



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

Análisis comparativo del desempeño de las arquitecturas GPON y R-CORD mediante simulación, considerando parámetros de latencia, jitter, throughput y pérdida de paquetes.

AUTOR:

Palacios Chafla, Pablo José

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

Mgs. Peñafiel Olivo, Kety Jenny

Guayaquil, Ecuador

3 de marzo del 2026



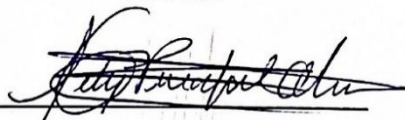
**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por el Sr. **Palacios Chafra, Pablo José**, como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR



Mgs. Peñañiel Olivo, Kety Jenny

DIRECTOR DE CARRERA



Ms. C. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo. Ph. D.

Guayaquil, a los 03 días del mes de marzo del año 2026



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Palacios Chafla, Pablo José**

DECLARO QUE:

El Trabajo de integración curricular, “**Análisis comparativo del desempeño de las arquitecturas GPON y R-CORD mediante simulación, considerando parámetros de latencia, jitter, throughput y perdida de paquetes.**” previo a la obtención del título de **Ingeniero 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.

Guayaquil, a los 03 días del mes de marzo del año 2026

EL AUTOR

PALACIOS CHAFLA, PABLO JOSÉ



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

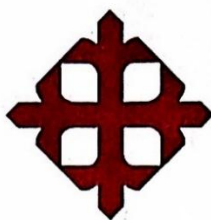
Yo, **Palacios Chafla, Pablo José**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la publicación en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Análisis comparativo del desempeño de las arquitecturas GPON y R-CORD mediante simulación, considerando parámetros de latencia, jitter, throughput y pérdida de paquetes.**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 03 días del mes de marzo del año 2026

EL AUTOR

PALACIOS CHAFLA, PABLO JOSÉ




**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR
INFORME SOFTWARE ANTIPLAGIO

REPORTE DE COMPILATIO

 **CERTIFICADO DE ANÁLISIS**
magister

TIC_PabloJ_PalaciosC (2)

< 1%
Textos sospechosos


0% Similitudes
0% similitudes entre conchas
0% entre las fuentes mencionadas
6% Idiomas no reconocidos (ignorado)
6% Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)

Nombre del documento: TIC_PabloJ_PalaciosC (2).docx
ID del documento: fd1c7e63b65678281aa1064ab2655cf8a7c0a4aa
Tamaño del documento original: 4.39 MB

Depositante: Ricardo Xavier Uvilla Gonzalez
Fecha de depósito: 20/2/2026
Tipo de carga: Interface
fecha de fin de análisis: 20/2/2026

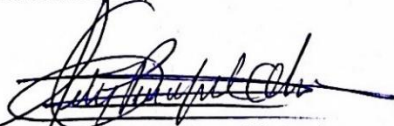
Número de palabras: 15.545
Número de caracteres: 106.924

Ubicación de las similitudes en el documento:



Reporte Compilatio del trabajo de integración curricular de la Carrera Telecomunicaciones denominado: "Análisis comparativo del desempeño de las arquitecturas GPON y R-CORD mediante simulación, considerando parámetros de latencia, jitter, throughput y perdida de paquetes.", del estudiante Palacios Chafra, Pablo José se encuentra al 1% de coincidencias.

Atentamente,


Mgs. Peñafoel Olivo, Kety Jenny
DOCENTE-TUTOR

DEDICATORIA

Agradezco profundamente a mi familia por su respaldo incondicional, especialmente a mi papá Edwin Fernando Palacios Meléndez, quien no cesa de brindar su apoyo y tiempo para que mis hermanos y yo logremos nuestros sueños.

EL AUTOR



PALACIOS CHAFLA, PABLO JOSÉ

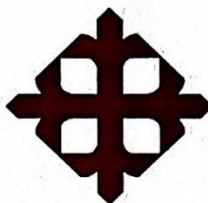
AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Ingeniera Mgs. Peñafiel Olivo, Kety Jenny por su guía, paciencia y flexibilidad durante el desarrollo de esta tesis.

EL AUTOR




PALACIOS CHAFLA, PABLO JOSÉ



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

MS. C. BOHÓRQUEZ ESCOBAR, CELSO BAYARDO. PH. D.
DIRECTOR DE CARRERA

f. 

Ms. C. UBILLA GONZALEZ, RICARDO XAVIER
COORDINADOR DEL ÁREA

f. 

Ms.C. NINO TELLO VEGA URETA
OPONENTE

Índice General

Índice de Figuras	XIII
Resumen	XV
Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación	2
1.1. Introducción.	2
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Definición del Problema.....	4
1.4. Justificación del Problema.	5
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.	5
1.5.1. Objetivo General.	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5
1.6. Hipótesis.....	6
1.7. Metodología de Investigación.	6
Capítulo 2: Fundamentación Teórica	8
2.1. Introducción al acceso óptico FTTH	8
2.2. Definición de FTTH.....	9
2.2.1. Arquitectura FTTx	9
2.3. Tipos de FTTH.	11
2.3.1. Point To Point (P2P)	11
2.3.2. Arquitectura de P2P.....	12
2.3.3. Point to Multipoint (P2MP)	12
2.3.4. Arquitectura P2M/PON.	13
2.4. Capas de FTTH.	13
2.5. Topología PON	15
2.6. Principios de multiplexación en PON (TDM-PON)	15
2.6.1. TDM PON.....	15
2.6.2. WDM PON.....	16

2.6.3.	OFDM PON	17
2.7.	Evolución de las tecnologías PON.....	18
2.7.1.	Primera generación de sistemas PON (APON / BPON).....	18
2.7.2.	PON basada en Ethernet (EPON / GEAPON).....	18
2.7.3.	PON de próxima generación.....	19
2.8.	GPON	20
2.8.1.	Definición de GPON.....	20
2.8.2.	Arquitectura GPON	21
2.8.2.1.	OLT	21
2.8.2.2.	ODN.....	22
2.8.2.3.	ONT	23
2.8.3.	Principios de acceso y transmisión	23
2.8.4.	Limitaciones y motivación para la evolución arquitectónica... 24	
2.9.	R-CORD (Residential Central Office Re-architected as a Datacenter)	25
2.9.1.	Definición de R-CORD.....	25
2.9.2.	Principios de diseño de R-CORD.....	27
2.9.3.	Componentes R-CORD.....	28
2.9.4.	Infraestructura R-CORD	29
2.9.5.	Modelo de control y gestión	30
2.9.6.	Flexibilidad del servicio y división de la red	30
2.9.7.	Posicionamiento de R-CORD en la evolución de las redes de acceso	31
	Capítulo 3: Metodología del sistema propuesto.....	33
3.1.	Enfoque de la investigación	33
3.2.	Tipo y diseño de investigación	33
3.3.	Variables de estudio	34
3.3.1.	Variable independiente.....	34
3.3.2.	Variables dependientes.....	34

3.4.	Técnicas de recopilación de información	34
3.5.	Herramientas de investigación.....	35
3.6.	Población y muestra	35
3.7.	Procedimiento metodológico, análisis de datos y validez	36
Capítulo 4: Diseño, implementación y resultados.....		37
4.1.	Descripción general del sistema de simulación	37
4.2.	Métricas de evaluación de desempeño	37
4.2.1.	Latencia.....	37
4.2.2.	Jitter.....	38
4.2.3.	Throughput	38
4.2.4.	Pérdida de paquetes.....	38
4.2.5.	Métricas complementarias.....	38
4.3.	Definición de escenarios de simulación y diseño experimental..	39
4.3.1.	Principios de comparabilidad entre GPON y R-CORD	39
4.3.2.	Escenario E1: Tráfico residencial base (operación normal)	39
4.3.3.	Escenario E2: Congestión y estrés (saturación upstream).....	40
4.3.4.	Escenario E3: Variación temporal de carga (hora pico)	41
4.3.5.	Escenario E4: QoS por clases (protección de VoIP/Video)	42
4.3.6.	Escenario E5: Escalabilidad (N ONTs creciente).....	43
4.4.	Implementación y ejecución de la simulación de escenarios	44
4.4.1.	Entorno de desarrollo y herramientas utilizadas.....	44
4.4.2.	Modelo de red y supuestos de simulación	45
4.4.3.	Implementación de las arquitecturas simuladas	46
4.4.3.1.	Implementación del modelo GPON.....	46
4.4.3.2.	Implementación del modelo R-CORD.....	47
4.4.4.	Ejecución de los escenarios de simulación	47
4.4.5.	Generación de métricas y exportación de resultados	47
4.5.	Análisis y discusión de los resultados obtenidos	48

4.5.1.	Análisis del Escenario E1: Tráfico residencial base	48
4.5.2.	Análisis del Escenario E2: Congestión y estrés de la red	50
4.5.3.	Análisis del Escenario E3: Variación temporal de carga (hora pico).....	53
4.5.4.	Análisis del Escenario E4: QoS por clases de servicio	54
4.5.5.	Análisis del Escenario E5: Escalabilidad del sistema.....	55
4.5.6.	Conclusión general.....	57
Conclusiones.....		58
Recomendaciones.....		59
Bibliografía.....		60

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Arquitectura de una red FTTH	8
Figura 2. 2: Arquitectura de la familia FTTx	10
Figura 2. 3: Red P2P	11
Figura 2. 4: Una red punto a punto en FTTH	12
Figura 2. 5: Red P2MP	13
Figura 2. 6: Capas FTTH	14
Figura 2. 7: Topologías PON	15
Figura 2. 8: Multiplexación TDM	16
Figura 2. 9: Multiplexación WDM	16
Figura 2. 10: Multiplexación OFDM.....	17
Figura 2. 11: Red GPON.....	20
Figura 2. 12: OLT.....	22
Figura 2. 13: ODN.....	22
Figura 2. 14: ONT	23

Capítulo 4

Figura 4. 1: Modelos de simulación del sistema GPON y R-CORD.	46
Figura 4. 2: Serie temporal de latencia para el escenario de tráfico residencial base correspondiente al escenario de simulación 1.....	48
Figura 4. 3: Evolución de cola promedio (upstream) correspondiente al escenario de simulación 2.	49
Figura 4. 4: Latencia p95 frente a la carga upstream (%) para 32 ONTs correspondiente al escenario de simulación 2.	51
Figura 4. 5: Latencia p95 frente a la carga upstream (%) para 64 ONTs correspondiente al escenario de simulación 2.	51
Figura 4. 6: Pérdida frente a la carga upstream (%) para 32 ONTs correspondiente al escenario de simulación 2.	52
Figura 4. 7: Pérdida frente a la carga upstream (%) para 64 ONTs correspondiente al escenario de simulación 2.	52

Figura 4. 8: Latencia p95 ante variación de carga upstream (hora pico) para GPON y R-RCORD correspondiente al escenario de simulación 3.....	53
Figura 4. 9: Utilización upstream (%) para GPON y R-RCORD correspondiente al escenario de simulación 3.....	54
Figura 4. 10: Variación temporal de la latencia p95 bajo carga 110%.	54
Figura 4. 11: Pérdida promedio (%) por clase (QoS) bajo carga 110%.	55
Figura 4. 12: Índice de jain (equidad) frente número de ONTs.....	56
Figura 4. 13: Latencia p95 frente escalabilidad (número de ONTs).	56

Resumen

El creciente aumento de la demanda de servicios digitales de alta velocidad ha impulsado a las redes de acceso óptico a ser más flexibles, escalables y eficientes. En este contexto, esta investigación lleva a cabo un análisis comparativo del rendimiento de las arquitecturas tradicionales GPON y R-CORD (oficina central residencial rediseñada como centro de datos) en entornos FTTH, utilizando una metodología de simulación computacional. Esta tesis emplea una metodología cuantitativa centrada en el modelado de enlaces ascendentes, identificados como el principal punto de congestión en las redes PON. Para ello, creamos un entorno de simulación en Python que recrea situaciones reales de tráfico multiclase (VoIP, vídeo y mejor esfuerzo) en las mismas condiciones controladas para ambas arquitecturas. Analizamos métricas básicas de calidad de servicio (QoS) como la latencia media y los percentiles (p95, p99), la fluctuación, el rendimiento, la pérdida de paquetes, la utilización del enlace, la longitud de la cola y el índice de equidad de Jain. Este método protege mejor el tráfico sensible y minimiza la degradación del rendimiento. Los resultados respaldan la hipótesis, ya que demuestran que la virtualización y la desagregación de R-CORD son una forma técnicamente sólida de modernizar las redes FTTH, dotándolas de una mayor flexibilidad operativa y una mejor calidad de servicio que las arquitecturas GPON tradicionales.

Palabras claves: FTTH, GPON, R-CORD, SDN, NFV, QoS, latencia, jitter, simulación de redes

Abstract

Optical access networks have had to become more flexible, adaptable, and efficient because more and more users are demanding high-speed digital services. Given this context, this research conducts a comparative analysis of the performance of classic GPON and R-CORD (residential central office reconfigured as a data center) designs in FTTH environments, using a computational simulation methodology. This thesis employs a quantitative methodology focused on modeling uplinks, identified as the main point of congestion in PON networks. To do this, we created a simulation environment in Python that recreates real-world multi-class traffic situations (VoIP, video, and best effort) under the same controlled conditions for both architectures. We analyze basic quality of service (QoS) metrics such as average latency and percentiles (p95, p99), jitter, throughput, packet loss, link utilization, queue length, and Jain's fairness index. This shields critical traffic better and prevents performance from getting worse. The results support the hypothesis, as they demonstrate that R-CORD virtualization and disaggregation are a technically sound way to modernize FTTH networks, providing them with greater operational flexibility and better quality of service than traditional GPON architectures.

Keywords: FTTH, GPON, R-CORD, SDN, NFV, QoS, latency, jitter, network simulation.

Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación

1.1. Introducción.

En los últimos años, la exigencia de conectividad de alta velocidad y servicios digitales han permitido el despliegue de infraestructuras ópticas más eficaces y escalables (Xie & Zhang, 2022). En los escenarios desarrollados, las redes de fibra hasta el hogar (FTTH) se reafirmadas como la tecnología preferida para proporcionar acceso de banda ancha con gran estabilidad y capacidad. En decir, que la tecnología FTTH puede sostener aplicaciones cada vez más demandantes, tales como, educación en línea, telemedicina, video en 4K, o Internet de las Cosas (IoT).

Entre las tecnologías de redes ópticas pasivas, la red óptica pasiva Gigabit (GPON) ha sido una solución rentable para la fibra hasta el hogar. La tecnología GPON se ha ido extendiendo por todo el continente americano, debido a su compatibilidad con la infraestructura ya existente, la cada vez mayor demanda de servicios y la reducción de costos al momento de implementar la red (Aguiar et al., 2023). Aun así, el aumento de la demanda de servicios y la necesidad de una gestión más dinámica del tráfico de red están dejando al descubierto las limitaciones fundamentales de los sistemas tradicionales basados en hardware, en particular en términos de flexibilidad, escalabilidad y control de recursos.

En vista de lo anterior, han surgido nuevas arquitecturas de acceso óptico compatibles con la virtualización y la automatización. Estas plataformas aprovechan las redes definidas por software (SDN) y la virtualización de funciones de red (NFV) a fin de transformar las antiguas infraestructuras de red en entornos programables y modificables(Simon et al., 2022). Dichas características permiten una administración más inteligente de los recursos y una provisión de servicios más eficiente para los abonados.

En consecuencia, con el fin de analizar cómo afectan la QoS y el desempeño sobre la percepción de los clientes, es fundamental realizar una evaluación entre las configuraciones R-CORD y GPON FTTH. Esta

evaluación no solamente demuestra técnicamente la viabilidad sobre arquitecturas virtualizadas, sino que también fortalece el desarrollo tecnológico y configuración de las infraestructuras de acceso óptico en el país.

1.2. Antecedentes

El despliegue de redes de acceso óptico ha visto una significativa mejoría durante las dos últimas décadas, propiciado por la necesidad de proveer de mayores velocidades de transmisión y una calidad de servicio superior para abonados en sectores residenciales y empresariales. Las arquitecturas Passive Optical Network (PON) nacieron de la visión de alejarse de los costosos y energéticamente intensivos sistemas de cobre tradicionales mediante el uso compartido de la infraestructura óptica (Arya et al., 2025)

Entre las variantes más utilizadas de las arquitecturas PON se encuentra Gigabit Passive Optical Network (GPON), estandarizada por la ITU-T G.984, la cual ofrece velocidades de hasta 2.5 Gbps en sentido descendente (downstream) y 1.25 Gbps en sentido ascendente (upstream). Diversos estudios han demostrado su efectividad en despliegues Fiber-to-the-Home (FTTH) debido al balance que ofrecen entre rendimiento, cobertura y costo (Abdellaoui et al., 2021). No obstante, la demanda de servicios digitales como los dispositivos IoT, cloud computing y streaming de video ha mostrado que existen limitaciones en la capacidad para gestionar dinámicamente el tráfico y escalar infraestructuras que se basan solo en hardware (Kamarudin et al., 2023)

Frente a esto, investigaciones recientes han dirigido sus esfuerzos hacia redes ópticas virtualizadas, capaces de ofrecer más flexibilidad y procesos automatizados. En este marco, surge R-CORD (Residential Central Office Re-architected as a Datacenter), una arquitectura que combina Software-Defined Networking (SDN) y Network Function Virtualization (NFV) a fin de convertir las centrales ópticas en entornos programables y escalables (T. Aditya et al., 2023). Dicho enfoque ha demostrado una mejor utilización y colocación de recursos, reducción de costos operativos y simplificar la provisión de servicios

La mayoría de los proveedores continúan utilizando a GPON como su tecnología estándar para sus servicios, mientras que en América latina las iniciativas para modernizar las redes FTTH aún se encuentran en desarrollo. Sin embargo, entidades como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) comunican la necesidad de desarrollar estrategias más flexibles y sustentables con el fin de ampliar el alcance y mejorar la calidad de los servicios (Oliver et al., 2021). Consecuentemente, resulta crucial un análisis comparativo entre GPON y R-CORD, que permita generar evidencias de bases técnicas sobre su desempeño, calidad de servicio, orientado a ser material de apoyo para decisiones futuras de inversión y modernización en el contexto ecuatoriano.

1.3. Definición del Problema.

La tecnología GPON se utiliza ampliamente en redes FTTH en zonas residenciales (Ali et al., 2021). Pese a ello, su infraestructura presenta limitaciones derivadas principalmente de su dependencia del hardware, lo que restringe la gestión, la escalabilidad y la eficiencia ante el aumento de la demanda de servicios demandantes de un ancho de banda mayor, como lo es el streaming, la computación en la nube, educación en línea o el internet de las cosas (IoT).

El hardware estándar de los equipos FTTH basados en GPON se limita en cuanto a la poca flexibilidad de recursos de red y mayores costos operativos para los proveedores de servicio (Asgarirad & Jahromi, 2020), quienes se encuentran ante el desafío de mantener un excelente servicio a lo largo de todos los abonados sin cambiar significativamente su infraestructura. Ante este escenario, nace la necesidad de experimentar con alternativas que permitan un acceso óptico más eficiente, programable y automatizado. En este contexto, se presenta una arquitectura virtualizada como lo es R-CORD y su tecnología basada en redes definidas por software (SDN) y virtualización de funciones de red.

En este trabajo de integración curricular se plantea hacer una comparación simulada con el fin de establecer cuál arquitectura da mejor rendimiento y calidad de servicio en situaciones reales.

1.4. Justificación del Problema.

Adaptarse a redes o arquitecturas modernas con el fin de optimizar la flexibilidad, la calidad y la sostenibilidad del servicio es un objetivo clave para los proveedores de servicios de Internet (ISP) (Jiang et al., 2023). Pero la adaptación a tecnologías como R-CORD requiere de grandes inversiones y transformaciones estructurales. Por lo tanto, simular y comparar el rendimiento de una red FTTH basada en R-CORD con una red GPON es una manera económica y objetiva de medir su rendimiento y alcance antes de su despliegue (Ulloa et al., 2020).

