



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

**TÍTULO**

Optimización de la Calidad del Servicio en CNT EP Tungurahua:  
Estrategias Técnicas para Mejorar la Infraestructura de Red y Satisfacción  
del Cliente

**AUTOR**

**Bastidas Tello, Juan Xavier**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

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

**TUTOR**

**Chamba Macas, Fernando Vinicio**

**Santa Elena, Ecuador**

**Año 2025**



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

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**Ing. Alicia Andrade Vera, Mgtr.**

**COORDINADORA DEL**  
**PROGRAMA**

---

**Ing. Fernando Chamba Macas, Mgtr.**

**TUTOR**

---

**Ing. Diego Intriago Rodríguez, MSc.**

**DOCENTE ESPECIALISTA**

---

**Ing. Carlos López Rodríguez, MSc.**

**DOCENTE ESPECIALISTA**

---

**Abg. María Rivera González, Mgtr.**

**SECRETARIA GENERAL UPSE**



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

**CERTIFICACIÓN**

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

**TUTOR**

---

**Ing. Fernando Chamba Macas, Mgtr.**

Santa Elena, 15 de diciembre de 2024



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

**Yo, BASTIDAS TELLO JUAN XAVIER**

**DECLARO QUE:**

El trabajo de Titulación, Optimización de la Calidad del Servicio en CNT EP Tungurahua: Estrategias Técnicas para Mejorar la Infraestructura de Red y Satisfacción del Cliente, previo a la obtención del título en Magíster en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, 15 de diciembre de 2024

**EL AUTOR**

---

**Juan Xavier Bastidas Tello**



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

**CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO**

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado Optimización de la Calidad del Servicio en CNT EP Tungurahua: Estrategias Técnicas para Mejorar la Infraestructura de Red y Satisfacción del Cliente, presentado por el estudiante, Bastidas Tello, Juan Xavier fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 8%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



**CERTIFICADO DE ANÁLISIS**  
magister

**Tesis MT Bastidas**  
**15dic2024**

**8%**  
Textos  
sospechosos

**8% Similitudes**  
0% similitudes entre comillas  
5% entre las fuentes mencionadas  
2% Idiomas no reconocidos (ignorado)  
12% Textos potencialmente generados por IA (ignorado)

Nombre del documento: Tesis MT Bastidas 15dic2024.docx  
ID del documento: b23e1b95c9c5b8460038ac5f93d3df4fab07435  
Tamaño del documento original: 4.6 MB  
Autores: []

Depositante: FERNANDO VINICIO CHAMBA MACAS  
Fecha de depósito: 15/12/2024  
Tipo de carga: interface  
fecha de fin de análisis: 15/12/2024

Número de palabras: 18.026  
Número de caracteres: 115.826

**TUTOR**

---

**Ing. Fernando Chamba Macas, Mgtr.**



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

**AUTORIZACIÓN**

**Yo, BASTIDAS TELLO JUAN XAVIER**

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, 15 de diciembre de 2024

**EL AUTOR**

---

**Juan Xavier Bastidas Tello**

## **AGRADECIMIENTO**

Al culminar esta etapa tan significativa en mi formación académica, quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que, de una u otra manera, han contribuido a la realización de esta tesis de maestría en telecomunicaciones. En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor de tesis, Ing. Chamba Macas, Fernando, Mgtr.

por su invaluable guía, paciencia y dedicación durante todo este proceso. Sus consejos y experiencia fueron fundamentales para el desarrollo y culminación exitosa de este trabajo.

Agradezco también a La Universidad Estatal Península De Santa Elena, por haberme brindado todas las herramientas y recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Su infraestructura y el ambiente académico propicio me permitieron explorar y desarrollar mis ideas de manera efectiva.

Un especial reconocimiento a mis compañeros de clase, con quienes compartí innumerables horas de discusión, estudio y trabajo en equipo. Sus aportes, críticas constructivas y compañía hicieron de este camino una experiencia mucho más enriquecedora y llevadera.

No puedo dejar de mencionar a mi Esposa e hijos, cuyo amor, apoyo incondicional y comprensión fueron el pilar fundamental que me sostuvo en los momentos

Finalmente, extendiendo mi agradecimiento a todos aquellos que, de alguna manera, contribuyeron a que este proyecto se hiciera realidad. A quienes participaron en entrevistas, encuestas, o brindaron su tiempo y conocimientos, mi más sincero agradecimiento.

Este logro no hubiera sido posible sin la ayuda y el apoyo de todos ustedes.

*Bastidas Tello, Juan Xavier*



## DEDICATORIA

Dedico esta tesis de maestría en telecomunicaciones a la memoria de mi padre, Hugo Enrique Bastidas Cuesta, y de mi hermano, Guillermo de Jesús Bastidas Tello, quienes en paz descansen. Fueron mis primeros mentores e inspiración para seguir el camino de la electrónica. Su legado vive en cada paso y logro que alcanzo.

De manera especial, dedico este trabajo a mi madre, María Mercedes Tello, quien con valentía asumió ambos roles en la ausencia de mi padre. Su sacrificio, apoyo y fortaleza fueron la base para construir mi carrera y vida.

También dedico esta tesis a mi esposa, Mercedes Guadalupe Lema Chiliquina, y a mis hijos, Diego Xavier y Pablo Andrés Bastidas Lema, quienes han sido mi sostén e inspiración durante este tiempo de estudio. Agradezco su comprensión, sacrificio y amor, a pesar de las ausencias y ocasiones importantes que no pude compartir por mis compromisos académicos. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

*Bastidas Tello, Juan Xavier*

# ÍNDICE GENERAL

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO .....	V
AUTORIZACIÓN .....	VI
AGRADECIMIENTO .....	VII
DEDICATORIA.....	IX
ÍNDICE GENERAL .....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIV
RESUMEN .....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1. Introducción.....	5
1.2. Medios de transmisión.....	6
1.2.1. Medios de transmisión guiados .....	6
1.2.2. Medios de transmisión no guiados .....	7
1.3. La fibra óptica .....	8
1.3.1. Fibra monomodo (SMF).....	9
1.3.2. Fibra multimodo (MMF) .....	10
1.4. ¿Cómo funciona la comunicación por fibra óptica?.....	12
1.4.1. Atenuación.....	13
1.4.2. La dispersión .....	14
1.5. Componentes del enlace de fibra óptica.....	15

1.5.1.	Transmisor óptico .....	15
1.5.2.	Modulación óptica directa y externa .....	16
1.5.3.	Receptor óptico.....	18
1.5.4.	El amplificador óptico .....	19
1.6.	Descripción general de la Red Óptica Pasiva (PON).....	20
1.6.1.	Terminal de línea óptica (OLT).....	22
1.6.2.	Red de distribución óptica (ODN).....	23
1.6.3.	Unidad de red óptica (ONU) .....	25
1.6.4.	Terminal de red óptica (ONT).....	25
1.7.	Descripción del funcionamiento de la red óptica pasiva.....	26
1.7.1.	Canal descendente. ....	27
1.7.2.	Canal ascendente .....	27
1.8.	Tecnologías PON .....	28
1.8.1.	PON basadas en Multiplexación por división en el tiempo (TDM-PON). 29	
1.8.1.1.	ATM PON (APON).....	31
1.8.1.2.	PON de banda ancha (BPON) .....	31
1.8.1.3.	PON Ethernet (EPON).....	32
1.8.1.4.	PON Gigabit (GPON).....	33
1.8.2.	Multiplexación por división de longitud de onda (WDM).....	36
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....</b>		<b>39</b>
2.1.	Contexto de la investigación .....	39
2.2.	Diseño y alcance de la investigación.....	40
2.2.1.	Delimitación del marco de investigación .....	40
2.2.2.	Indicadores de rendimiento – KPI.....	41
2.2.3.	Alcance de las mejoras en la red actual.....	41
2.3.	Tipo y métodos de investigación.....	42
2.3.1.	Herramientas y plataformas de simulación .....	42

2.3.2. Configuración de referencia .....	42
2.3.3. Pseudocódigos utilizados en la simulación .....	43
2.4. Parámetros de simulación.....	45
2.5. Población y distribución de la red .....	46
2.5.1. Definición de la población.....	46
2.5.2. Disposición de la red GPON .....	46
2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información. ....	47
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>48</b>
3.1. Introducción.....	48
3.2. Análisis de la influencia de la latencia en la calidad de servicio .....	48
3.3. Análisis de pérdida de paquetes en función de la distancia .....	49
3.4. Análisis del uso del ancho de banda con asignación fija .....	51
3.5. Discusión de resultados obtenidos de la latencia con tecnología WDM.....	52
3.6. Asignación de ancho de banda: Distribución fija frente a dinámica.....	53
3.7. Disminución de la pérdida de paquetes con divisores ópticos intermedios .....	54
3.8. Resumen de los resultados .....	54
3.9. Propuesta de fortalecimiento en programas de formación continua .....	55
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>57</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>58</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>59</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

## Capítulo 3

Tabla 3. 1: Resumen de los datos obtenidos de la latencia frente al número de usuarios. .....	48
Tabla 3. 2: Resumen de los datos obtenidos de la pérdida de paquetes en función de la distancia del enlace. ....	49
Tabla 3. 3: Resumen de los datos obtenidos de la utilización del BW vs. Número de Usuarios .....	51
Tabla 3. 1: Resumen de los resultados de las simulaciones.....	55

# ÍNDICE DE FIGURAS

## Capítulo 1

Figura 1. 1: Topología de redes ópticas (medios guiados) de acceso inalámbrico, por satélite, terrestres y domésticas integradas (medios no guiados).....	6
Figura 1. 2: Medios de transmisión no guiados (a) ondas acústicas sobre un haz de luz; y (b) transceptor de telefonía móvil para comunicaciones ópticas no guiadas (UOC).....	7
Figura 1. 4: Estructura de la fibra óptica. ....	9
Figura 1. 5: Esquema de la propagación de la luz en una fibra monomodo (SMF). ....	10
Figura 1. 6: Esquema de la propagación de la luz en una fibra multimodo (MMF).....	10
Figura 1. 7: Esquema de la propagación de la luz en una SI-MMF. ....	11
Figura 1. 8: Esquema de la propagación de la luz en una GI-MMF.....	11
Figura 1. 3: Sistema básico de comunicación por fibra óptica. ....	12
Figura 1. 9: Atenuación típica en función de la longitud de onda. ....	13
Figura 1. 10: Esquemático de la modulación óptica directa (a) usando un láser, y (b) usando láser de inyección óptica reforzada. ....	16
Figura 1. 11: Esquemático de la modulación óptica externa (a) sin OFM y (b) con OFM. ....	17
Figura 1. 12: Estructura de un fotodiodo PIN y su símbolo eléctrico. ....	18
Figura 1. 13: Estructura de un fotodiodo de avalancha (APD) y distribución del campo eléctrico.....	19
Figura 1. 14: Esquemático de las diferentes configuraciones de EDFAs. ....	20
Figura 1. 15: Arquitectura de red óptica pasiva.....	21
Figura 1. 16: Terminal de línea óptica (OLT) con 32 puertos PON.....	22
Figura 1. 17: Red de distribución óptica (ODN) .....	23
Figura 1. 18: Repartidor óptico (ODF) .....	23
Figura 1. 19: Esquema del divisor óptico. ....	24

Figura 1. 20: Representación de la conexión de la unidad de red óptica (ONU). .....	25
Figura 1. 21: Terminal de red óptica (ONT).....	25
Figura 1. 22: Evolución del PON.....	26
Figura 1. 23: La topología común en PON para el tráfico downstream. ....	27
Figura 1. 24: La topología común en PON para el tráfico upstream. ....	28
Figura 1. 25: Evolución de la red óptica pasiva (PON). ....	29
Figura 1. 26: Arquitectura PON basada en multiplexación por división en el tiempo (TDM).....	30
Figura 1. 27: Red APON típica según ITU-T G.983 .....	31
Figura 1. 28: Arquitectura BPON básica y concepto operativo .....	32
Figura 1. 29: Arquitectura EPON. ....	32
Figura 1. 30: Arquitectura GPON.....	33
Figura 1. 31: GPON – modo de difusión (Broadcasting) downstream.....	34
Figura 1. 32: GPON – modo de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) upstream.....	34
Figura 1. 33: PON basada en multiplexación por división de longitud de onda (WDM) .....	37
Figura 1. 34: PON basada en multiplexación CWDM. ....	38

## Capítulo 2

Figura 2. 1: Ubicación de la Zonal CNT EP Ambato Sur en la Provincia de Tungurahua. ....	39
Figura 2. 2: Flujograma del proceso de simulación.....	43
Figura 2. 3: Pseudocódigo de la simulación de tráfico en la Red. ....	43
Figura 2. 4: Pseudocódigo de la simulación de pérdida de paquetes.....	44
Figura 2. 5: Pseudocódigo de la simulación de ocupación del ancho de banda. ....	45

Figura 2. 6: Pseudocódigo comparativo del impacto de usar WDM-GPON frente a GPON actual.....	45
Figura 2. 7: Topología en árbol de la red GPON en CNT EP Tungurahua. ....	46

### **Capítulo 3**

Figura 3. 1: Gráfica de la latencia en función del número de usuarios sobre GPON. ....	49
Figura 3. 2: Gráfico de pérdida de paquetes vs. Distancia sobre GPON.....	50
Figura 3. 3: Gráfico de la utilización del BW fija vs. Número de usuarios sobre GPON. .....	52
Figura 3. 4: Comparativa de latencia entre infraestructuras GPON y WDM-GPON.....	52
Figura 3. 5: Comparativa del uso del ancho de banda entre los modelos de asignación fija y dinámica. ....	53
Figura 3. 6: Índices de pérdida de paquetes antes y después de la introducción de divisores ópticos. ....	54



## RESUMEN

En el presente documento se desarrolla el trabajo investigativo denominado “Optimización de la Calidad del Servicio en CNT EP Tungurahua: Estrategias Técnicas para Mejorar la Infraestructura de Red y Satisfacción del Cliente” para obtener el grado académico de Magíster en Telecomunicaciones. El propósito principal del trabajo de maestría fue la implementación de estrategias técnicas (desarrollado en el capítulo 2) para mejorar la calidad de servicio de la red GPON en CNT EP Tungurahua. En el capítulo 1 se describe el marco teórico de las redes de acceso por fibra óptica y las tecnologías de acceso TDMA, CDMA y FDMA. En el capítulo 2 se implementan los algoritmos de simulación de la red GPON y la mejora WDM-GPON, y en Capítulo 3 se presentan las discusiones de los resultados obtenidos. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

**Palabras claves:** Multiplexación, GPON, WDM.

## **ABSTRACT**

This document develops the research work called “Optimization of the Quality of Service in CNT EP Tungurahua: Technical Strategies to Improve the Network Infrastructure and Customer Satisfaction” to obtain the academic degree of Master in Telecommunications. The main purpose of the master's work was the implementation of technical strategies (developed in chapter 2) to improve the quality of service of the GPON network in CNT EP Tungurahua. Chapter 1 describes the theoretical framework of fiber optic access networks and TDMA, CDMA and FDMA access technologies. Chapter 2 implements the simulation algorithms of the GPON network and the WDM-GPON enhancement, and Chapter 3 presents the discussions of the results obtained. Finally, conclusions and recommendations are presented.

**Keywords:** Multiplexing, GPON, WDM.

# INTRODUCCIÓN

Los antecedentes de este estudio se fundamentan en la creciente importancia de la calidad del servicio en telecomunicaciones, especialmente en empresas como CNT EP Tungurahua, que enfrentan desafíos persistentes en la optimización de su infraestructura de red para mejorar la satisfacción del cliente. A nivel global, la demanda por servicios de telecomunicaciones eficientes y de alta calidad ha incrementado significativamente, impulsada por la creciente digitalización de la sociedad y la economía. Sin embargo, muchas empresas enfrentan obstáculos técnicos y operativos para cumplir con estas expectativas, afectando su capacidad para competir efectivamente en el mercado y satisfacer las necesidades cambiantes de los usuarios.

El desarrollo de infraestructuras de red robustas ha sido fundamental para mejorar la calidad del servicio (QoS) en el sector de las telecomunicaciones, lo que se refleja en la satisfacción del cliente. La empresa CNT EP Tungurahua enfrenta desafíos importantes en su infraestructura de red, lo cual afecta directamente la percepción del servicio por parte de sus usuarios. Esto es especialmente crítico dado que la calidad del servicio en telecomunicaciones ha sido un parámetro clave para las empresas que buscan diferenciarse en mercados competitivos y mejorar la retención de clientes, como lo demuestran estudios previos que analizan cómo la calidad del servicio influye en la competitividad de las empresas de telecomunicaciones a nivel mundial (Rajeswari et al., 2016). Además, investigaciones han revelado que las inversiones en la optimización de la red no solo mejoran la eficiencia operativa, sino también los niveles de satisfacción y fidelización de los usuarios (Beshley et al., 2020).

La evolución del sector de las telecomunicaciones ha impulsado a las empresas a priorizar la calidad del servicio como un elemento clave para mantenerse competitivas en un mercado global cada vez más exigente. En el caso de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT EP) en Tungurahua, se enfrentan a desafíos considerables en cuanto a la infraestructura de red, lo que repercute directamente en la experiencia del cliente. A lo largo de los años, el aumento exponencial en el uso de internet, dispositivos móviles y servicios de transmisión de datos ha generado una demanda creciente por una conectividad de alta calidad y sin interrupciones. Esta tendencia ha hecho que los usuarios sean cada vez más conscientes de la importancia de contar con servicios confiables y

eficientes, lo que ha intensificado la presión sobre las empresas para mejorar su infraestructura y adaptarse rápidamente a los avances tecnológicos.

A nivel nacional, CNT EP ha sido el principal proveedor de telecomunicaciones, pero la creciente demanda de conectividad, sumada a las deficiencias actuales en su infraestructura, subraya la necesidad de realizar mejoras significativas para mantenerse competitiva. Esta situación está alineada con estudios que señalan la importancia de que las empresas del sector implementen estrategias de optimización para abordar los crecientes retos de calidad, particularmente en un mercado cada vez más digitalizado (Pina et al., 2014). Consecuentemente, muchas empresas de telecomunicaciones, incluida CNT EP, se ven en la necesidad de superar obstáculos técnicos, financieros y operativos para ofrecer un servicio acorde a las expectativas de los usuarios, lo que hace imperativa una evaluación profunda de las estrategias de optimización y mejora de la infraestructura de red.

### **Planteamiento de la investigación**

Este estudio parte de la necesidad de investigar las deficiencias en la infraestructura de red de CNT EP Tungurahua que están afectando la calidad del servicio y, en consecuencia, la satisfacción de los clientes. Los problemas recurrentes de interrupciones en el servicio y la velocidad limitada han generado experiencias negativas para los usuarios, lo cual es consistente con investigaciones previas que han demostrado que la calidad del servicio tiene un impacto significativo en la decisión de los usuarios finales o clientes sobre sus proveedores de telecomunicaciones (Kwame et al., 2019; Naz et al., 2021). Además, la mejora en la calidad de la red no solo influye en la percepción del cliente, sino también en la capacidad de la empresa para captar nuevos usuarios en un entorno cada vez más competitivo (Rajeswari et al., 2016).

El núcleo de esta investigación radica en examinar los factores que impiden que CNT EP Tungurahua logre una calidad del servicio que cumpla con los estándares exigidos por sus clientes. Las deficiencias en la infraestructura de red se traducen en experiencias insatisfactorias para los usuarios, que enfrentan problemas como bajas velocidades de conexión, interrupciones en el servicio y una atención al cliente limitada. Esta situación no solo afecta la percepción y fidelidad de los clientes actuales, sino que también compromete la capacidad de la empresa para atraer nuevos usuarios en un mercado que

se caracteriza por la alta competencia y por la exigencia de soluciones más personalizadas y eficientes.

A través de un análisis detallado de los aspectos técnicos y operativos de la red, este estudio busca identificar los puntos críticos que están afectando la calidad del servicio. Se pretende proponer soluciones viables y estrategias técnicas que permitan a CNT EP Tungurahua superar las barreras actuales y mejorar tanto su infraestructura como la satisfacción de sus clientes. Esta investigación no solo se enfocará en los aspectos tecnológicos, sino también en el impacto que las mejoras en la red pueden tener en la relación empresa-cliente, su reputación y competitividad en la región.

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

La calidad del servicio en telecomunicaciones es un aspecto fundamental para la satisfacción del cliente y, por ende, para el éxito de cualquier proveedor. En el caso de CNT EP Tungurahua, se han identificado fallas recurrentes en su infraestructura de red que comprometen la calidad de los servicios ofrecidos, lo que afecta la experiencia de los usuarios y su percepción de la empresa. Esta situación plantea el problema central de esta investigación: **¿Cuáles son las deficiencias técnicas y operativas de la infraestructura de red de CNT EP Tungurahua que afectan la calidad del servicio y cómo pueden ser optimizadas para mejorar la satisfacción del cliente?**

Este problema no solo abarca los aspectos tecnológicos, sino también factores relacionados con la gestión, mantenimiento y actualización de la infraestructura, así como las estrategias implementadas para atender las necesidades cambiantes de los usuarios. La investigación busca identificar de manera precisa estas deficiencias, evaluarlas y proponer soluciones que permitan a CNT EP Tungurahua no solo mejorar su calidad de servicio, sino también adaptarse a las nuevas demandas del mercado.

### **Objetivo General:**

Implementar estrategias técnicas para mejorar la infraestructura de red y la satisfacción del cliente en CNT EP Tungurahua, asegurando una conectividad óptima y estable mediante la adopción de tecnologías avanzadas y prácticas de mantenimiento innovadoras para consolidar la posición de CNT EP como un proveedor líder en telecomunicaciones,

contribuyendo al desarrollo socioeconómico de la provincia de Tungurahua mediante servicios de telecomunicaciones de alta calidad.

