

**Análisis comparativo de la eficiencia en la migración de redes de última milla HFC hacia
arquitecturas GPON**

Luis Alfredo Bolaños Pérez

Juan David Herrera Varona

Asesor

Héctor Julián Parra Mogollon

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Especialización Redes de Nueva Generación

2026

Resumen

Este trabajo de grado analiza la eficiencia de la migración de redes de última milla basadas en HFC hacia arquitecturas de fibra óptica como GPON, en respuesta a la creciente demanda de servicios que exigen mayor capacidad, menor latencia. Mediante una revisión bibliográfica actualizada y el análisis de parámetros técnicos como ancho de banda disponible, latencia, jitter y eficiencia del medio se comparan los desempeños de HFC frente a las arquitecturas ópticas en el tramo de acceso al usuario final. El propósito de esta investigación es aportar una guía clara y fundamentada que oriente a proveedores de servicios y operadores en los procesos de modernización tecnológica, destacando los beneficios técnicos, operativos y económicos de adoptar soluciones de fibra en la última milla, con criterios de eficiencia y sostenibilidad.

Palabras clave: Fibra óptica, GPON, HFC, última milla, latencia

Abstract

This research analyzes the efficiency of migrating last-mile access networks from traditional Hybrid Fiber Coaxial (HFC) infrastructures to fiber-based architectures such as GPON. The study is motivated by the increasing demand for broadband services that require higher bandwidth and lower latency. Through a comprehensive literature review and comparative analysis, key technical parameters are evaluated, including available bandwidth, latency, error rates, user capacity, and network reliability in the last-mile segment. The results highlight the performance differences between HFC and optical access technologies, emphasizing their impact on service quality and scalability. The purpose of this research is to provide a well-grounded guide for service providers and network operators, supporting decision-making processes in technological modernization. By focusing on the last mile, the study outlines the technical, operational, and economic advantages of adopting fiber-based solutions to ensure efficient, sustainable, and future-ready access networks.

Keywords: Optical fiber, GPON, HFC, last mile, latency

Tabla de Contenido

Introducción	9
Planteamiento del Problema	12
Justificación	14
Objetivos	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos.....	17
Metodología	18
Enfoque Metodológico.....	18
Diseño Metodológico.....	19
Técnicas e Instrumentos de Recolección	20
Validación y Confiabilidad	20
Marco Teórico y Contextualización.....	22
Evolución de las Redes de Acceso y el Rol de la Fibra Óptica	22
Caracterización Técnica de las Tecnologías HFC.....	23
Tecnología HFC: Características y Desempeño	23
Limitaciones de las Redes Tradicionales	25
La Necesidad de la Fibra Óptica.....	28
Última Milla y Arquitecturas FTTx	29
Fiber to the Home (FTTH).....	30

FTTB (Fiber to the Building).....	30
FTTO (Fiber to the Office)	31
Tecnologías GPON y XG(S)-PON	31
GPON (Gigabit Passive Optical Network).....	31
XG(S)-PON (10 Gigabit-capable Symmetric PON).....	33
Línea de Tiempo Redes de Acceso y sus Respektivas Características.....	35
Seguridad en Redes GPON y XG(S)-PON.....	36
Parámetros Técnicos del Análisis: Definición y Relevancia	37
Latencia.....	37
Ancho de Banda.....	38
Eficiencia en el Uso de la Fibra Óptica	39
Potencia Óptica	40
Jitter.....	40
Estado Actual del Despliegue Tecnología GPON y XGPON.....	41
Panorama en Colombia.....	41
Panorama en Latinoamérica.....	43
Panorama Internacional	44
Comparación Tecnológica.....	45
Aspectos Económicos: CAPEX y OPEX	50
CAPEX (Capital Expenditure).....	51
OPEX (Operating Expenditure).....	52
Diseño e Implementación del Entorno Experimental	53

Plan de Pruebas de Laboratorio	53
Topología de la Prueba.....	53
Parámetros Sujetos a la Medición.....	54
Procedimiento General.....	55
Criterios de Aceptación.....	56
Implementación en OLT	56
Pruebas de Desempeño	60
Análisis de Resultados	64
Análisis Comparativo de Desempeño entre HFC y GPON	64
Ancho de Banda.....	64
Latencia.....	65
Jitter.....	66
Ventajas Técnicas y Operativas.....	68
Desafíos.....	69
Compatibilidad y Actualización de Equipos.....	69
Gestión de la Transición Operativa.....	69
Seguridad y Redundancia	70
Integración de Sistemas Heterogéneos	70
Discusión y Perspectivas para la Implementación en el Mercado Corporativo.....	70
Conclusiones	72
Recomendaciones y Trabajos Futuros	75
Referencias.....	77

