1.1051e-6
6	4.4530	0.3123	4.1577e-6
6.5	4.1669	0.3407	1.5218e-5
7	3.8723	0.3644	5.3282e-5
7.5	3.5820	0.3786	1.6890e-4
8	3.2918	0.4448	4.9407e-4
8.5	3.0115	0.4638	1.2921e-3
9	2.6885	0.4874	3.5747e-3
9.5	0	0.8736	1

Fuente: Autoría propia

La relación y comparación que se obtiene al usar los resultados simulados en cada tecnología tanto de BER como potencia recibida se muestran en la Figura 20. Puede observarse que, como era de esperar, el mejor desempeño lo tiene la red GPON dado que se logran los mismos valores de BER con mejor potencia de señal en el receptor en comparación con las otras dos tecnologías (pero evidentemente con mucho menor tasa de bits). La curva del BER de NGPON2 tiene una penalidad de aproximadamente 2dB con respecto a GPON (es decir, para lograr un mismo BER obtenido con GPON, se requiere que la señal que llega al receptor tenga una potencia 2dB mayor). El peor desempeño lo tiene, como a su vez era de esperarse, la red 50 GPON, con una penalidad que se incrementa desde los 2dB creciendo a cerca de 3dB para valores de BER pequeños. Sin embargo, con esta última se tiene la mayor velocidad de transmisión.

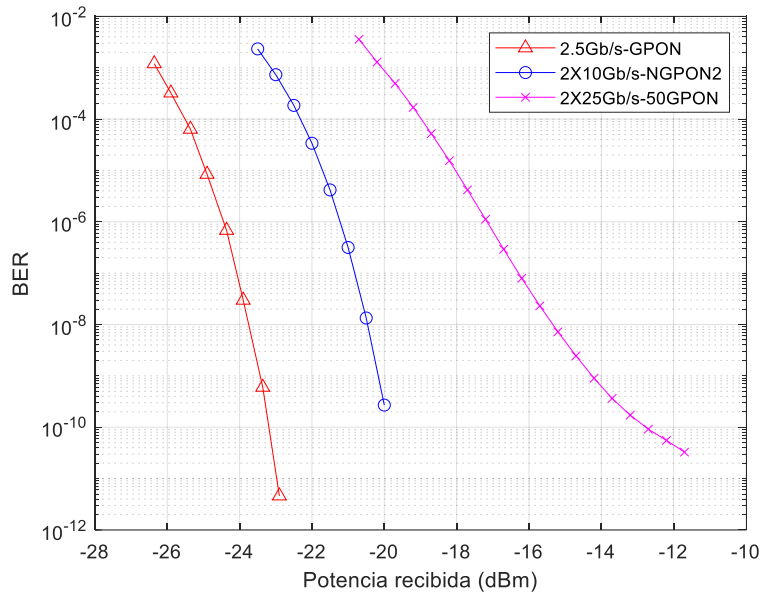


Figura 20 Relación Potencia/BER de las tres tecnologías
Fuente: Autoría propia

El despliegue de las tres tecnologías obtenidas mediante el algoritmo OTS se muestra en la Figura 21.