### **Objetivos Específicos:**

1. Realizar un diagnóstico exhaustivo de la infraestructura de red actual de CNT EP en la provincia de Tungurahua, identificando puntos críticos y áreas de mejora prioritarias
2. Evaluar el rendimiento de la red mediante pruebas de carga y análisis de tráfico, con el fin de identificar cuellos de botella y puntos de congestión que puedan afectar la experiencia del cliente.
3. Analizar programas de formación continua para el personal técnico y de atención al cliente, enfocados en habilidades de resolución de problemas y comunicación efectiva.

### **Planteamiento hipotético**

La premisa central de este estudio sostiene que la implementación de estrategias técnicas avanzadas y la optimización de la infraestructura de red en CNT EP Tungurahua puede generar mejoras sustanciales en la calidad del servicio, lo cual repercutirá positivamente en la percepción y satisfacción de los clientes. Este estudio parte de la hipótesis de que la actualización tecnológica, junto con una gestión más eficiente de los procesos operativos, permitirá a la empresa no solo aumentar su capacidad operativa, sino también ofrecer un servicio más confiable, de mayor velocidad y con menos interrupciones. De este modo, se mejorará la experiencia del cliente, lo que se reflejará en una mayor fidelización, una reputación mejorada y una ventaja competitiva en el mercado regional.

Adicionalmente, se plantea que estas mejoras no solo tendrán un impacto directo en los clientes actuales, sino que también aumentarán la capacidad de CNT EP para atraer nuevos usuarios, consolidándose como líder en el sector de telecomunicaciones a nivel provincial. En resumen, la hipótesis defendida en este trabajo es que la optimización de la red permitirá alcanzar un equilibrio entre eficiencia operativa y satisfacción del cliente, impulsando a la empresa a ser más competitiva y exitosa.

# CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

## 1.1. Introducción

La fibra óptica es uno de los principales componentes de la infraestructura de telecomunicaciones. En comparación con los cables de cobre, la fibra óptica se basa en la luz para la transmisión de datos y permite una mayor velocidad y ancho de banda. Su gran ancho de banda y su baja atenuación la hacen ideal para la transmisión de gigabits y más. Desarrollada por primera vez a mediados de los años 70, la fibra óptica desempeñó un papel fundamental en el advenimiento de la era de la información al revolucionar la industria de las telecomunicaciones. (Agrawal, 2022)

Con la explosión del tráfico de información debida a Internet, el comercio electrónico, las redes informáticas, los multimedia, la voz, los datos y el vídeo, la necesidad de un medio de transmisión con capacidad de ancho de banda para manejar cantidades tan ingentes de información es primordial. En la actualidad, este tipo de comunicación de fibra óptica es la base de las redes de telecomunicaciones modernas, desde la conexión de alta velocidad a Internet hasta la transmisión de datos a todo el mundo. (Ellis et al., 2017)

El principio de funcionamiento de la tecnología óptica es la conversión de las señales eléctricas en luz, que a continuación se transmite a través de finos hilos de vidrio o plástico. Como la luz tiene estas propiedades, la transmisión de datos a grandes distancias presenta pérdidas mínimas, de modo que la fibra óptica es idónea tanto para transmisiones de corto alcance como de larga distancia. No obstante, los avances tecnológicos, tales como la multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM) y los amplificadores de fibra óptica, han aumentado considerablemente la capacidad y eficacia de estas redes. (Ramaswami et al., 2010)

Entonces, la luz forma una onda portadora electromagnética que se modula para transportar la información. Un sistema moderno estándar de comunicación por fibra óptica consta de un dispositivo transmisor que convierte la señal eléctrica en una señal óptica que se envía a la fibra óptica, un cable de fibra óptica que transporta la luz, varios tipos de amplificadores y un receptor óptico que recupera la señal y la convierte de nuevo en una señal eléctrica. La información transmitida suele ser información digital generada por ordenadores, sistemas telefónicos y compañías de televisión por cable.

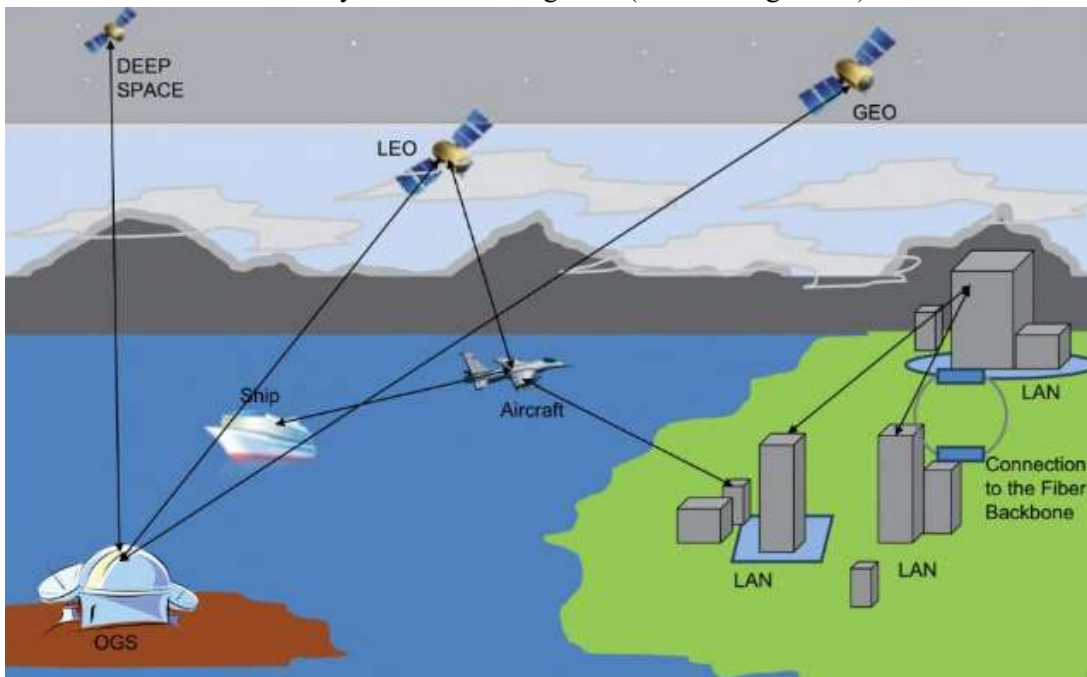
El desarrollo de esta tecnología ha sido espectacular desde su introducción en los años setenta. Originalmente se usaba principalmente para aplicaciones específicas, aunque en

la actualidad la fibra óptica es un elemento normalizado en las infraestructuras de redes urbanas y rurales. La demanda creciente de servicios de datos como la transmisión de vídeo, los juegos en línea y la computación en nube ha favorecido este crecimiento.

## 1.2. Medios de transmisión

En un sistema de telecomunicaciones, la transmisión de datos se lleva a cabo con mayor o menor eficacia y fiabilidad a través de los medios de transmisión, que, por lo general, estos medios se clasifican en medios guiados (cable de fibra óptica) y medios no guiados (acceso inalámbrico), tal como se muestra en la Figura 1.1 con sus características propias que determinan su aplicación en las redes de telecomunicaciones modernas.

Figura 1. 1: Topología de redes ópticas (medios guiados) de acceso inalámbrico, por satélite, terrestres y domésticas integradas (medios no guiados).



Fuente: (Majumdar, 2015)

### 1.2.1. Medios de transmisión guiados

Entre los medios guiados se incluyen conductores físicos que se encargan de la transmisión de las señales de datos, por lo general mediante cables de cobre o fibra óptica.

1. Cables de cobre: entre los cables de cobre se encuentran los pares trenzados y los cables coaxiales, que se utilizan con frecuencia en redes de área local (LAN) y sistemas telefónicos tradicionales. Aunque son económicos y relativamente



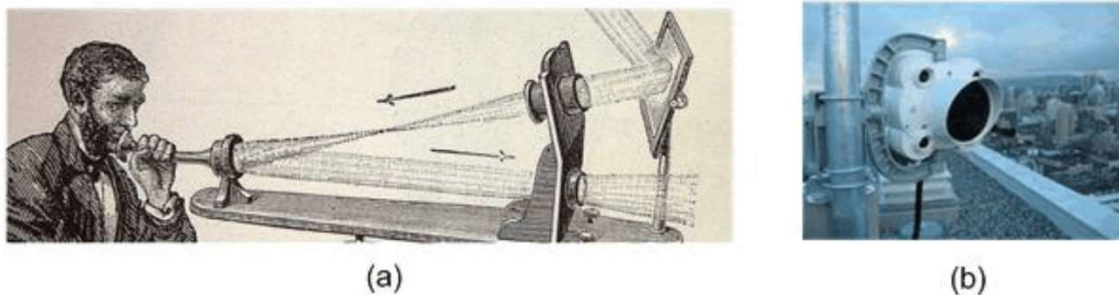
fáciles de instalar, estos cables son susceptibles a perturbaciones electromagnéticas y la señal se atenúa a largas distancias, por lo que su uso en redes modernas de alta capacidad es limitado (Zhang et al., 2023)

2. Fibra óptica: en el caso de las redes de comunicaciones de alta velocidad y larga distancia, las fibras ópticas son esenciales. En este medio los datos son transmitidos mediante impulsos luminosos, por lo que se consigue un gran ancho de banda con pérdidas mínimas de señal y resistencia a las interferencias electromagnéticas. (Sendin et al., 2021)

### 1.2.2. Medios de transmisión no guiados

La transmisión de datos a través del aire u otros medios no conductores sin requerir canales físicos se realiza por medios no guiados, o comunicación inalámbrica. En la Figura 1.2 se observan dos ejemplos de medios no guiados, el primero (ver Figura 1.2 a) es el principio de transmisión de ondas acústicas sobre un haz de luz. Es decir, en el que se utilizaban haces de luz para la transmisión de señales acústicas; esto no se llevó más lejos, pero sentó las bases de la transmisión inalámbrica mediante luz. (Raj et al., 2023)

Figura 1. 2: Medios de transmisión no guiados (a) ondas acústicas sobre un haz de luz; y (b) transceptor de telefonía móvil para comunicaciones ópticas no guiadas (UOC).



Fuente: (Raj et al., 2023)

Los sistemas UOC comerciales actuales son más compactos y con unos costes de instalación mucho más reducidos (véase la Figura 1.2 b). La integración de la conectividad masiva, con el objetivo de proporcionar servicios de voz y vídeo, mensajería de texto, conexiones a Internet, entretenimiento, acceso a servicios de terceros, aplicaciones en línea, etc., utilizando un único dispositivo es posible si y sólo si se utiliza un haz de luz como señal portadora. (Arockia Bazil Raj & Arputha Vijaya Selvi, 2015; Lionis et al., 2023)

1. Ondas de radio: Son muy utilizadas en redes móviles y sistemas Wi-Fi. Son ideales para entornos urbanos por su capacidad para atravesar obstáculos, pero están expuestas a interferencias (Cempaka, 2020).
2. Microondas: Este tipo de ondas funcionan en las bandas de frecuencia más altas y necesitan una línea de visión clara entre el transmisor y el receptor. Se trata de una tecnología muy utilizada en redes de backhaul para torres de comunicaciones móviles. (H. Seo & Kim, 2020)
3. Ondas milimétricas: Este tipo de tecnología desempeña un papel fundamental en las redes 5G, pues ofrece un gran ancho de banda y baja latencia, factores esenciales para aplicaciones como la navegación autónoma y el Internet de las Cosas (IoT). (Jung et al., 2020)

### **1.3. La fibra óptica**

La fibra óptica es un medio por el que se transmiten señales de comunicación de un lugar a otro en forma de luz a través de finas fibras de vidrio o plástico. Estas señales son impulsos digitales o flujos de luz analógicos modulados continuamente que representan información. Es el mismo tipo de información que puede enviarse por cables metálicos, como los de par trenzado, coaxiales (cables coaxiales) y a través del aire en frecuencias de microondas.

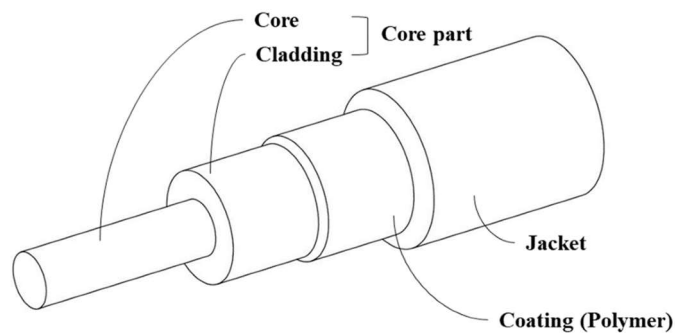
Una fibra óptica es una fibra delgada, flexible y transparente que actúa como guía de ondas o «tubo de luz» para transmitir luz entre los dos extremos de la fibra. Las fibras ópticas se utilizan mucho en las comunicaciones por fibra óptica, que permiten la transmisión a distancias más largas y a anchos de banda (velocidades de transmisión de datos) mayores que otras formas de comunicación. Las fibras se utilizan en lugar de cables metálicos porque las señales viajan por ellas con menos pérdidas y además son inmunes a las interferencias electromagnéticas.

Las fibras ópticas utilizadas en comunicaciones tienen una estructura muy simple que se muestran en la Figura 1.4. Se compone del núcleo de vidrio o plástico, la capa de revestimiento y el recubrimiento, fibras de refuerzo, chaqueta.

1. Núcleo: el núcleo de una fibra óptica convencional es un cilindro de vidrio o plástico que recorre toda la longitud de la fibra. El núcleo está rodeado por un medio con un índice de refracción más bajo, normalmente un revestimiento de otro vidrio o plástico. Los tres tamaños de núcleo más comunes son:

- 9  $\mu\text{m}$  de diámetro (monomodo)
  - 50  $\mu\text{m}$  de diámetro (multimodo)
  - 62,5  $\mu\text{m}$  de diámetro (multimodo)
2. Recubrimiento: las fibras se recubren con un vidrio de índice de refracción ligeramente inferior. Esto se conoce como recubrimiento, el mismo aumenta el ángulo crítico dentro de la fibra central y también evita que las fibras adyacentes se toquen entre sí. En cada punto de contacto, la luz se escaparía hacia otra fibra.
  3. Revestimiento: es la primera capa no óptica alrededor del cladding (recubrimiento). Además, consiste en una o varias capas de polímero que protegen la estructura de sílice contra daños físicos o ambientales. Cuando la fibra óptica se conecta o es empalmada mediante fusión, el revestimiento se elimina.
  4. Fibras de refuerzo: estos componentes ayudan a proteger el núcleo contra las fuerzas de aplastamiento y la tensión excesiva durante la instalación.
  5. Chaqueta: la cubierta es una característica importante de la fibra. Es de 900 micras y ayuda a proteger la fibra de la rotura durante la instalación y la terminación y se encuentra fuera del revestimiento.

Figura 1. 3: Estructura de la fibra óptica.



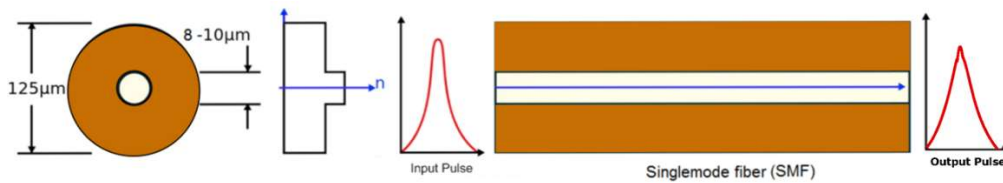
Fuente: (S.-Y. Seo et al., 2021)

### 1.3.1. Fibra monomodo (SMF)

En la fibra monomodo, sólo se transmite una luz cuyo diámetro oscila entre 8 y 10  $\mu\text{m}$ , tal como se observa en la Figura 1.5. Dado que sólo hay una luz, no existe el problema asociado a la fibra multimodo, por lo que se consigue una mayor velocidad de transmisión y muy utilizada en enlaces ópticos de larga distancia (Wu et al., 2023). De esta forma se minimiza la dispersión modal, haciéndolas ideales para transmisiones de larga distancia y gran ancho de banda, por ejemplo, para redes troncales de conmutación y cables

submarinos. El funcionamiento de las SMF se basa en longitudes de onda de 1310 nm y 1550 nm, donde la atenuación y la pérdida de señales se reducen al mínimo.

Figura 1. 4: Esquema de la propagación de la luz en una fibra monomodo (SMF).

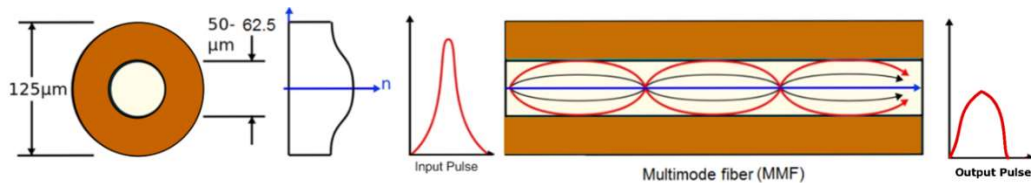


Fuente: (Miah & Potter, 2017)

### 1.3.2. Fibra multimodo (MMF)

La fibra multimodo (Multi-Mode Fiber, MMF) fue el primer tipo de fibra que se comercializó. Las fibras multimodo (MMFs) tienen mayor diámetro del núcleo, generalmente entre 50 y 62.5  $\mu\text{m}$ , lo que permite la propagación simultánea de múltiples modos de luz a través de la fibra (Matsuura, 2021). Además, este diámetro mayor de la MMF facilita el uso de transmisores ópticos de menor coste, como transmisores LED o láseres de superficie de cavidad vertical (VCSEL) y conectores. Existen dos tipos de fibra multimodo: la MMF de índice escalonado (Index-Step MMF, IS-MMF) y MMF de índice gradual (Graded-Index MMF, GI-MMF). En la Figura 1.6 se muestra la forma en que se transmite la señal de luz dentro de la fibra óptica.

Figura 1. 5: Esquema de la propagación de la luz en una fibra multimodo (MMF).



Fuente: (Miah & Potter, 2017)

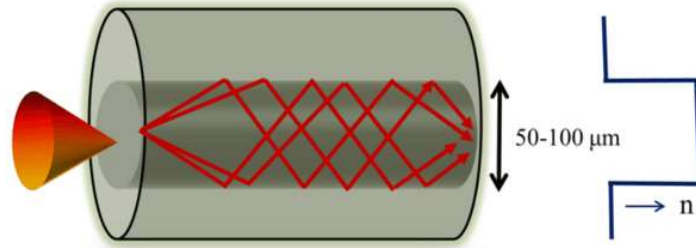
A continuación, se describen las MMFs de índice escalonado y gradual.

1. Fibra multimodo de índice escalonado (IS-MMF): este tipo de fibras muestran un límite marcado entre el núcleo y revestimiento, con un índice de refracción uniforme en el núcleo y una caída súbita en el revestimiento (Gangwar et al., 2023). La Figura 1.7 muestra el modo de propagación “escalonado” en una IS-MMF siendo siempre  $n_1 > n_2$  ( $n_1$  es el índice de refracción en el núcleo de la fibra óptica y  $n_2$  es el índice de refracción del revestimiento) y el cono de aceptación. Además, se observa que en una IS-MMF, el núcleo es

significativamente mayor que al de una SMF. Por lo tanto, las IS-MMF están concebidas para enlaces de corta distancia y emplean longitudes de onda entre 850 y 1300  $nm$ . Aquí, se utiliza mucho la ley de Snell o ley de la refracción, que se define como:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

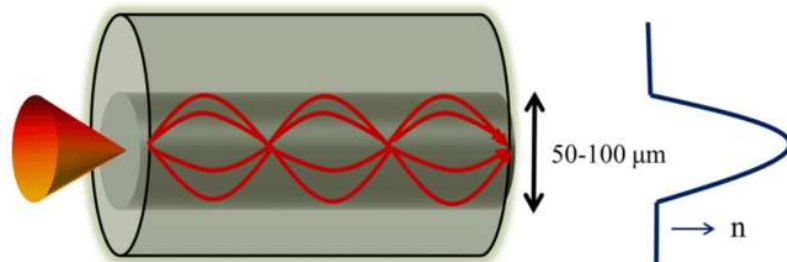
Figura 1. 6: Esquema de la propagación de la luz en una SI-MMF.



Fuente: (Mondal, 2020)

2. Fibra multimodo de índice gradual (GI-MMF): son utilizadas habitualmente en aplicaciones de redes LAN de corto alcance. En estas fibras, el índice de refracción del núcleo decrece progresivamente a partir del centro hacia el exterior (Simović et al., 2021). Además, curvan los rayos hacia dentro (ver Figura 1.8) y además les permiten viajar más rápido en la zona de menor índice de refracción, es un tipo de fibra en la que el índice de refracción del núcleo es menor hacia el exterior de la fibra. Este tipo de fibra presenta una amplia capacidad de ancho de banda. Por ello, las GI-MMF disponen de anchos de banda significativamente superiores a los de las SI-MMF, pero aún muy por debajo de las SMF. Los diámetros de núcleo más comunes en las fibras de índice gradual son de 50, 62.5 y 100  $\mu m$ .