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Parámetros del HFC</i>	23
Tabla 2	<i>Evolución de las Redes de Acceso</i>	34
Tabla 3	<i>Penetración de Fibra Óptica en América Latina</i>	42
Tabla 4	<i>Penetración de Fibra Óptica a Nivel Global</i>	44
Tabla 5	<i>Descripción de Tecnologías de Acceso</i>	44
Tabla 6	<i>Recopilación de Datos en Cliente GPON</i>	59
Tabla 7	<i>Comparación entre Redes Híbridas y GPON</i>	64

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Elementos de la Fibra Óptica</i>	21
Figura 2	<i>Arquitectura Típica del HFC</i>	25
Figura 3	<i>Arquitectura de XG-PON</i>	33
Figura 4	<i>Arquitectura desde la Plataforma NCE</i>	52
Figura 5	<i>Anchos de Banda en la OLT</i>	55
Figura 6	<i>ONT Autenticada en la OLT</i>	55
Figura 7	<i>Asignación de GEM Ports a la ONT</i>	55
Figura 8	<i>Ancho de Banda Asignado a la ONT</i>	56
Figura 9	<i>Configuración de BW desde la Herramienta</i>	56
Figura 10	<i>Prueba en Cliente con Speedtest</i>	58
Figura 11	<i>Prueba en Cliente con nPerf</i>	58
Figura 12	<i>Distancia de la ONT a la OLT</i>	59

Introducción

Las redes de telecomunicaciones modernas enfrentan desafíos cada vez mayores debido a la rápida evolución tecnológica y al aumento exponencial de la demanda de conectividad. Factores como el uso intensivo de servicios en la nube, el consumo de video bajo demanda, el teletrabajo y las aplicaciones de misión crítica han elevado considerablemente el volumen de tráfico de datos, lo que exige infraestructuras más escalables y eficientes. Si bien las redes de acceso basadas en cobre o en coaxial han desempeñado un papel clave en la masificación de la conectividad, comienzan a evidenciar limitaciones en escalabilidad, flexibilidad y costos operativos (James, 2024). La alta demanda de recursos y la dificultad para adaptarse con agilidad a nuevas necesidades hacen que la optimización y evolución tecnológica de la última milla sean una prioridad estratégica para los proveedores de servicios.

En este contexto, las redes ópticas pasivas (*Passive Optical Network*, PON), en particular las redes ópticas pasivas gigabit (*Gigabit Passive Optical Network*, GPON) y redes ópticas pasivas simétricas de 10 gigabits (*10-Gigabit Symmetrical Passive Optical Network*, XGS-PON), han emergido como soluciones clave para mejorar la eficiencia en el acceso. Estas tecnologías permiten compartir la infraestructura de fibra óptica entre múltiples usuarios residenciales y corporativos, reduciendo los costos operativos sin comprometer la calidad del servicio. En regiones como Europa y Asia, el despliegue de GPON y XGS-PON ha sido acelerado como parte de estrategias de modernización de infraestructuras (Escallón-Portilla et al., 2020). Su capacidad para ofrecer hasta 10 Gbps de velocidad simétrica las convierte en opciones ideales para proveedores que buscan garantizar alto rendimiento y conectividad confiable en la última milla.

Desde una perspectiva económica, las organizaciones que aún dependen de redes tradicionales enfrentan costos elevados asociados al mantenimiento y la expansión de su

infraestructura heredada. Según Ovum, (2023) los proveedores de servicios que operan con fibras dedicadas o redes coaxiales incurren en un gasto operativo (*Operational Expenditures, OPEX*) considerablemente alto, lo cual resulta insostenible a medida que crece la demanda (Vintimilla Murillo, 2024). En contraste, GPON y XGS-PON optimizan el uso de la infraestructura existente, permitiendo conexiones de alta capacidad sin que la inversión en la red aumente proporcionalmente. Además, la naturaleza simétrica de XGS-PON es esencial para sectores que requieren grandes volúmenes de datos en ambos sentidos, como las operaciones en la nube y la interconexión de redes empresariales.