Esta investigación pretende determinar el efecto tecnológico y operativo del proceso de virtualización sobre la conectividad óptica, con el fin de brindar datos verificables para las actualizaciones de enlaces residenciales. Además, el uso del software de simulación en Python utilizando el IDE, Visual Studio Code, con lo cual se obtendrán las métricas de rendimiento, tales como, rendimiento, latencia, eficiencia energética y escalabilidad, el mismo que refuerza la base experimental y científica del trabajo.

1.5. Objetivos del Problema de Investigación.

1.5.1. Objetivo General.

Analizar comparativamente el desempeño de las arquitecturas de red de acceso GPON y R-CORD a través de simulaciones considerando parámetros de medición como el desempeño de red, latencia, jitter, throughput y pérdida de paquetes, para el propósito de conocer su viabilidad para futuras redes de acceso óptico.

1.5.2. Objetivos Específicos.

1. Describir los fundamentos teóricos de las redes de acceso óptico, en la que se incluyen tanto arquitecturas PON como desagregadas, así

como los parámetros de rendimiento relevantes para la simulación de redes.

2. Realizar el modelado y simulación de una red de acceso basada en GPON, analizando su comportamiento en función de, latencia, jitter, rendimiento y pérdida de paquetes bajo diferentes condiciones de tráfico.
3. Realizar el modelado y simulación de una red de acceso basada en R-CORD, considerando sus componentes desagregados y virtualizados, analizando los mismos parámetros de rendimiento en condiciones similares.
4. Analizar el impacto de la integración de tecnologías SDN/NFV en la arquitectura R-CORD sobre el control de tráfico, la asignación de recursos y el rendimiento de la red, en comparación con la arquitectura GPON, utilizando los resultados obtenidos que permita la identificación de diferencias, ventajas y desventajas bajo diversas condiciones de tráfico.

1.6. Hipótesis.

La arquitectura FTTH sobre R-CORD posibilitará mejorar el rendimiento y la calidad del servicio en contraste con las redes GPON convencionales, al tener una gestión más centralizada, dinámica y de menor latencia mientras se mantiene una mayor eficiencia. Estas mejoras en rendimiento se pondrán en evidencia con simulaciones en Python, en donde se medirán métricas de rendimiento, eficiencia energética y escalabilidad.

1.7. Metodología de Investigación.

El enfoque de la investigación es cuantitativo dado que se centra en la recolección y análisis de datos derivados a partir de simulaciones computarizadas de redes FTTH GPON y R-CORD. Este método permite medir de forma clara las diferencias en rendimiento y calidad de servicio (QoS) entre las dos arquitecturas. Las técnicas usadas para recopilar datos simulan escenarios con ambas arquitecturas en las mismas condiciones, utilizando Python para medir rendimiento, latencia, jitter, eficiencia energética y escalabilidad. El muestreo de datos definirá casos que representativos de la

red, teniendo en cuenta la distancia, los usuarios y la carga del tráfico. El análisis de datos será comparativo, usando métodos estadísticos para interpretar los resultados y determinar qué arquitectura tiene el mejor desempeño.

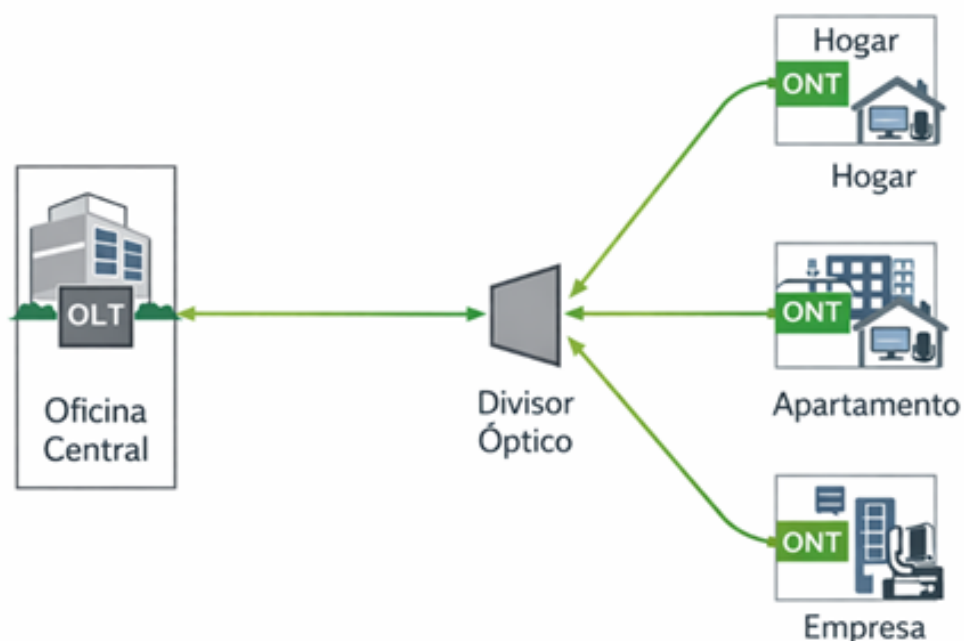
Capítulo 2: Fundamentación Teórica

2.1. Introducción al acceso óptico FTTH

Durante la última década, el flujo de datos global ha experimentado un crecimiento exponencial impulsado por nuevos inventos en computación en la nube, transmisión de vídeo, telemedicina, aprendizaje a distancia e Internet de las cosas. Como resultado de estos cambios repentinos en los patrones de consumo y del aumento de la demanda de mayor ancho de banda, fiabilidad y baja latencia, expusieron las limitaciones de las tecnologías de acceso basadas en cobres.

Bajo esta noción, el crecimiento exponencial de datos impulsó a los proveedores dejar a un lado décadas de exclusividad que tuvieron las troncales y redes de transporte sobre la fibra (Shtaif et al., 2022), tomando así la decisión de extenderla hasta la última milla y progresivamente reemplazando el cobre en el hogar. Como se observa en la Figura 2.1, la arquitectura FTTH permite conectar la oficina central del proveedor con múltiples usuarios finales mediante una red de distribución óptica pasiva, facilitando el acceso a servicios de alta velocidad, estabilidad y baja latencia.

Figura 2. 1: Arquitectura de una red FTTH



Fuente: Elaboración propia

2.2. Definición de FTTH

La configuración FTTH (Fiber To The Home) La fibra hasta el hogar (FTTH) es una arquitectura de telecomunicaciones que proporciona conexiones de fibra óptica directamente a las propiedades residenciales, ofreciendo a los consumidores acceso a Internet de gran ancho de banda a través de cables de fibra óptica dedicados. (Żukowski et al., 2021) caracterizan la FTTH como un modelo de despliegue que proporciona conectividad de fibra óptica directamente a las instalaciones residenciales, diferenciándola de otros servicios de banda ancha.

(Helmy & Nayak, 2020) mencionan que las redes FTTH se basan en la tecnología de red óptica pasiva (PON), además, que elimina la necesidad de equipos eléctricos activos en las centrales telefónicas y en la casa del cliente. Este tipo de infraestructura pasiva hace mucho más eficiente y confiable la tecnología que cualquier red tradicional de cobre o híbrida.

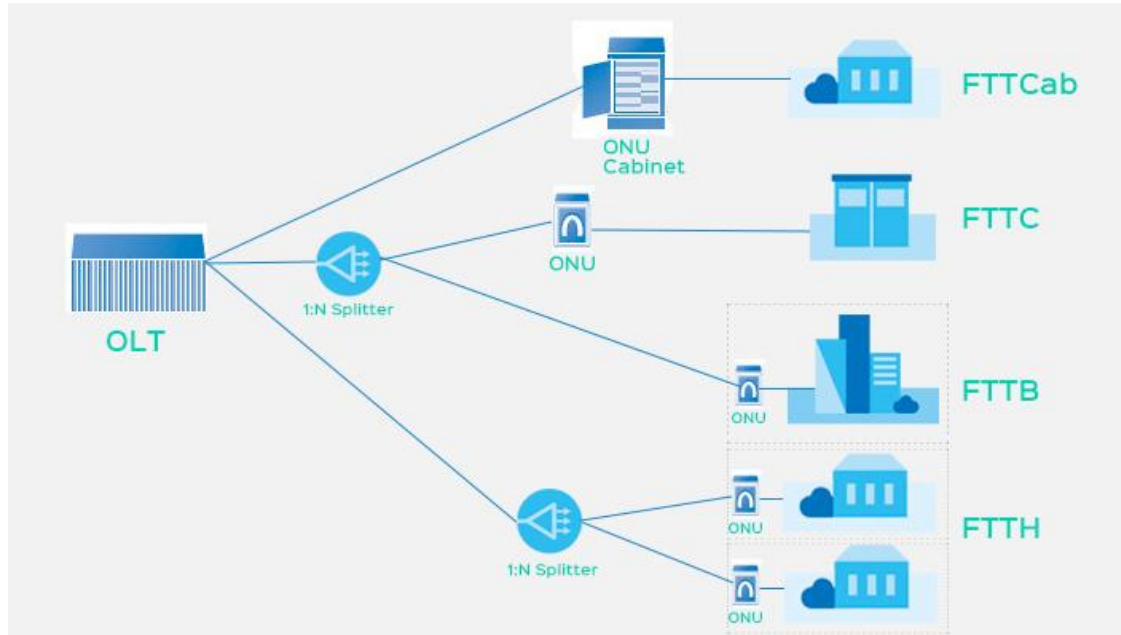
La implementación de FTTH requiere un diseño de red detallado que asegure un servicio de alta calidad y eficaz. (Adhi et al., 2021), señalan que la eficacia de las redes FTTH depende de una evaluación minuciosa de diversos parámetros de diseño, como los presupuestos de energía, las consideraciones de sincronización y la administración de la tasa de error.

FTTH forma parte de una familia de arquitecturas de implementación de fibra, donde cada una responde a diferentes necesidades de conectividad. Para comprender FTTH a profundidad es necesario analizar los distintos modelos de despliegue de fibra que conforman las redes de acceso óptico actuales. En la siguiente subsección se examinan los miembros de la familia FTTx y sus aplicaciones específicas dentro de la infraestructura.

2.2.1. Arquitectura FTTx

La Figura 2.2 muestra la arquitectura de la tecnología FTTx, la misma consta de un conjunto de tecnologías basadas en el uso de la fibra óptica como medio de transmisión de señales digitales y pueden ser clasificadas en:

Figura 2. 2: Arquitectura de la familia FTTx



Fuente: HDV Fiber (2020).

- **FTTH:** la configuración FTTH consiste en llevar la fibra óptica directamente hasta la vivienda del abonado. cada abonado tiene su propia fibra dedicada a un puerto en el equipo, como en el POP, los divisores, la fibra de alimentación al POP. (Skoufis et al., 2023), indica que las redes FTTH pueden ofrecer altas velocidades de acceso simétricas con una latencia mínima. La tecnología elimina las interferencias y la diafonía, al mismo tiempo que maximiza la calidad general de la experiencia. No obstante, la implementación de FTTH implica costes sustanciales, lo que a menudo hace necesarias estrategias de transición gradual para un despliegue generalizado.
- **FTTB:** como su nombre lo indica, la arquitectura Fiber To The Building (FTTB), extiende la fibra óptica hasta un edificio, generalmente hasta un cuarto, gabinete, dotado con equipamiento especializado para servicios de telecomunicaciones, donde el proveedor hace uso de la infraestructura interna ya existente del edificio, usualmente cobre o cableado ethernet, para dar soporte a la disponibilidad de una red multimedia en un área de oficinas o conjunto habitacional. Este enfoque permite desplegar fibra en edificios residenciales y oficinas sin reemplazar la infraestructura interna del conjunto, reduciendo costos, tiempo de instalación y a la vez manteniendo altas tasas de velocidades

y estabilidad (Sopubekov et al., 2025), aparte de ser la opción más conveniente en espacios donde la instalación resulta no solo ser costosa pero también un riesgo al personal.

- **FTTC:** Fiber To The Curb describe al cableado de fibra óptica que se extiende hasta un punto cercano (una caja) al usuario ubicado en la acera, presenta inferiores velocidades comparadas a FTTH debido a que los switches dentro de la caja, el tramo entre la caja y el hogar son basados en cobre. (Mazzenga et al., 2020)

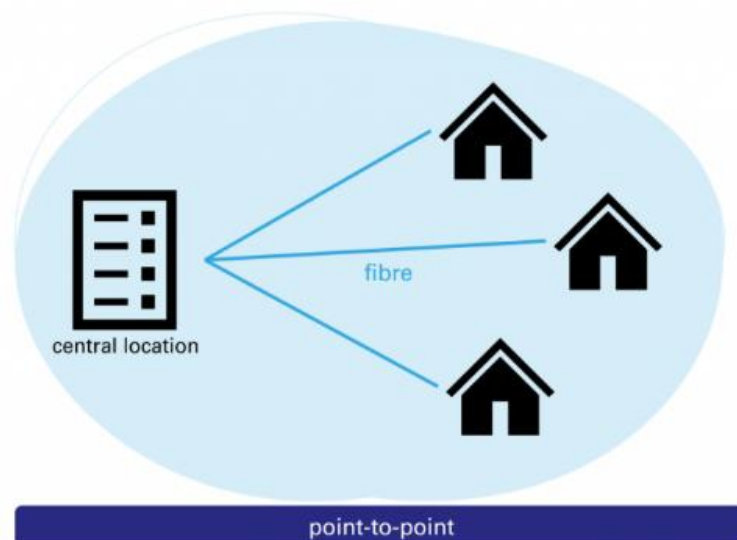
2.3. Tipos de FTTH.

Las redes FTTH principales son las redes Ethernet punto a punto (P2P), las redes ópticas pasivas (PON) y las redes ópticas activas, en las siguientes subsecciones.

2.3.1. Point To Point (P2P)

Esta arquitectura, denominada FTTH P2P (Fiber-to-the-Home Point-to-Point), es una forma económica de montar una red de fibra en la que cada usuario tiene su propia línea de fibra óptica, tal y como se observa en la Figura 2.3. En esta configuración punto a punto, se establece un enlace de comunicación directo entre la oficina central o el terminal de línea óptica (OLT) y el hogar de cada abonado. Esto crea una conexión uno a uno que garantiza la asignación de ancho de banda dedicado.

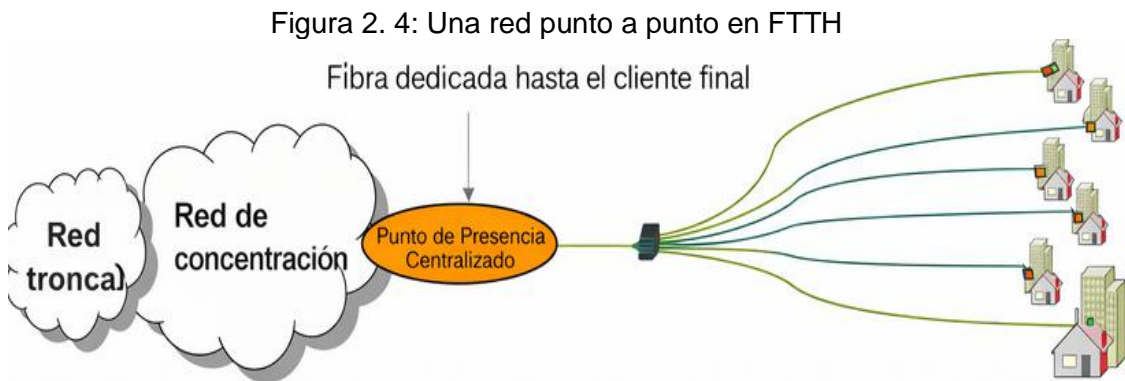
Figura 2. 3: Red P2P



Fuente: FCST (2024).

2.3.2. Arquitectura de P2P

Las redes de acceso punto a punto (P2P) comprenden una topología one to one en la cual todos los abonados están conectados a la central del proveedor a través de una ruta de transmisión dedicadas e individuales para cada usuario (Welch et al., 2023), tal como se muestra en la Figura 2.4. Esta arquitectura lo que facilita, es que la red presente un mejor manejo en cuanto a la asignación de ancho de banda y por ende, mejor rendimiento y aislamiento del tráfico. Como resultado, las redes de acceso P2P suelen contrastarse con las soluciones punto a multipunto, especialmente en términos de escalabilidad, complejidad operativa y control de la calidad del servicio.

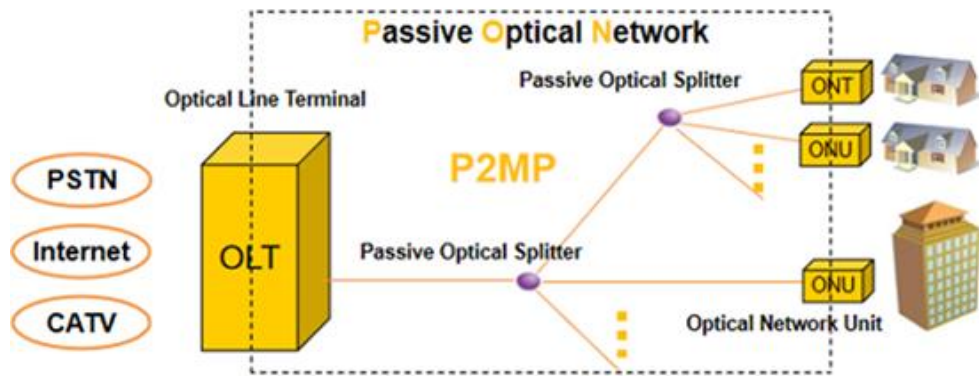


Fuente: Adaptado de Sánchez-García (2017).

2.3.3. Point to Multipoint (P2MP)

La arquitectura punto a multipunto se basa en un modelo de conexión en el que un único centro de distribución se comunica con muchos puntos finales dispersos utilizando componentes pasivos estratégicamente situados en la infraestructura de la red (Welch et al., 2021). Como se muestra en la Figura 2.5, esta arquitectura representa un cambio importante respecto a las redes punto a punto tradicionales. De este modo, los sistemas de comunicación son más flexibles y pueden crecer con los patrones de tráfico en estrella que se observan en los segmentos de las redes metropolitanas y de acceso modernas. El divisor óptico pasivo (splitter) es una parte importante del proceso de agregación, ya que este permite que las señales ópticas del transmisor central viajen por varias rutas, manteniendo la calidad de la señal y permitiendo la comunicación bidireccional.

Figura 2. 5: Red P2MP



Fuente: ELFCAMS (2024).

2.3.4. Arquitectura P2M/PON.

La arquitectura de red óptica pasiva punto a multipunto (P2M) Los diseños de redes ópticas pasivas punto a multipunto (P2M) son fundamentalmente diferentes de las configuraciones tradicionales punto a punto (P2P). Las principales diferencias radican en cómo distribuyen los datos y qué tipo de infraestructura requieren. Las topologías P2P dependen de elementos de conmutación activos con puertos de fibra especializados, mientras que las redes P2M utilizan divisores ópticos pasivos en los nodos de distribución. Esto supone que los puntos intermedios de la red no necesitan un suministro constante de energía eléctrica (Welch et al., 2021).

Esta arquitectura permite configurar redes más económicas y que pueden crecer según las necesidades. Los divisores pasivos pueden manejar múltiples proporciones de división, lo que normalmente permite 32, 64 o 128 conexiones de bajada desde un único terminal de línea óptica (OLT) sin necesidad de componentes electrónicos activos en la red de distribución (Tochino et al., 2021).