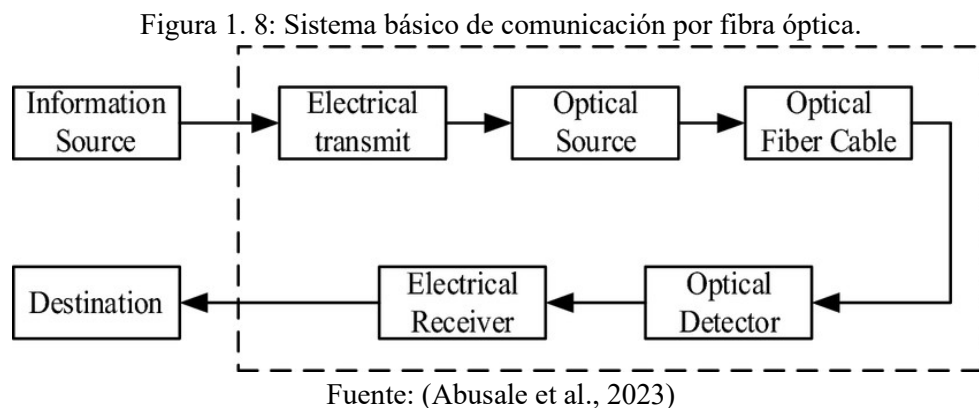
Figura 1. 7: Esquema de la propagación de la luz en una GI-MMF.



Fuente: (Mondal, 2020)

#### 1.4. ¿Cómo funciona la comunicación por fibra óptica?

A diferencia de la transmisión basada en cables de cobre, en la que la transmisión depende totalmente de las señales eléctricas que pasan por el cable, la transmisión por fibra óptica implica la transmisión de señales en forma de luz de un punto a otro (Klaus et al., 2022). Además, una red de comunicación por fibra óptica consta de circuitos de transmisión y recepción, una fuente de luz y dispositivos detectores como los que se muestran en la figura 1.3.



Cuando los datos de entrada, en forma de señales eléctricas, llegan al circuito transmisor, éste los convierte en una señal luminosa con ayuda de una fuente de luz. Esta fuente es de LED (diodos emisores de luz) cuya amplitud, frecuencia y fases deben permanecer estables y sin fluctuaciones para que la transmisión sea eficaz. El haz de luz procedente de la fuente es transportado por un cable de fibra óptica hasta el circuito de destino, donde la información se transmite de vuelta a la señal eléctrica mediante un circuito receptor. El circuito receptor consta de un fotodetector junto con un circuito electrónico apropiado, que es capaz de medir la magnitud, la frecuencia y la fase del campo óptico. Este tipo de comunicación utiliza las longitudes de onda cercanas a la banda infrarroja que está justo por encima de la gama visible. Tanto el LED como el láser pueden utilizarse como fuentes de luz en función de la aplicación.

Habiendo abordado previamente la naturaleza, el papel y la definición de la fibra óptica, vamos a tratar a continuación sus dos características principales:

### 1.4.1. Atenuación

Una de las características más fundamentales de la fibra óptica es la atenuación, que se define por la caída de intensidad de la señal a medida que la luz atraviesa la fibra.(Pires, 2024)

La atenuación se deriva de diversos factores, tales como la dispersión, la absorción y las pérdidas por curvatura. También se la suele conocer como «pérdida de señal» o «pérdida de fibra». Asimismo, decide el número de repetidores requeridos entre emisor y receptor. La atenuación será directamente proporcional a la longitud del cable. La atenuación se describe como la razón entre la potencia óptica de salida y la potencia de entrada en la fibra de longitud L.

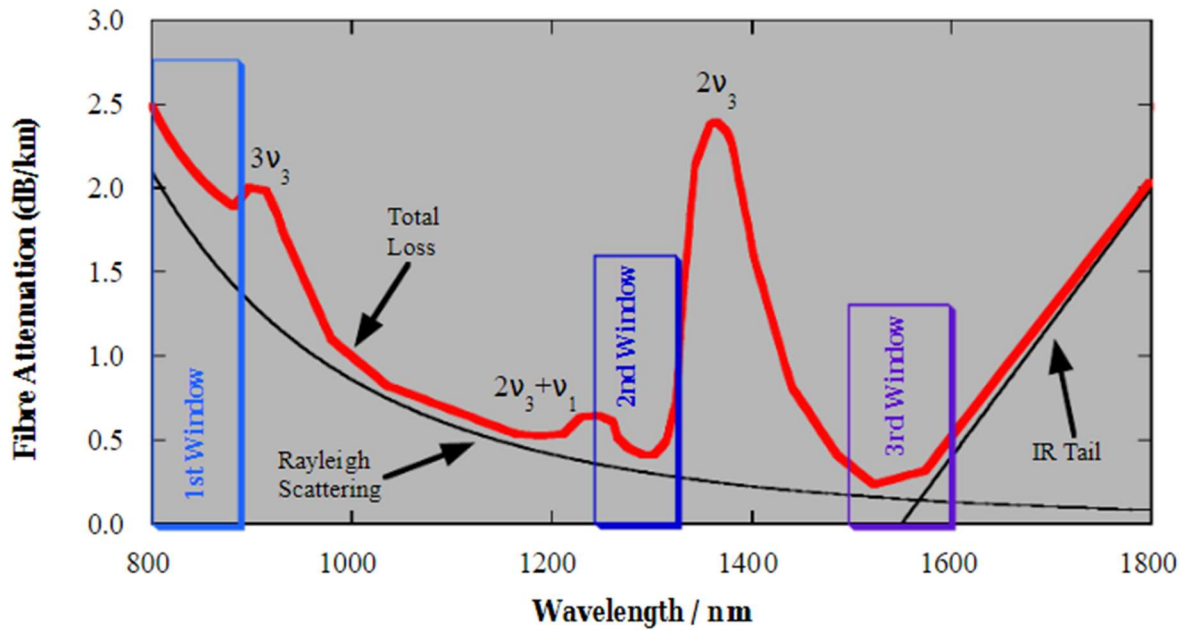
$$\alpha = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o} [dB/km]$$

donde,  $P_i$  es la potencia de entrada,  $P_o$  es la potencia de salida, y  $\alpha$  es una constante de atenuación

La Figura 1.9 muestra la gráfica Atenuación Vs. Longitud de Onda en la que se observan las pérdidas en el cable de fibra óptica, tales como:

- Absorción, obsérvese “IR Tail” en la Figura 1.2 el tramo de la pérdida por absorción de infrarrojos.
- Pérdidas por flexión, dependen de la curvatura de la fibra óptica y no de la longitud de onda de la señal.
- Dispersión de Rayleigh (véase la Figura 1.12), se debe a las fluctuaciones microscópicas del material de la fibra óptica por las imperfecciones durante el proceso de fabricación.

Figura 1. 9: Atenuación típica en función de la longitud de onda.



Fuente: (Ding et al., 2019; Harrison et al., 2000)

#### 1.4.2. La dispersión

La dispersión se refiere a la propagación de los pulsos de luz a medida que viajan por la fibra, lo que puede producir una degradación de la señal y una disminución en la calidad de la transmisión (Amiri et al., 2018). A medida que un pulso de luz se propaga por una fibra, factores como la apertura numérica, el diámetro del núcleo, el perfil del índice de refracción, la longitud de onda y el ancho de línea del láser provocan que el pulso se ensanche. La dispersión se incrementa a lo largo de la longitud de la fibra.

El efecto general de la dispersión en el rendimiento de un sistema de fibra óptica se designa como «interferencia entre símbolos» (Inter Symbol Interference, ISI). La interferencia entre símbolos se produce cuando la dispersión de pulsos ocasionada por la dispersión da lugar a que los pulsos de salida de un sistema se solapen. Existen muchos tipos de dispersión, cada uno de los cuales funciona de una manera diferente, pero a continuación se analizan los tres más importantes:

- a) **Dispersión cromática (Chromatic Dispersion, CD):** también denominada dispersión material, se origina por el hecho de que la luz constituye de diferentes longitudes de onda, y cada longitud de onda se propaga a una velocidad diferente a través de la fibra (X. Chen et al., 2023). La CD es la propagación de impulsos debido a que las diferentes longitudes de onda de la luz se propagan a velocidades ligeramente diferentes a través de la fibra porque el índice de refracción de la fibra



de vidrio es una variable que depende de la longitud de onda; las diferentes longitudes de onda se propagan a velocidades diferentes.

- b) Dispersión en la guía de ondas:** la dispersión en la guía de ondas se debe a la estructura y geometría de la propia fibra óptica, sobre todo en las fibras monomodo (Wang et al., 2022). La dispersión en la guía de ondas se debe a la estructura y geometría de la propia fibra óptica, sobre todo en las fibras monomodo. La dispersión en la guía de ondas es muy compleja y se debe a la forma y el perfil de índice del núcleo de la fibra. Sin embargo, puede controlarse mediante un diseño cuidadoso y la dispersión de la guía de ondas puede emplearse para contrarrestar la dispersión material.
- c) Dispersión intermodal (Modal Dispersion, MD):** la dispersión intermodal, o modal, es propia de las fibras multimodo, por las que pueden propagarse múltiples modos o haces de luz (Ayesta et al., 2017). La dispersión modal es un mecanismo de distorsión que se da en las fibras multimodo y otras guías de ondas, en las que la señal se propaga en el tiempo porque la velocidad de propagación de la señal óptica no es la misma para todos los modos.

## **1.5. Componentes del enlace de fibra óptica**

Normalmente, una red de comunicación por fibra óptica tiene tres componentes principales a saber: transmisor óptico, fibra y receptor óptico. En el caso del transmisor, se convierten las señales eléctricas en señales ópticas a través de emisores de luz, como LED o láser. Después, dicha señal luminosa se transmite a través de la fibra, que funciona como medio de transmisión de los haces de luz entre el transmisor y el receptor. Para comprender cómo funcionan las aplicaciones de fibra óptica, es importante entender los componentes de un enlace de fibra óptica.

### **1.5.1. Transmisor óptico**

Hoy en día se utilizan dos tipos principales de transmisores de fibra óptica. Ambos se basan en la tecnología de semiconductores:

1. Diodos emisores de luz (LED): los LED emiten luz a través de, y la luz se crea por un método conocido como emisión espontánea típica emiten luz incoherente con un espectro relativamente amplio en sistemas de comunicación por fibra

óptica. Esto se debe a su pequeño tamaño, larga vida útil y bajo coste. Por lo general, ser la salida de luz en el rango de 30 - 60 nm en LED esto conduce a la mala focalización del haz y la radiación incoherente que puede limitar las distancias a las que los datos pueden ser transmitidos.

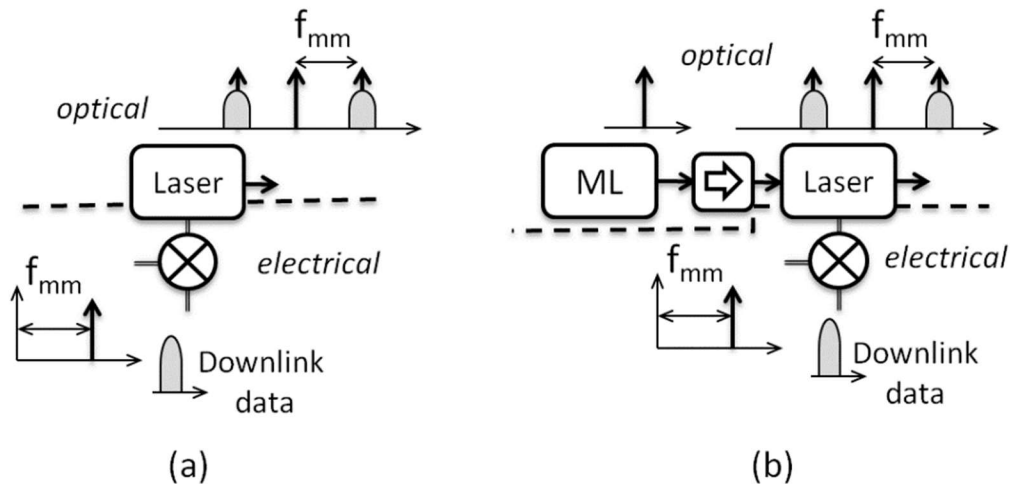
2. Diodos láser: los láseres emiten luz mediante la amplificación de la radiación por emisión estimulada (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER). A menudo, los láseres tienen una potencia de salida mayor que los LED: la salida de luz de un diodo láser puede rondar los 100 mW, por lo que son capaces de transmitir información a grandes distancias. Además, los láseres tienen una anchura espectral mucho menor y transportan el mayor ancho de banda, por lo que son una fuente de luz excelente para enlaces de fibra óptica de largo recorrido.

### 1.5.2. Modulación óptica directa y externa

Los láseres y LED utilizados en aplicaciones de telecomunicaciones se modulan utilizando uno de estos dos métodos: modulación directa o modulación externa.

1. Modulación directa: la Figura 1.10 muestra un diodo láser utilizado como modulación directa. En este tipo de modulación, la potencia de salida del dispositivo depende directamente de la corriente de accionamiento de entrada. Esto significa que el dispositivo emite luz cuando se transmite «1 (uno binario)» y no emite luz cuando se transmite «0 (cero binario)» (E. Abejide et al., 2022). En la Figura 1.10 (a), se modula directamente un láser con la señal downstream a la frecuencia de onda milimétrica ( $f_{mm}$ ) deseada. La Figura 1.10 (b) se muestra el bloqueo por inyección óptica (OIL), en el que un láser está sometido a una luz externa de potencia relativamente alta procedente de un láser maestro (ML) (Beas et al., 2013).
  - ✓ Ventajas: Esta modulación óptica es sencilla. Es más barata, ya que no interviene ningún circuito complejo durante el proceso de modulación.
  - ✓ Desventajas: Este método es más lento comparado con el tipo de modulación indirecta o externa. Puede utilizarse por debajo de 3 GHz.

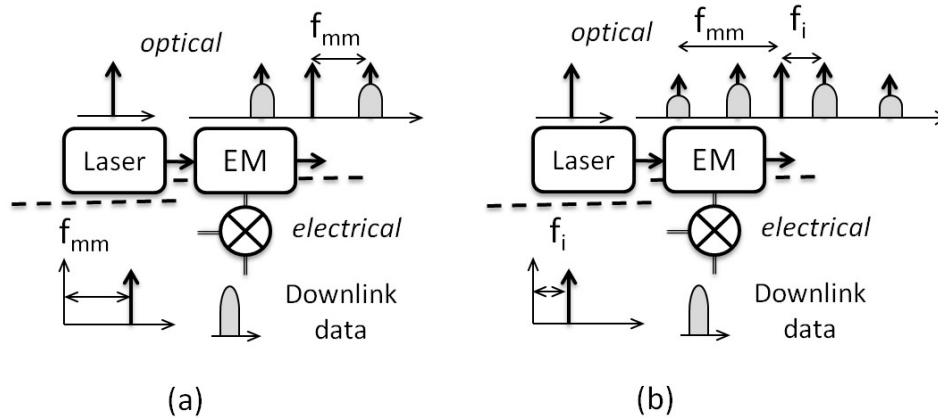
Figura 1. 10: Esquemático de la modulación óptica directa (a) usando un láser, y (b) usando láser de inyección óptica reforzada.



Fuente: (Beas et al., 2013)

2. Modulación externa en la modulación externa (ver Figura 1.11), se utiliza un dispositivo externo para modular la intensidad o la fase de la fuente luminosa. La fuente de luz permanece encendida mientras el modulador externo actúa como un «obturador» controlado por la información que se transmite. La modulación externa suele utilizarse en aplicaciones de alta velocidad, como redes ópticas de larga distancia o cabeceras de televisión por cable. Las ventajas de la modulación externa son que es mucho más rápida y puede utilizarse con fuentes láser de mayor potencia. La desventaja es que es más cara y requiere circuitos complejos para manejar la señal de modulación de RF de alta frecuencia. (E. Abejide et al., 2022) La razón para convertir a frecuencias ópticas sin multiplicación de frecuencia óptica (OFM) es simplemente permitir la transmisión a través del enlace de fibra como se muestra en la Figura 1.11 (a), lo que significa que la frecuencia de onda milimétrica deseada se genera electrónicamente en el CS para convertir la señal de enlace descendente. Por el contrario, si OFM se realiza en la conversión electro-óptica, la señal de enlace descendente tiene que ser convertida electrónicamente no a la frecuencia de onda mm deseada, sino a un subarmónico de la misma ( $f_i$ ), a continuación, se seleccionan dos bandas laterales separadas en el fmm deseado, esta técnica reduce la complejidad de la electrónica en el CS. (Beas et al., 2013)

Figura 1. 11: Esquemático de la modulación óptica externa (a) sin OFM y (b) con OFM.



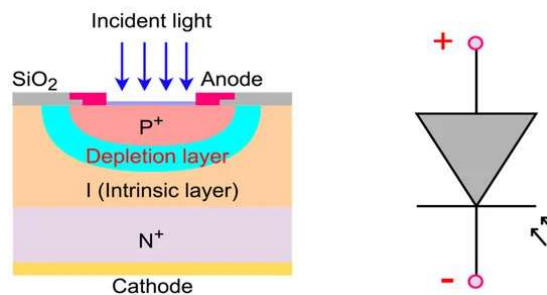
Fuente: (Beas et al., 2013)

### 1.5.3. Receptor óptico

El último componente del enlace de fibra óptica es el receptor óptico, que utiliza un fotodiodo para convertir las señales ópticas en eléctricas. Los dos tipos de fotodiodos utilizados son: Tipo P Intrínseco Tipo N (P-type Intrinsic N-type, PIN) y el Fotodiodo de Avalancha (Avalanche PhotoDiode, APD).

1. Positivo Intrínseco Negativo (PIN): para permitir el funcionamiento a longitudes de onda más largas, en las que la luz penetra más profundamente en el material semiconductor, es necesaria una región de agotamiento más amplia. Para conseguirlo, el material de tipo n se dopa tan ligeramente que puede considerarse intrínseco, y para hacer un contacto de baja resistencia se añade una capa de tipo p (p+) altamente dopada. Esto crea una estructura PIN, como puede verse en la figura 1.12, donde toda la absorción tiene lugar en la región de agotamiento. (Islam et al., 2019)

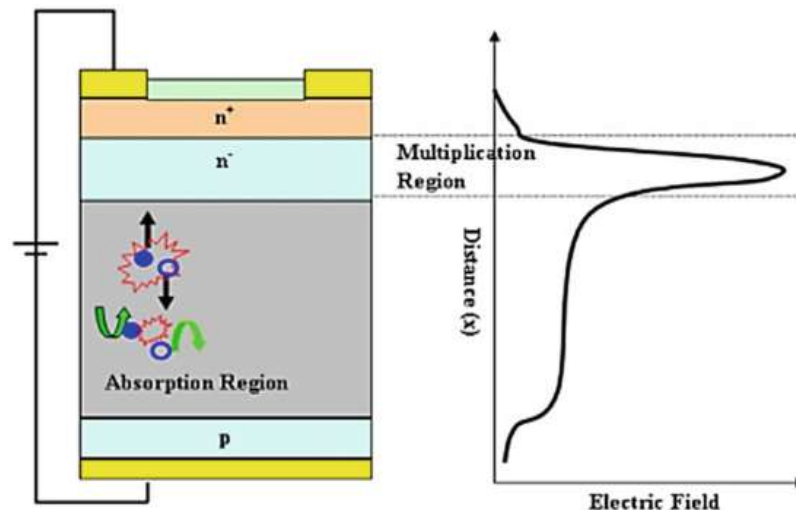
Figura 1. 12: Estructura de un fotodiodo PIN y su símbolo eléctrico.



Fuente: (Q. Chen et al., 2024)

2. Fotodiodo de avalancha (APD): El segundo gran tipo de detector de comunicaciones ópticas es el fotodiodo de avalancha (APD). Éste tiene una estructura más sofisticada que el fotodiodo PIN, con el fin de crear una región de campo eléctrico extremadamente alta, como puede verse en la Figura 1.13. Por lo tanto, además de la región de agotamiento en la que se absorben la mayoría de los fotones y se generan los pares de portadores primarios, existe una región de campo elevado en la que los huecos y los electrones pueden adquirir la energía suficiente para excitar nuevos pares electrón-hueco. Este proceso se conoce como ionización por impacto y es el fenómeno que provoca la ruptura por avalancha en los diodos de polarización inversa ordinarios. Suele requerir tensiones de polarización inversa elevadas (de 50 a 400 V).

Figura 1. 13: Estructura de un fotodiodo de avalancha (APD) y distribución del campo eléctrico.



Fuente: (Chee, 2023)

#### 1.5.4. El amplificador óptico

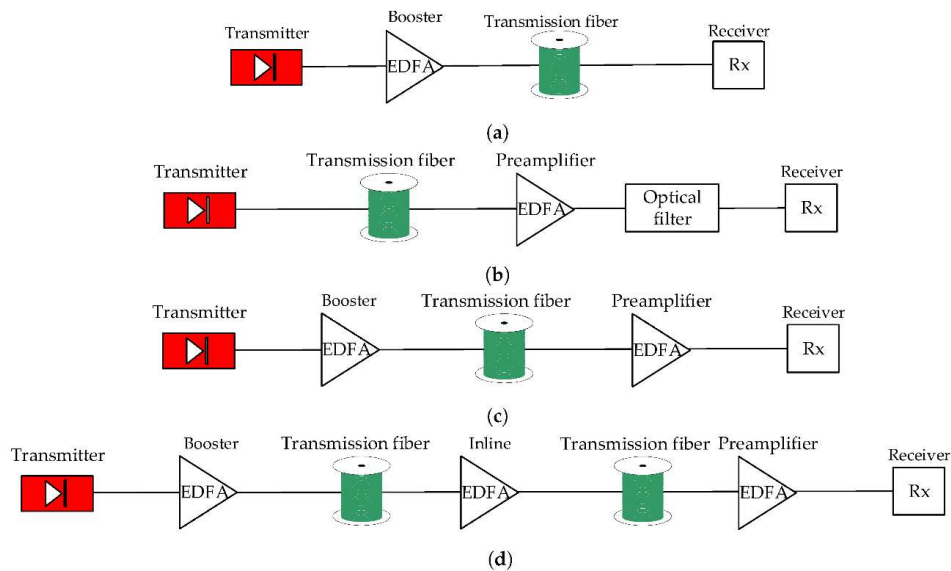
Un amplificador óptico es un dispositivo que amplifica una señal óptica directamente, sin convertirla antes en eléctrica. Los amplificadores ópticos son importantes en la comunicación óptica. Existen varios mecanismos físicos diferentes que pueden utilizarse para amplificar una señal luminosa, lo que corresponde a los principales tipos de amplificadores ópticos.