Un aspecto crítico de esta transición es su impacto en el despliegue de redes 5G, donde la fibra óptica juega un papel fundamental al conectar estaciones base con el núcleo de la red. Según (Conde-Zhingre et al., 2018) señala que GPON y XGS-PON proporcionan un backhaul de alta velocidad y baja latencia, lo que permite que las redes 5G operen de manera más eficiente. La creciente generación de datos por parte de las estaciones base demanda soluciones escalables, y las redes tradicionales, si no son optimizadas, pueden convertirse en un cuello de botella.

El problema central identificado es la falta de eficiencia en la última milla heredada, lo que incrementa los costos operativos y limita la capacidad para ofrecer servicios de alta velocidad a una base de clientes en expansión. La migración a GPON y XGS-PON surge como una solución viable que proporciona una plataforma más eficiente y escalable. No obstante, esta transición implica desafíos relacionados con la inversión inicial y la planificación del despliegue, que deben gestionarse estratégicamente para minimizar el impacto en la continuidad y la calidad de los servicios (OECD, 2022).

Este trabajo analiza los beneficios de la actualización tecnológica en redes de última milla, migrando de arquitecturas tradicionales, como híbrido de fibra coaxial (Hybrid Fiber

Coaxial, HFC), hacia tecnologías de acceso por fibra óptica, como GPON y XGS-PON, en empresas prestadoras de servicios. Se adopta una línea de investigación basada en experiencias previas y estudios especializados para comparar sus ventajas frente a tecnologías legadas, evaluando parámetros clave como el ancho de banda, la velocidad, la seguridad y el uso eficiente del recurso de fibra óptica. Este proyecto tiene como propósito brindar una visión clara tanto a proveedores con infraestructura heredada que buscan modernizar su acceso como a nuevos actores del mercado, ayudándoles a responder a la creciente demanda de los usuarios mediante soluciones más eficientes y sostenibles.

Al finalizar este trabajo, se espera caracterizar las tecnologías HFC y GPON en el contexto de la última milla, mediante la implementación de un escenario de red en laboratorio que permita medir y comparar parámetros técnicos y de desempeño. A partir de estos resultados, se busca analizar de manera integral la eficiencia técnica, operativa y económica de ambas arquitecturas, evidenciar los beneficios de la migración a redes ópticas pasivas y proponer lineamientos estratégicos que orienten a los proveedores en procesos de modernización tecnológica, con base en criterios de desempeño, confiabilidad y sostenibilidad.

Planteamiento del Problema

El alto consumo actual de servicios de telecomunicaciones, impulsado por las crecientes exigencias técnicas de los usuarios y el surgimiento de nuevas aplicaciones que demandan grandes volúmenes de datos —como el streaming en alta resolución, los videojuegos en línea, la realidad virtual/aumentada y el Internet de las Cosas (IoT)— ha obligado a los proveedores de servicios a optimizar su infraestructura y sus modelos operativos. Este panorama exige una evolución tecnológica que permita soportar mayores velocidades de transmisión, menor latencia, robustez en seguridad, garantías de Calidad de Servicio (*Quality of Service, QoS*) y la capacidad de conectar a un número creciente de usuarios y dispositivos.

Según el informe de la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) en el 2025, los accesos a internet mediante fibra óptica en Colombia aumentaron aproximadamente un 20 % en comparación con el año 2024, posicionando este servicio como vital para el desarrollo cotidiano. En concordancia, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2024) reportó que el 63,9 % de los hogares colombianos cuenta con acceso a internet, lo que evidencia la creciente dependencia digital de la población.

Ante este panorama, las empresas prestadoras de servicios se enfrentan al desafío constante de mantenerse competitivas y de cumplir con las expectativas de un mercado cada vez más exigente. Las limitaciones se concentran principalmente en la última milla, donde tecnologías tradicionales como ADSL o arquitecturas híbridas HFC (cable coaxial) restringen el ancho de banda disponible, incrementan la latencia y presentan problemas de escalabilidad y de calidad de servicio. Estos factores, al encontrarse en el tramo más cercano al usuario final, tienen un impacto directo en la experiencia del cliente y en la capacidad de los operadores para sostener el crecimiento de la demanda.

En contraste, las tecnologías de redes ópticas de nueva generación, como GPON (Gigabit Passive Optical Network), se presenta como una solución prometedora. Esta tecnología ofrece capacidades superiores en términos de ancho de banda bidireccional, menor latencia, mayor seguridad inherente y la capacidad de soportar numerosos usuarios con altos niveles de QoS. No obstante, la migración hacia esta nueva plataforma tecnológica implica una evaluación exhaustiva que va más allá de las mejoras técnicas e incluye factores económicos, de planificación y de compatibilidad.