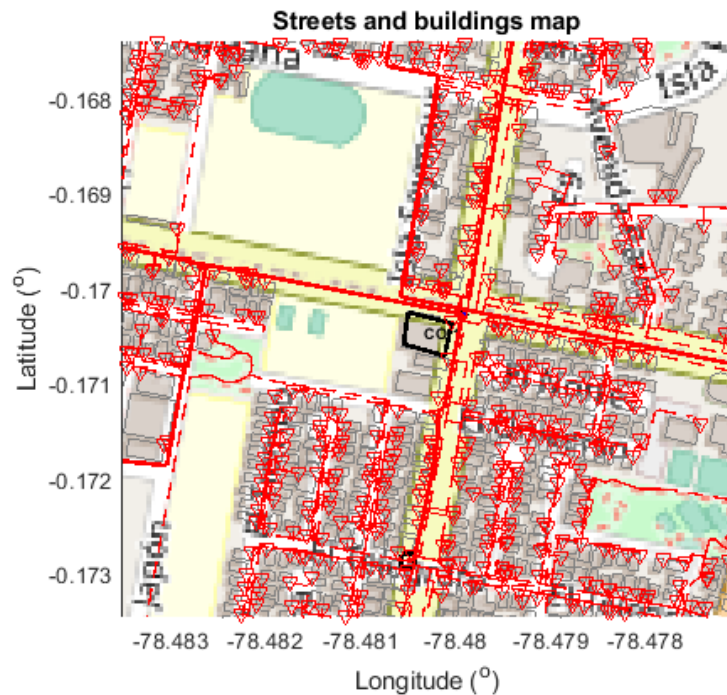


Figura 21 Grafica de despliegue de las tecnologías con OTS
Fuente: Autoría propia

4.1.2. Análisis de costos de implementación

En un caso de la vida real, los usuarios exigen diferentes velocidades de bits dependiendo de su necesidades y preferencias. Por ello asignamos cuatro escenarios de bit rate, garantizado diferentes tarifas para cada usuario, residencial o corporativo, en el

rango de los correspondientes valores del escenario de velocidad de bits considerado. La Tabla 20 especifica el costo total de implementación para GPON, NGPON2 y 50GPON en cada escenario de velocidad de bits.

Tabla 20 Costos de implementación por tecnologías

COSTO EN MILLONES (USD)			
BR ESCENARIO	GPON	NGPON2	50GPON
1	11,120561	11,2357409	10,5514492
2	12,829775	10,5008953	10,6810336
3	15,3956191	10,6346539	10,5445773
4	20,2348006	11,5330647	10,6991845

Fuente: Autoría propia

El valor obtenido del primer escenario para la tecnología GPON es aproximadamente el escenario que cubre la demanda de tasa de bits típica de hoy para residencial y usuarios corporativos. Dicho valor, 11,12 millones de dólares para 16772 usuarios, corresponde a un costo de aproximadamente 663 USD por usuario, por lo que parece un resultado razonable teniendo en cuenta el coste típico estimaciones de los costes reales por usuario del operador actual para GPON.

Los resultados de la Tabla 20 muestran que, para demandas crecientes de velocidad de bits, el coste de despliegue aumenta significativamente cuya posición depende de la capacidad de cada tecnología. Por ejemplo, en el caso de la GPON, el coste se dispara por encima del escenario 3, mientras que para NGPON en escenarios comunes como es el 2 y 3 su costo es bajo comparado a GPON e igualitario comparado con 50GPON.