Un ejemplo de este tipo es el amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA), uno de los amplificadores ópticos más utilizados. Los EDFA contienen una longitud de fibra que funciona como región activa fuertemente dopada con iones de erbio y se bombea

ópticamente a 980 nm, 1480 nm o ambos utilizando un láser semiconductor en el rango de salida de 10 a 100 mW.

La Figura 1.14 muestra distintas configuraciones de EDFAs utilizados en aplicaciones prácticas de transmisiones por fibra óptica.

Figura 1. 14: Esquemático de las diferentes configuraciones de EDFAs.



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

La Figura 1.14 (a) muestra la configuración con sólo un amplificador que se utilizan para distancias cortas de 150 km. La Figura 1.14 (b) muestra la configuración con sólo un preamplificador que se emplea cuando queremos evitar potencias ópticas elevadas producidas por los boosters; en esta configuración, a menudo es necesario utilizar un filtro óptico para suprimir el ruido. La Figura 1.14 (c) muestra la configuración con booster y preamplificador para enlaces de fibra de gran alcance, por ejemplo, 250 km. Finalmente, la Figura 1.14 (d) muestra la configuración de amplificadores ópticos conectados en cascada para enlaces mayores a la configuración anterior.

## 1.6. Descripción general de la Red Óptica Pasiva (PON)

Una PON es un conjunto de tecnologías estandarizadas por la UIT-T e IEEE, aunque en su origen y creación fue concebida por el grupo de trabajo Full Service Access Network (FSAN). PON es una infraestructura convergente que soporta varios servicios, como telefonía tradicional (POTS), voz sobre IP (VoIP), datos, vídeo y/o telemetría, en la

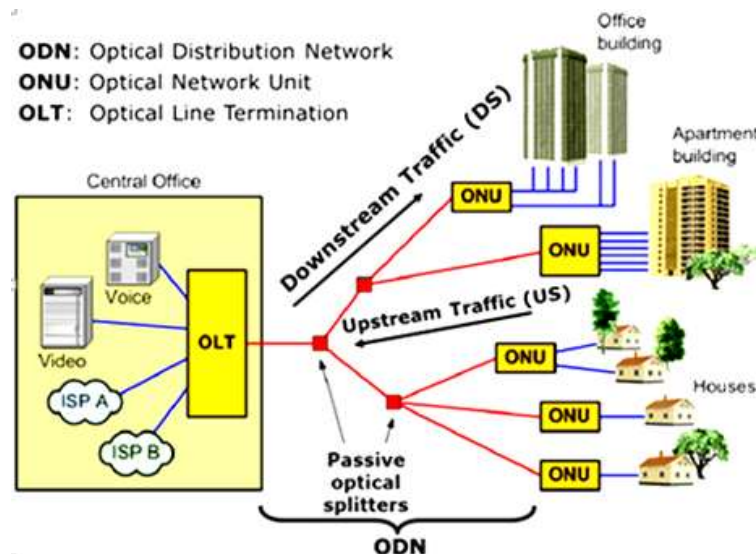
medida en que todos estos servicios se convierten y encapsulan en un solo tipo de paquete para su transmisión a lo largo de la fibra en una PON.

PON es una tecnología de las telecomunicaciones que emplea una arquitectura “punto a multipunto”, mediante el empleo de divisores ópticos (splitters) que hacen viable que una sola fibra óptica sirva a varias terminales, tales como las de los clientes, sin tener que suministrar fibras individuales entre el concentrador y el cliente (Dias et al., 2022).

Además, las PONs no cuenta con componentes activos entre la oficina central y el cliente. Los equipos pasivos no precisan de energía eléctrica, ya que guían las señales de tráfico encapsuladas en longitudes de onda ópticas específicas. Los flujos de tráfico de voz, vídeo y de datos (triple play) son fáciles de implementar mediante el uso de diferentes longitudes de onda (Gu et al., 2020).

Consta de tres partes principales, la terminal de línea óptica (Optical Line Terminal, OLT) ubicada en la central u oficina central (Office Central, OC), donde conecta la red de acceso óptico a la red troncal y la red de distribución óptica (Optical Distribution Network, ODN) entre la OLT y la ONU tal como se observa en la Figura 1.15. Por su parte, las unidades de red óptica (Optical Network Unit, ONU) están situadas cerca de los usuarios finales y suministran a estos interfaces de servicio al cliente, con lo cual convierten las señales ópticas en eléctricas.

Figura 1. 15: Arquitectura de red óptica pasiva

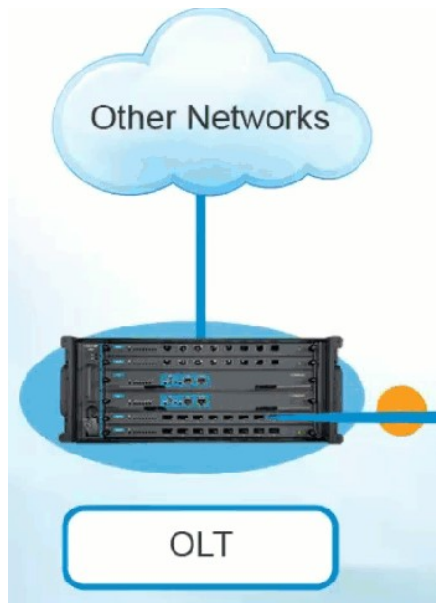


Fuente: (Ghoniemy, 2018)

### 1.6.1. Terminal de línea óptica (OLT)

La OLT se ubica en la central telefónica u oficina central (CO) y controla el flujo bidireccional de los datos por toda la ODN. En la Figura 1.16 se muestra una OLT de 32 puertos PON.

Figura 1. 16: Terminal de línea óptica (OLT) con 32 puertos PON.



Fuente: (Diary, 2023)

Una OLT soporta y cubre distancias de transmisión a lo largo de la ODN de hasta 20 km, aunque si es mayor a esto se requiere el uso de EDFAs. En la dirección descendente, la OLT capta el tráfico de voz, datos y vídeo de una red de larga distancia y se transmite a todos los módulos ONT de la ODN. En las direcciones opuestas (ascendente), la OLT acepta y reparte la totalidad del tráfico procedente de los usuarios de la red.

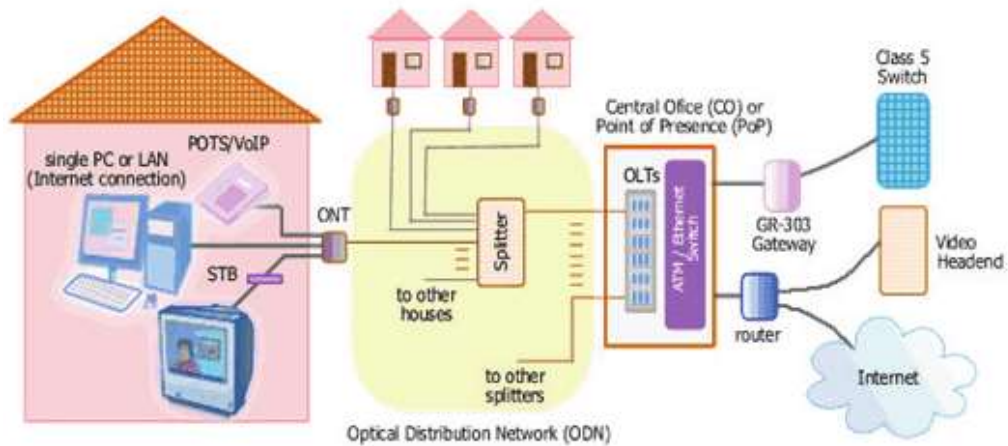
La transmisión simultánea de diferentes tipos de servicio en de la misma fibra en la ODN se consigue empleando diferentes longitudes de onda para cada dirección o sentido. En el caso de las transmisiones descendentes, una PON utilizará una longitud de onda de 1490 nm para el tráfico combinado de voz y datos y otra de 1550 nm para la distribución de vídeo. En cuanto a la dirección ascendente de voz y datos se utiliza una longitud de onda de 1310 nm a través de las tecnologías TDM, WDM o ambas (TWDM).



### 1.6.2. Red de distribución óptica (ODN)

La ODN forma parte integral del sistema PON y proporciona el medio de transmisión óptica que facilita la conexión física de las ONT/ONU con las OLT. Alcanza distancias de hasta 20 km. La ODN consta específicamente de cinco segmentos: fibra de alimentación, punto de distribución óptica, fibra de distribución, punto de acceso óptico y fibra de bajada.

Figura 1. 17: Red de distribución óptica (ODN)

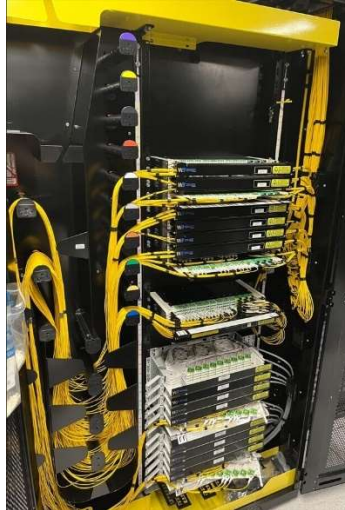


Fuente: (Acakpovi & Matoumona, 2012)

La fibra de alimentación sale del repartidor óptico (Optical Distribution Frame, ODF) de la oficina central (CO) o central telefónica (ejemplo CNT EP) y acaba en el punto de distribución óptica para la cobertura de larga distancia. La fibra de distribución desde el punto de distribución hasta el punto de acceso óptico reparte las fibras ópticas entre las zonas adyacentes. La fibra de bajada une el punto de acceso óptico a los terminales (ONT). La ODN es la ruta más esencial para la transmisión de datos PON y su calidad afecta directamente al rendimiento, fiabilidad y escalabilidad del sistema PON.

1. **Repartidor óptico (ODF):** es un componente pasivo, y un elemento muy importante para la organización de las conexiones de cable de fibra óptica, tal como se muestra en la Figura 1.18. El ODF habitualmente se utiliza en interiores y dependiendo de los requisitos de diseño de la red, puede tener un marco muy grande o más pequeño, similar a las cajas de los paneles de conexión.

Figura 1. 18: Repartidor óptico (ODF)

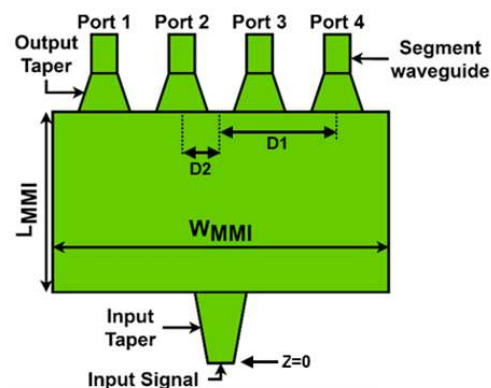


Fuente: (Acakpovi & Matoumona, 2012)

2. **Splitter óptico:** es el principal componente de las PON, ya que es el divisor de potencia pasivo responsable de dar nombre a las redes ópticas pasivas. Se conoce como splitter, pero se trata de un dispositivo bidireccional cuyo cometido es dividir la señal óptica downstream procedente de la OLT entre todas las salidas del splitter conectadas a las ONTs, así como combinar las señales de entrada upstream procedentes de las ONTs en una fibra conectada a la OLT. Las pérdidas provocadas por la división de potencia afectan al número de salidas  $N$  conectadas a las ONT, definida por:

$$A_s = 10 \log \frac{1}{n}$$

Figura 1. 19: Esquema del divisor óptico.



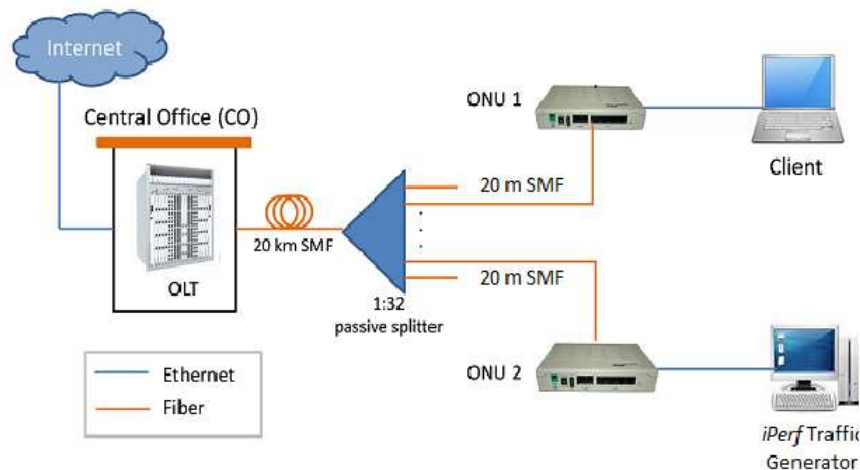
Fuente:(Frishman & Malka, 2023)

La ONT u ONU finaliza la PON y proporciona interfaces de servicio nativas al usuario. Estos servicios comprenden voz (servicio telefónico convencional «POTS» o voz sobre IP «VoIP»), datos (normalmente Ethernet o V.35) y vídeo.

### 1.6.3. Unidad de red óptica (ONU)

La ONU se encarga de transformar las señales ópticas que se transmiten a través de la fibra en señales eléctricas. A su vez, dichas señales eléctricas se remiten a los usuarios finales. En términos generales, entre la ONU y las instalaciones del usuario final existe una distancia u otra red de acceso, tal como se observa en la Figura 1.20. Asimismo, la ONU permite enviar, agrupar y clasificar distintos tipos de datos procedentes del cliente y enviarlos a la OLT. La ONU se puede conectar por diversos métodos y tipos de cable, como por ejemplo par trenzado de cobre, cable coaxial, fibra óptica o Wi-Fi.

Figura 1. 20: Representación de la conexión de la unidad de red óptica (ONU).

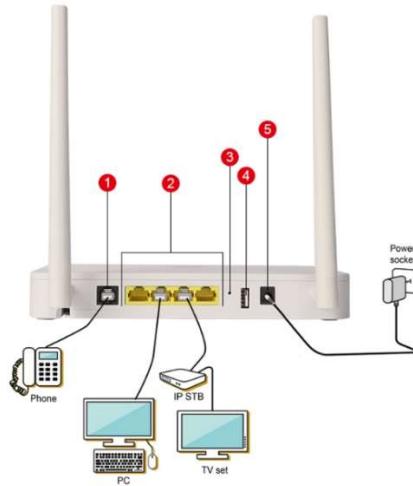


Fuente: (Ramli et al., 2018)

### 1.6.4. Terminal de red óptica (ONT)

En esencia, ONT es lo mismo que ONU. ONT es una terminología ITU-T, en cambio ONU es una terminología IEEE. Ambas se refieren al equipo del lado del usuario en el sistema GEAPON. Sin embargo, en la práctica, existe una ligera diferencia entre ONT y ONU en lo que respecta a su ubicación. La ONT suele estar en las instalaciones del cliente, un ejemplo, es el equipo que se muestra en la Figura 1.21.

Figura 1. 21: Terminal de red óptica (ONT)

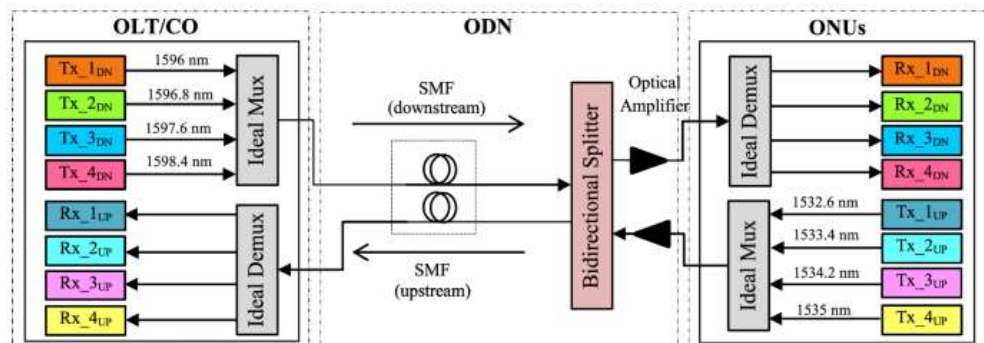


Fuente: (Ramli et al., 2018)

### 1.7. Descripción del funcionamiento de la red óptica pasiva

Una vez desglosados todos los elementos que constituyen una PON, es preciso comprender el funcionamiento de la red con todos sus elementos interconectados, desde la OLT en la cabecera principal hasta los usuarios de la ONT, y viceversa. En el funcionamiento genérico de la red, lo más importante a destacar es la existencia de dos canales, uno ascendente (upstream) y otro descendente (downstream) (ver Figura 1.22).

Figura 1. 22: Evolución del PON.



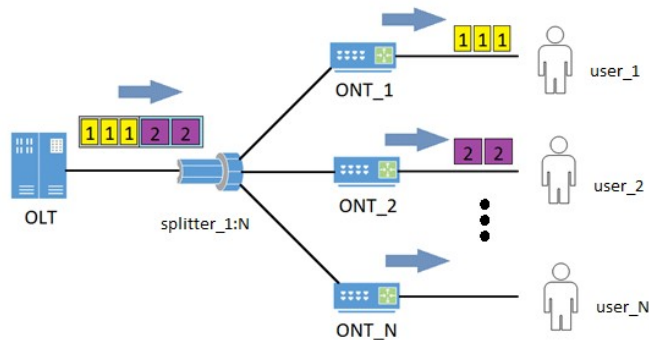
Fuente: (Kumari et al., 2021)

No obstante, generalmente ambas funcionan a través del mismo cable físico, de modo que se atribuyen diferentes longitudes de onda a cada canal de transmisión y en función del tráfico, coexistiendo en la misma fibra por lo menos 3 longitudes de onda diferentes: una destinada al flujo de vídeo en el canal ascendente y dos destinadas al flujo de datos del enlace ascendente y descendente respectivamente. En las secciones 1.9.1. y 1.9.2 se analiza brevemente ambos canales de transmisión.

### 1.7.1. Canal descendente.

El canal descendente es el sentido, o dirección, de la información desde la OLT (operadora, por ejemplo, CNT-EP) hasta la ONU situada en el usuario final (véase la Figura 1.23). En este caso, la PON se comporta como una red multipunto. La OLT cuenta con multitud de tramas añadidas de voz y datos que se dirigen hacia la PON, mediante el terminal de línea óptica de paquetes (Packet Optical Line Terminal, POLT) y de Video (Video Optical Line Terminal, VOLT).

Figura 1. 23: La topología común en PON para el tráfico downstream.



Fuente: (Bosternak & Roka, 2017)

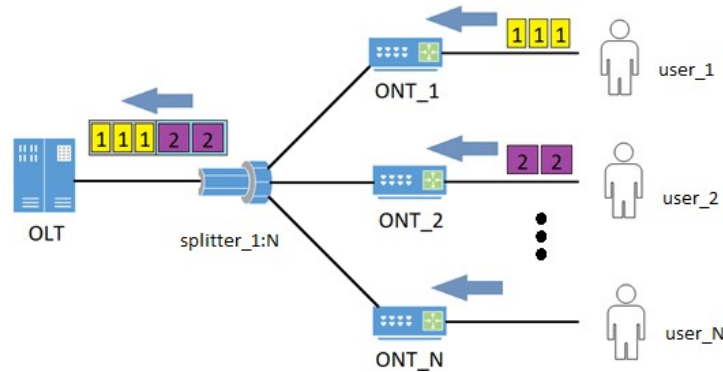
Los frames captados en estos equipos se convierten en señales que se insertan en las distintas ramas de los usuarios. Estos ramales son constituidos por una o dos fibras que portan señales bi o unidireccionales, acoplados de forma pasiva por splitters ópticos que posibilitan la unión de todos los ONT de la red y sin una regeneración intermedia de señales (evitando elementos activos).

### 1.7.2. Canal ascendente

El canal ascendente es la dirección de transmisión de la información procedente del usuario final de la ONU al operador de la OLT, tal como se observa en la Figura 1.24. En esta red, la PON se comporta como un punto a punto. Cada ONU incluye las tramas añadidas de datos y voz (de cada usuario) que se direccionan hacia la OLT. Llegado a este punto, la ONU efectúa la misma operación que la OLT en el canal de descenso, convertir las tramas en señales de inyección a través de la fibra óptica que han sido dedicadas al usuario.

Los splitters de cada una de las etapas se ocupan de recopilar la información de todas las ONTs correspondientes y multiplexarla en una sola fibra de salida en dirección a la OLT del operador. Con el fin de transmitir la información de distintas ONT en el mismo canal, es imprescindible (al igual que en el canal descendente) el uso de TDMA, de forma que cada ONT manda la información en distintos intervalos de tiempo gestionados por la unidad OLT.

Figura 1. 24: La topología común en PON para el tráfico upstream.