2.4. Capas de FTTH.

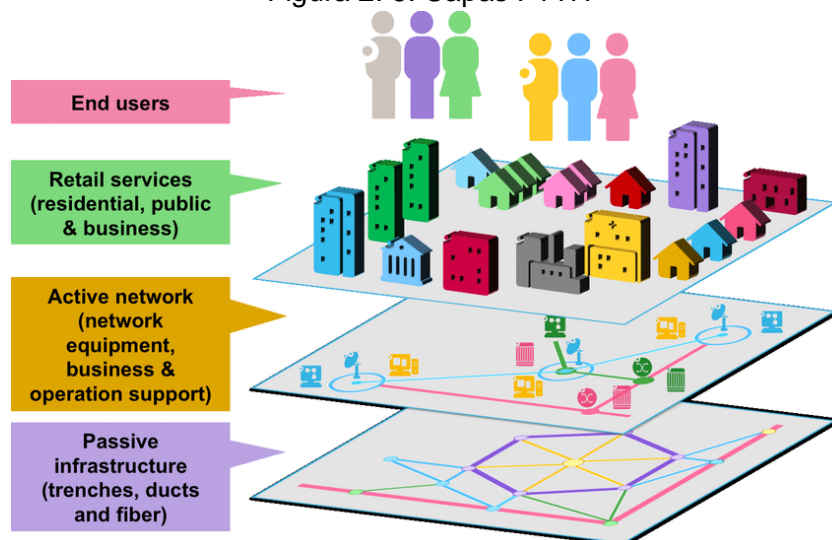
La Figura 2.6 muestra las capas que conforman la arquitectura FTTH. A continuación, se describen cada una de estas capas y su función dentro del sistema de acceso óptico.

1. **Usuario final:** la capa de usuario final incluye a todos los usuarios de FTTH que utilizan el servicio para acceder a servicios triple play

(teléfono, Internet y televisión) a través de una única infraestructura. Esta capa cuenta con el terminal de red óptica (ONT) en la ubicación del cliente. El ONT se conecta a los dispositivos domésticos mediante conexiones de cable de conexión a rosetas, lo que permite servicios de gran ancho de banda.

2. **Servicio:** esta capa gestiona el soporte técnico y la prestación de servicios, incluido supervisión de calidad de servicio (QoS) con parámetros como rendimiento, retardo, pérdida de paquetes y jitter.
3. **Red activa:** la red activa está formada por dispositivos electrónicos, como terminales de línea óptica (OLT), que funcionan como interfaces que conectan con las redes de distribución óptica. Esta capa necesita trabajadores especializados para su diseño y funcionamiento, que supervisen el flujo bidireccional de la red, en el que los nodos pueden insertar, leer y eliminar tráfico según el caso.
4. **Red pasiva:** la capa de red pasiva de una arquitectura FTTH comprende la infraestructura de distribución óptica que conecta desde el nodo de acceso del proveedor de servicios hasta los hogares de múltiples usuarios finales. Esta parte incluye todos los equipos físicos, como conductos, fibras ópticas, empalmes, etc.

Figura 2. 6: Capas FTTH

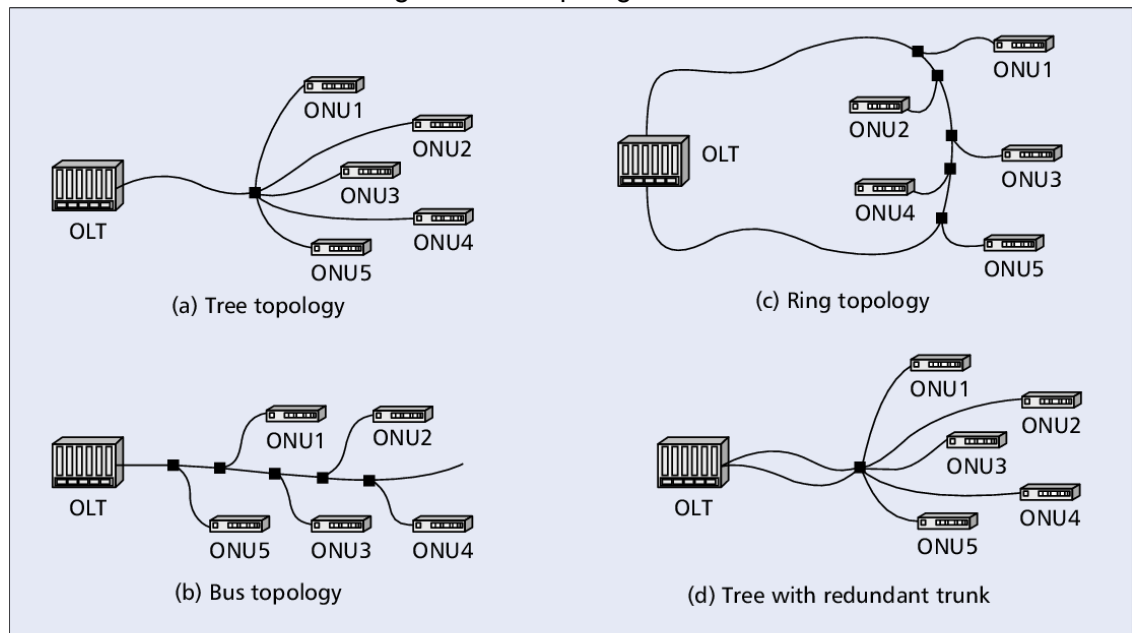


Fuente: Sánchez-García (2017).

2.5. Topología PON

La topología PON es aquella en la que nodos como routers y switches están conectados a otra red o a una LAN (Local Area Network), tal como se muestra en la Figura 2.7. Se caracterizan por su bajo costo, despliegue y diseño flexible (Zhao et al., 2023). Existen diferentes tipos de topologías, como la estrella, la malla, el anillo y el bus.

Figura 2. 7: Topologías PON



■ Figure 3. PON topologies.

Fuente: Kramer & Pesavento (2003).

2.6. Principios de multiplexación en PON (TDM-PON)

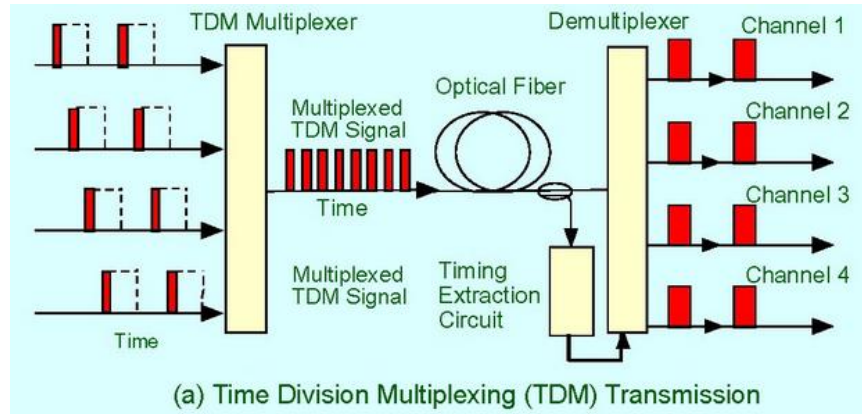
Existen 3 tipos de PON basados en multiplexación

2.6.1. TDM PON

TDM PON es un tipo de red óptica pasiva que recurre a la multiplexación por división de tiempo para manejar el flujo entrante y saliente de tráfico en las longitudes de onda ascendentes y descendentes. Las redes de acceso TDM-PON han visto un gran uso en redes de banda ancha y redes que requieren de tecnologías adaptables para continuar ofreciendo servicios de baja latencia y gran capacidad (Pfeiffer et al., 2022). En la Figura 2.8 se muestra el diagrama de funcionamiento de la red TDM PON.

Estos sistemas utilizan técnicas de modulación avanzadas para obtener un alto rendimiento. También cuentan con arquitecturas escalables que permiten a múltiples usuarios finales compartir una única infraestructura de fibra, al tiempo que mantienen la eficiencia energética y la rentabilidad tanto en la implementación como en el funcionamiento (Che et al., 2021).

Figura 2. 8: Multiplexación TDM

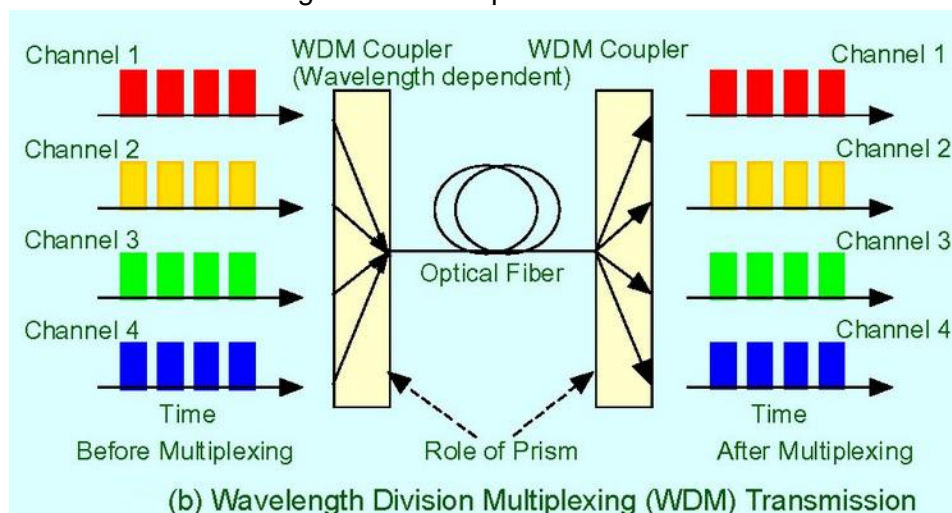


Fuente: Nakazawa (s. f.).

2.6.2. WDM PON

La multiplexación por división de longitud de onda (WDM) es una manera de mejorar el aislamiento y la capacidad del tráfico al darles a varios usuarios o grupos de usuarios longitudes de onda ópticas separadas en la misma red de distribución pasiva. Como se muestra en la Figura 2.9, esta tecnología permite transmitir múltiples señales simultáneamente a través de una sola fibra óptica, incrementando la capacidad del sistema y reduciendo la interferencia entre canales.

Figura 2. 9: Multiplexación WDM



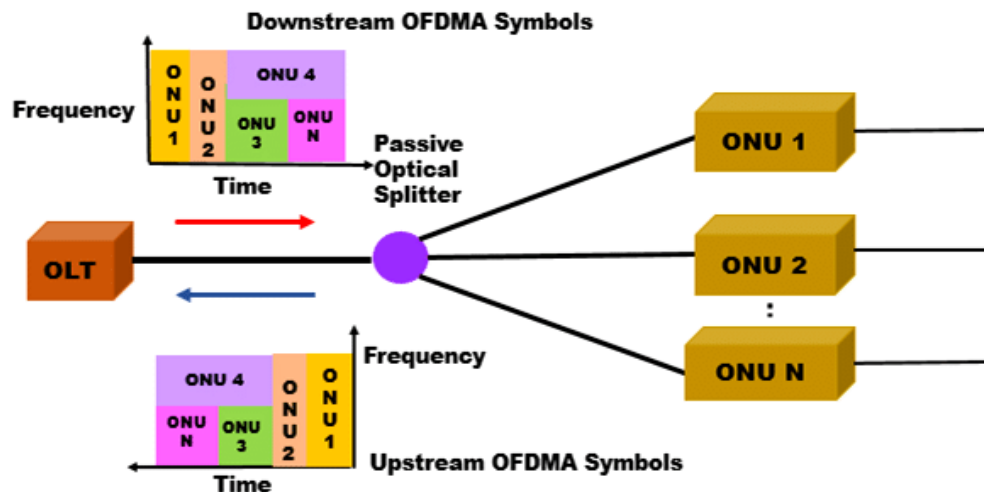
Fuente: Nakazawa (s. f.).

No obstante, esto tiene el costo de hacer que el sistema sea más caro y complicado. Esta técnica difiere mucho de las arquitecturas PON tradicionales, ya que ofrece canales de longitud de onda dedicados que permiten capacidades de multiplexación de longitud de onda individuales que pueden alcanzar velocidades de datos mucho más altas para satisfacer el enorme aumento de la demanda de ancho de banda (Sharma et al., 2022). Los sistemas WDM-PON suelen utilizar fuentes de luz centrales con mecanismos de reutilización de la longitud de onda. Así se aprovecha mejor el espectro y se mantienen separados los servicios de los usuarios.

2.6.3. OFDM PON

OFDM PON (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Passive Optical Network, red óptica pasiva con multiplexación por división de frecuencia ortogonal) es una técnica de acceso óptico de vanguardia que utiliza una gran cantidad de subportadoras ortogonales muy próximas entre sí para mover el tráfico de la ONU de forma rápida y eficiente. Este método de multiplexación aprovecha mejor el ancho de banda al tener una mayor capacidad de transmisión y mantiene una alta eficiencia espectral mediante el uso de la ortogonalidad matemática para eliminar las interferencias entre canales.

Figura 2. 10: Multiplexación OFDM



Fuente: ResearchGate (s. f.).

El sistema muestra muchas mejoras de rendimiento con respecto a las topologías PON típicas. Las pruebas han demostrado que puede enviar datos rápidamente a través de una infraestructura de fibra óptica ordinaria (Jin et al., 2020).

2.7. Evolución de las tecnologías PON

2.7.1. Primera generación de sistemas PON (APON / BPON)

La evolución de las redes ópticas pasivas supone un avance tecnológico continuo impulsado por la creciente demanda de ancho de banda. Los primeros sistemas PON, incluidos ATM PON (APON) y Broadband PON (BPON), consolidaron la arquitectura básica que daría soporte a las generaciones posteriores de tecnologías de acceso óptico (Arya et al., 2025). Esta primera generación de sistemas estableció la estructura básica de las PON, formada por terminales de línea óptica (OLT), redes de distribución óptica (ODN) y múltiples unidades de red óptica (ONU), estructura que sigue siendo la arquitectura central en las implementaciones de hoy.

2.7.2. PON basada en Ethernet (EPON / GEPON)

Las redes ópticas pasivas Ethernet (EPON), conocidas también como Gigabit Ethernet PON (GEPON), ofrecen un enfoque basado en IEEE que aprovecha los protocolos y estructuras de trama estándar de Ethernet para las redes de acceso óptico. Las normas IEEE 802.3 rigen esta tecnología, cuyo desarrollo reciente incluye el grupo de trabajo IEEE 802.3ca, dedicado a impulsar las especificaciones de próxima generación para sistemas EPON de 25 Gb/s y 50 Gb/s (Knittle, 2020).

La diferencia entre las redes EPON y las redes PON basadas en ITU-T (como GPON) se extiende más allá de las especificaciones técnicas y cubre distintas estrategias de estandarización y modelos de adopción regionales. A pesar de que GPON es la solución PON más utilizada por los proveedores europeos y norteamericanos, los del continente asiático han optado mayoritariamente por las tecnologías EPON/GEPON. Las dos tecnologías usan algoritmos de asignación dinámica de ancho de banda para optimizar el uso de la red (Thangappan et al., 2020).

2.7.3. PON de próxima generación.

La transición hacia las redes ópticas pasivas de próxima generación se origina a partir del crecimiento exponencial del uso de Internet y la correspondiente mayor demanda de mayor capacidad de transmisión de datos. Debido al uso masivo de Internet, las redes de comunicación se han visto obligadas a pasar a redes de acceso óptico, lo que ha impulsado la necesidad de mayores velocidades de transmisión de información (Arya et al., 2025).

Este avance tecnológico da respuesta a las enormes demandas de ancho de banda y asignación dinámica necesarias para los servicios de Internet del futuro, al tiempo que los sistemas PON tradicionales llegan al límite de sus capacidades para soportar las aplicaciones más recientes (Rajbir Singh et al., 2021). El impulso a nuevas tecnologías va más allá de las necesidades residenciales y se extiende a las necesidades de infraestructuras críticas, como los servicios de fronthaul móvil y las aplicaciones comerciales que precisan una mayor fiabilidad y rendimiento.

Los sistemas NG-PON apuntan a mejoras sustanciales tanto en capacidad como en escalabilidad en contraste con sus modelos predecesores. Esta tecnología tiene como objetivo alcanzar mayores velocidades de transmisión de datos, un mayor ancho de banda de canal, una mayor capacidad de la unidad de red óptica y amplias áreas de cobertura (Liu, 2022). Además, estos sistemas fueron diseñados para acomodar múltiples usuarios simultáneamente, al tiempo que dan soporte a diversos tipos de servicios. Las metas de escalabilidad hacen que NG-PON pueda servir como base para la infraestructura de comunicación del futuro, con posibles aplicaciones en redes submarinas, satelitales y de próxima generación, sin dejar de ser rentable y eficiente en cuanto a energía en todos los entornos de red integrados (Vivek Arya et al., 2024).

2.8. GPON

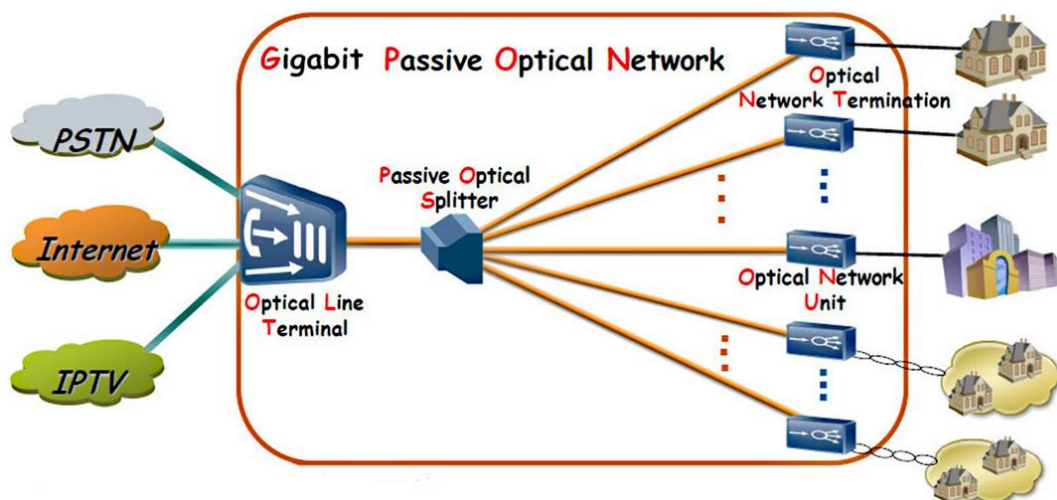
2.8.1. Definición de GPON

GPON (Gigabit Passive Optical Network) es una tecnología PON estandarizada y basada en especificaciones de la serie G.984 de la UIT-T desarrollada a fin de proveer acceso de banda ancha de alta velocidad a través de infraestructura de fibra óptica. (Horvath et al., 2020).

Adicionalmente, D. M. S. Sultan et al., 2023 sostiene a GPON como la tecnología básica para respaldar la infraestructura del sistema FTTH de próxima generación debido a que posibilita una topología punto multipunto en despliegues de FTTH, en donde existe una única terminal de línea óptica (OLT) encargada de abastecer múltiples unidades de red óptica (ONU) mediante splitters pasivos. De igual manera, GPON como tecnología de acceso cuenta con las velocidades, ancho de banda y calidad de servicios necesarios para el soporte lo que se conoce como servicios triple play (voz, datos y vídeo) (Sadin et al., 2022).

Como se observa en la Figura 2.11, la arquitectura GPON conecta la OLT con múltiples usuarios finales a través de divisores ópticos pasivos, permitiendo la distribución eficiente de servicios como Internet, IPTV y telefonía sobre una misma infraestructura de fibra óptica.

Figura 2. 11: Red GPON



Fuente: LightOptics (s. f.).