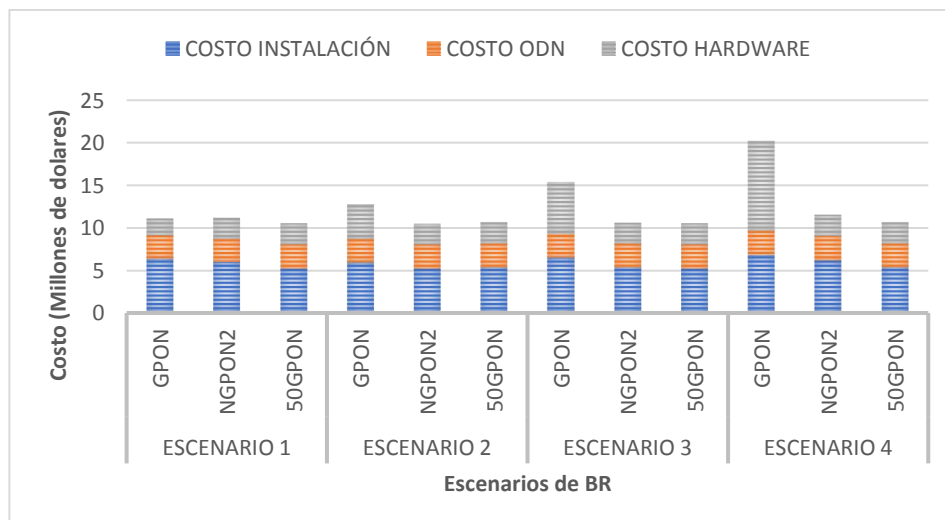


Figura 22 Resultados de costos de implementación

Fuente: Autoría propia

La Figura 22 muestra un gráfico de costos para cada implementación de tecnología PON, incluyendo un detalle del costo del hardware, instalación y componentes ODN, para los escenarios de cuatro velocidades de bits. Se puede ver en la figura que cuando la demanda de velocidad de bits garantizada por parte de los usuarios es relativamente baja, es decir, del orden de poco más de cientos de Mb/s para usuarios residenciales y hasta 500 Mb/s para usuarios corporativos, como en el escenario 1, el costo de GPON es más bajo en comparación con el costo de la tecnología NGPON2. En cambio, cuando las demandas de velocidad de bits de los usuarios residenciales son del orden de más de cientos de Mb/s y miles de Mb/s para usuarios corporativos (escenario 3 y 4), NGPON2 Y 50GPON se convierten en la mejor opción frente al mayor costo de implementación de GPON. Sin embargo, como puede verse en el escenario 2, se considera valores de velocidades de bits que son frecuentes dentro de la demanda actual del Ecuador, por lo que para este escenario la implementación de la tecnología NGPON2 resulta ser la de menos valor de implementación.

CAPITULO V

5.1. Conclusiones

En el transcurso de este estudio, se ha llevado a cabo una exhaustiva evaluación de las tecnologías de acceso óptico GPON, NGPON2 y 50GPON en el contexto de las crecientes demandas de ancho de banda en las redes de telecomunicaciones. El objetivo principal fue comparar los costos de implementación de estas tecnologías en diferentes escenarios de demanda de ancho de banda, con el propósito de proporcionar una visión integral de su viabilidad económica.

Los hallazgos revelan que cada una de estas tecnologías presenta ventajas y desventajas particulares en función de las condiciones específicas de implementación. En términos de costos, observando que la elección de la tecnología adecuada está influenciada por múltiples factores, incluyendo la infraestructura existente, la densidad de usuarios y las tasas de bits requeridas.

En escenarios de baja demanda de ancho de banda y en áreas donde la infraestructura heredada puede ser reutilizada, GPON sigue siendo una opción rentable y efectiva. No obstante, para áreas con una alta densidad de usuarios y una demanda significativa de ancho de banda, NGPON2 y 50GPON emergen como alternativas prometedoras. A pesar de que su implementación inicial puede conllevar costos más altos, su capacidad de escalabilidad y sus tasas de transmisión más elevadas los hacen atractivos para entornos de alto rendimiento.

NGPON2 y 50GPON son tecnologías de próxima generación que ofrecen mayores tasas de transmisión de datos en comparación con GPON. Son especialmente adecuadas para escenarios con una alta demanda de ancho de banda, como redes de acceso para empresas y aplicaciones de 5G.

En conclusión, la elección de la tecnología PON adecuada dependerá en última instancia de las necesidades específicas de cada escenario. Este estudio proporciona una guía para los proveedores de servicios en la toma de decisiones en telecomunicaciones, ayudándoles a evaluar de manera informada las opciones disponibles y seleccionar la tecnología que mejor se adapte a sus requerimientos de ancho de banda y presupuesto.

5.2. Recomendaciones

Para tomar decisiones más encaminadas sobre qué tecnología PON implementar, es crucial evaluar escenarios específicos. Considera factores como la densidad de usuarios, la distancia entre nodos, las tasas de crecimiento del tráfico y las limitaciones presupuestarias en cada caso.

Las tecnologías NGPON2 y 50GPON ofrecen mayores tasas de transmisión, pero también pueden ser más costosas en la implementación inicial. Por ello es importante evaluar la capacidad de escalabilidad de estas tecnologías para satisfacer las futuras demandas de ancho de banda sin requerir una inversión importante a corto plazo.