Fuente: (Bosternak & Roka, 2017)

## 1.8. Tecnologías PON

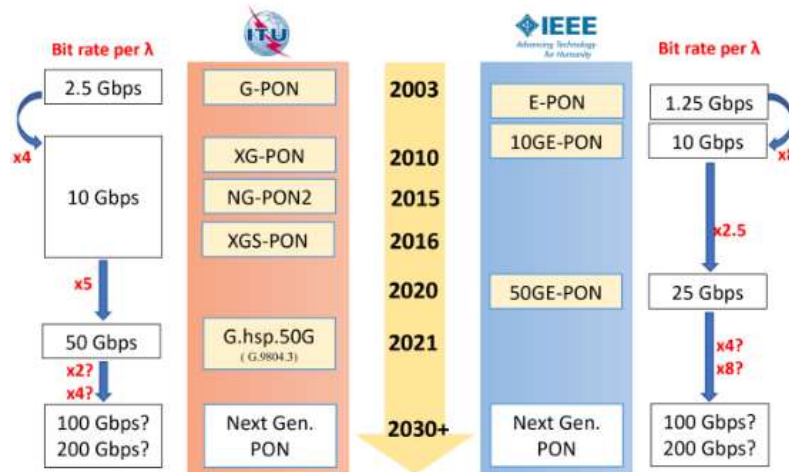
Hay tres tipos principales de PON en función del esquema de multiplexación de datos. Para Horvath, Munster, et al., (2020) en la actualidad, la tecnología PON más utilizada es la multiplexación por división de tiempo (Time Division Multiplexing, TDM) también conocida como TDM-PON, en la cual el tráfico a múltiples ONUs se multiplexa por TDM en la longitud de onda ascendente/descendente. Los principales TDM-PON son: BPON, EPON y GPON. (Miladić-Tešić et al., 2022)

No obstante, la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) basadas en PON (denominadas WDM-PON) y la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) basadas en PON (llamada OFDM-PON) conforman otros dos tipos de tecnologías PON. En el caso de sistemas WDM-PON recurren al uso de múltiples longitudes de onda para dotar de ancho de banda a las ONU, mientras que el sistema OFDM-PON utilizan una serie de subportadoras ortogonales destinadas a transmitir tráfico a las ONU. (Arya et al., 2024)

Con la tecnología WDM u OFDM, estas PON son potencialmente capaces de proporcionar una velocidad de datos superior a 40 Gbps e incluso Tbps. La Figura 1.25 ilustra la evolución de los sistemas PON (Horvath, Munster, et al., 2020). La técnica TDM

es el esquema de multiplexación de todas las PONs que se han estandarizado hasta ahora. Desde su primera propuesta en 1986, se han realizado numerosos trabajos de investigación sobre los retos de las WDM-PON. Sin embargo, aún no se ha plasmado en la estándar principalmente. (Torres-Ferrera et al., 2022)

Figura 1. 25: Evolución de la red óptica pasiva (PON).



Fuente: (Torres-Ferrera et al., 2022)

A causa del elevado coste del sistema, ha despertado un gran interés entre los investigadores en los últimos años OFDM-PON por su gran ancho de banda. Tanto WDM-PON como OFDM-PON son consideradas futuras tecnologías PON.

### 1.8.1. PON basadas en Multiplexación por división en el tiempo (TDM-PON)

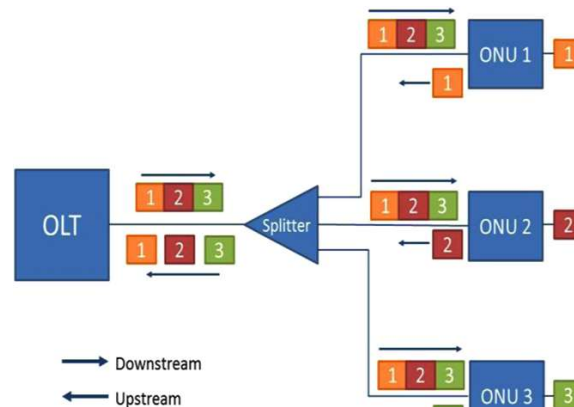
Los sistemas PON actualmente utilizados son sistemas TDM-PON, que incluyen: (1) PON basada modo de transferencia asíncrona (ATM PON, APON), PON de banda ancha (Broadband PON, BPON), PON basada en Ethernet (EPON), PON Gigabit (Gigabit PON, GPON), PON de 10 Gbps (10G EPON) y PON de Próxima Generación (Next-Generation PON, NG-PON) para proveer diferentes velocidades de datos. Las arquitecturas APON/BPON, GPON y NG-PON fueron estandarizadas por la FSAN (Full Service Access Network), asociación de operadores de redes y proveedores de telecomunicaciones. (Abbas & Gregory, 2016)

Puesto que la mayor parte de los operadores de telecomunicaciones han hecho grandes inversiones en la prestación de servicios TDM, estas arquitecturas PON están orientadas y optimizadas para manejar el tráfico TDM y se basan en estructuras de trama con estrictos requisitos de sincronización y temporización. Además, TDM-PON es una



aplicación de la multiplexación por división de tiempo en redes ópticas pasivas (PON). Las dos principales funciones de una red OLT son la gestión del tráfico de usuarios y la asignación de ancho de banda de manera dinámica a los módulos ONT. Puesto que hasta 32 ONT hacen uso de la misma longitud de onda y además comparten una línea de transmisión de fibra óptica común, es preciso emplear algún tipo de sincronización de la transmisión para evitar colisiones entre el tráfico proveniente de diferentes ONT.

Figura 1. 26: Arquitectura PON basada en multiplexación por división en el tiempo (TDM)



Fuente: (Abbas & Gregory, 2016)

El método más simple es emplear el Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA), donde cada usuario transmite información en un intervalo de tiempo asignado específicamente a una velocidad de datos preestablecida (Uzunidis et al., 2022). La señal de bajada multiplexada se transmite a todas las ONT. Dependiendo del direccionamiento de la cabecera del paquete, cada ONT desecha o admite los paquetes de información entrantes. El envío de tráfico en sentido ascendente resulta más complejo, puesto que todos los usuarios tienen que utilizar temporalmente la misma longitud de onda. Con objeto de garantizar que no se produzcan colisiones entre las transmisiones de los distintos usuarios, el sistema recurre a un protocolo TDMA.

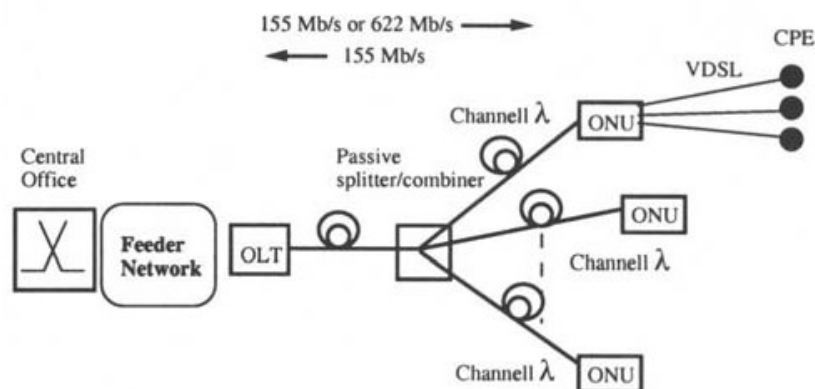
La OLT se encarga de gestionar y coordinar el tráfico de cada ONT enviándoles permisos para transmitir durante una franja horaria específica. Los intervalos de tiempo van sincronizados de forma que las ráfagas de transmisión de diferentes usuarios no colisionen. Puesto que cada terminal se halla a diferentes distancias de la oficina central, la OLT emplea una técnica de rango para medir la distancia lógica existente entre los usuarios y la OLT. De este modo, cada ONT es capaz de ajustar adecuadamente su temporización de transmisión evitando así colisiones de tráfico.



### 1.8.1.1. ATM PON (APON)

La primera generación de la gama PON fue estandarizada por el grupo de redes de acceso de servicio completo (FSAN) del UIT-T a mediados de los años 1990. Su objetivo era estudiar la conexión ATM de extremo a extremo a partir de una configuración de árbol punto a multipunto. En un principio se aprobó el uso del protocolo ATM, pues es el principal protocolo utilizado en las redes telefónicas y también en la transferencia de datos. Según la clasificación IEEE 802.3, la velocidad máxima de datos en APON era de 622 Mbps a 1.244 Gbps. La figura 1.24 ilustra la estructura de una red APON típica conforme a la norma UIT-T G.983, donde la longitud de onda descendente es de 1550 nm y la ascendente de 1310 nm. Las redes APON son capaces de soportar 32 usuarios con una velocidad de datos ascendente única de 155 Mbps y una velocidad de datos descendente de 622 o 155 Mbps (asimétrica).

Figura 1. 27: Red APON típica según ITU-T G.983



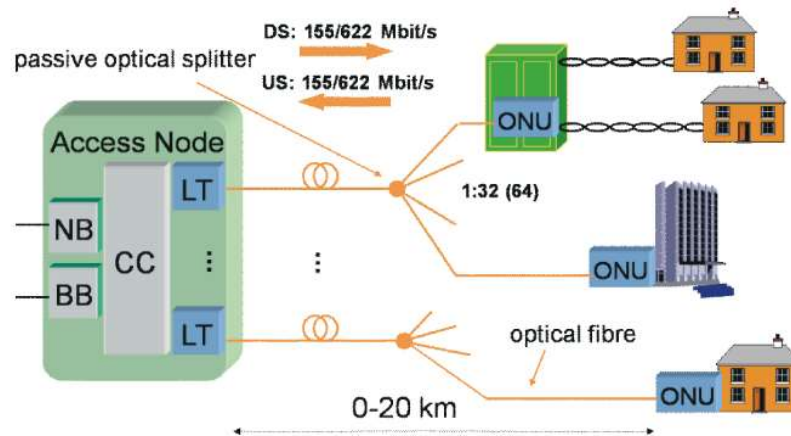
Fuente: (Gagnaire & Stojanovski, 2002)

### 1.8.1.2. PON de banda ancha (BPON)

La PON de banda ancha (BPON), según se define en la serie ITU-T G.983, supuso una mejora de la APON. Su objetivo era desplegar sistemas de acceso óptico de banda ancha de forma rentable. BPON proporciona diversos servicios de banda ancha, como ATM, acceso Ethernet y distribución de vídeo. BPON utiliza ATM a modo de protocolo de señalización y transporte.

No obstante, BPON también proporciona mayor seguridad. Además, otra diferencia significativa respecto a APON es que BPON permite la distribución de vídeo, mientras que APON no se centra en este tipo de servicios. Con BPON se hizo un uso más elaborado de WDM al añadir longitudes de onda adicionales para la distribución de vídeo. Las señales digitales de BPON operan a velocidades ATM de 155, 622 y 1244 Mbps (véase la figura 1.28).

Figura 1. 28: Arquitectura BPON básica y concepto operativo

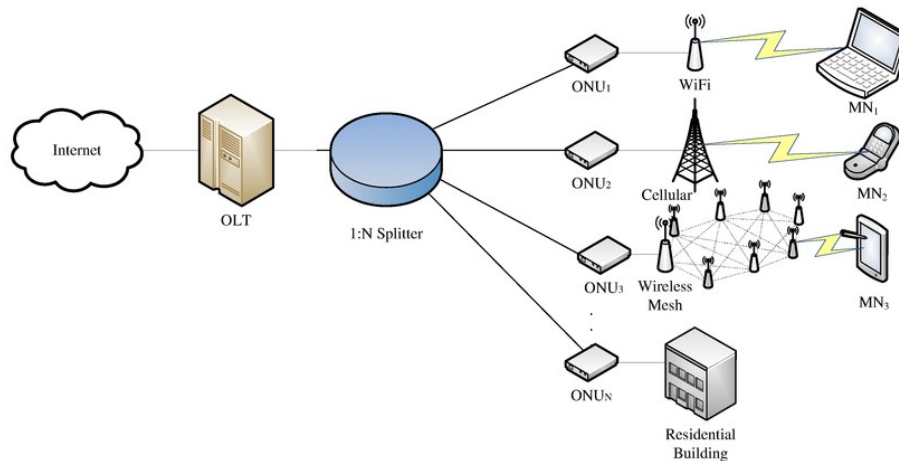


Fuente: (Shaukat et al., 2011)

### 1.8.1.3. PON Ethernet (EPON)

La PON basada en Ethernet también denominada Ethernet PON (EPON), aunque en ocasiones también se conoce como Gigabit EPON (GEPON). EPON forma ya parte del estándar 802.3 del IEEE. Soporta una velocidad de 1.25 Gbps tanto en sentido descendente como ascendente. EPON se basa en Ethernet, al contrario que otras tecnologías de redes ópticas pasivas que se basan en ATM. Provee una conectividad sencilla y fácil de administrar con equipos IP basados en Ethernet, tanto a los clientes como en la oficina central (CO). EPON es apta para transportar tráfico empaquetado y tráfico de voz y vídeo sensible al tiempo.

Figura 1. 29: Arquitectura EPON.

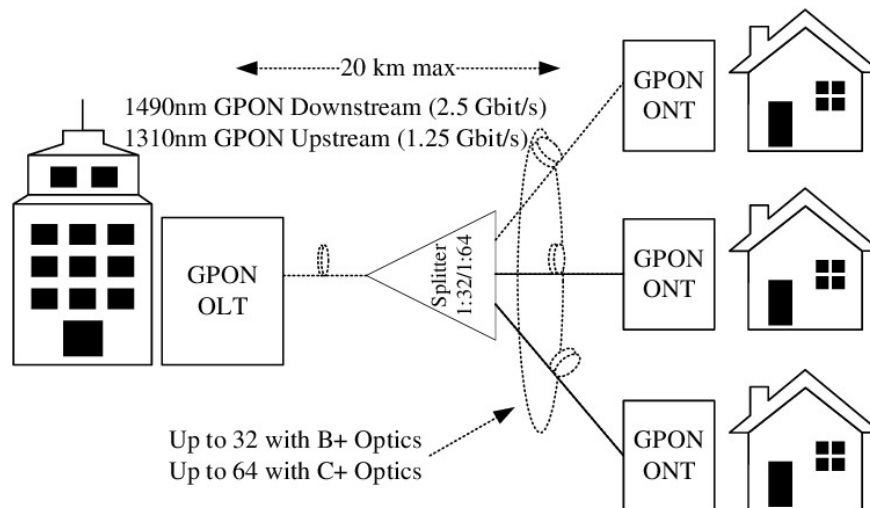


Fuente: (Sanchez et al., 2013)

#### 1.8.1.4. PON Gigabit (GPON)

La GPON se encuentra descrita en la norma G.984 del Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T). GPON consta de una arquitectura punto a multipunto (véase la Figura 1.30), por la que una única fibra se conecta a un divisor óptico pasivo que reparte las fibras a varios clientes (Ricciardi et al., 2012), hasta un máximo de 64 clientes por cada interfaz GPON.

Figura 1. 30: Arquitectura GPON.



Fuente: (Horvath et al., 2017)

El divisor óptico tiene configuraciones de división diferentes, como 1:2, 1:4, 1:32, etc. Los datos de bajada se transmiten sobre una longitud de onda de 1490 nm. Los datos ascendentes se transmiten a una longitud de onda de 1310 nm. GPON suministra

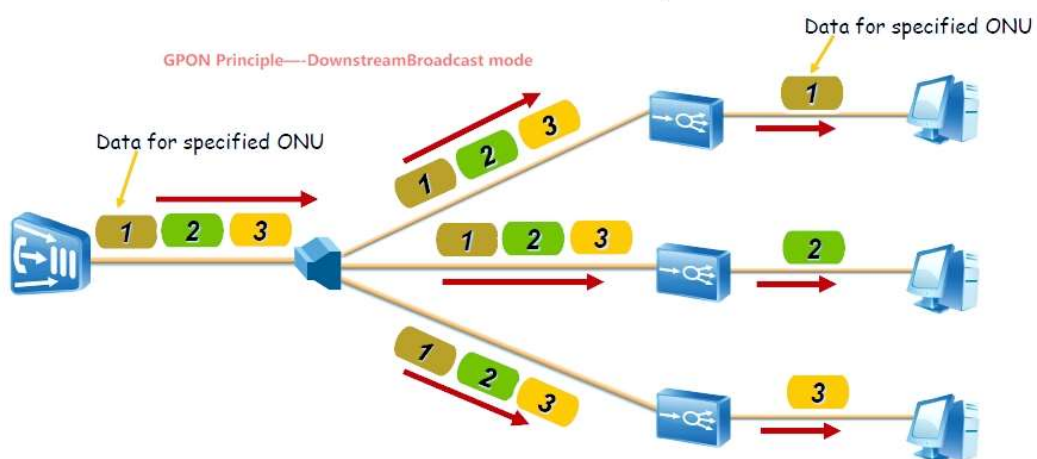
velocidades de datos asimétricas de 2.488 Gbps en sentido descendente y 1.244 Gbps en sentido ascendente (Horvath et al., 2017).

Como ya se ha mencionado GPON se compone principalmente de los siguientes dispositivos: (1) OLT y (2) ONT/ONU. Por ejemplo, la OLT, conecta varios ONT/ONU a través de divisores ópticos pasivos, tal como se observó en la Figura 1.30. Con la finalidad de dividir las señales de subida y bajada de varios usuarios a partir de una única fibra, GPON incorpora dos mecanismos de multiplexación:

- El tráfico descendente es transmitido por la OLT a todas las ONUs. Todas ellas procesan el tráfico que se les adjudica a partir de una dirección incluida en la cabecera de la unidad de datos de protocolo (Protocol Data Unit, PDU).
- El tráfico ascendente usa el mecanismo de Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA) controlado por la OLT situada en la central (OC), que asigna intervalos de tiempo a cada ONU para la transmisión sincronizada de sus paquetes de datos.

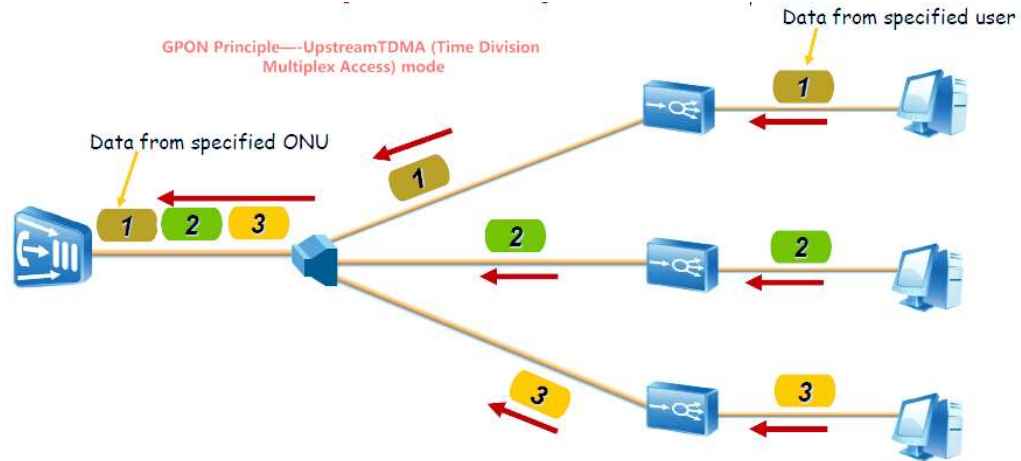
El ancho de banda atribuido a cada usuario puede ser estática o dinámicamente variable, para dar soporte a aplicaciones de voz, datos y vídeo. Las figuras 1.31 y 1.32 muestran los modos de: (1) difusión (broadcast) y (2) TDMA.

Figura 1. 31: GPON – modo de difusión (Broadcasting) downstream.



Fuente: (Richer, 2018)

Figura 1. 32: GPON – modo de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) upstream.



Fuente: (Richer, 2018)

En la Tabla 2.1 se enumeran las tecnologías PON con la comparación del tamaño de la red de datos. Velocidades de datos ascendente y descendente máximas y mínimas, relación de división y distancia.

Tabla 1. 1: Comparación entre diferentes tecnologías de acceso óptico.

A/BPON	EPON (GEPON)	GPON	10 GPON	WDM PON	
Estándar	ITU.G.983	IEEE802.3ah	ITU.G.984	IEEE802.3av	ITU G.983
Tamaño de Celda de Paquete de Datos	53 bytes	1518 bytes	53 a 1518 bytes	1518 bytes	Independiente
Velocidad de Línea de Bajada Máxima	622 Mbps	1.2 Gbps	2.4 Gbps	2.4 Gbps; IP, 10 Gbps Broadcast; 5 Gbps bajo demanda	1-10 Gbps por canal
Velocidad de Línea de Subida Máxima	155/622 Mbps	1.2 Gbps	1.2 Gbps	2.5 Gbps	1-10 Gbps por canal
Longitud de Onda de Bajada	1490 y 1550 nm	1550 nm	1490 y 1550 nm	1550 nm	Individual por longitud de onda/canal
Longitud de Onda de Subida	1310 nm	1310 nm	1310 nm	1310 nm	Individual por longitud de onda/canal

<b>Modos de Tráfico</b>	ATM	Ethernet	ATM o TDM	Ethernet	Independiente del Protocolo
<b>Voz</b>	ATM	VoIP	TDM	VoIP	Independiente
<b>Video</b>	1550 nm superpuesto	1550 nm superpuesto/IP	1550 nm superpuesto/IP	IP	1550 nm superpuesto/IP
<b>Máxima División PON</b>	32	64	128	128	16/1000's
<b>Distancia Máxima</b>	20 km	20 km	20 km	10 km	20 km
<b>Ancho de Banda Promedio por Usuario</b>	20 Mbit/s	60 Mbit/s	40 Mbit/s	20 Mbit/s	Hasta 10 Gbps

Fuente: (Richer, 2018)

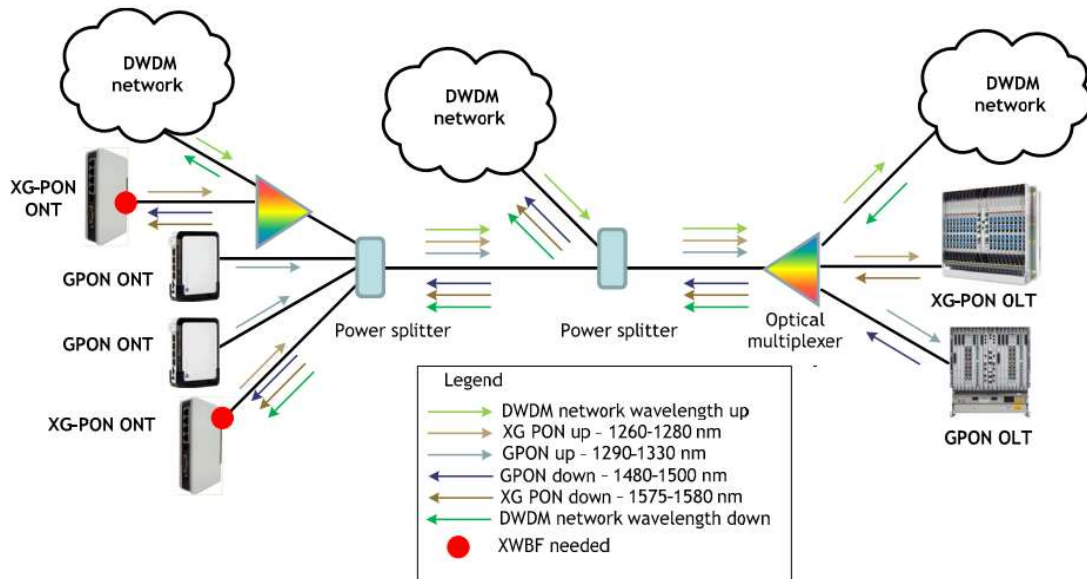
### 1.8.2. Multiplexación por división de longitud de onda (WDM)

WDM es la abreviación de «Wavelength-Division Multiplexing» (multiplexación por división de longitud de onda) y hoy en día es una de las tecnologías más empleadas en los sistemas de comunicación óptica de alta capacidad. La figura 1.33 describe esquemáticamente un sistema de transmisión WDM convencional. En el extremo del transmisor, varios transmisores ópticos, cada uno emitiendo a una longitud de onda diferente, envían señales de forma individual y dichas señales se multiplexan mediante un multiplexor de longitud de onda (MUX). Posteriormente, las señales multiplexadas se transportan por una línea de transmisión principal (cable de fibra óptica). En el lado del receptor, las señales se demultiplexan mediante un demultiplexador de longitud de onda (DEMUX) y se envían a múltiples receptores.