2.8.2. Arquitectura GPON

GPON hace uso de una topología de red punto a multipunto, lo que lo distingue fundamentalmente del resto de arquitecturas de redes de acceso tradicionales (Goluža, 2024). Gracias al diseño de la arquitectura de la misma permite que un ONT preste servicio a numerosas ONUs a través de splitters ópticos pasivos lo que crea un sistema de distribución de banda ancha eficiente y rentable. (Thangappan et al., 2020)

Como en cualquier otra arquitectura, la red GPON se compone de 3 partes primarias siendo una de ellas la OLT, ubicada en la central del proveedor, seguida por la red de distribución óptica (ODN) que maneja los splitters pasivos y finalmente las terminales de redes ópticas (ONT) que se encuentran en las premisas de los abonados (Sadin et al., 2022).

Dicha configuración saca partido de la naturaleza pasiva de la infraestructura óptica, por lo que no requiere componentes electrónicos activos entre el OLT y el equipo del cliente, reduciéndose así la complejidad del mantenimiento y los costes operativos (Goluža, 2024) Adicionalmente, la transmisión funciona con multiplexación por división de longitud de onda (WDM), lo que permite la comunicación bidireccional por un solo hilo de fibra. (Sadin et al., 2022)

2.8.2.1. OLT

Una OLT es un dispositivo de red centralizado que cumple con la función de manejar, controlar y distribuir servicios a lo largo de la red pasiva. La OLT es el puente fundamental entre la infraestructura PON y capas de red superior. Al integrar distintos proveedores de servicios y redes de acceso, obtiene la capacidad de ofrecer múltiples accesos, una amplia cobertura y capacidades de integración (Rawshan et al., 2023).

La Figura 2.12 muestra el equipo OLT utilizado en las redes PON, el cual se instala en la central del proveedor para gestionar y distribuir la señal óptica hacia múltiples usuarios.

Figura 2. 12: OLT



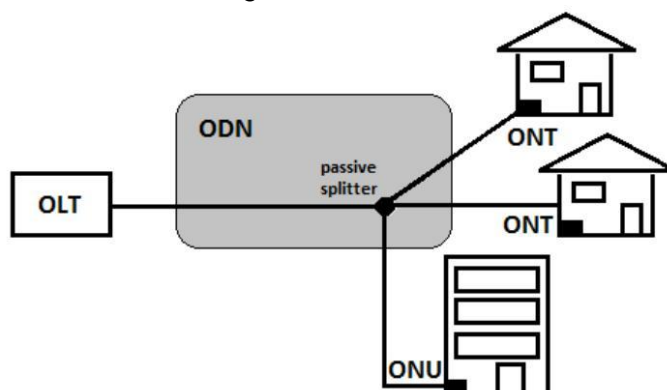
Fuentes: Fibresplitter.com (s. f.).

2.8.2.2. ODN

La ODN puede definirse como el tramo de infraestructura óptica pasiva que proporciona el medio físico de transmisión para la comunicación entre una central telefónica (CO) y las redes de usuario (UN), lo que la convierte en una pieza clave en los sistemas de comunicación por fibra óptica. Una red de distribución óptica (ODN) cuenta con tres componentes clave: la fibra de alimentación que conecta la oficina central (CO) con los puntos de distribución, el cable de distribución que llega hasta las viviendas de los clientes y los splitters pasivos que dividen las señales ópticas en varias rutas mediante configuraciones como las relaciones 1:4 o 1:8. (Aguiar et al., 2023).

Como se observa en la Figura 2.13, la ODN actúa como el enlace entre la OLT y los usuarios finales, distribuyendo la señal óptica mediante divisores pasivos que permiten conectar múltiples abonados a una misma infraestructura de fibra.

Figura 2. 13: ODN



Fuentes: Sopto (s. f.).

2.8.2.3. ONT

Un ONT (terminal de red óptica) es un dispositivo esencial que se encuentra en las premisas del cliente. Esta funciona como punto de terminación de una PON y convierte las señales ópticas de la red de fibra en señales eléctricas para los dispositivos del usuario final.

El ONT supone un punto de convergencia desde el lado del cliente que opera como límite de conversión de óptico a eléctrico, convirtiendo los servicios ópticos a nivel de operador en funciones de telecomunicaciones multiservicio a través de una interfaz unificada, a la vez que establece la demarcación lógica y física entre la infraestructura del operador y la red del cliente (Muliandhi et al., 2020). La Figura 2.14 muestra el dispositivo ONT y las funciones de cada puerto.

Figura 2. 14: ONT



Fuente: Baudcom (s. f.).

2.8.3. Principios de acceso y transmisión

GPON opera como una red óptica pasiva de multiplexación por división de tiempo (TDM-PON), la cual es una de las tecnologías actualmente estandarizadas. Estas redes TDM-PON se caracterizan principalmente por su naturaleza de tráfico compartido, en la que los recursos de la red se reparten entre varios usuarios mediante mecanismos de asignación basados en tiempo (Pfeiffer et al., 2022). La arquitectura utiliza un modelo de difusión y selección, en el que las mismas agrupaciones de datos se dirigen a diferentes destinos

mediante splitters de potencia, lo cual favorece una distribución eficiente de la señal por toda la infraestructura de la red (Liu et al., 2024)

El entorno GPON funciona bajo un modelo de control centralizado, ejemplo de ello son los sistemas de asignación dinámica de ancho de banda (DBA) que gestionan los recursos de red desde unidades de procesamiento centralizadas (Slyne et al., 2020). Este enfoque centralizado ha ido evolucionando hacia arquitecturas de red definidas por software, en las que múltiples terminales de línea óptica pueden compartir recursos a través de sistemas virtualizados y para múltiples usuarios gestionados por procesadores de uso general (Slyne et al., 2020).

2.8.4. Limitaciones y motivación para la evolución arquitectónica

Las redes GPON se ven afectadas por una rigidez en su arquitectura que se deriva del diseño estático y basado en una topología en árbol (Horvath et al., 2020). explica la estructura PON tradicional, donde «el OLT (la interfaz del operador) suministra una fibra troncal que se divide en varios segmentos, cada segmento se divide en otro conjunto de segmentos, y así sucesivamente, generando una estructura en árbol».

Esta arquitectura estática limita la adaptabilidad en la asignación de recursos de red y en el despliegue de servicios, ya que la infraestructura física no se puede reconfigurar dinámicamente en función de las necesidades de ancho de banda o las demandas de servicio. Si bien la naturaleza pasiva de la red de distribución óptica presenta ventajas en términos de costo, también restringe la posibilidad de implementar mecanismos de enrutamiento adaptativo o de balanceo de carga que las aplicaciones actuales ocupan.

El modelo centralizado de control de GPON implica importantes limitaciones en la gestión dinámica de la red y la distribución de servicios. (Thangappan et al., 2020), resalta que «la utilización de todo el ancho de banda es un poco complicada» y ocupa de sofisticados mecanismos de asignación dinámica de ancho de banda (DBA) centralizados en el terminal de línea óptica (OLT).

Asimismo, la flexibilidad limitada de GPON para la asignación dinámica de recursos se vuelve cada vez más un problema a raíz de la creciente demanda de aplicaciones de mayor diversidad y consumo de ancho de banda. (Saliou et al., 2024) hacen hincapié en la complejidad de alcanzar rendimiento, latencia y jitter adecuados, sin perder rentabilidad en las arquitecturas PON tradicionales.

El carácter estático de las redes GPON limita mecanismos como el corte de red, la diferenciación de la calidad del servicio y el despliegue rápido de servicios, motivo por el cual se están estudiando soluciones basadas en software, como R-CORD, para superar estas limitaciones mediante la virtualización y la organización centralizada.

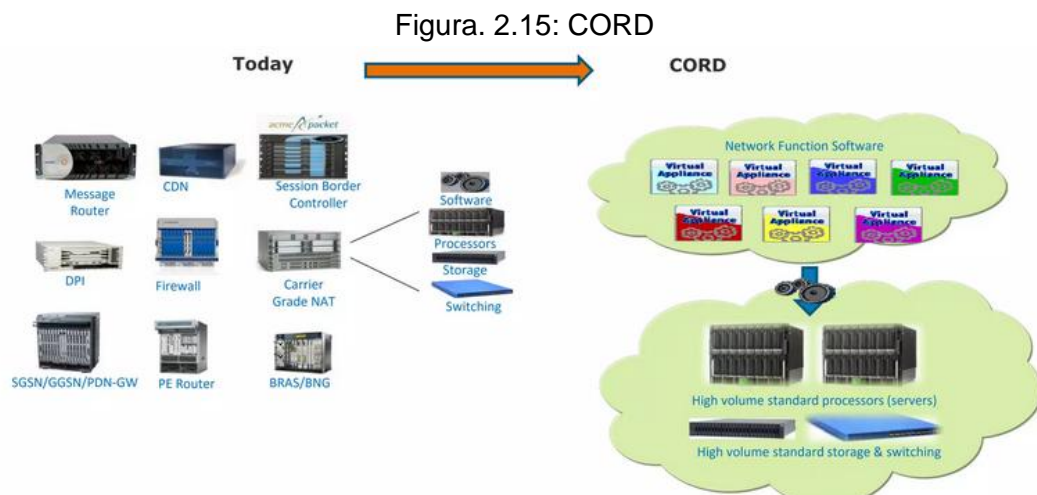
2.9. R-CORD (Residential Central Office Re-architected as a Datacenter)

2.9.1. Definición de R-CORD

R-CORD es un modelo de arquitectura de redes que convierte las centrales telefónicas tradicionales en infraestructuras semejantes a centros de datos mediante la virtualización y los fundamentos de la nube. (Alberto Hernández et al., 2020). Supone un cambio fundamental, al pasar de equipos de red diseñados específicamente para un fin concreto a componentes independientes y definidos por software que pueden coordinarse de forma dinámica.

La iniciativa CORD surgió de la Open Networking Foundation (ONF) dentro de un esfuerzo más amplio por llevar la rentabilidad y la agilidad de los centros de datos a las redes de telecomunicaciones (Das, 2021). La ONF ha contribuido de manera significativa al desarrollo y la promoción de soluciones basadas en CORD, entre las que se incluyen proyectos como SEBA (SDN Enabled Broadband Access), cuyo funcionamiento se basa en los principios de CORD utilizando hardware de caja blanca, silicio comercial y tecnologías SDN (Das, 2021).

Como se observa en la Figura 2.15, la arquitectura CORD transforma la infraestructura tradicional basada en equipos especializados en una plataforma virtualizada soportada por software y servidores estándar, permitiendo mayor flexibilidad, escalabilidad y eficiencia operativa en las redes de acceso.



Fuente: AT&T (s. f.).

El propósito fundamental de R-CORD consiste en aplicar principios de diseños de centros de datos a las redes de acceso de telecomunicaciones. (Alberto Hernández et al., 2020). Esto incluye:

- Segregación de equipos: La separación de los componentes de hardware y software tanto en los elementos ópticos y de conmutación de paquetes con el fin de proporcionar ahorros de costes y flexibilidad operativa (Alberto Hernández et al., 2020).
- Arquitectura de estructura Leaf-and-Spine: Implementación de topologías de red de estilo centro de datos que ofrecen una mejor escalabilidad y rendimiento (Hernandez et al., 2021).
- Virtualización: Permite que las funciones de red se ejecuten como software en hardware básico, aportando una agilidad similar a la de la nube a las operaciones de red (Hernandez et al., 2021).
- Integración de Multi-access Edge Computing (MEC): incorporación de capacidades de cómputo y almacenamiento directamente en nodos del borde de la red, con el fin de soportar servicios 5G y aplicaciones de baja latencia (Hernandez et al., 2021)

Esta nueva arquitectura permite a los operadores de telecomunicaciones lograr una eficiencia operativa, una rentabilidad y una flexibilidad de servicio similares a las de un centro de datos en sus redes de acceso, a la vez que soporta requisitos emergentes como los servicios 5G y de computación en el borde de la red.

2.9.2. Principios de diseño de R-CORD

R-CORD se enfoca en el principio de segregación de equipos en una central, tanto en lo que respecta a los componentes ópticos como a los de conmutación de paquetes, consiguiendo reportar un considerable ahorro en costos para las operadoras de telecomunicaciones. (José Alberto Hernández et al., 2020.) (Alberto Hernández et al., 2020). Este principio separa las funciones del hardware de las del software, lo que permite una mayor flexibilidad e independencia de los proveedores.

Adicionalmente, R-CORD aprovecha las ventajas de la virtualización y la migración a la nube en las redes de acceso de banda ancha (Saurav Das et al., 2020.) (Das, 2021). La virtualización de funciones de red (NFV) en hardware comercializado ofrece un entorno atractivo y económico en el que se pueden implementar innovaciones de forma mucho más rápida que con equipos con hardware específicos (Kundel et al., 2021).

La arquitectura se maneja utilizando hardware de caja blanca y silicio comercial como componentes fundamentales (Das, 2021). La sustitución de los routers tradicionales por conmutadores desagregados de clase portadora supone un ahorro considerable tanto en costes como en energía en la capa de paquetes (Hernandez et al., 2021). Por último, R-CORD funciona según los principios de SDN, lo cual permite un control centralizado y programabilidad (Das, 2021). Incluye la digitalización de dispositivos físicos y arquitecturas programables que favorecen la versatilidad y la rápida implementación de nuevas innovaciones.

2.9.3. Componentes R-CORD

R-CORD supone una transición significativa de la infraestructura de telecomunicaciones convencional a una arquitectura nativa de la nube y definida por software. (Alberto Hernández et al., 2020) describen que este modelo abarca componentes ópticos, de conmutación de paquetes y de centros de datos, por su parte, (Hernandez et al., 2021) resalta que esta arquitectura facilita tanto la capacidad de computación como de almacenamiento de acuerdo con las directrices de los centros de datos. Con este enfoque, los operadores de telecomunicaciones tienen la posibilidad de aprovechar los principios de virtualización y desagregación para crear infraestructuras de red más flexibles y rentables.

En el corazón de esta arquitectura, la infraestructura informática centralizada transforma las oficinas centrales tradicionales en instalaciones similares a centros de datos que proporcionan recursos informáticos y de almacenamiento para aplicaciones de computación en el borde de acceso múltiple (MEC). (Hernandez et al., 2021), señala que, si bien la incorporación de estas capacidades de centro de datos en los nodos MAN puede aumentar el coste total de la red entre un 30 % y un 50 %, esta inversión permite una funcionalidad crítica de computación en el borde que da soporte a los servicios de próxima generación.

A partir de este fundamento, (Yahya et al., 2021) demuestran que las implementaciones posteriores a CORD con funciones de red desagregadas y virtualizadas permiten situar estratégicamente el CN-MEC más cerca de los equipos de los usuarios, reduciendo en un 30 % los requisitos de capacidad en comparación con las arquitecturas previas a CORD, al mismo tiempo que se admiten comunicaciones fiables y de baja latencia.

Además, los elementos de acceso desagregados separan las funciones de hardware y software para permitir una mayor flexibilidad y optimización de costes en toda la implementación de la red. (Hernandez et al., 2021), señala que sustituir los routers tradicionales por switches desagregados de clase portadora supone un ahorro considerable tanto en costes como en consumo

energético, al tiempo que (Slyne et al., 2020), demuestra la desagregación práctica a través de terminales de línea óptica programables con planos de datos totalmente virtualizados.

Mediante la coordinación de estos componentes interconectados, las capas de control y coordinación aportan capacidades de gestión centralizada y automatización basadas en los principios de las redes definidas por software (SDN). (Das, 2021), subraya que los principios SDN brindan ventajas de virtualización y transición a la nube a las redes de acceso de banda ancha, mientras que (Yahya et al., 2021), ilustra cómo estas capacidades de coordinación permiten una optimización dinámica del upload y offload.

2.9.4. Infraestructura R-CORD

La infraestructura centralizada de R-CORD convierte las centrales de telecomunicaciones en algo parecido a un centro de datos, donde se reúnen recursos de cómputo y almacenamiento para dar soporte a múltiples funciones y servicios de red. Esta plataforma permite alojar funciones de red virtualizadas, habilitar capacidades de cómputo en el borde (MEC) y proporcionar la potencia de procesamiento necesaria para operar la red en tiempo real (Alberto Hernández et al., 2020). Gracias a este enfoque centralizado, es posible asignar recursos de manera dinámica y desplegar o escalar servicios de red rápidamente según las necesidades de los usuarios.

La desagregación de los elementos de acceso representa la separación funcional de los componentes de red tradicionalmente integrados en unidades modulares definidas por software que pueden administrarse y optimizarse de forma independiente. Este proceso se aplica tanto a los componentes ópticos como a los de conmutación de paquetes, lo cual permite a los operadores de red desacoplar el hardware de las funciones de software y habilitar arquitecturas de red más flexibles (Alberto Hernández et al., 2020). Este enfoque facilita la independencia de los proveedores, disminuye los costes y permite la virtualización de funciones de red de acceso, como terminales de línea óptica y sistemas de asignación dinámica de ancho de banda.

2.9.5. Modelo de control y gestión

R-CORD se basa en la separación de los planos de control y de datos introducida por las redes definidas por software (SDN), donde las funciones de control centralizadas quedan desacopladas de la infraestructura subyacente de transmisión de datos (Andriolli et al., 2022). Dicha separación en la arquitectura permite una gestión más flexible de la red, a la vez que facilita que el plano de datos se centre exclusivamente en la transmisión de paquetes, lo que da lugar a una estructura de red modular y fácil de gestionar.

El control centralizado saca partido de esta separación para ofrecer una gestión unificada de los servicios en recursos de red heterogéneos. Estos sistemas traducen automáticamente los requisitos de servicio de alto nivel en configuraciones de red específicas, sin necesidad de intervención manual de expertos. Este método permite el control de los servicios de red de extremo a extremo en varias plataformas, sin perder la coherencia operativa. La programabilidad y la automatización se manifiestan en el aprendizaje automático y en las redes basadas en la intencionalidad, los cuales permiten un comportamiento autónomo de la red, donde los sistemas pueden responder dinámicamente a los requisitos cambiantes de los servicios basados en los principios de SDN y el hardware de caja blanca (Khan et al., 2020).

2.9.6. Flexibilidad del servicio y división de la red

R-CORD permite la provisión dinámica de servicios a través de la virtualización de funciones de red (NFV), lo que crea redes virtuales en una infraestructura física compartidas para la creación de servicios on-demand a través del modelado automatizado de VNF y la coordinación de extremo a extremo (Rafiq et al., 2020). Las redes basadas en la intención (Intent-Based Networking) reducen los requerimientos de nivel experto al tomar las intenciones de los usuarios de alto nivel y automatizar la configuración de servicios, como se ha demostrado a través de implementaciones M-CORD que minimizan el esfuerzo manual y proporcionan una coordinación de servicios sin interrupciones (Rafiq et al., 2020).

Esta arquitectura es compatible con servicios diferenciados, ya que se adapta a distintos requisitos de rendimiento, ancho de banda, fiabilidad y latencia que las redes tradicionales no son capaces de gestionar con una infraestructura uniforme (Abbas et al., 2020). La cadena de funciones de servicio con enrutamiento flexible ofrece una latencia garantizada de extremo a extremo, a la vez que optimiza el consumo energético y tiene en cuenta las limitaciones de recursos (Chen et al., 2021).

La capacidad de R-CORD para dar soporte a la segmentación (slicing) de redes permite crear múltiples redes lógicas a partir de una infraestructura física común, con una división funcional flexible para diferentes requisitos de segmentación (Da Silva Coelho et al., 2022). De este modo, la segmentación de redes se consolida como el mecanismo clave para dar servicio a múltiples usuarios de forma rentable, a pesar de que la implementación a escala comercial requiere capacidades de automatización avanzadas (Park et al., 2023).