Además, es importante buscar las maneras de optimizar el uso de recursos, como la consolidación de fibra óptica o la implementación de soluciones de multiplexación para reducir la cantidad de componentes físicos requeridos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abreu Marcelo, C. A. (2009). Características generales de una red de fibra óptica al hogar (FTTH9). En *Memoria de trabajos de difusión científica y técnica* (págs. 38-46).
- Arévalo Germán, H. R. (2017). Optimization of multiple PON deployment costs and comparison between GPON, XGPON, NGPON2 and UDWDM PON. En *Optical Switching and networking 25* (págs. 80-90).
- Arévalo, G. (2016). *OPTIMIZATION OF MULTIPLE UDWDM PON DEPLOYMENT BASED ON PHYSICAL RESTRICTIONS AND ASYMMETRIC USERS' CLUSTERING*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Brito, M. (2022). *ESTUDIO DEL DESPLIEGUE DE UNA RED DE ACCESO NG-PON2 EN LA CIUDAD DE QUITO*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Cando, C. (2020). *Análisis comparativo entre NG-PON2 y GPON para mejorar el desempeño de las redes pasivas de fibra óptica FTTH*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Endara, D. (2021). *Análisis, Diseño y Simulación de una red FTTH GPON para la Población de la Parroquia de Checa de la Ciudad de Quito*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Espinoza, C., & Baque, J. (2010). *ESTUDIO, ANALISIS Y PROPUESTA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED GPON PARA LA UCSG*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- García, P. (2016). *Diseño de una red de acceso FTTH, utilizando el estándar GPON en la ciudad de Ibarra para la empresa PUNTONET S.A.* Quito: Universidad de las Américas.
- Jama Gómez, A. S. (2017). *Dimensionamiento óptimo de redes PON con oficinas centrales redundantes para el sector de Ñaquito del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.
- Larrea, J., & Rivera, F. (2010). *Propuesta de factibilidad técnico económico para la implementación de una red de acceso con tecnología GPON para brindar el servicio triple play en la ciudad de Cuenca*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Loayza, P. (2019). *DISEÑO DE REDES FTTH-GPON CON ENFOQUE QoS*. Quito: Universidad Tecnológica Israel.
- Melo, M., Toledo, A., Gómez, G., & Velasco, I. (2018). *Estudio de factibilidad técnico - económico para la implementación de una red FTTH/GPON en el contexto colombiano para servicios Triple Play*. Popayán: Perspectiv@s Revista de Tecnología e Información.
- Milanovic, S. (2014). Case Study for a GPON Deployment in the Enterprise Environment. *Journal of networks*, 42-47.
- Moreno, M. (2018). Estudio Tecno-Económico del despliegue del estándar NG-PON2 sobre infraestructura óptica heredada. *Universidad Oberta de Catalunya*, 10.
- Pardo, D. (2021). *ESTUDIO PARA EL DISEÑO DE UNA RED DE ACCESO GPON, PARA LA CIUDAD DE LORETO EN LA PROVINCIA DE ORELLANA. CASO DE ESTUDIO "LA CORPORACIÓN NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES CNT EP"*. Quito: Pontificia Universidad católica del Ecuador.

- Piyasagua, J., & Quinchuqui, W. (2018). *Estudio de ingeniería para el despliegue eficiente de recursos y servicios de Internet y Telefonía Fija en ciudadela del cantón Playas*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del litoral.
- Rábano, C. (2022). *Estudio tecno-económico del despliegue del estándar 50G-PON sobre infraestructura óptica heredada*. Universidad Oberta de Catalunya.
- Santiana, P. (2022). *Estudio del impacto del uso de las redes GPON en Ecuador frente a otras tecnologías año 2022 y perspectivas de crecimiento*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana.
- Sarango, D. (2015). *DISEÑO DE UNA RED DE DATOS BASADA EN TECNOLOGÍA XG-PON systems (10 GIGABITCAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORKS) PARA EL PROGRAMA DE VIVIENDA CIUDAD VERDE*. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Velásquez, J. (2019). *Next generation optical access networks and coexistence with legacy PONs*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.