WDM-PON son redes ópticas pasivas (PON) con tecnología de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), que proporciona una mayor seguridad de red. Estas tecnologías permiten a las ONUs disponer de fuentes de luz a distintas longitudes de onda sintonizadas coexistiendo en la misma fibra, con lo que se consigue aumentar el ancho de banda total de la red y el número de usuarios atendidos dentro de la red de acceso óptico. La multiplexación por división de longitud de onda PON, o WDM-PON, es una forma de red óptica pasiva de la que varias empresas están promoviendo su uso a gran escala. Esta

tecnología prevé un futuro en el que la tecnología óptica sea más económica y sencilla de desplegar y los usuarios finales puedan disfrutar de un mayor ancho de banda. WDM-PON puede suministrar un mayor ancho de banda a mayores distancias al dedicar ancho de banda óptico a cada usuario. Al incrementar el presupuesto de pérdida de enlace de cada longitud de onda, resulta menor sensibilidad a las pérdidas ópticas que se producen en cada divisor óptico.

Figura 1. 33: PON basada en multiplexación por división de longitud de onda (WDM)



Fuente: (Mullerova et al., 2012)

Sabemos que WDM-PON abastece a cada usuario con una longitud de onda única, en lugar de compartirla entre 32 o incluso más usuarios, como en TDM-PON. Este enfoque supone un ancho de banda significativamente mayor. Dadas sus ventajas, WDM-PON se ha considerado un firme candidato para la próxima generación de sistemas PON, compitiendo con TDM PON:

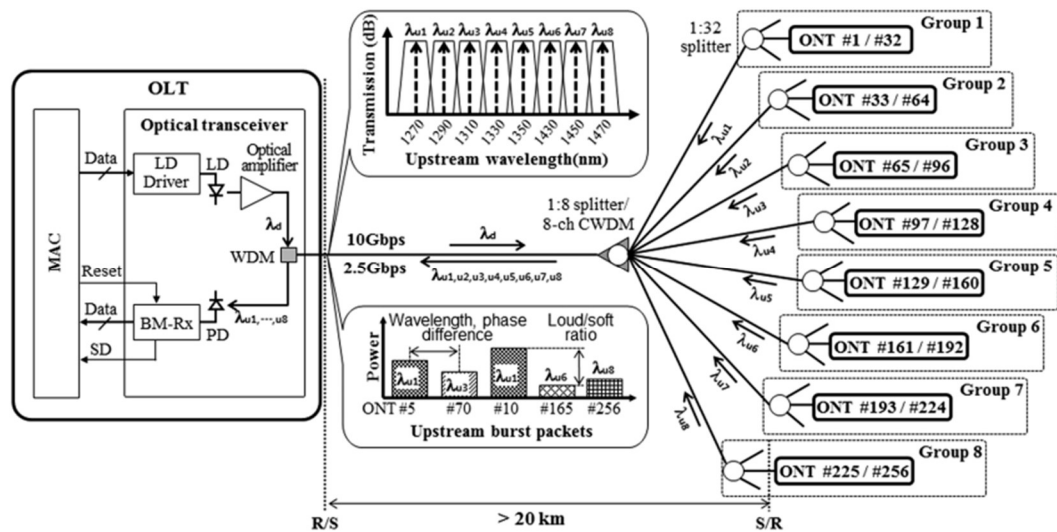
- WDM-PON posibilita que cada usuario se consagre con una o más longitudes de onda dedicadas, de modo que cada usuario pueda acceder a todas las longitudes de ancho de banda disponibles.
- Las redes WDM-PON proporcionan habitualmente mayor seguridad y adaptabilidad, puesto que cada domicilio únicamente recibe la longitud de onda que le ha sido asignada.
- El control de la capa MAC en WDM-PON es más simple que en TDM PON. Esto es debido a que WDM-PON dispone de conexiones punto a punto (P2P)

entre la OLT y la ONU, eliminando la dependencia de los controladores de acceso a medios punto a multipunto (P2MP) empleados en otras redes PON.

- La longitud de onda en una red WDM-PON es efectivamente un enlace P2P, permitiendo así que cada longitud de onda opere como un enlace P2P, pudiendo así cada conexión operar a diferentes velocidades y protocolos para una máxima flexibilidad.

La WDM tiene dos principales variantes: CWDM (multiplexación por división de longitud de onda gruesa) y DWDM (multiplexación por división de longitud de onda densa). La distinción fundamental entre estas dos radica en la banda operativa y el espacio entre las longitudes de onda, que en última estancia afecta al número de longitudes de onda o canales que se pueden utilizar. La Figura 1.34 se observa la arquitectura de la tecnología CWDM estudiada por (Kim et al., 2012).

Figura 1. 34: PON basada en multiplexación CWDM.



Fuente: (Kim et al., 2012)



## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Contexto de la investigación

En esta investigación la metodología se enfoca en el análisis y mejora del desempeño de la red de CNT EP Tungurahua con el propósito de mejorar la calidad del servicio a los usuarios. En este capítulo se describe el marco metodológico que permite la evaluación de la infraestructura actual, así como el diseño de estrategias de mejoramiento y la validación de su efectividad a través de simulaciones.

Este enfoque se basa en el uso de la herramienta de simulación basada en Python y el uso de librerías especializadas en redes ópticas, para abordar los retos identificados. El método utilizado garantiza que la propuesta de solución no solamente solucione los problemas actuales, sino que además sea escalable y viable en función de la demanda futura.

Figura 2. 1: Ubicación de la Zonal CNT EP Ambato Sur en la Provincia de Tungurahua.



Fuente: Elaboración propia

La situación actual de las redes comunicaciones a nivel global ha evolucionado exponencialmente para dar solución a la creciente demandas de uso del ancho de banda, derivado del crecimiento de los servicios de Internet, aplicaciones multimedia y computación en la nube. Ante esta problemática, CNT EP Ambato Sur (véase la Figura

2.1) en la Provincia de Tungurahua enfrenta el reto de mantener y mejorar la calidad del servicio (QoS) para sus clientes. CNT EP debe garantizar la conectividad en todo el país, especialmente en aquellas regiones donde los usuarios residenciales y corporativos dependen de una infraestructura de telecomunicaciones, como es el caso de la Provincia de Tungurahua.

Por ello, el presente estudio propone un análisis de la infraestructura actual, evaluando el rendimiento de la red y la aplicación estratégica de mejoras en la red. De este modo, la investigación busca proponer estrategias técnicas que permitan mejorar el rendimiento de la red y la satisfacción del cliente, y así mejorar la calidad de servicio (QoS) integral de CNT EP en Tungurahua. La implementación de fibra óptica WDM-GPON se presenta como una oportunidad para mejorar la calidad del servicio de internet y catalizar el desarrollo socioeconómico de la región.

Se abordan en este capítulo tres ejes fundamentales:

1. Descripción del marco metodológico que se utiliza para evaluar y mejorar la red.
2. Descripción de los indicadores de rendimiento, como latencia, pérdida de paquetes y ocupación del ancho de banda.
3. Diseñar escenarios de simulación que permitan evaluar el impacto de tecnologías avanzadas como WDM, asignación dinámica de ancho de banda (DBA) y divisores ópticos intermedios.

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

El diseño de la investigación combina métodos cuantitativos para evaluar la viabilidad técnica de la implementación de WDM-GPON.

### **2.2.1. Delimitación del marco de investigación**

CNT EP Tungurahua cuenta con una infraestructura de telecomunicaciones que sirve tanto a zonas urbanas como rurales. A medida que crece la demanda de servicios de Internet, en especial con el aumento de aplicaciones que exigen un uso masivo de ancho de banda, tales como la transmisión de vídeo y herramientas online basadas en web, la necesidad de una red estable y escalable resulta evidente.

Actualmente, está basada en la tecnología GPON (Gigabit Passive Optical Network, red óptica pasiva Gigabit) que, aunque resulta eficiente, muestra limitaciones en cuanto a

latencia, pérdida de paquetes y ocupación del ancho de banda a medida que se incrementa la cantidad de usuarios. En este proyecto se examina la configuración actual de la red y se proponen mejoras para satisfacer la demanda actual y futura.

### **2.2.2. Indicadores de rendimiento – KPI.**

Esta investigación se ha basado en tres parámetros de rendimiento (KPI) para evaluar el rendimiento y la calidad de la red:

1. Latencia: calcula el tiempo de retardo en la transmisión de datos. Un retardo alto tiene un impacto negativo en los servicios en tiempo real, tales como las videoconferencias y juegos online.
2. Pérdida de paquetes: es el porcentaje de paquetes de datos que no logran llegar a su destino. Las pérdidas de paquetes altas reducen la calidad de los datos y perjudican la experiencia del usuario.
3. Ocupación del ancho de banda: es el grado de aprovechamiento del ancho de banda disponible. Una deficiente ocupación puede dar lugar a una insuficiente asignación de recursos o a cuellos de botella en picos de demanda.

Estos KPIs son utilizadas como parámetros para evaluar más adelante la eficacia de las estrategias propuestas.

### **2.2.3. Alcance de las mejoras en la red actual**

Para la presente investigación se han planteado tres estrategias para mejorar el rendimiento de la red GPON:

1. Reducción de la latencia: aplicando la tecnología WDM sobre GPON, con la que se pueden transmitir de manera simultánea varios canales de datos en diferentes longitudes de onda, con lo que se logra reducir la congestión y mejorar los tiempos de respuesta.
2. Distribución dinámica del ancho de banda: A través de la asignación dinámica de ancho de banda (DBA), se puede lograr una distribución más eficiente de los recursos, asegurando que los usuarios con mayor demanda dispongan de un ancho de banda suficiente sin afectar al servicio de los demás.

3. Reducción de la pérdida de paquetes: la instalación de divisores ópticos intermediarios disminuye la distancia entre nodos, con lo que la atenuación de la señal es menor y se mejora la calidad de la transmisión de datos.

La estructura de este proyecto de investigación está pensada para evaluar el estado actual de la red, aplicar estas estrategias mediante un modelo de simulación y evaluar su impacto en los indicadores antes mencionados.

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

Para evaluar el rendimiento y proponer mejoras en la red CNT EP Tungurahua, se ha empleado una metodología de simulación computacional. En estas simulaciones se analizan métricas tales como latencia, ocupación de ancho de banda y pérdida de paquetes, con el fin de evaluar el estado actual de la red y proponer estrategias de mejora.

#### **2.3.1. Herramienta y plataforma de simulación**

Este estudio se incluye la siguiente herramienta de simulación para lograr modelos precisos y confiables:

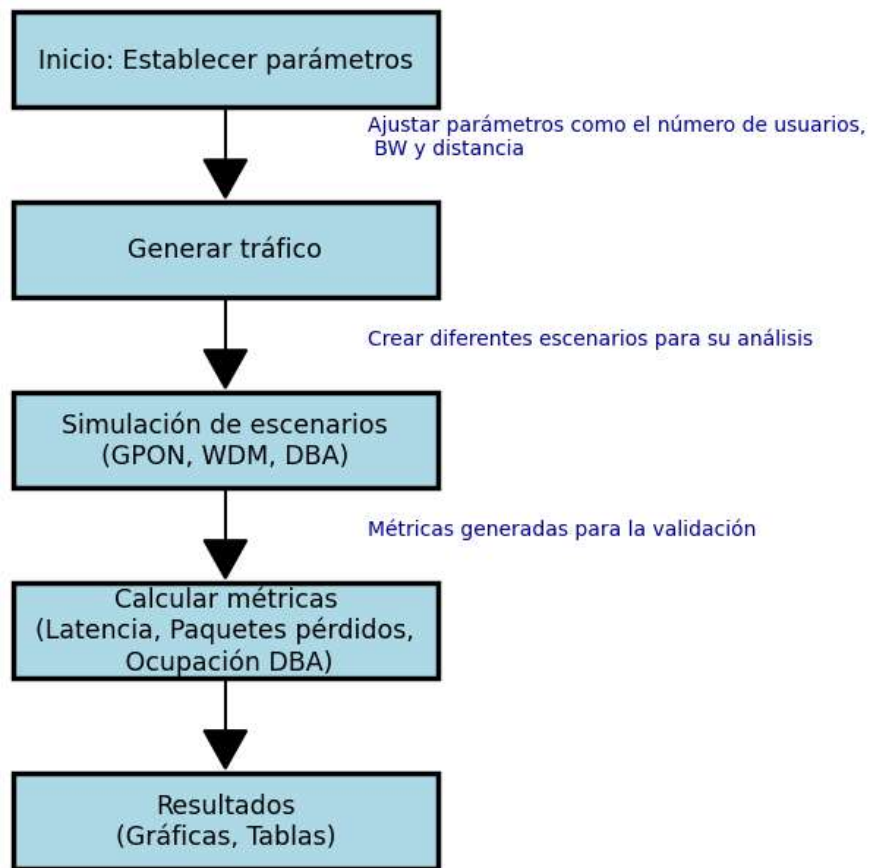
1. Python: Permite la implementación de modelos y la generación de simulaciones basadas en pseudocódigos de algoritmos.

La selección de este programa se debió a su capacidad para generar entornos de simulación modulares y dinámicos, lo que resulta indispensable para probar diferentes escenarios de red.

#### **2.3.2. Configuración de referencia**

Para empezar a realizar las simulaciones, se ha modelado la configuración de red GPON existente. Para ello se han definido parámetros tales como el ancho de banda total disponible, el promedio de tráfico generado por usuario y la cantidad total de usuarios, de acuerdo con los estándares y datos proporcionados por CNT EP Tungurahua. Esta referencia sirve como escenario de control frente al cual se evaluarán las mejoras. En la Figura 2.2 se presente el diagrama de flujo del proceso de simulación desde el establecimiento de parámetros, generación del tráfico, simulaciones de los escenarios GPON, WDM y DBA, calcular las métricas (latencia, pérdida de paquetes y ocupación DBA, y finalmente la presentación de los resultados.

Figura 2. 2: Flujograma del proceso de simulación.



Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3. Pseudocódigos utilizados en la simulación

Se han desarrollado e implementado cinco algoritmos de simulación para cumplir con los objetivos de la investigación:

1. Simulación del tráfico de red: en este algoritmo (ver Figura 2.3 correspondiente al pseudocódigo 1) se calcula la latencia media y el aprovechamiento del ancho de banda en función de la carga de usuarios. En este sentido, la simulación permite obtener el tráfico con distribución de Poisson y obtener los parámetros ópticos más importantes.

Figura 2. 3: Pseudocódigo de la simulación de tráfico en la Red.

---

**Algorithm 1** Simulación de Tráfico en la Red

---

```
1: Entrada: Número de usuarios  $U$ , Ancho de banda total disponible  $B_{total}$ ,  
   Tasa promedio de tráfico por usuario  $\lambda$ .  
2: Salida: Latencia promedio  $L$ , Utilización de ancho de banda  $U_B$ .  
3: Inicialización:  
4:  $T_{generado} \leftarrow 0$  {Total tráfico generado}  
5:  $T_{utilizado} \leftarrow 0$  {Total tráfico utilizado}  
6: Simulación:  
7: for cada usuario  $i$  en el conjunto  $U$  do  
8:   Generar tráfico  $T_i \sim \text{Poisson}(\lambda)$   
9:   if  $T_i \leq B_{total}$  then  
10:     $T_{utilizado} \leftarrow T_{utilizado} + T_i$   
11:   else  
12:     $T_{utilizado} \leftarrow T_{utilizado} + B_{total}$   
13:   end if  
14:    $T_{generado} \leftarrow T_{generado} + T_i$   
15: end for  
16: Calcular latencia promedio  $L \leftarrow \frac{\text{Cola acumulada}}{\text{Velocidad de servicio}}$   
17: Calcular utilización de ancho de banda  $U_B \leftarrow \frac{T_{utilizada}}{B_{total}}$   
18: Fin del Algoritmo
```

---

Fuente: Elaboración propia

2. Simulación de pérdida de paquetes: A través de este algoritmo se evalúa el efecto de la distancia y la atenuación en la pérdida de paquetes. El algoritmo cuantifica la pérdida de paquetes en diferentes escenarios variando la distancia total y estimando las proporciones. En la Figura 2.4 se muestra más detalles del algoritmo 2.

Figura 2. 4: Pseudocódigo de la simulación de pérdida de paquetes.

---

**Algorithm 2** Simulación de Pérdida de Paquetes

---

```
1: Entrada: Número de paquetes  $P$ , Distancia total  $D$ , Atenuación por km  
    $A_{km}$ , Tasa de pérdida aceptable  $P_{acceptable}$ .  
2: Salida: Tasa de pérdida de paquetes  $P_{total}$ .  
3: Inicialización:  
4:  $P_{entregado} \leftarrow 0$   
5:  $P_{perdido} \leftarrow 0$   
6: Calcular pérdida total  $A_{total} \leftarrow D \times A_{km}$   
7: Simulación:  
8: for cada paquete  $i$  en el conjunto  $P$  do  
9:   Generar probabilidad de pérdida  $P_{actual} \sim \text{Uniform}(0, 1)$   
10:  if  $P_{actual} \leq A_{total}$  then  
11:    $P_{perdido} \leftarrow P_{perdido} + 1$   
12:  else  
13:    $P_{entregado} \leftarrow P_{entregado} + 1$   
14:  end if  
15: end for  
16: Calcular tasa de pérdida  $P_{total} \leftarrow \frac{P_{perdido}}{P}$   
17: Fin del Algoritmo
```

---

Fuente: Elaboración propia

3. Mejora del ancho de banda: con este algoritmo de simulación se aplican estrategias de asignación de ancho de banda fijas y dinámicas. Se reasignan de

forma dinámica los recursos de los usuarios de alta prioridad para mejorar el rendimiento. En la Figura 2.5 se muestra más detalles del algoritmo 3.

Figura 2. 5: Pseudocódigo de la simulación de ocupación del ancho de banda.

---

**Algorithm 3** Optimización del Ancho de Banda

---

- 1: **Entrada:** Ancho de banda total  $B_{total}$ , Solicitudes de ancho de banda de los usuarios  $B_{solicitado}[i]$ .
- 2: **Salida:** Ancho de banda asignado  $B_{asignado}[i]$ .
- 3: **Inicialización:**
- 4:  $B_{restante} \leftarrow B_{total}$
- 5: **Asignación inicial:**
- 6: **for** cada usuario  $i$  **do**
- 7:    $B_{asignado}[i] \leftarrow \min(B_{solicitado}[i], \frac{B_{restante}}{U})$
- 8:    $B_{restante} \leftarrow B_{restante} - B_{asignado}[i]$
- 9: **end for**
- 10: **Reasignación dinámica:**
- 11: **for** cada usuario  $i$  con prioridad **do**
- 12:    $B_{asignado}[i] \leftarrow B_{asignado}[i] + \frac{B_{restante}}{\text{Usuarios restantes}}$
- 13: **end for**
- 14: **Fin del Algoritmo**

---

Fuente: Elaboración propia

4. Impacto de la tecnología WDM: en esta simulación se comparan las métricas de la tecnología GPON actual frente a las mejoras de WDM-PON. Con el fin de destacar las ventajas de la mejora propuesta, se calculan la latencia, capacidad y pérdida de paquetes de ambas configuraciones. El pseudocódigo 4 se muestra en la Figura 2.6.

Figura 2. 6: Pseudocódigo comparativo del impacto de usar WDM-GPON frente a GPON actual.