2.9.7. Posicionamiento de R-CORD en la evolución de las redes de acceso

Las arquitecturas tradicionales de redes de acceso se encuentran con serias limitaciones en lo que respecta a la rentabilidad, el consumo energético y la escalabilidad, y esto ha llevado a la evolución hacia soluciones R-CORD (Central Office Re-architected as Datacenter, o central telefónica rediseñada como centro de datos). R-CORD no es un reemplazo completo de la infraestructura actual, sino una evolución arquitectónica que busca solucionar estas limitaciones básicas a través de principios de desagregación y virtualización. (Alberto Hernández et al., 2020), señala que la desagregación de equipos en las oficinas centrales, en particular en los componentes ópticos y de conmutación de paquetes, pueden proporcionar importantes ahorros de costes a los operadores de telecomunicaciones, al tiempo (Simon et al., 2022), muestra cómo las tecnologías de computación en la nube en las redes de acceso óptico pueden derribar las barreras entre los segmentos de la red mejorando la sinergia entre ellos.

El carácter evolutivo de R-CORD se hace especialmente evidente en su capacidad para optimizar las capacidades de red existentes sin perder continuidad operativa. (Yahya et al., 2021) ilustran este avance a través de las arquitecturas pre-CORD y post-CORD, en las que las configuraciones post-CORD precisan mucha menos capacidad que los sistemas pre-CORD, sin dejar de cubrir la gran mayoría de los requisitos de tráfico de comunicaciones ultra fiables y de baja latencia (URLLC). Esta evolución posibilita una asignación de tráfico más flexible y unas mejores capacidades de descarga horizontal, con el post-CORD obteniendo una descarga vertical y horizontal significativamente más equilibrada en comparación con la fuerte orientación vertical de la distribución del pre-CORD.

Para evaluar objetivamente las mejoras que brinda la arquitectura R-CORD en comparación con GPON, así como comprobar las ventajas de rendimiento de esta transición, y mediante un análisis basado en simulaciones entre ambos enfoques a través de las métricas de rendimiento. En el capítulo 4, se utilizan modelos de simulación en las que se consideran tanto las capacidades técnicas como las implicaciones económicas de las arquitecturas GPON y R-CORD, lo que permite evaluar cómo se posiciona R-CORD dentro de la evolución de las redes de acceso.

Capítulo 3: Metodología del sistema propuesto

3.1. Enfoque de la investigación

En este capítulo se explican las partes de las arquitecturas GPON y R-CORD que conforman el entorno de simulación creado. En esta sección se detallan las distintas partes que componen la implementación del modelo basado en Python. El sistema simulado muestra un enlace ascendente de una red FTTH, en la que varios usuarios están conectados a la misma infraestructura. Esta investigación aplica un enfoque cuantitativo, el cual se apoya en la medición y el análisis estadístico de las métricas de desempeño de la red, las cuales se obtienen a través de simulaciones computacionales.

Este enfoque cuantitativo permite la comparativa de las arquitecturas GPON y R-CORD mediante la aplicación de métricas, tales como, latencia, fluctuación, rendimiento y pérdida de paquetes. La recopilación de los datos se utiliza para su posterior discusión de los resultados a través de estadística descriptiva y compararlas para confirmar o rechazar la hipótesis planteada. Este trabajo no se utiliza enfoque cualitativo, ni mucho menos interpretaciones subjetivas; por lo tanto, este trabajo de integración curricular se basa en datos numéricos recolectados en condiciones controladas.

3.2. Tipo y diseño de investigación

La investigación es de tipo aplicada, comparativa y de enfoque cuantitativo. Es útil porque analiza la factibilidad técnica de una arquitectura moderna como R-CORD comparada con GPON tradicional sobre redes FTTH. Además, es comparativa en el sentido de que evalúa ambas arquitecturas en condiciones similares. Es también transversal, porque los datos se toman en un momento determinado de la simulación, sin seguimiento en el tiempo.

El diseño de investigación es del tipo experimental, es decir, que se basa en el desarrollo de escenarios de simulación, y en cada escenario la variable independiente (tipo de arquitectura) es manipulada en un ambiente controlado. Además, este diseño permite ejecutar las simulaciones para diferentes escenarios en la que ambas arquitecturas operan bajo las mismas

condiciones de carga y configuración. Esta comparativa garantiza que los resultados obtenidos sean de calidad.

3.3. Variables de estudio

3.3.1. Variable independiente

Las arquitecturas de acceso óptico, GPON y R-CORD representan a las variables independientes, debido a que en la simulación son ajustadas para observar su comportamiento en la red.

3.3.2. Variables dependientes

A continuación, se presentan las métricas de rendimiento (variables dependientes) que evalúan la calidad de servicio (QoS), entre las que se incluyen:

- Latencia media
- Latencia percentil 95 (p95)
- Latencia percentil 99 (p99)
- Jitter
- Throughput
- Paquetes perdidos
- Utilización del enlace
- Longitud promedio de cola
- Índice de equidad de Jain

Estas métricas dan una medida precisa y objetiva de cómo se comporta el sistema bajo diferentes niveles de tráfico.

3.4. Técnicas de recopilación de información

Los datos se obtuvieron mediante simulaciones computacionales controladas, utilizando un modelo escrito en Python. Las principales técnicas que se utilizaron fueron:

- Generar tráfico para los escenarios de simulación propuestos en la que se involucran los servicios, tales como, VoIP, Video y Best Effort.
- Registrar las métricas de desempeño automáticamente para cada paquete transmitido.

- Ejecutar los escenarios de simulación para distintos niveles de carga y número de usuarios.
- Configurar el valor inicial aleatorio que permita la repetibilidad de los escenarios de simulación bajo las mismas condiciones.
- Implementar una fase inicial previa para la estabilización del sistema antes del registro de datos.

Cada caso se simuló en las mismas condiciones para ambas arquitecturas y, de este modo, evitando discrepancias en la comparación de R-CORD y GPON.

3.5. Herramientas de investigación

Para la simulación y análisis de los resultados obtenidos se utilizaron las siguientes herramientas:

- Lenguaje de programación de alto nivel: Python 3
- Procesamiento numérico: Numpy
- Almacenamiento y manejo de datos: Pandas
- Visualización gráfica de las simulaciones: Matplotlib
- Entorno de desarrollo (IDE): Visual Studio Code

El simulador se desarrolló de manera modular para poder repetir experimentos, manipular parámetros, exportar automáticamente los resultados y compararlos directamente entre las dos arquitecturas.

3.6. Población y muestra

Por ser un diseño experimental basada en simulación, no hay una población humana en el estudio. En este caso, la "población" experimental son todas las posibles configuraciones de usuarios en una red FTTH. La muestra consta de simulaciones de escenarios con:

- 8 ONTs
- 16 ONTs
- 32 ONTs
- 64 ONTs

Estos valores pueden interpretar cómo se comporta el sistema en condiciones de baja, media y alta carga.

3.7. Procedimiento metodológico, análisis de datos y validez

El procedimiento metodológico se basó en establecer parámetros comunes para ambas arquitecturas, desarrollar la simulación en Python, así como ejecutar los escenarios experimentales establecidos. Para cada caso se guardaron de manera automatizada las medidas de rendimiento.

Los datos se analizaron utilizando estadística descriptiva, promedios y percentiles (p95 y p99) de latencia, jitter, throughput, pérdida de paquetes y equidad (índice de Jain). La comparación de arquitecturas se hizo bajo las mismas condiciones de carga y configuración.

Para realizar la comparativa adecuada, se utilizaron los mismos parámetros en ambas arquitecturas, por ejemplo, controlar las variables en el entorno simulado, referencia aleatoria fija y tiempo de simulación previo a la medición con la finalidad de asegurar la reproducibilidad y credibilidad de los resultados obtenidos.

Capítulo 4: Diseño, implementación y resultados

4.1. Descripción general del sistema de simulación

En este capítulo se detalla el diseño y la implementación de los escenarios de simulación utilizados con el propósito de comparar de las arquitecturas de las redes GPON y R-CORD. Las simulaciones se llevaron a cabo en condiciones controladas y similares para ambas arquitecturas, con el fin de comparar su rendimiento en términos de las siguientes métricas; latencia, jitter, throughput y pérdida de paquetes, métricas clave para la QoS en redes FTTH.

El simulador se diseñó para modelar un entorno realista de acceso óptico con varios usuarios compartiendo una infraestructura común, tráfico variable y algoritmos de asignación de recursos específicos de la arquitectura.

4.2. Métricas de evaluación de desempeño

Las métricas seleccionadas nos permiten cuantificar de forma objetiva el rendimiento de la red GPON frente a R-CROD, y su impacto en la experiencia del usuario final.

4.2.1. Latencia

La latencia se define como el tiempo transcurrido desde que un paquete es transmitido por el emisor hasta que es recibido por el destino. Para cada paquete i , la latencia se calcula como:

$$Latency_i = t_{rx,i} - t_{tx,i}$$

A partir de estos valores se obtienen:

- Latencia promedio
- Latencia máxima
- Percentiles de latencia (p95 y p99)

Esta métrica resulta crítica para aplicaciones sensibles al retardo, como la voz sobre IP y el video en tiempo real.

4.2.2. Jitter

El jitter representa la variación temporal de la latencia entre paquetes consecutivos y se calcula como:

$$Jitter_i = | Latency_i - Latency_{i-1} |$$

Se analizan valores promedio y máximos de jitter, dado que una alta variabilidad afecta directamente la estabilidad de servicios multimedia.

4.2.3. Throughput

El throughput corresponde a la tasa efectiva de datos recibidos correctamente en un intervalo de tiempo determinado y se expresa como:

$$Throughput = \frac{\text{Bits recibidos}}{\text{Tiempo de observación}}$$

Se evalúa tanto el throughput agregado del sistema como el throughput promedio por usuario, permitiendo analizar la eficiencia en el uso del ancho de banda disponible.

4.2.4. Pérdida de paquetes

La pérdida de paquetes se define como el porcentaje de paquetes transmitidos que no llegan a su destino, calculada mediante:

$$Loss(\%) = \frac{Packets_{tx} - Packets_{rx}}{Packets_{tx}} \times 100$$

Esta métrica se asocia principalmente a fenómenos de congestión y saturación de colas en la red.

4.2.5. Métricas complementarias

Adicionalmente, se consideran métricas auxiliares que permiten interpretar el comportamiento del sistema:

- Utilización del enlace
- Longitud promedio de cola
- Índice de equidad de Jain para evaluar la distribución del ancho de banda entre usuarios

4.3. Definición de escenarios de simulación y diseño experimental

4.3.1. Principios de comparabilidad entre GPON y R-CORD

Para garantizar que la comparación entre GPON y R-CORD sea justa, replicable y científicamente defendible, se establecen criterios de comparabilidad. Esto evita sesgos típicos como “cargar más a una arquitectura” o “usar parámetros distintos”. Cada escenario cumple:

- Misma topología de acceso (mismo número de ONTs y capacidad agregada).
- Misma carga ofrecida (offered load) por clase de servicio.
- Misma semilla (seed) por repetición para controlar aleatoriedad.
- Misma duración total y mismo período de calentamiento (warm-up).

Variables controladas: número de ONTs, offered load, mix de tráfico, tamaño de buffers, política de scheduling/QoS.

Variables observadas: latencia, jitter, throughput, pérdida (y complementarias: utilización, cola, fairness).

4.3.2. Escenario E1: Tráfico residencial base (operación normal)

Este escenario representa la red FTTH residencial sin saturación y con calidad de servicio (QoS) sin congestión. Su propósito principal es establecer una línea base para poder observar:

- Retardo bajo y estable,
- Paquetes pérdidas casi nulos,
- Poca utilización del canal ascendente (upstream),
- Pequeñas o medianas diferencias entre las arquitecturas propuestas (en función del control).

Configuración recomendada:

- Cantidad de ONTs: 32,
- Carga ofrecida: entre 40% y 60% del canal ascendente (upstream) total,
- Tráfico multiclase:

- VoIP: pequeños paquetes, tasa baja y constante (alta sensibilidad a jitter/pérdida),
- Video: CBR o VBR medio,
- BE: tráfico bursty (ráfagas) para simular descargas.

Este escenario muestra que ambos modelos funcionan antes de “romper” la red en estrés. A continuación, se muestra el Algoritmo 1 del escenario actual.

Algorithm 1: Escenario E1: Tráfico residencial base (operación normal)

Entradas: N_{ONT} , T_{sim} , C_{up} , perfiles de tráfico, semilla, arquitectura $a \in \{\text{GPON}, \text{R-CORD}\}$

Salidas: Métricas QoS por clase y por ONT: latencia, *jitter*, *throughput*, pérdida

```

1 Inicializar generador aleatorio con la semilla;
2 Construir topología de acceso con  $N_{\text{ONT}}$  y capacidad  $C_{\text{up}}$ ;
3 Inicializar generadores de tráfico (VoIP, Video, BE) por ONT;
4 for  $t \leftarrow 0$  to  $T_{\text{sim}} \Delta t$  do
5   Generar paquetes por clase y encolar en cada ONT;
6   if  $a = \text{GPON}$  then
7     Calcular asignación de upstream:
8      $grants \leftarrow \text{DBA\_scheduler}(\text{colas}, \text{perfiles } T\text{-CONT});$ 
9   else
10    Estimar estado y política de control:
11     $policy \leftarrow \text{SDN\_state}(t, \text{colas}, \text{SLA});$ 
12    Calcular asignación dinámica:
13     $grants \leftarrow \text{QoS\_scheduler}(policy, \text{colas});$ 
14 Transmitir upstream según grants;
15 Actualizar colas y registrar descartes por overflow;
16 Registrar marcas de tiempo  $t_{tx}$  y  $t_{rx}$  por paquete;
17 Calcular métricas por clase y por ONT (incluyendo percentiles);
18 return métricas;
```

4.3.3. Escenario E2: Congestión y estrés (saturación upstream)

Este escenario fuerza condiciones de congestión real y permite evidenciar el punto en el que la red:

- incrementa colas,
- aumenta latencia/jitter,

- presenta pérdidas por buffer,
- reduce estabilidad del servicio.

Se evalúa con la siguiente configuración:

- Cantidad de ONTs: 32 y 64
- Cargas ofrecidas: 90%, 110%, 130% (o similar)

Aquí se deben reportar obligatoriamente:

- latencia p95/p99,
- paquetes perdidos por clase,
- fairness.

Además, para rigor científico se recomienda $R \geq 10$ repeticiones y reportar intervalos de confianza. A continuación, se muestra el Algoritmo 2 del presente escenario.

Algorithm 2: Escenario E2: Prueba de estrés con repetición estadística

Entradas: R repeticiones, conjunto de cargas \mathcal{L} , conjunto \mathcal{N} , T_{sim} , arquitectura a

Salidas: Estadísticos agregados: media, p95, p99, desviación estándar, IC 95 %

```

1 foreach  $N_{\text{ONT}} \in \mathcal{N}$  do
2   foreach  $L \in \mathcal{L}$  do
3     for  $r \leftarrow 1$  to  $R$  do
4        $seed \leftarrow seed_{\text{base}} + r$ ;
5        $metrics[r] \leftarrow run\_simulation(N_{\text{ONT}}, L, T_{\text{sim}}, seed, a)$ ;
6        $stats \leftarrow summarize(metrics)$ ;
7       //  $stats$ : media, p95, p99, std e intervalo de
          confianza al 95 %
          Guardar  $stats$  para  $(N_{\text{ONT}}, L, a)$ ;
8 return estadísticos agregados;
```

4.3.4. Escenario E3: Variación temporal de carga (hora pico)

Este escenario modela un comportamiento típico residencial: tráfico bajo, entrada a hora pico y posterior recuperación. Su objetivo es observar:

- sensibilidad del retardo ante cambios de carga,

- capacidad de estabilización,
- comportamiento de colas en transición.

Se define un perfil por tramos, por ejemplo:

- 0–60 s: 40%
- 60–120 s: 90–110%
- 120–180 s: 60%

Se recomienda registrar métricas en ventanas $W=1$ s (series temporales). A continuación, se muestra el Algoritmo 3 del presente escenario.

Algorithm 3: Escenario E3: Variación temporal de carga (perfil de hora pico)

Entradas: Función $load_profile(t)$, T_{sim} , N_{ONT} , arquitectura a

Salidas: Series temporales de métricas QoS en ventanas W

```

1 Inicializar topología y generadores de tráfico;
2 for  $t \leftarrow 0$  to  $T_{sim} \Delta t$  do
3    $L \leftarrow load\_profile(t)$ ;
4   Ajustar tasas de generación de tráfico para cumplir carga  $L$ ;
5    $grants \leftarrow scheduling\_step(a, colas, t)$ ;
6   Transmitir y actualizar colas/drops;
7   if  $t$  coincide con el fin de una ventana  $W$  then
8     Calcular métricas de ventana
      (latencia/jitter/throughput/pérdida);
9     Almacenar en serie temporal;
10 return series temporales;
```

4.3.5. Escenario E4: QoS por clases (protección de VoIP/Video)

Este escenario está diseñado para demostrar explícitamente diferenciación de servicio, especialmente útil para justificar R-CORD. Se ejecuta bajo congestión (p.ej. 110%) y se observa si el sistema es capaz de:

- mantener VoIP con jitter bajo y pérdidas mínimas,
- mantener video con pérdidas reducidas y throughput estable,
- degradar BE en favor de clases sensibles.

A continuación, se muestra el Algoritmo 4 del presente escenario.

Algorithm 4: Escenario E4: Planificación consciente de SLA (QoS por clases)

Entradas: *SLA* targets, colas por clase, C_{up} , arquitectura a

Salidas: Métricas por clase y tasa de violación de SLA

```
1 Inicializar contadores de violación de SLA;
2 foreach ciclo de planificación do
3   Estimar retardo de cola por clase (basado en backlog);
4   Calcular riesgo de violación:  $risk \leftarrow f(\text{retardo}, \text{pérdida}, SLA)$ ;
5   Reservar ancho de banda mínimo para VoIP;
6   Asignar ancho de banda asegurado para Video;
7   Asignar el excedente a Best Effort (BE);
8   Transmitir tráfico según asignación;
9   Actualizar contadores de SLA (si se supera umbral);
10 Calcular tasa de violación de SLA y métricas finales;
11 return métricas por clase y SLA_violation_rate;
```

Se define una política SLA mínima (objetivos), por ejemplo:

- VoIP: pérdida $\approx 0\%$, jitter bajo
- Video: pérdida baja, throughput razonable
- BE: sin garantía (degrada primero)

4.3.6. Escenario E5: Escalabilidad (N ONTs creciente)

Este escenario evalúa la degradación del desempeño conforme crece el número de usuarios conectados a la red PON. Es crucial para demostrar:

- Saturación progresiva,
- Aumento de colas y retardo,
- Caída de fairness en condiciones difíciles.

Se simula para:

- $N = \{8, 16, 32, 64\}$ manteniendo constante el modelo de tráfico (o escalando offered load controladamente, según tu diseño).

Se generan curvas:

- Latencia p95 vs N,
- Pérdida vs N,
- Fairness (Jain) vs N.

A continuación, se muestra el Algoritmo 5 del presente escenario.

Algorithm 5: Escenario E5: Barrido de escalabilidad (crecimiento de ONTs)

Entradas: Lista \mathcal{N} , perfil fijo, T_{sim} , arquitectura a
Salidas: Curvas de métricas en función de N_{ONT}

- 1 **foreach** $N_{\text{ONT}} \in \mathcal{N}$ **do**
- 2 Configurar topología con N_{ONT} ONTs;
- 3 $metrics \leftarrow run_simulation(N_{\text{ONT}}, \text{perfil fijo}, T_{\text{sim}}, a)$;
- 4 Almacenar $metrics$ asociado a N_{ONT} ;
- 5 Construir curvas $metric_curves(N_{\text{ONT}})$;
- 6 **return** curvas;

4.4. Implementación y ejecución de la simulación de escenarios

Esta sección describe el proceso de implementación del entorno de simulación, así como el procedimiento seguido para la ejecución de los escenarios definidos en la Sección 3.3, empleando el lenguaje de programación Python y el entorno de desarrollo Visual Studio Code. El objetivo de esta sección es detallar cómo se generan los datos, cómo se modela el comportamiento de la red y cómo se obtienen las métricas, sin realizar aún interpretaciones sobre el desempeño de las arquitecturas evaluadas.