---

**Algorithm 4** Impacto de Mejores Tecnologías

---

- 1: **Entrada:** Tecnología actual  $T_{actual}$ , Tecnología propuesta  $T_{propuesta}$ .
- 2: **Salida:** Comparación de métricas: Latencia  $L$ , Capacidad  $C$ , Pérdida  $P$ .
- 3: **Simulación:**
- 4: **for** cada tecnología  $T$  en  $\{T_{actual}, T_{propuesta}\}$  **do**
- 5:   Calcular  $L$  basado en distancia y velocidad de propagación.
- 6:   Calcular  $C$  basado en multiplexación (WDM).
- 7:   Calcular  $P$  basado en divisores y distancia.
- 8: **end for**
- 9: Generar tabla de comparación entre  $T_{actual}$  y  $T_{propuesta}$ .
- 10: **Fin del Algoritmo**

---

Fuente: Elaboración propia

## 2.4. Parámetros de simulación

En las simulaciones se utilizan los siguientes parámetros:

1. Número de usuarios: de 10 a 100, con incrementos de 10 en 10
2. Ancho de banda (BW) total: 2.4 Gbps (estándar GPON)

3. Distribución de tráfico: se utiliza la distribución de Poisson con una tasa media  $\lambda$  dependiendo del comportamiento de cada usuario
4. Distancia del enlace óptico: de 0 a 20 km, con lo cual nos permite evaluar la pérdida de los paquetes.

## **2.5. Población y distribución de la red**

### **2.5.1. Definición de la población**

La población, en este estudio, se refiere a los componentes principales de la red GPON de la CNT EP Tungurahua y a sus usuarios. Entre ellos se incluyen:

1. OLT: es el dispositivo encargado de la distribución de señales ópticas a múltiples usuarios.
2. Splitters: conocidos como divisores ópticos, es decir, que se encargan de dividir la señal óptica procedente de la OLT para su distribución a varias ONUs.
3. ONUs: estos dispositivos, que se encuentran ubicados en las casas de los usuarios, permiten convertir las señales ópticas en eléctricas para los equipos de los usuarios finales.

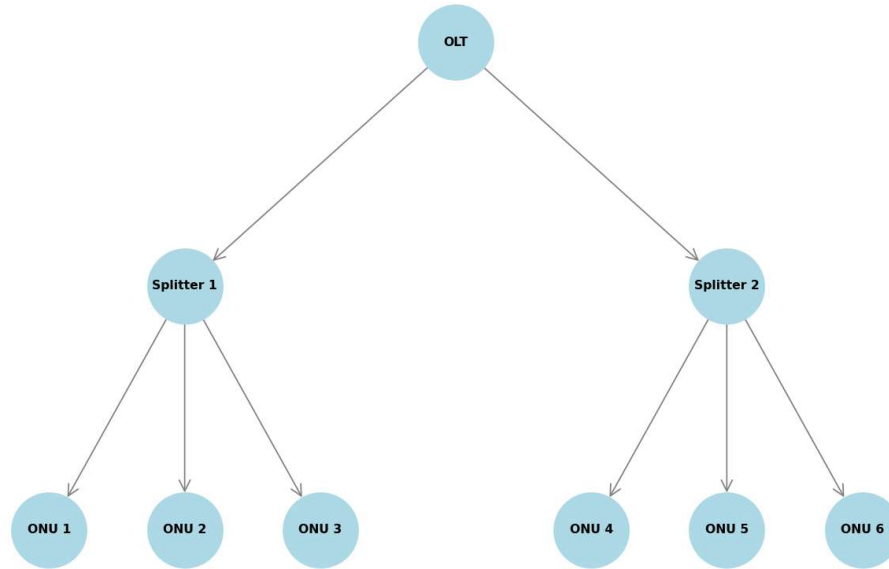
Además, la red está formada por usuarios residenciales, clientes corporativos e institucionales que utilizan Internet con demandas variables de ancho de banda.

### **2.5.2. Disposición de la red GPON**

El modelo de la red GPON adopta la topología de árbol tradicional de los despliegues de fibra óptica. La Figura 2.7 muestra el diagrama de la estructura jerárquica de la GPON de CNT EP Tungurahua. Se observa una OLT que se conecta a dos splitters que se ramifica hacia 6 ONUs.

Figura 2. 7: Topología en árbol de la red GPON en CNT EP Tungurahua.





Fuente: Elaboración propia

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

Los resultados se han comparado con los valores referenciales actuales y los resultados teóricos para validar su exactitud. Los resultados se cotejaron con los puntos de referencia existentes y las predicciones teóricas para validar su exactitud. Las métricas como la latencia, pérdida de paquetes y ocupación del ancho de banda se han analizado con cuidado para identificar tendencias y correlaciones.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Introducción

En el presente capítulo son analizados los resultados obtenidos de las simulaciones desarrolladas para evaluar el rendimiento y la optimización de la red CNT EP Tungurahua. Los resultados se enfocan en métricas tales como latencia, pérdida de paquetes y utilización del ancho de banda, lo cual resalta el impacto de la implementación de mejoras técnicas y relaciona estos resultados con los objetivos de la tesis. Los datos obtenidos se apoyan en representaciones visuales (figuras y tablas), a las cuales se hace referencia en el presente informe.

### 3.2. Análisis de la influencia de la latencia en la calidad de servicio

Hay que tener en cuenta que la latencia influye mucho en la calidad de servicio (QoS) de los usuarios. Por ejemplo, en la transmisión de vídeo, los videojuegos y la transmisión de datos en tiempo real, son aplicaciones que sufren retardos. En la Tabla 3.1 se muestran los datos obtenidos de la simulación de la latencia en función de la cantidad de usuarios disponibles en la red GPON.

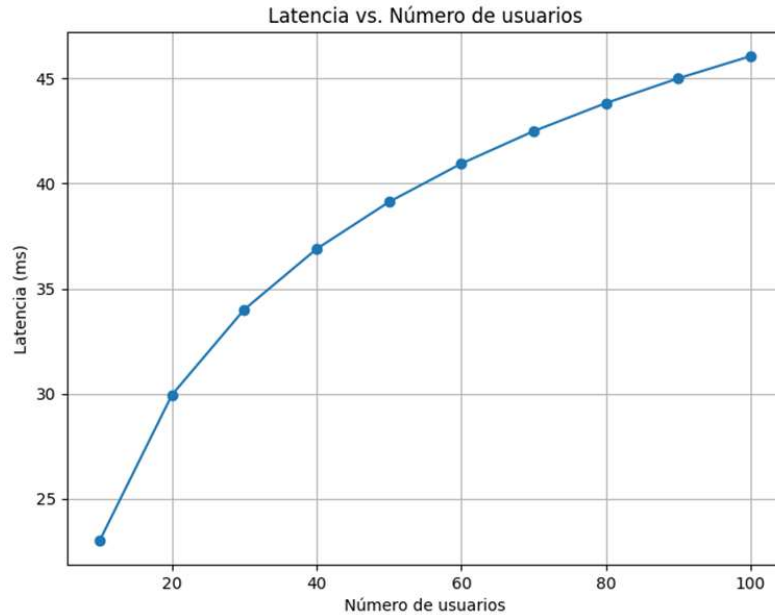
Tabla 3. 1: Resumen de los datos obtenidos de la latencia frente al número de usuarios.

<b>Número de Usuarios</b>	<b>Latencia (ms)</b>
10	23.03
20	30.10
30	34.81
40	38.15
50	40.76
60	42.83
70	44.51
80	45.88
90	47.03
100	48.02

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.1 se observa cómo la latencia se incrementa proporcionalmente al número de usuarios. Este hecho, aunque controlable con los parámetros de la red actual, demuestra la necesidad de utilizar tecnologías como WDM para reducir la latencia aún en las horas de mayor tráfico.

Figura 3. 1: Gráfica de la latencia en función del número de usuarios sobre GPON.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Análisis de pérdida de paquetes en función de la distancia

Uno de los parámetros más destacados para evaluar la calidad de la transmisión de datos en una red es la pérdida de paquetes. En la Tabla 3.2 se presentan los resultados de la pérdida de paquetes en función de la distancia del enlace en una GPON.

Tabla 3. 2: Resumen de los datos obtenidos de la pérdida de paquetes en función de la distancia del enlace.

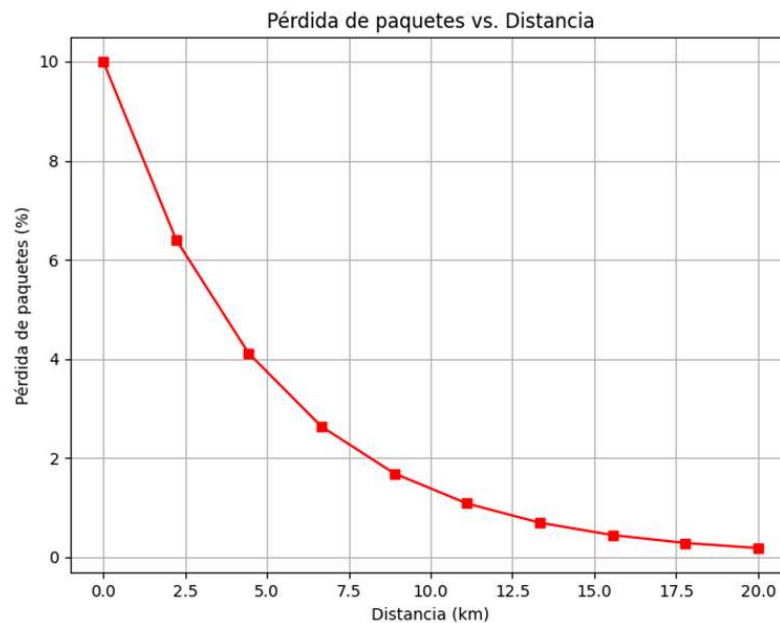
Distancia (km)	Pérdida de Paquetes (%)
0.0	10.00
2.2	6.61
4.4	4.37
6.7	2.89
8.9	1.91
11.1	1.26
13.3	0.83

15.6	0.55
17.8	0.36
20.0	0.23

Fuente: Elaboración propia.

Si la pérdida de paquetes es elevada, afecta negativamente a la calidad del servicio, lo que puede provocar interrupciones o una disminución del rendimiento, en especial en aplicaciones sensibles al tiempo, por ejemplo, las videoconferencias y las transferencias de datos. En la Figura 3.2 se aprecia la relación entre pérdida de paquetes y distancia con la actual configuración de red.

Figura 3. 2: Gráfico de pérdida de paquetes vs. Distancia sobre GPON.



Fuente: Elaboración propia.

Los paquetes se pierden significativamente más en distancias cortas (0-5 km), alcanzando valores cercanos al 10%. Esta situación demuestra las limitaciones a la hora de garantizar la transmisión de la señal debido a la atenuación y la dispersión. Pero, a medida que la distancia se incrementa, la pérdida de paquetes decrece exponencialmente, hasta descender por debajo del 2% más allá de los 10 km. Estos valores de estabilidad a mayores distancias permiten suponer que la infraestructura de red es más robusta en estos trayectos.

### 3.4. Análisis del uso del ancho de banda con asignación fija

El consumo de ancho de banda es el mejor indicador de la eficacia de una red a la hora de aprovechar los recursos disponibles para satisfacer la demanda de los usuarios. En la Tabla 3.3 se presentan los resultados del uso del ancho de banda (asignación fija) en función de la cantidad de usuarios conectados en la GPON.

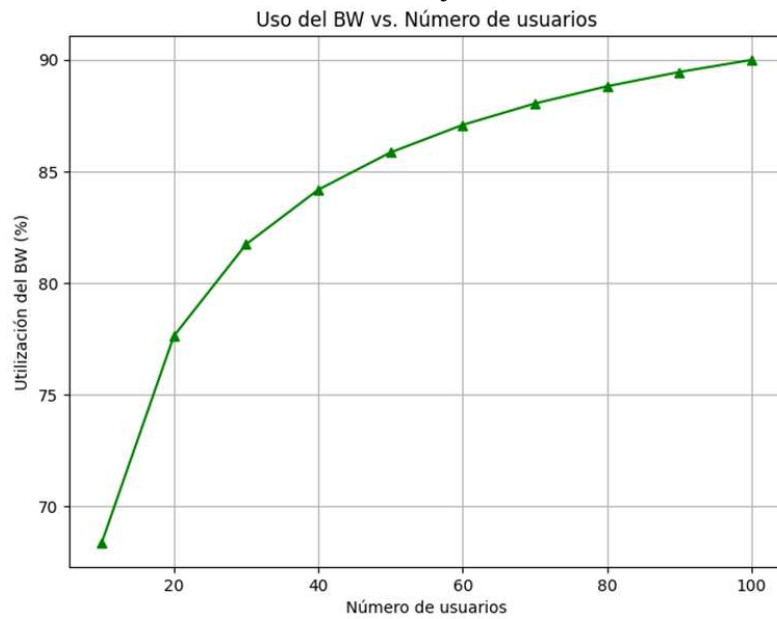
Tabla 3. 3: Resumen de los datos obtenidos de la utilización del BW vs. Número de Usuarios

Número de Usuarios	Uso del BW (%)
10	68.38
20	77.64
30	81.74
40	84.19
50	85.86
60	87.08
70	87.98
80	88.64
90	89.16
100	89.60

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.3 se observa la evolución del uso del ancho de banda conforme se incrementa el número de usuarios conectados a la red con el actual modelo de asignación fija. En un escenario de 10 usuarios, la demanda de ancho de banda es del 70% aproximadamente y se incrementa progresivamente hasta establecerse en torno al 90% para 100 usuarios. Este incremento muestra que la demanda actual es aceptable en condiciones moderadas, pero que el rendimiento de los recursos disminuye a medida que se incrementa el número de usuarios.

Figura 3. 3: Gráfico de la utilización del BW fija vs. Número de usuarios sobre GPON.

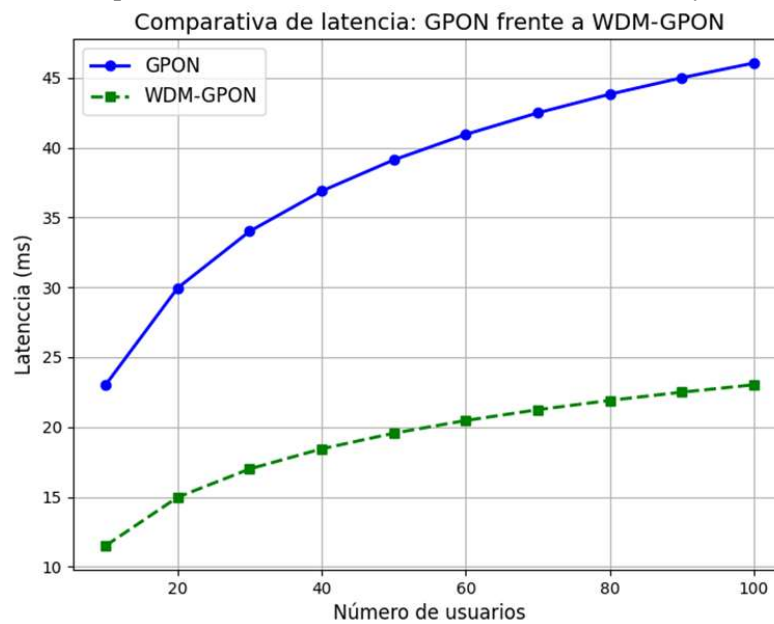


Fuente: Elaboración propia.

### 3.5. Discusión de resultados obtenidos de la latencia con tecnología WDM

En esta simulación se ha demostrado hasta qué punto es posible reducir la latencia mediante la aplicación de la tecnología WDM, sobre todo si la demanda de los usuarios es alta. En la Figura 3.4 se presenta la comparativa entre la latencia de la infraestructura GPON actual y de la solución WDM propuesta.

Figura 3. 4: Comparativa de latencia entre infraestructuras GPON y WDM-GPON.



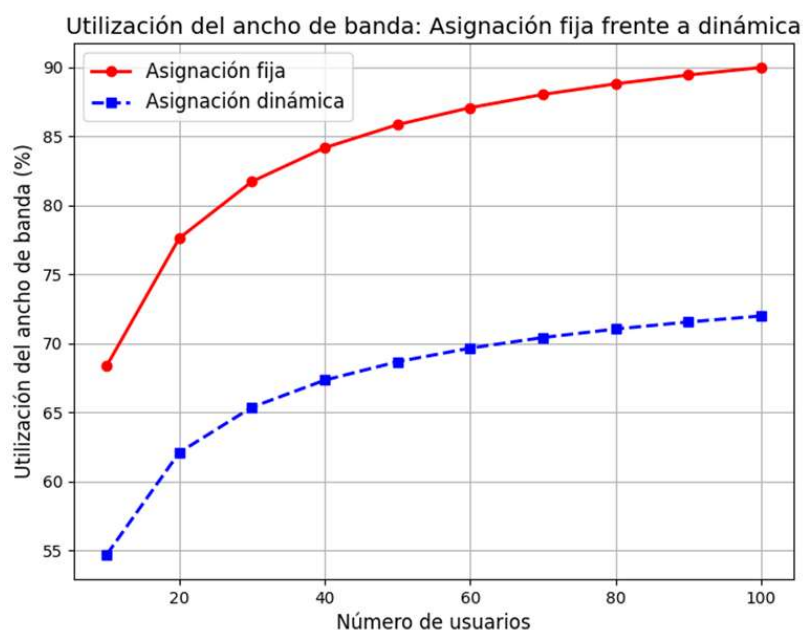
Fuente: Elaboración propia.

Cuando la carga de usuarios está comprendida entre 10 y 100, la tecnología WDM logró reducir la latencia a la mitad comparada con el modelo GPON. Este resultado demuestra que la tecnología WDM resulta ser muy eficiente para descongestionar los picos de uso. Al reducirse la latencia, se mejora la satisfacción del usuario, sobre todo para aquellas aplicaciones sensibles a la latencia, por ejemplo, videoconferencias y juegos. Además, este aspecto se ajusta al objetivo de la tesis que consiste en identificar las estrategias que permitan optimizar el rendimiento de la red.

### 3.6. Asignación de ancho de banda: Distribución fija frente a dinámica

A través de la simulación se analizó el impacto de la introducción de la asignación dinámica de ancho de banda (DBA) frente a una asignación fija tradicional. La Figura 3.5 muestra el aprovechamiento del ancho de banda en función de la carga de usuarios. Por ejemplo, con 100 usuarios, el modelo DBA logró mejorar el uso en aproximadamente un 20%.

Figura 3. 5: Comparativa del uso del ancho de banda entre los modelos de asignación fija y dinámica.



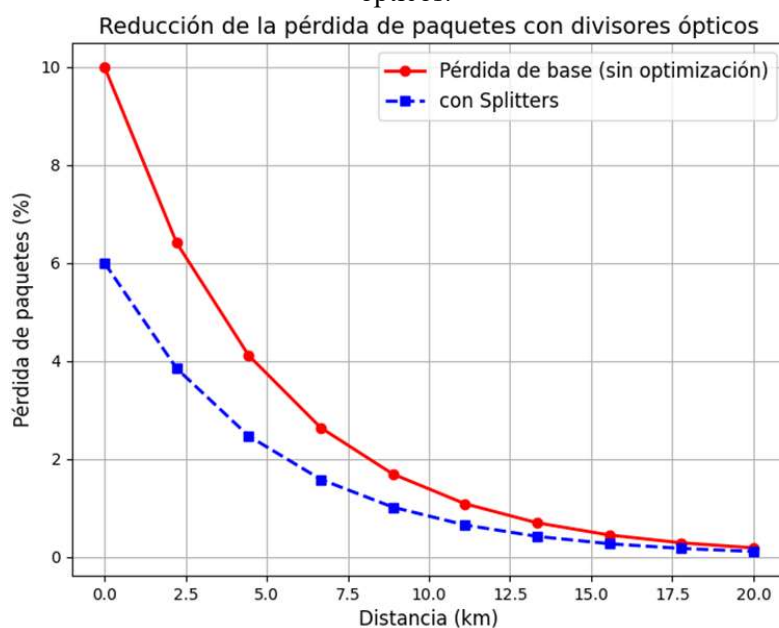
Fuente: Elaboración propia.

Con este enfoque se asegura a los usuarios con mayor demanda la disponibilidad de recursos adecuados, y al mismo tiempo se evita que otros usuarios sufran una reutilización insuficiente. Además, el análisis responde al objetivo de explorar soluciones técnicas que permitan incrementar al máximo la eficiencia de la red.

### 3.7. Disminución de la pérdida de paquetes con divisores ópticos intermedios

En este caso, la simulación analizó el impacto que tendría la introducción de divisores ópticos situados en medio de la red para reducir la pérdida de paquetes, sobre todo en zonas rurales o distantes. La figura 3.6 presenta la tasa de pérdida de paquetes en función de la distancia. Con la instalación de divisores ópticos disminuyó la pérdida hasta en un 40%, sobre todo durante los primeros 5 km. Después de 10 km, la pérdida de paquetes fue insignificante, lo que pone de evidencia la estabilidad de la configuración optimizada.

Figura 3. 6: Índices de pérdida de paquetes antes y después de la introducción de divisores ópticos.



Fuente: Elaboración propia.

Con la reducción de la pérdida de paquetes también aumenta automáticamente la calidad de la transmisión de datos, lo que a su vez contribuye a mantener la calidad del servicio. De este modo se resuelve el problema de mejorar la infraestructura para garantizar una calidad de servicio homogénea entre las distintas áreas de la red.

### 3.8. Resumen de los resultados

La combinación de la tecnología WDM, así como la asignación dinámica de ancho de banda y los splitters ópticos, representa una solución completa que permite mejorar la calidad de servicio (QoS) de la red. En la Tabla 3.1 puede verse el resumen obtenido de



las mejoras obtenidas en cada simulación. Así, por ejemplo, los resultados demuestran que la aplicación conjunta de estas estrategias tiene el potencial de:

1. Reducción de latencia en un 50%,
2. Aprovechar al máximo el ancho de banda hasta en un 20%,
3. Reducción de la pérdida de paquetes en un 40%.

Con estos resultados se ha demostrado que las soluciones propuestas no sólo solucionan las limitaciones actuales, sino que además la red está preparada para un futuro incremento de la demanda.