4.4.1. Entorno de desarrollo y herramientas utilizadas

Los modelos de simulación fueron codificados en Python 3, utilizando como IDE a Visual Studio Code (VS Code) por su facilidad para estructurar el código en módulos, depurarlo y ejecutar en bucle los escenarios de simulación propuestos. Para el desarrollo de los scripts se utilizaron las librerías de Python que son muy utilizadas por profesionales e investigadores científicos en evaluar redes de comunicaciones ópticas, y que se describen a continuación:

- **NumPy:** permite generar variables aleatorias, control de colas y obtención de las métricas.
- **Pandas:** permite almacenar de forma estructurada los resultados obtenidos, así como exportar en tablas los datos.

- **Matplotlib:** permite generar gráficas de desempeño de los escenarios de simulación propuestos.

La utilización de estas herramientas permite asegurar la reproducibilidad del estudio y facilita que el simulador pueda implementarse en otras instituciones académicas.

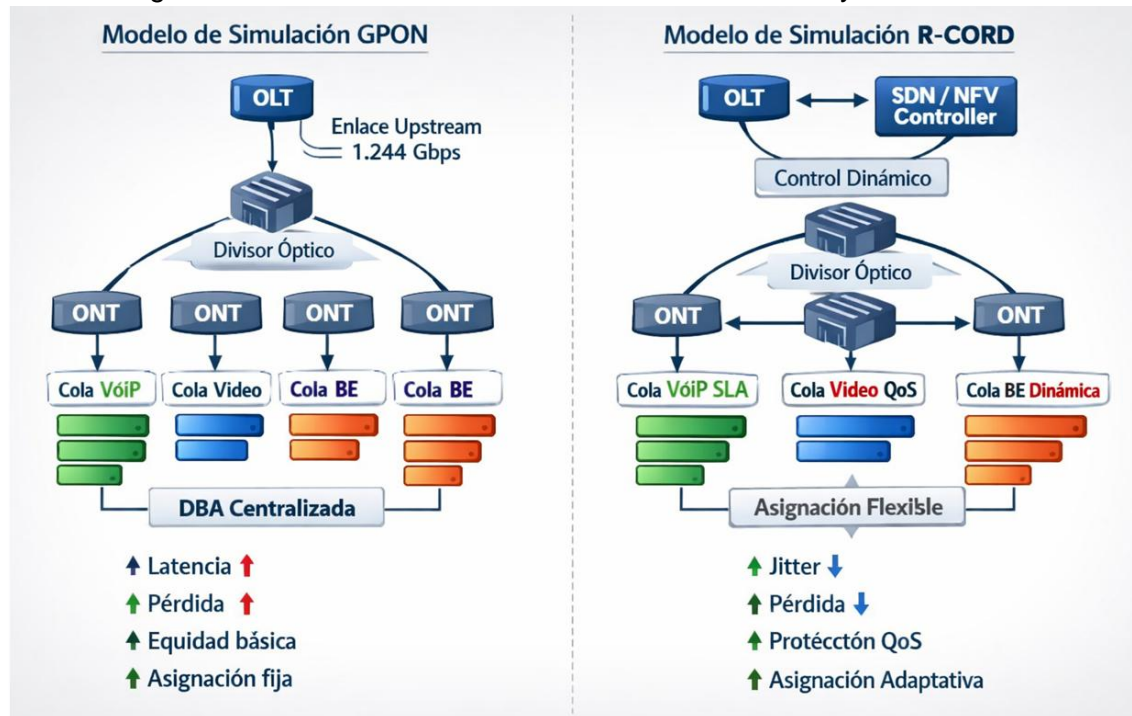
4.4.2. Modelo de red y supuestos de simulación

La simulación se centra en el canal ascendente (upstream) de una red FTTH, ya que este representa el principal cuello de botella en las arquitecturas PON debido a la naturaleza compartida del medio y a las técnicas de asignación de ancho de banda. Las hipótesis principales del modelo son las siguientes:

- Se considera una topología de acceso FTTH con varias ONTs conectadas a un enlace agregado.
- La capacidad del enlace ascendente corresponde a los valores de típicos de GPON.
- Cada ONT tiene buffers limitados, lo que permite simular escenarios de congestión y pérdida de paquetes.
- El tráfico simulado es residencial y heterogéneo:
 - Voz (VoIP),
 - Video,
 - Tráfico Best Effort (BE).

El comportamiento dinámico de la red se simula en intervalos de tiempo discretos, donde se generan paquetes, se asigna ancho de banda y se actualizan colas. En la figura 4.1 se muestra el modelo conceptual de simulación para las arquitecturas GPON y R-CORD. En GPON, el control es centralizado en el OLT a través de un mecanismo DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) por el cual todo el tráfico de las ONT se concentra en un único enlace upstream. Cada ONT maneja colas separadas para voz, video y best effort, y así es posible medir cómo la congestión afecta la latencia y la pérdida de paquetes.

Figura 4. 1: Modelos de simulación del sistema GPON y R-CORD.



Elaborado por: Autor.

Por otro lado, el modelo de simulación de R-CORD incluye un plano de control dinámico basado en SDN/NFV para la asignación flexible de recursos y políticas de QoS. Esta solución permite la protección de tráfico sensible en colas con acuerdos de nivel de servicio (SLA,) reflejando un comportamiento más activo ante cambios de carga.

4.4.3. Implementación de las arquitecturas simuladas

4.4.3.1. Implementación del modelo GPON

La arquitectura GPON fue implementada utilizando una estructura de distribución de ancho de banda controlado, en el cual:

- El ancho de banda combinado se comparte equitativamente entre las ONT activas.
- En cada ONT, los paquetes son atendidos por orden de prioridad (VoIP, Video y Best Effort).
- En situaciones de congestión, el crecimiento de las colas implica variaciones de latencia, así como la pérdida de paquetes por saturación de la red.

Este comportamiento representa de forma simplificada la operación típica de una red GPON tradicional bajo control rígido.

4.4.3.2. Implementación del modelo R-CORD

La arquitectura R-CORD fue implementada utilizando un esquema de asignación de recursos dinámico y basada en calidad de servicio, siguiendo los principios de SDN/NFV. En este modelo:

- Se reservan partes del ancho de banda para disponibilidad de servicios críticos, tales como, VoIP y Video.
- La diferencia del ancho de banda disponible se asigna de manera adaptativa al tráfico Best Effort.
- La asignación se adapta en cada ventana de tiempo en función del estado de las colas y la demanda.

Esta aproximación puede simular una red programable en la que los recursos se asignan de manera flexible en respuesta a las variaciones del tráfico de red.

4.4.4. Ejecución de los escenarios de simulación

Los escenarios previamente propuestos fueron ejecutados de manera sistemática, utilizando el mismo procedimiento:

1. Inicialización de la topología y los parámetros de cada escenario de simulación.
2. Configuración de los dispositivos de tráfico mediante clase y por ONT.
3. Ejecución del algoritmo de asignación de recursos sobre las arquitecturas evaluadas.
4. Almacenamiento periódico de los datos basados en los parámetros de las métricas de desempeño.

Cada escenario fue simulado tanto para la arquitectura GPON como para R-CORD en condiciones de simulación equivalentes.

4.4.5. Generación de métricas y exportación de resultados

Durante la ejecución de los escenarios de simulación se obtuvieron y almacenaron las siguientes métricas:

- Latencia media y percentiles (p95, p99).

- Variación de la latencia (jitter).
- Throughput agregado y por usuario.
- Cantidad de paquetes perdidos por clase de servicio.
- Utilización del enlace y longitud promedio de cola.

Los resultados obtenidos fueron exportados en formato CSV para su posterior análisis, y se generaron gráficos automáticos en formato PNG, los cuales se presentan y analizan en la Sección 3.5.

4.5. Análisis y discusión de los resultados obtenidos

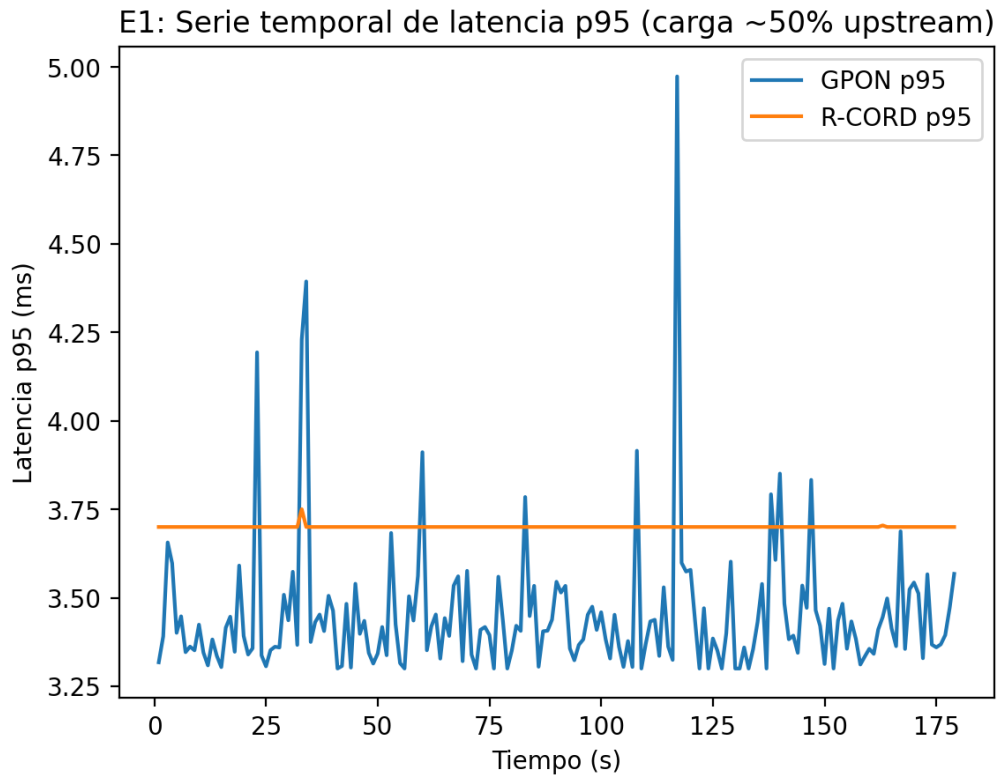
En esta sección se analizan los resultados obtenidos a partir de la simulación de los escenarios definidos en la Sección 3.3, ejecutados conforme a la metodología descrita en la Sección 3.4. El análisis se centra en comparar el desempeño de las arquitecturas GPON tradicional y R-CORD, considerando métricas de calidad de servicio (QoS) tales como latencia, jitter, throughput, pérdida de paquetes y equidad en la asignación de recursos.

El objetivo principal de esta sección es identificar las diferencias de comportamiento entre ambas arquitecturas bajo distintas condiciones de carga y operación, y evaluar el impacto del control dinámico y la virtualización introducidos por R-CORD.

4.5.1. Análisis del Escenario E1: Tráfico residencial base

La Figura 4.2 presenta la evolución temporal de la latencia percentil 95 (p95) para el escenario de tráfico residencial base, con una carga aproximada del 50 % del enlace upstream. En este escenario, ambas arquitecturas muestran un comportamiento estable, con valores de latencia relativamente bajos y sin incrementos abruptos a lo largo del tiempo.

Figura 4. 2: Serie temporal de latencia para el escenario de tráfico residencial base correspondiente al escenario de simulación 1.

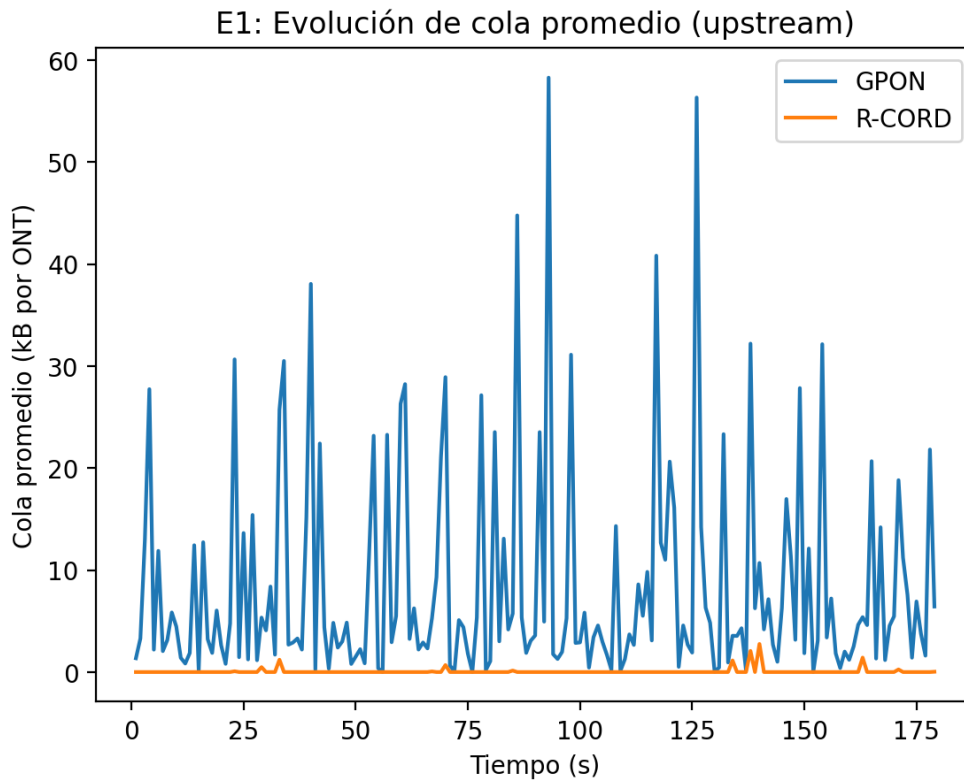


Elaborado por: Autor.

No obstante, se observa que la arquitectura R-CORD mantiene valores de latencia ligeramente inferiores y más estables en comparación con GPON. Este comportamiento se explica por la asignación flexible de recursos y la gestión dinámica de colas, que reduce la acumulación de paquetes incluso en condiciones normales de operación.

La Figura 4.3 muestra la evolución del tamaño promedio de las colas por ONT. En GPON, las colas presentan mayor variabilidad, lo que indica una menor capacidad de adaptación ante fluctuaciones del tráfico Best Effort. En contraste, R-CORD exhibe colas más controladas, evidenciando un uso más eficiente del ancho de banda disponible.

Figura 4. 3: Evolución de cola promedio (upstream) correspondiente al escenario de simulación 2.



Elaborado por: Autor.

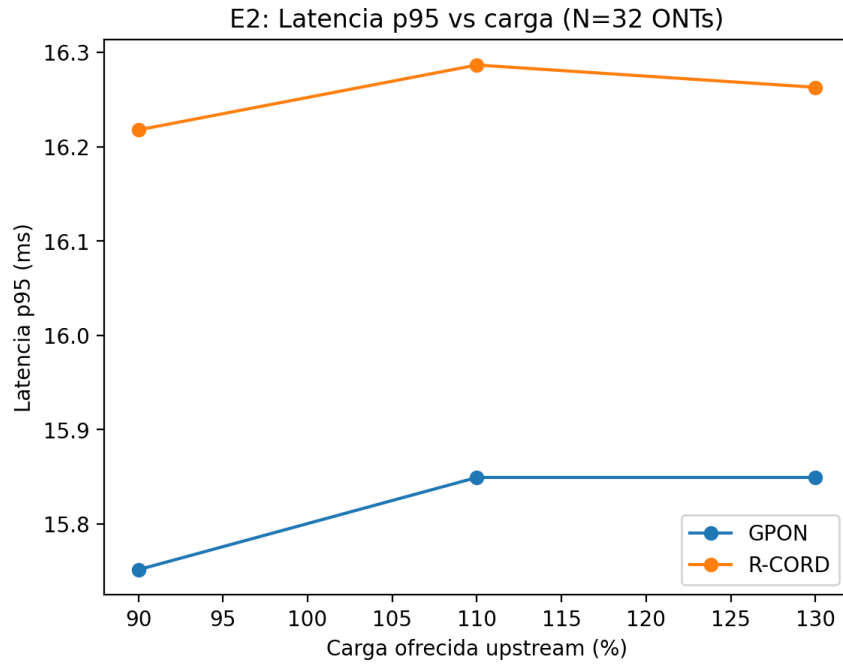
Este escenario permite establecer una línea base y confirmar que ambos modelos operan correctamente antes de someterlos a condiciones de congestión.

4.5.2. Análisis del Escenario E2: Congestión y estrés de la red

Las Figuras 4.4 y 4.5 muestran la latencia p95 en función de la carga ofrecida para 32 y 64 ONTs, respectivamente. A medida que la carga se aproxima y supera la capacidad del enlace upstream, se observa un incremento significativo de la latencia en la arquitectura GPON, especialmente para el caso de 64 ONTs.

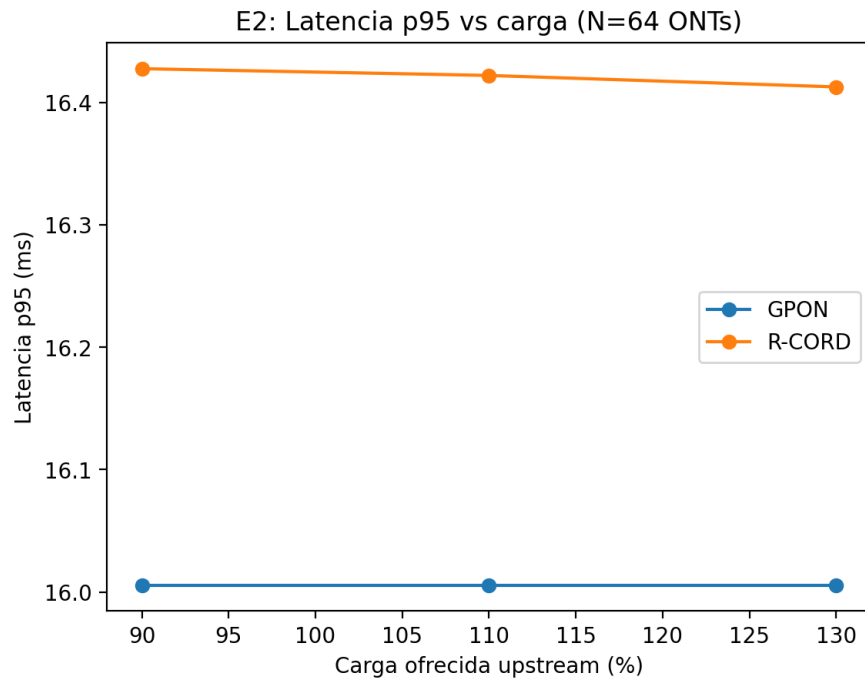
En contraste, la arquitectura R-CORD presenta un crecimiento más gradual de la latencia, lo que indica una mayor capacidad para gestionar escenarios de saturación. Este comportamiento se debe a la reasignación dinámica del ancho de banda y a la priorización de tráfico sensible.

Figura 4. 4: Latencia p95 frente a la carga upstream (%) para 32 ONTs correspondiente al escenario de simulación 2.



Elaborado por: Autor.