Tabla 3. 4: Resumen de los resultados de las simulaciones

<b>Métrica</b>	<b>Desempeño Base</b>	<b>Desempeño Optimizado</b>	<b>Mejora</b>
Reducción de Latencia	45 ms (GPON)	22.5 ms (WDM)	Reducción del 50%
Mejora en la Utilización del Ancho de Banda	Asignación Fija: ~90%	Asignación Dinámica: ~72%	Optimización del 20%
Reducción de Pérdida de Paquetes	10% (Sin Divisores)	6% (Con Divisores)	Reducción del 40%

Fuente: Elaboración propia.

### **3.9. Propuesta de fortalecimiento en programas de formación continua**

En la actualidad las empresas de telecomunicaciones privadas como públicas, en este caso CNT EP Tungurahua, la función del personal técnico y servicio al cliente en la prestación de servicios (telefonía fija e internet sobre GPON) con alta calidad y satisfacción del cliente son fundamentales para incrementar los clientes en redes FTTH. Es fundamental, que el personal técnico sea capacitado en programas de formación continua en infraestructura de redes ópticas y certificaciones con lo que puedan garantizar a futuro un mejor servicio de alta calidad. A continuación, se proponen abordar los siguientes programas de capacitación continua:

1. Capacitación técnica en la resolución de problemas en infraestructura de redes: al personal técnico de CNT EP Tungurahua gestionar la capacitación sobre la tecnología GPON, tales como, mejoras en GPON usando la técnica WDM, así

como la asignación dinámica del ancho de banda, con todo esto el personal técnico puede:

- Realizar diagnósticos de la red y proponer soluciones ante problemáticas que se puedan presentar en la GPON actual.
- Gestionar mantenimientos preventivos y correctivos con la finalidad de evitar interrupciones de servicio en CNT EP Tungurahua.
- Tomar decisiones con relación al incremento de la demanda en la red para tener más usuarios en servicios FTTH.

Por otra parte, se pueden organizar sesiones prácticas y de simulación de problemas reales con la finalidad de que el personal técnico reaccione de manera inmediata y eficaz ante posibles fallos técnicos en los dispositivos o cuellos de botellas en la red actual.

2. Fortalecimiento de las competencias en la comunicación del personal de servicio de atención al cliente: esta área de CNT EP Tungurahua deben ser capaces de explicar técnicamente los fallos en la red utilizando un lenguaje claro y sencillo para que los clientes entiendan la situación de la problemática que suceda en determinadas zonas de la red de acceso óptico. Se proponen los siguientes programas de fortalecimiento del personal técnico:

- Técnicas de comunicación: con esto se logrará que el personal de atención al cliente utilice un lenguaje sencillo para que los clientes se sientan valorados y escuchados, a pesar de que tengan interrupciones de servicios de internet y telefonía fija.
- Actuación inmediata en caso de incidencias: con esto se garantiza que el personal de atención al cliente pueda escalar los problemas al departamento técnico para su inmediata resolución.

Con estas capacitaciones se logrará mejorar los índices de satisfacción de los clientes, con lo que se va a generar mayor confianza en el servicio de calidad de la empresa CNT EP Tungurahua.

## CONCLUSIONES

1. La investigación permitió aprovechar la infraestructura GPON actual de CNT EP Tungurahua y con esto se pudo incorporar de forma estratégica splitters y tecnología WDM, con lo que se logró mejorar el rendimiento de la red de manera escalable y rentable. Gracias a esto se pudo minimizar la latencia en el caso de aplicaciones (videoconferencias y juegos en línea) en tiempo real.
2. Con la incorporación de la tecnología WDM y asignación dinámica del ancho de banda (DBA) en la infraestructura de GPON en CNT EP Tungurahua se obtuvieron mejoras significativas en los parámetros de rendimiento, tales como, latencia se logró disminuir en un 50%, la ocupación del BW mediante DBA se incrementó en un 20%, y la pérdida de paquetes tuvo una reducción del 40%. Con esto se pudo demostrar la eficacia de las estrategias técnicas que se implementaron en la red actual GPON de CNT EP Tungurahua.
3. Se logró cumplir con los objetivos entre ellos diagnosticar los problemas en la red, así como la optimización en la asignación dinámica del ancho de banda y en la propuesta de soluciones para el personal técnico y de atención al cliente. Con estos resultados, se lograría que CNE EP Tungurahua sea una ISP con visión a futuro en la que tengan los recursos técnicos para satisfacer las necesidades de los futuros clientes en la red FTTH.

## RECOMENDACIONES

En concordancia con las conclusiones derivadas en la presente investigación, se recomienda que:

1. Implementar la tecnología WDM en la red GPON actual de CNT EP Tungurahua y, además, incluir la asignación dinámica del ancho de banda ya que demostraron que el rendimiento de la red WDM-GPON fue mejor al de CPON actual bajo diferentes escenarios de simulación.
2. Realizar el despliegue de splitters intermedios para una mejor escalabilidad de la red actual especialmente en zonas con mayor densidad de usuarios o en zonas remotas en la que los enlaces desde la OLT al usuario final con el propósito de reducir las pérdidas de paquetes, con lo que se mejorará la eficacia del servicio.
3. Implementar herramientas de gestión y supervisión de la red para dar un mejor seguimiento a los KPI (indicadores de rendimiento), tales como, latencia, pérdida de paquetes y ocupación del BW, con esto se logrará identificar las posibles incidencias y dar soluciones inmediatas.

## REFERENCIAS

- Abbas, H. S., & Gregory, M. A. (2016). The next generation of passive optical networks: A review. *Journal of Network and Computer Applications*, 67, 53–74. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.015>
- Abusale, W. A., Ilhan, H., & Karabulut, M. A. (2023). Performance Analysis of Spectral Amplitude Coding Methods in Fiber Optical Communication System. *Wireless Personal Communications*. <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10756-y>
- Acakpovi, A., & Matoumona, P. L. M. V. (2012). Comparative analysis of plastic optical fiber and glass optical fiber for home networks. *2012 IEEE 4th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*, 154–157. <https://doi.org/10.1109/ICASTech.2012.6381084>
- Agrawal, G. P. (2022). *Fiber-optic communication systems* (Fifth edition). Wiley.
- Amiri, I. S., Azzuhri, S. R. B., Jalil, M. A., Hairi, H. M., Ali, J., Bunruangses, M., & Yupapin, P. (2018). Introduction to Photonics: Principles and the Most Recent Applications of Microstructures. *Micromachines*, 9(9), 452. <https://doi.org/10.3390/mi9090452>
- Arockia Bazil Raj, A., & Arputha Vijaya Selvi, J. (2015). Comparison of Different Models for Ground-Level Atmospheric Attenuation Prediction with New Models According to Local Weather Data for FSO Applications. *Journal of Optical Communications*, 36(2). <https://doi.org/10.1515/joc-2014-0054>
- Arya, V., Kumari, M., & Rana, A. K. (2024). Historical development of passive optical network (PON): A review. *Journal of Optical Communications*. <https://doi.org/10.1515/joc-2024-0177>
- Ayesta, I., Zubia, J., Arrue, J., Illarramendi, M., & Azkune, M. (2017). Characterization of Chromatic Dispersion and Refractive Index of Polymer Optical Fibers. *Polymers*, 9(12), 730. <https://doi.org/10.3390/polym9120730>

- Beas, J., Castanon, G., Aldaya, I., Aragon-Zavala, A., & Campuzano, G. (2013). Millimeter-Wave Frequency Radio over Fiber Systems: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *15*(4), 1593–1619. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.013013.00135>
- Beshley, M., Veselý, P., Pryslupskyi, A., Beshley, H., Kyryk, M., Romanchuk, V., & Kahalo, I. (2020). Customer-Oriented Quality of Service Management Method for the Future Intent-Based Networking. *Applied Sciences*, *10*(22), 8223. <https://doi.org/10.3390/app10228223>
- Bosternak, Z., & Roka, R. (2017). Approach of the T-CONT Allocation to Increase the Bandwidth in Passive Optical Networks. *Radioengineering*, *26*(4), 954–960. <https://doi.org/10.13164/re.2017.0954>
- Cempaka, P. S. (2020). Radio in The Midst of Technological Development and New Media: Case Study of Delta FM Broadcasting Segment ‘Siaran Lagu Cinta’. *MEDIASI*, *1*(1), 41–53. <https://doi.org/10.46961/mediasi.v1i1.400>
- Chee, K.-W. A. (2023). II–VI Compound Semiconductor Avalanche Photodiodes for the Infrared Spectral Region: Opportunities and Challenges. En G. Korotcenkov (Ed.), *Handbook of II-VI Semiconductor-Based Sensors and Radiation Detectors: Volume 2, Photodetectors* (pp. 53–77). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20510-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20510-1_3)
- Chen, Q., Zhang, X., Sharawi, M. S., & Kashyap, R. (2024). Advances in High–Speed, High–Power Photodiodes: From Fundamentals to Applications. *Applied Sciences*, *14*(8), 3410. <https://doi.org/10.3390/app14083410>
- Chen, X., Hurley, J. E., Stone, J. S., & Li, M.-J. (2023). Chromatic Dispersion Measurements of Single-Mode Fibers, Polarization-Maintaining Fibers, and Few-Mode Fibers Using a Frequency Domain Method. *Photonics*, *10*(2), 215. <https://doi.org/10.3390/photonics10020215>
- Diary, B. (2023, febrero 15). *Optical Line Terminal(OLT), its features and installation guide*. Ee-Diary. <https://www.ee-diary.com/2023/02/optical-line-terminalolt-its-features.html>

- Dias, L. P., Dos Santos, A. F., Pereira, H. A., De Andrade Almeida, R. C., Giozza, W. F., De Sousa, R. T., & Assis, K. D. R. (2022). Evolutionary Strategy for Practical Design of Passive Optical Networks. *Photonics*, 9(5), 278. <https://doi.org/10.3390/photonics9050278>
- Ding, M., Fan, D., Wang, W., Luo, Y., & Peng, G.-D. (2019). Basics of Optical Fiber Measurements. En G.-D. Peng (Ed.), *Handbook of Optical Fibers* (pp. 1099–1137). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7087-7\\_57](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7087-7_57)
- E. Abejide, A., R. Kota, M., Pandey, S., Aboderin, O., Pinho, C., Lima, M., & Teixeira, A. (2022). Direct and External Hybrid Modulation Approaches for Access Networks. En I. A. Alimi, O. Aboderin, N. J. Muga, & A. L. Teixeira (Eds.), *Network-on-Chip—Architecture, Optimization, and Design Explorations*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96085>
- Ellis, A. D., McCarthy, M. E., Al Khateeb, M. A. Z., Sorokina, M., & Doran, N. J. (2017). Performance limits in optical communications due to fiber nonlinearity. *Advances in Optics and Photonics*, 9(3), 429. <https://doi.org/10.1364/AOP.9.000429>
- Frishman, A., & Malka, D. (2023). An Optical 1×4 Power Splitter Based on Silicon–Nitride MMI Using Strip Waveguide Structures. *Nanomaterials*, 13(14), 2077. <https://doi.org/10.3390/nano13142077>
- Gagnaire, M., & Stojanovski, S. (2002). An Approach for Traffic Management Over G.983 ATM-based Passive Optical Networks. En D. Kouvatsos (Ed.), *Performance Evaluation and Applications of ATM Networks* (Vol. 557, pp. 287–307). Kluwer Academic Publishers. [https://doi.org/10.1007/0-306-47023-3\\_12](https://doi.org/10.1007/0-306-47023-3_12)
- Gangwar, R. K., Kumari, S., Pathak, A. K., Gutlapalli, S. D., & Meena, M. C. (2023). Optical Fiber Based Temperature Sensors: A Review. *Optics*, 4(1), 171–197. <https://doi.org/10.3390/opt4010013>
- Ghoniemy, S. (2018). Enhanced Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Triple-Play Broadband Service Delivery in FTTx Networks. *2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*, 419–426. <https://doi.org/10.1109/COMAPP.2018.8460423>

- Gu, R., Wang, G., Li, Z., & Ji, Y. (2020). Energy and Transmission Efficiency Enhancement in Passive Optical Network Enabled Reconfigurable Fronthaul Supporting Smart Homes. *Sensors*, 20(21), 6245. <https://doi.org/10.3390/s20216245>
- Harrison, M. T., Kershaw, S. V., Burt, M. G., Rogach, A. L., Kornowski, A., Eychmüller, A., & Weller, H. (2000). Colloidal nanocrystals for telecommunications. Complete coverage of the low-loss fiber windows by mercury telluride quantum dot. *Pure and Applied Chemistry*, 72(1–2), 295–307. <https://doi.org/10.1351/pac200072010295>
- Horvath, T., Munster, P., & Bao, N.-H. (2020). Lasers in Passive Optical Networks and the Activation Process of an End Unit: A Tutorial. *Electronics*, 9(7), 1114. <https://doi.org/10.3390/electronics9071114>
- Horvath, T., Munster, P., Vojtech, J., & Havlis, O. (2017). Modified GIANT Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm of NG-PON. *Journal of Communications Software and Systems*, 13(1), 15. <https://doi.org/10.24138/jcomss.v13i1.243>
- Horvath, T., Radil, J., Munster, P., & Bao, N.-H. (2020). Optical Amplifiers for Access and Passive Optical Networks: A Tutorial. *Applied Sciences*, 10(17), 5912. <https://doi.org/10.3390/app10175912>
- Islam, M., Ahmed, S., & Islam, A. (2019). Performance Analysis of 2.5 Gbps PIN and APD Photodiodes to Use in Free Space Optical Communication Link. *International Journal of Thin Films Science and Technology*, 8, 53–58. <https://doi.org/10.18576/ijtfst/080204>
- Jung, J.-Y., Choi, D.-J., & Im, H.-J. (2020). Switched Digital Video Using Convergence Transmission of Broadcasting and Communication on Cable TV Network. *2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-Taiwan)*, 1–2. <https://doi.org/10.1109/ICCE-Taiwan49838.2020.9258283>
- Kim, J., Bang, H., & Park, C.-S. (2012). Design and Performance Analysis of Passively Extended XG-PON With CWDM Upstream. *Journal of Lightwave Technology*, 30(11), 1677–1684. <https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2182672>



- Klaus, W., Winzer, P. J., & Nakajima, K. (2022). The Role of Parallelism in the Evolution of Optical Fiber Communication Systems. *Proceedings of the IEEE*, 110(11), 1619–1654. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2022.3207920>
- Kumari, M., Sharma, R., & Sheetal, A. (2021). Performance analysis of full-duplex 4×10Gbps TWDM- PON using QAM-OFDM modulation. *Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications*, 15(3–4), 133–147.
- Kwame, A. J., Kwaku, A. J., & Hongyun, T. (2019). Service Quality and Consumer Choice of Their Preferred Telecommunications Service Provider in Ghana. *European Journal of Business and Management Research*, 4(6). <https://doi.org/10.24018/ejbmr.2019.4.6.126>
- Lionis, A., Sklavounos, A., Stassinakis, A., Cohn, K., Tsigopoulos, A., Peppas, K., Aidinis, K., & Nistazakis, H. (2023). Experimental Machine Learning Approach for Optical Turbulence and FSO Outage Performance Modeling. *Electronics*, 12(3), 506. <https://doi.org/10.3390/electronics12030506>
- Majumdar, A. K. (2015). Fundamentals of Free-Space Optical (FSO) Communication System. En A. K. Majumdar, *Advanced Free Space Optics (FSO)* (Vol. 186, pp. 1–20). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0918-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0918-6_1)
- Matsuura, M. (2021). Recent Advancement in Power-over-Fiber Technologies. *Photonics*, 8(8), 335. <https://doi.org/10.3390/photonics8080335>
- Miah, K., & Potter, D. (2017). A Review of Hybrid Fiber-Optic Distributed Simultaneous Vibration and Temperature Sensing Technology and Its Geophysical Applications. *Sensors*, 17(11), 2511. <https://doi.org/10.3390/s17112511>
- Miladić-Tešić, S., Marković, G., Peraković, D., & Cvitić, I. (2022). A review of optical networking technologies supporting 5G communication infrastructure. *Wireless Networks*, 28(1), 459–467. <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02582-6>
- Mondal, P. (2020). *Experimental Investigation of Intermodal Nonlinear Effects in Few-Mode Fibers and Its Application* [Indian Institute of Technology Kharagpur]. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.31683.02085>

- Mullerova, J., Korcek, D., & Dado, M. (2012). On wavelength blocking for XG-PON coexistence with GPON and WDM-PON networks. *2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2012.6253748>
- Naz, F., Alshaabani, A., Rudnák, I., & Magda, R. (2021). Role of Service Quality in Improving Customer Loyalty towards Telecom Companies in Hungary during the COVID-19 Pandemic. *Economies*, 9(4), 200. <https://doi.org/10.3390/economies9040200>
- Pina, V., Torres, L., & Bachiller, P. (2014). Service quality in utility industries: The European telecommunications sector. *Managing Service Quality: An International Journal*, 24(1), 2–22. <https://doi.org/10.1108/MSQ-03-2013-0034>
- Pires, J. J. O. (2024). On the Capacity of Optical Backbone Networks. *Network*, 4(1), 114–132. <https://doi.org/10.3390/network4010006>
- Raj, A. A. B., Krishnan, P., Darusalam, U., Kaddoum, G., Ghassemlooy, Z., Abadi, M. M., Majumdar, A. K., & Ijaz, M. (2023). A Review–Unguided Optical Communications: Developments, Technology Evolution, and Challenges. *Electronics*, 12(8), 1922. <https://doi.org/10.3390/electronics12081922>
- Rajeswari, S., Srinivasulu, Y., & Thiyagarajan, S. (2016). Service Quality in the Telecommunication Industry: Analysis with Special Reference to DSL Services. *Indian Journal of Marketing*, 46(2), 7. <https://doi.org/10.17010/ijom/2016/v46/i2/87245>
- Ramaswami, R., Sivarajan, K. N., & Sasaki, G. H. (2010). WDM Network Elements. In *Optical Networks* (pp. 433–468). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374092-2.50015-1>
- Ramli, A., Zulkifli, N., Usman, A., & Idrus, S. M. (2018). A Development of Optical Network Unit Power Consumption Model considering traffic load effect. *Jurnal Teknologi*, 80(4). <https://doi.org/10.11113/jt.v80.10247>

- Ricciardi, S., Santos-Boada, G., Careglio, D., & Domingo-Pascual, J. (2012). GPON and EP2P: A techno-economic study. *2012 17th European Conference on Networks and Optical Communications*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/NOC.2012.6249954>
- Richer. (2018, agosto 31). Analysis of 10G GPON Technology -PON Technology-GPON Network. *Richerlink*. <https://www.richerlink.com/analysis-of-10g-gpon-technology/>
- Sanchez, M., Uruena, M., De La Oliva, A., Hernandez, J., & Bernardos, C. (2013). On providing mobility management in WOBANs: Integration with PMIPv6 and MIH. *IEEE Communications Magazine*, *51*(10), 172–181. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6619581>
- Sendin, A., Matanza, J., & Ferrús, R. (2021). *Smart Grid Telecommunications: Fundamentals and Technologies in the 5G Era* (1a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119755401>
- Seo, H., & Kim, G. (2020). DASH Live Broadcast Traffic Model: A Time-Bound Delay Model for IP-Based Digital Terrestrial Broadcasting Systems. *Applied Sciences*, *11*(1), 247. <https://doi.org/10.3390/app11010247>
- Seo, S.-Y., Park, J.-H., Yun, H.-D., Kim, K.-S., Lee, G.-C., & Hong, S. (2021). Strain Transfer of Fiber Bragg Grating Sensor Externally Bonded to FRP Strip for Structural Monitoring after Reinforcement. *Materials*, *14*(16), 4382. <https://doi.org/10.3390/ma14164382>
- Shaukat, S., Ibrahim, U. I., & Nazir, S. (2011). Monte Carlo Analysis of Broadband Passive Optical Networks. *World Applied Sciences Journal*, *12*(8), 1156–1164.
- Simović, A., Savović, S., Drljača, B., Djordjevich, A., & Min, R. (2021). Theoretical Investigation of the Influence of Wavelength on the Bandwidth in Multimode W-Type Plastic Optical Fibers with Graded-Index Core Distribution. *Polymers*, *13*(22), 3973. <https://doi.org/10.3390/polym13223973>
- Torres-Ferrera, P., Effenberger, F., Faruk, M. S., Savory, S. J., & Gaudino, R. (2022). Overview of high-speed TDM-PON beyond 50 Gbps per wavelength using digital

signal processing [Invited Tutorial]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 14(12), 982. <https://doi.org/10.1364/JOCN.468920>

Uzunidis, D., Logothetis, M., Stavdas, A., Hillerkuss, D., & Tomkos, I. (2022). Fifty Years of Fixed Optical Networks Evolution: A Survey of Architectural and Technological Developments in a Layered Approach. *Telecom*, 3(4), 619–674. <https://doi.org/10.3390/telecom3040035>

Wang, Z., Zhang, W., Liu, X., Li, M., Lang, X., Singh, R., Marques, C., Zhang, B., & Kumar, S. (2022). Novel Optical Fiber-Based Structures for Plasmonics Sensors. *Biosensors*, 12(11), 1016. <https://doi.org/10.3390/bios12111016>

Wu, W., Yu, H., Wang, C., & Li, Z. (2023). Efficient Mode Conversion from a Standard Single-Mode Fiber to a Subwavelength-Diameter Microfiber. *Nanomaterials*, 13(23), 3003. <https://doi.org/10.3390/nano13233003>

Zhang, H., Wang, Z., & Wang, Q. (2023). Application and development prospect of transmission technology in communication engineering. *International Journal of Computing and Information Technology*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.56028/ijcit.1.1.1.2023>