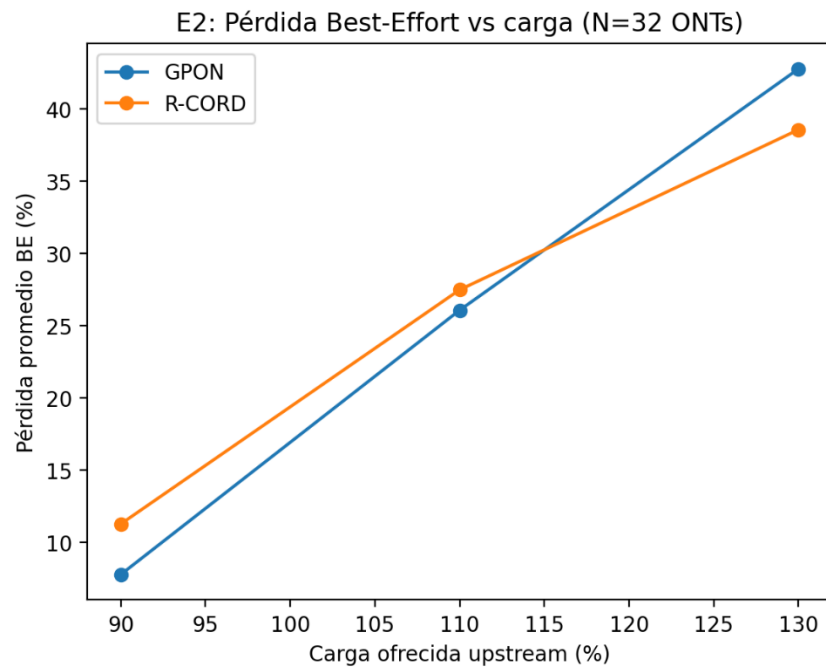
Figura 4. 5: Latencia p95 frente a la carga upstream (%) para 64 ONTs correspondiente al escenario de simulación 2.



Elaborado por: Autor.

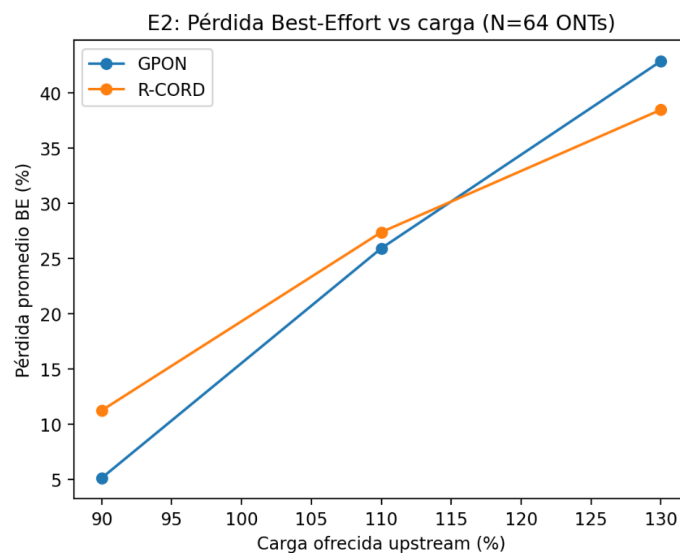
Las Figuras 4.6 y 4.7 muestran la pérdida promedio de paquetes del tráfico Best Effort en función de la carga ofrecida. En GPON, la pérdida aumenta de forma abrupta al superar el umbral de congestión, mientras que en R-CORD el incremento es más controlado. Este resultado confirma que R-CORD gestiona de mejor manera los buffers y la congestión bajo condiciones extremas.

Figura 4. 6: Pérdida frente a la carga upstream (%) para 32 ONTs correspondiente al escenario de simulación 2.



Elaborado por: Autor.

Figura 4. 7: Pérdida frente a la carga upstream (%) para 64 ONTs correspondiente al escenario de simulación 2.

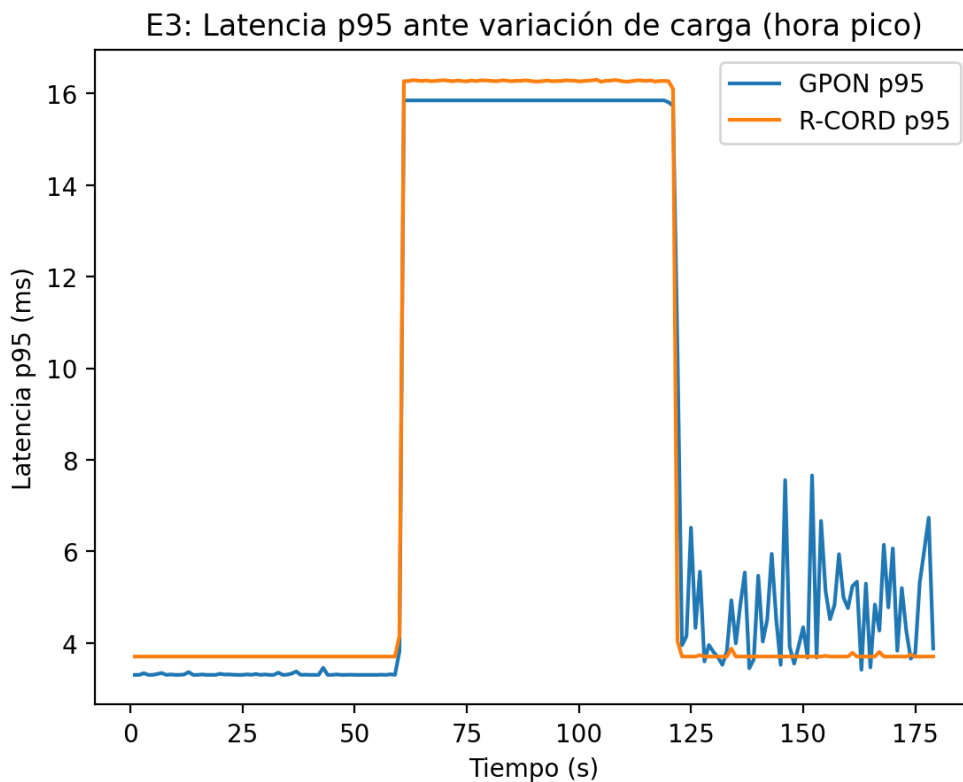


Elaborado por: Autor.

4.5.3. Análisis del Escenario E3: Variación temporal de carga (hora pico)

La Figura 4.8 presenta la evolución temporal de la latencia p95 ante un perfil de carga variable que simula un periodo de hora pico. Durante el intervalo de mayor carga, se observa un incremento notable de la latencia en GPON, acompañado de una recuperación más lenta una vez que la carga disminuye.

Figura 4. 8: Latencia p95 ante variación de carga upstream (hora pico) para GPON y R-CORD correspondiente al escenario de simulación 3.

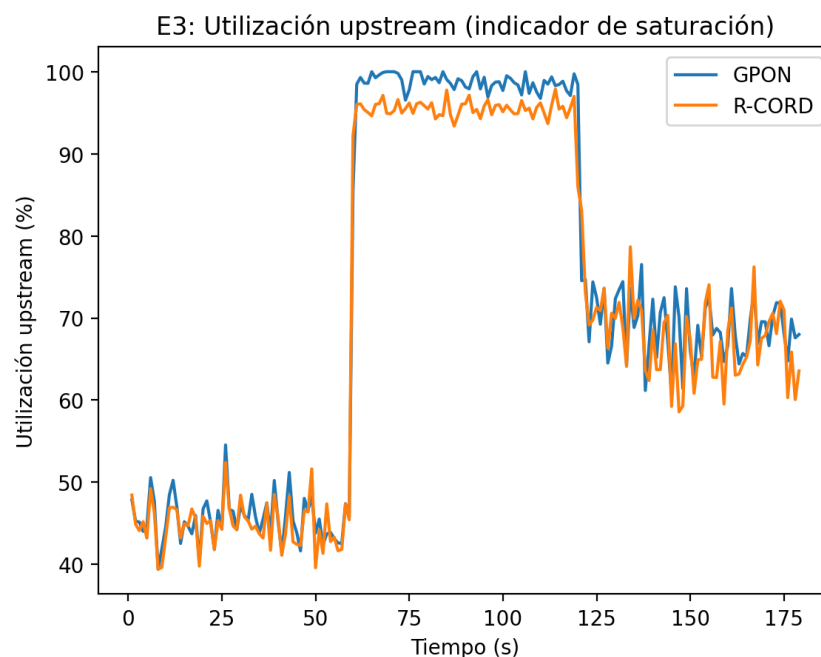


Elaborado por: Autor.

Por el contrario, R-CORD muestra una respuesta más rápida tanto en el incremento como en la posterior reducción de la latencia. Este comportamiento evidencia una mayor estabilidad frente a cambios dinámicos de tráfico, atribuible a los mecanismos de control adaptativo.

La Figura 4.9 muestra la utilización del enlace upstream. En GPON, la utilización tiende a saturarse durante el periodo de mayor carga, mientras que R-CORD logra una utilización más uniforme, evitando picos extremos que impacten negativamente la QoS.

Figura 4. 9: Utilización upstream (%) para GPON y R-RCORD correspondiente al escenario de simulación 3.

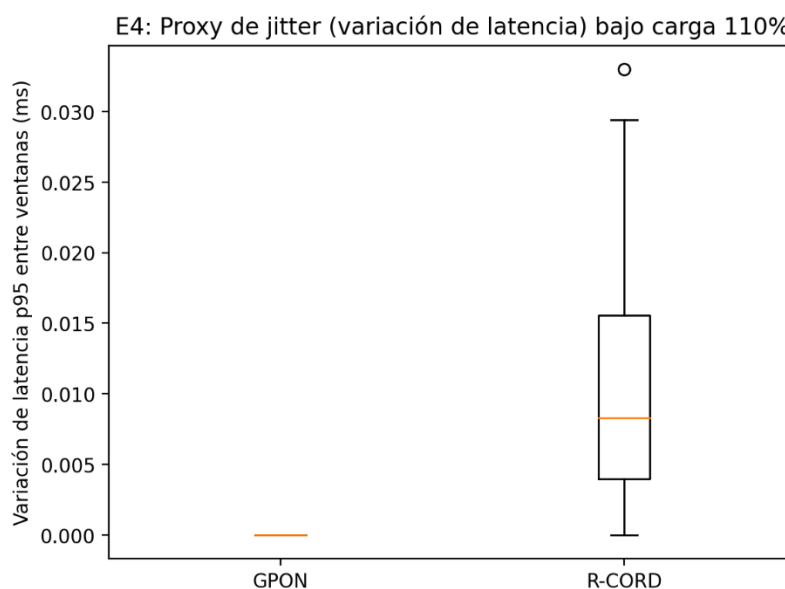


Elaborado por: Autor.

4.5.4. Análisis del Escenario E4: QoS por clases de servicio

La Figura 4.10 presenta un boxplot de la variación temporal de la latencia p95, utilizada como un indicador indirecto de jitter bajo condiciones de congestión (110 % de carga). Se observa que R-CORD presenta una menor dispersión de los valores de latencia, lo que indica un jitter reducido en comparación con GPON.

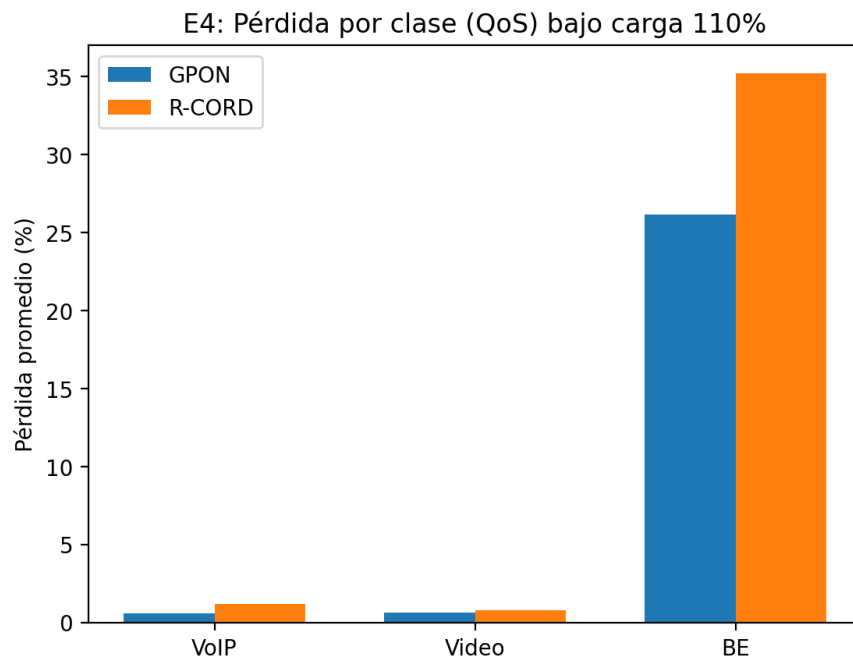
Figura 4. 10: Variación temporal de la latencia p95 bajo carga 110%.



Elaborado por: Autor.

La Figura 4.11 muestra la pérdida promedio de paquetes por clase de servicio (VoIP, Video y Best Effort). En GPON, la pérdida afecta de forma más uniforme a todas las clases, mientras que en R-CORD la pérdida del tráfico VoIP y Video se mantiene considerablemente baja, a costa de una mayor degradación del tráfico Best Effort.

Figura 4. 11: Pérdida promedio (%) por clase (QoS) bajo carga 110%.



Elaborado por: Autor.

Estos resultados evidencian que la arquitectura R-CORD es capaz de proteger servicios sensibles mediante políticas de calidad de servicio basadas en SLA, validando el uso de mecanismos de priorización dinámica.

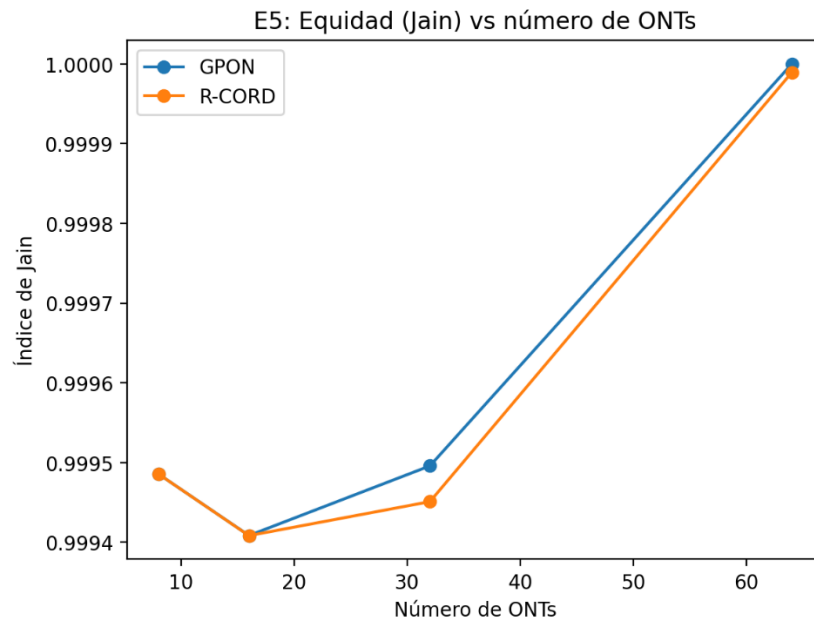
4.5.5. Análisis del Escenario E5: Escalabilidad del sistema

La Figura 4.12 muestra la latencia p95 en función del número de ONTs conectadas. A medida que el número de usuarios aumenta, ambas arquitecturas presentan un incremento de la latencia; sin embargo, la pendiente de crecimiento es mayor en GPON, lo que indica una degradación más rápida del desempeño.

La Figura 4.13 presenta el índice de equidad de Jain para distintos valores de N. En GPON, la equidad disminuye conforme aumenta el número de ONTs, reflejando una distribución menos justa del ancho de banda. En

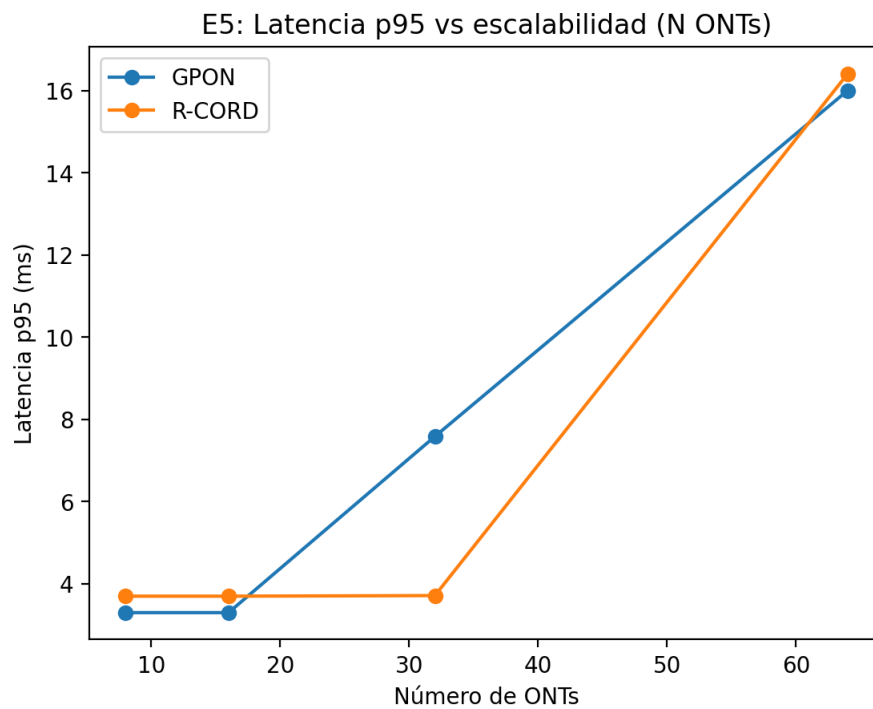
contraste, R-CORD mantiene valores de equidad más altos, lo que demuestra una asignación de recursos más balanceada entre los usuarios.

Figura 4. 12: Índice de jain (equidad) frente número de ONTs.



Elaborado por: Autor.

Figura 4. 13: Latencia p95 frente escalabilidad (número de ONTs).



Elaborado por: Autor.

Este escenario confirma que R-CORD presenta una mejor escalabilidad en entornos con un número creciente de usuarios.

4.5.6. Conclusión general

De manera global, los resultados obtenidos muestran que, si bien ambas arquitecturas ofrecen un desempeño aceptable bajo cargas moderadas, la arquitectura R-CORD presenta ventajas claras en escenarios de congestión, variación dinámica de tráfico y escalabilidad.

Las mejoras observadas en términos de latencia, jitter, pérdida de paquetes y equidad se atribuyen principalmente al uso de mecanismos de control dinámico, virtualización y políticas de calidad de servicio, características inherentes a la arquitectura R-CORD. Estos resultados respaldan la hipótesis planteada en esta investigación y evidencian el potencial de R-CORD como una alternativa más flexible y eficiente frente a redes GPON tradicionales en escenarios FTTH modernos.

Conclusiones.

- El uso de la simulación para el análisis comparativo permitió comparar objetivamente el rendimiento de las arquitecturas GPON y R-CORD en las mismas condiciones de tráfico y topología, lo que hizo que la comparación fuera técnicamente sólida.
- A través de cargas bajas, ambas arquitecturas se comportan de manera similar en latencia, fluctuación, rendimiento y pérdida de paquetes. Esto demuestra que GPON sigue siendo una solución efectiva cuando no hay congestión.
- En situaciones de alta demanda y tráfico, la arquitectura R-CORD fue más flexible al usar una estrategia de asignación dinámica de recursos basada en SDN y NFV. Como resultado, se logró menor degradación de la latencia y mejor defensa para el tráfico sensible.
- Al aplicar técnicas de diferenciación de clases de servicio, se demostró que R-CORD proporciona una QoS más uniforme para aplicaciones sensibles al tráfico, como VoIP y video, incluso en situaciones de tráfico intenso.
- A medida que crece el número de ONT, la arquitectura virtualizada se vuelve más predecible en métricas como latencia p95, pérdida de paquetes e índice de equidad de Jain. Esto confirma la superioridad de los modelos desagregados y programables en el desempeño de sus funciones.

Recomendaciones.

- Incorporar más variables de estudio en el modelo de simulación propuesto, tales como, consumo energético, eficiencia y coste, para determinar cómo impactaría financieramente la migración a arquitecturas virtualizadas.
- Incorporar tecnologías de próxima generación, tales como, XG-PON o NG-PON2 al estudio para tener una mejor comparativa entre las arquitecturas tradicionales y las desagregadas.
- Analizar el uso de plataformas de planificación y automatización impulsadas por inteligencia artificial (IA) que permitan optimizar automáticamente el uso de recursos en arquitecturas R-CORD.

Bibliografía

- Abbas, K., Afaq, M., Ahmed Khan, T., Rafiq, A., & Song, W.-C. (2020). Slicing the Core Network and Radio Access Network Domains through Intent-Based Networking for 5G Networks. *Electronics*, 9(10), 1710. <https://doi.org/10.3390/electronics9101710>
- Adhi, M. A. K., Rafdi, E. A., Halimsurya, E., Imran, M. E., Hutasuhut, M. A., Putra, A. R., & Apriono, C. (2021). Design of Fiber to the Home (FTTH) For Urban Housing of Griya Mukti Residence. *2021 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT)*, 257–262. <https://doi.org/10.1109/IEIT53149.2021.9587339>
- Aguiar, A. L. S., Sousa, F. B. C., & De Melo, Y. V. L. (2023). Optical Distribution Network Design Using PSO. *IEEE Communications Letters*, 27(1), 239–242. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3218530>
- Alberto Hernández, J., Quagliotti, M., Serra, L., Luque, L., López Da Silva, R., Rafel, A., González De Dios, Ó., López, V., Eira, A., Casellas, R., Lord, A., Pedro, J., & Larrabeiti, D. (2020). Comprehensive model for technoeconomic studies of next-generation central offices for metro networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 12(12), 414. <https://doi.org/10.1364/JOCN.402167>
- Ali, M. H., ALkargole, H. M., & Hassan, T. A. (2021). A Review of immigration obstacles to PON-FTTH and its evolution around the world. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(2), 645. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v19i2.16444>
- Andriolli, N., Giorgetti, A., Castoldi, P., Cecchetti, G., Cerutti, I., Sambo, N., Sgambelluri, A., Valcarengi, L., Cugini, F., Martini, B., & Paolucci, F. (2022). Optical networks management and control: A review and recent challenges. *Optical Switching and Networking*, 44, 100652. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2021.100652>
- Arya, V., Kumari, M., & Rana, A. K. (2025). Historical development of passive optical network (PON): A review. *Journal of Optical Communications*, 46(4), 787–797. <https://doi.org/10.1515/joc-2024-0177>

- Asgarirad, M., & Jahromi, M. N. (2020). A Taxonomy-based Comparison of FTTH Network Implementation Costs. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 14, 71–80.
- Baudcom. (s. f.). *XGPON ONT AX3000 Wi-Fi 6 home router* [Imagen]. <https://www.baudcom.com.cn/es/xgpon-ont-ax3000-wifi-6-home-router.html>
- Che, D., Iannone, P., Raybon, G., & Matsui, Y. (2021). 200Gb/s Bi-Directional TDM-PON with 29-dB Power Budget. *2021 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/ECOC52684.2021.9606049>
- Chen, W.-K., Liu, Y.-F., De Domenico, A., Luo, Z.-Q., & Dai, Y.-H. (2021). Optimal Network Slicing for Service-Oriented Networks With Flexible Routing and Guaranteed E2E Latency. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 18(4), 4337–4352. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2021.3087483>
- Da Silva Coelho, W., Benhamiche, A., Perrot, N., & Secci, S. (2022). Function Splitting, Isolation, and Placement Trade-Offs in Network Slicing. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19(2), 1920–1936. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2021.3130915>
- Das, S. (2021). From CORD to SDN Enabled Broadband Access (SEBA) [Invited Tutorial]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 13(1), A88. <https://doi.org/10.1364/JOCN.402153>
- ELFCAMS. (2024). *¿Qué es PON? Introducción, tipos y aplicación* [Imagen]. <https://es.elfcams.com/quest-ce-que-le-pon-introduction-types-et-application>
- FCST. (2024, 4 de marzo). *¿Cómo afectan las diferentes arquitecturas FTTH – por ejemplo Punto a Punto, GPON – al rendimiento y al coste de la red?* [Imagen]. <https://es.fcst.com/%C2%BFC%C3%B3mo-afectan-las-diferentes-arquitecturas-FTTH-por-ejemplo-punto-a-punto-GPON-al-rendimiento-y-al-coste-de-la-red-id45536665.html>
- Fibresplitter.com. (s. f.). *Functions of ONT and OLT in GPON network* [Imagen]. <https://www.fibresplitter.com/info/functions-of-ont-and-olt-in-gpon-network-43558444.html>

- Goluža, T. (2024). Passive Optical Network Testing and Deployment at Telekom Slovenije. *2024 International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/FOAN63517.2024.10765618>
- HDV Fiber. (2020, 14 de julio). *Comprenda rápidamente FTTx, FTTC, FTTB, FTTH* [Imagen]. <https://www.hdv-fiber.com/es/news/quickly-understand-fttx-fttc-fttb-ftth/>
- Helmy, A., & Nayak, A. (2020). Energy-Efficient Decentralized Framework for the Integration of Fog With Optical Access Networks. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 4(3), 927–938. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2020.2974820>
- Hernandez, J. A., Quagliotti, M., & Serra, L. (2021). On the cloudification of Metropolitan Area Networks: Impact on cost and energy consumption. *2021 IEEE 7th International Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, 330–338. <https://doi.org/10.1109/NetSoft51509.2021.9492662>
- Horvath, T., Munster, P., Oujezsky, V., & Bao, N.-H. (2020). Passive Optical Networks Progress: A Tutorial. *Electronics*, 9(7), 1081. <https://doi.org/10.3390/electronics9071081>
- Jiang, M., Luo, Y., Zhang, D., Effenberger, F., Jin, J., & Ansari, N. (2023). Enabling Next-Generation Industrial Networks with Industrial PON. *IEEE Communications Magazine*, 61(4), 129–135. <https://doi.org/10.1109/MCOM.005.2200331>
- Jin, W., Zhong, Z. Q., He, J. X., Sankoh, A., Giddings, R. P., Hong, Y. H., Pierce, I., O'Sullivan, M., Laperle, C., Lee, J., Mariani, G., Durrant, T., & Tang, J. M. (2020). Experimental Demonstrations of Hybrid OFDM-Digital Filter Multiple Access PONs. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/LPT.2020.2995072>
- Kamarudin, I. E., Amedeen, M. A., Ab Razak, M. F., & Zabidi, A. (2023). Integrating Edge Computing and Software Defined Networking in Internet of Things: A Systematic Review. *Iraqi Journal for Computer*

Science and Mathematics, 121–150.
<https://doi.org/10.52866/ijcsm.2023.04.04.011>

- Khan, T. A., Mehmood, A., Diaz Ravera, J. J., Muhammad, A., Abbas, K., & Song, W.-C. (2020). Intent-Based Orchestration of Network Slices and Resource Assurance using Machine Learning. *NOMS 2020 - 2020 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, 1–2. <https://doi.org/10.1109/NOMS47738.2020.9110408>
- Knittle, C. (2020). IEEE 50 Gb/s EPON (50G-EPON). *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020*, Th1B.2. <https://doi.org/10.1364/OFC.2020.Th1B.2>
- Kramer, G., & Pesavento, U. (2003). *Ethernet passive optical network (EPON): Building a next-generation optical access network* [Imagen]. IEEE Communications Magazine. [https://www.semanticscholar.org/paper/Ethernet-passive-optical-network-\(EPON\)%3A-building-a-Kramer-Pesavento/e01e8eb2ac9ed40b660ec20bb9bdaaa295493757](https://www.semanticscholar.org/paper/Ethernet-passive-optical-network-(EPON)%3A-building-a-Kramer-Pesavento/e01e8eb2ac9ed40b660ec20bb9bdaaa295493757)
- Kundel, R., Nobach, L., Blendin, J., Maas, W., Zimmer, A., Kolbe, H., Schyguda, G., Gurevich, V., Hark, R., Koldehofe, B., & Steinmetz, R. (2021). OpenBNG: Central office network functions on programmable data plane hardware. *International Journal of Network Management*, 31(1), e2134. <https://doi.org/10.1002/nem.2134>
- LightOptics. (s. f.). *Overview of GPON fiber network architecture* [Imagen]. <https://www.lightoptics.co.uk/blogs/news/overview-of-gpon-fiber-network-architecture>
- Liu, X. (2022). Enabling Optical Network Technologies for 5G and Beyond. *Journal of Lightwave Technology*, 40(2), 358–367. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3099726>
- Liu, Y., Du, H., Niyato, D., Kang, J., Xiong, Z., Kim, D. I., & Jamalipour, A. (2024). Deep Generative Model and Its Applications in Efficient Wireless Network Management: A Tutorial and Case Study. *IEEE Wireless Communications*, 31(4), 199–207. <https://doi.org/10.1109/MWC.009.2300165>

- Mazzenga, F., Giuliano, R., & Vatalaro, F. (2020). Effective strategies for gradual copper-to-fiber transition in access networks. *Computer Networks*, 174, 107225. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107225>
- Muliandhi, P., Faradiba, E. H., & Nugroho, B. A. (2020). Analisa Konfigurasi Jaringan FTTH dengan Perangkat OLT Mini untuk Layanan Indihome di PT. Telkom Akses Witel Semarang. *Elektrika*, 12(1), 7. <https://doi.org/10.26623/elektrika.v12i1.1977>
- Nakazawa, K. (s. f.). *Research on optical access networks* [Imagen]. Tohoku University.
<https://www.nakazawa.riec.tohoku.ac.jp/English/research/re02.html>
- Oliver, E., Ozment, S., Grunwaldt, A., Silva Zuniga, M. C., & Watson, G. (2021). *Nature-based Solutions in Latin America and the Caribbean: Support from the Inter-American Development Bank*. Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0003689>
- Park, K., Sung, S., Kim, H., & Jung, J. (2023). Technology trends and challenges in SDN and service assurance for end-to-end network slicing. *Computer Networks*, 234, 109908. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109908>
- Pfeiffer, T., Dom, P., Bidkar, S., Fredricx, F., Christodoulopoulos, K., & Bonk, R. (2022). PON going beyond FTTH [Invited Tutorial]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 14(1), A31. <https://doi.org/10.1364/JOCN.439241>
- Rafiq, A., Mehmood, A., Ahmed Khan, T., Abbas, K., Afaq, M., & Song, W.-C. (2020). Intent-Based End-to-End Network Service Orchestration System for Multi-Platforms. *Sustainability*, 12(7), 2782. <https://doi.org/10.3390/su12072782>
- Rawshan, F., Hossen, M., Islam, Md. R., & Park, Y. (2023). Multi-OLT PON-based open access network for multi-service performance tuning via the Event-Horizon algorithm. *Journal of Optical Communications and Networking*, 15(4), 229. <https://doi.org/10.1364/JOCN.479756>

- ResearchGate. (s. f.). *OFDM-PON Architecture* [Imagen].
https://www.researchgate.net/figure/OFDM-PON-Architecture_fig3_324976864
- Sadin, S. I., Billah, A. B., Ahad, Md. A., Fahim, K. S., Mitra, P., Shawon, D. S., & Shorna, R. T. (2022). Design and Performance Evaluation of a Gigabit Passive Optical Network (GPON) Through Fiber-To-The-Home (FTTH) Technology. *2022 International Conference on Recent Progresses in Science, Engineering and Technology (ICRPSET)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICRPSET57982.2022.10188562>
- Saliou, F., Simon, G., Le Huérou, S., Chanclou, P., Potet, J., Gaillard, G., Percevault, U., Chevalier, D., Zandueta, J., Yang, B., Vagionas, C., Gatzianas, M., Kalfas, G., Moschos, T., Miliou, A., & Pleros, N. (2024). Coexistence in future optical access networks from an operator's perspective [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 16(1), A78. <https://doi.org/10.1364/JOCN.499935>
- Sánchez-García, J. E. (2017). *FTTH Point-to-Point and Point-to-Multipoint based Next Generation Access (NGA) Networks* [Imagen]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/FTTH-Point-to-Point-and-Point-to-Multipoint-based-Next-Generation-Access-NGA-Networks_fig1_319965169
- Sánchez-García, J. E. (2017). *FTTH network layers based on 7* [Imagen]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/FTTH-network-layers-based-on-7_fig2_321850320
- Sharma, A., Kaur, S., Nair, N., & Bhatia, K. S. (2022). Investigation of WDM-MDM PON employing different modulation formats. *Optik*, 257, 168855. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168855>
- Shtaif, M., Antonelli, C., Mecozzi, A., & Chen, X. (2022). Challenges in Estimating the Information Capacity of the Fiber-Optic Channel. *Proceedings of the IEEE*, 110(11), 1655–1678. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2022.3197188>

- SlideShare. (s. f.). *CORD: Central Office Re-architected as a Datacenter* [Presentación]. <https://www.slideshare.net/slideshow/cord-central-office-rearchitected-as-a-datacenter/55928796>
- Simon, G., Chanclou, P., Wang, M., Abgrall, D., & Minodier, D. (2022). Optical access evolutions towards SDN and disaggregated hardware: An operator perspective [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 14(6), C57. <https://doi.org/10.1364/JOCN.450904>
- Skoufis, A., Chatzithanasis, G., Dede, G., Filiopoulou, E., Kamalakis, T., & Michalakelis, C. (2023). Technoeconomic assessment of an FTTH network investment in the Greek telecommunications market. *Telecommunication Systems*, 82(2), 211–227. <https://doi.org/10.1007/s11235-022-00971-6>
- Slyne, F., Coyle, D., Singh, J., Sexton, R., Ryan, B., Giller, R., O’Hanlon, M., & Ruffini, M. (2020). Experimental Demonstration of multiple Disaggregated OLTs with Virtualised Multi Tenant DBA, over General Purpose Processor. *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020*, M3Z.11. <https://doi.org/10.1364/OFC.2020.M3Z.11>
- Sopto. (s. f.). [Ilustración de arquitectura PON] [Imagen]. https://www.sopto.com.cn/sp_news/show-33570.html
- Sopubekov, N., Sydykova, N., & Boltaboev, I. (2025). Application of FTTB Technology in Modern Conditions. *Bulletin of Science and Practice*, 11(10), 90–93. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/119/12>
- T. Aditya, A. David Donald, G. Thippanna, M. Mohsina Kousar, & T. Murali. (2023). NFV and SDN: A New Era of Network Agility and Flexibility. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 482–493. <https://doi.org/10.48175/IJARSCT-8526>
- Thangappan, T., Therese, B., Suvarnamma, A., & Sai Swapna, G. (2020). Review on dynamic bandwidth allocation of GPON and EPON. *Journal of Electronic Science and Technology*, 18(4), 100044. <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2020.100044>

- Tochino, T., Nishimoto, K., Asaka, K., Kani, J., & Terada, J. (2021). Redesigned TDM-PON System Architecture Based on Point-to-Point Ethernet Transmission and Software Processing With General-Purpose Hardware. *Journal of Lightwave Technology*, 39(2), 448–457. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3027915>
- Ulloa, D., Arevalo, G., & Gaudino, R. (2020). Optimal Deployment of Next-Generation PON for High and Ultra-High Bandwidth Demand Scenarios in Large Urban Areas. *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICTON51198.2020.9203528>
- Welch, D., Napoli, A., Back, J., Buggaveeti, S., Castro, C., Chase, A., Chen, X., Dominic, V., Duthel, T., Eriksson, T. A., Erkilinc, S., Evans, P., Fludger, C. R. S., Foo, B., Frost, T., Gavrilovic, P., Hand, S. J., Kakkar, A., Kumpera, A., ... Ziari, M. (2023). Digital Subcarrier Multiplexing: Enabling Software-Configurable Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 41(4), 1175–1191. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3211466>
- Welch, D., Napoli, A., Back, J., Sande, W., Pedro, J., Masoud, F., Fludger, C., Duthel, T., Sun, H., Hand, S. J., Chiang, T.-K., Chase, A., Mathur, A., Eriksson, T. A., Plantare, M., Olson, M., Voll, S., & Wu, K.-T. (2021). Point-to-Multipoint Optical Networks Using Coherent Digital Subcarriers. *Journal of Lightwave Technology*, 39(16), 5232–5247. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3097163>
- Xie, C., & Zhang, B. (2022). Scaling Optical Interconnects for Hyperscale Data Center Networks. *Proceedings of the IEEE*, 110(11), 1699–1713. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2022.3178977>
- Yahya, W., Oki, E., Lin, Y.-D., & Lai, Y.-C. (2021). Scaling and Offloading Optimization in Pre-CORD and Post-CORD Multi-Access Edge Computing. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 18(4), 4503–4516. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2021.3101862>

Zhao, H., Fang, Y., Zhao, Y., Tian, Z., Zhang, W., Feng, X., Yu, L., Li, W., Fan, H., & Mu, T. (2023). Time-Series Representation Learning in Topology Prediction for Passive Optical Network of Telecom Operators. *Sensors*, 23(6), 3345. <https://doi.org/10.3390/s23063345>

Żukowski, C., Mukhopadhyay, A., Payne, D. B., & Ruffini, M. (2021). Cost analysis of rural roll-out using a long-reach passive optical network: Trading off the upfront cost under uncertainty of the user take-up rate. *Journal of Optical Communications and Networking*, 13(5), 69. <https://doi.org/10.1364/JOCN.415806>



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Palacios Chafra, Pablo José** con C.C: # **0953512811** autor del trabajo de titulación: **Análisis comparativo del desempeño de las arquitecturas GPON y R-CORD mediante simulación, considerando parámetros de latencia, jitter, throughput y pérdida de paquetes** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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

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

Guayaquil, 03 de marzo de 2026

f. 

Nombre: Palacios Chafra, Pablo José

C.C: 095351281-1



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



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

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis comparativo del desempeño de las arquitecturas GPON y R-CORD mediante simulación, considerando parámetros de latencia, jitter, throughput y pérdida de paquetes.		
AUTOR(ES)	Palacios Chafla, Pablo José		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Mgs. Peñafiel Olivo, Kety Jenny		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	3 de marzo del 2026	No. DE PÁGINAS:	67
ÁREAS TEMÁTICAS:	Servicio digital, redes ópticas		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	FTTH, GPON, R-CORD, SDN, NFV, QoS, latencia, jitter, simulación de redes		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):	<p>El creciente aumento de la demanda de servicios digitales de alta velocidad ha impulsado a las redes de acceso óptico a ser más flexibles, escalables y eficientes. En este contexto, esta investigación lleva a cabo un análisis comparativo del rendimiento de las arquitecturas tradicionales GPON y R-CORD (oficina central residencial rediseñada como centro de datos) en entornos FTTH, utilizando una metodología de simulación computacional. Esta tesis emplea una metodología cuantitativa centrada en el modelado de enlaces ascendentes, identificados como el principal punto de congestión en las redes PON. Para ello, creamos un entorno de simulación en Python que recrea situaciones reales de tráfico multiclase (VoIP, vídeo y mejor esfuerzo) en las mismas condiciones controladas para ambas arquitecturas. Analizamos métricas básicas de calidad de servicio (QoS) como la latencia media y los percentiles (p95, p99), la fluctuación, el rendimiento, la pérdida de paquetes, la utilización del enlace, la longitud de la cola y el índice de equidad de Jain. Este método protege mejor el tráfico sensible y minimiza la degradación del rendimiento. Los resultados respaldan la hipótesis, ya que demuestran que la virtualización y la desagregación de R-CORD son una forma técnicamente sólida de modernizar las redes FTTH, dotándolas de una mayor flexibilidad operativa y una mejor calidad de servicio que las arquitecturas GPON tradicionales.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593 99 860 7683	E-mail: pablo.palacios03@cu.ucsg.edu.ec	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Ubilla González, Ricardo Xavier		
	Teléfono: +593 99 952 8515		
	E-mail: ricardo.ubilla@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			