Es así como surge la siguiente pregunta orientadora para el presente trabajo de grado:

¿Cuáles son los beneficios técnicos y operativos que justifican la actualización tecnológica de la última milla, particularmente en la migración de redes HFC hacia arquitecturas GPON, en comparación con las redes tradicionales, considerando parámetros como ancho de banda, latencia, jitter, capacidad de soporte de usuarios y operación?

Justificación

La demanda de servicios en redes de telecomunicaciones crece a un ritmo acelerado, impulsada por el aumento del consumo de contenido en línea, el uso intensivo de aplicaciones en la nube y la expansión del Internet de las Cosas (IoT). Cada día se requieren mayores capacidades de almacenamiento, velocidad y estabilidad para satisfacer las expectativas de los usuarios. Sin embargo, muchas redes actuales presentan limitaciones para migrar a tecnologías como GPON, principalmente debido a preocupaciones iniciales sobre los costos de inversión, el despliegue de infraestructura, la modernización tecnológica y la capacitación del personal.

Si bien estos factores representan desafíos, también es crucial considerar los costos operativos adicionales, la calidad del servicio limitada y la baja eficiencia de las redes existentes, que restringen el desarrollo de nuevos servicios y dificultan la fidelización de clientes en un entorno altamente competitivo. La resistencia a la migración tecnológica puede convertirse en una desventaja estratégica para las empresas proveedoras de servicios que buscan mantenerse competitivas y responder a la creciente demanda del mercado (Pinduisaca Quishpe, 2023).

La adopción de GPON representa una solución clave por su capacidad para proporcionar infraestructuras más robustas, escalables y eficientes. Entre sus principales ventajas destacan:

Optimización del uso del espectro y mayor capacidad de ancho de banda, lo que permite atender a múltiples usuarios mediante una infraestructura compartida sin sacrificar la calidad del servicio.

Reducción de costos operativos y de mantenimiento, gracias a su arquitectura pasiva, que disminuye la necesidad de equipos activos intermedios.

Mayor estabilidad y menor latencia en el tramo de acceso, lo que mejora significativamente la experiencia del usuario final y facilita la integración con tecnologías emergentes como 5G e IoT.

Eficiencia energética, ya que estas tecnologías consumen menos recursos que infraestructuras tradicionales basadas en fibra dedicada.

Las redes tradicionales presentan dificultades de escalabilidad, lo que limita su capacidad para expandir los servicios de forma eficiente. En cambio, GPON permite una adaptación más ágil a nuevas demandas, ofreciendo una infraestructura más flexible y un mejor retorno de la inversión (ROI) a mediano y largo plazo. Su capacidad para soportar altas velocidades de transmisión y una mayor densidad de usuarios en la última milla convierte a estas tecnologías en una alternativa idónea para modernizar el acceso y garantizar la evolución de los servicios de telecomunicaciones.

Este trabajo tiene como propósito analizar los beneficios estratégicos, técnicos y económicos de la migración a GPON, proporcionando a las empresas proveedoras de servicios una visión clara del impacto positivo de esta transición. A través de un enfoque basado en experiencias previas, estudios de caso y análisis comparativos, se busca demostrar cómo la adopción de estas tecnologías puede fortalecer la infraestructura de telecomunicaciones, incrementar la competitividad en el mercado y ofrecer un servicio más eficiente, confiable y sostenible para los usuarios finales.

El presente trabajo de grado se destaca por realizar un análisis de la tecnología GPON, brindando una visión integral de su evolución técnica y funcional. A diferencia de estudios que abordan de manera aislada una sola tecnología, esta investigación evalúa ambas en paralelo, lo que permite contrastar sus capacidades, aplicaciones y ventajas en distintos contextos. Asimismo,

el análisis trasciende el enfoque convencional centrado únicamente en el ancho de banda, e incluye parámetros técnicos fundamentales como la latencia, la eficiencia en el uso de la fibra, la escalabilidad y la calidad del servicio, todos ellos esenciales para el diseño de redes modernas y robustas. Este enfoque técnico se complementa con datos estadísticos reales y actualizados provenientes de fuentes confiables como el MinTIC, la CRC y Statista, lo que permite contextualizar el estado actual de la fibra óptica en Colombia y establecer comparaciones con otros países de Latinoamérica y del mundo. De esta manera, el estudio no solo ofrece una base sólida para la toma de decisiones tecnológicas, sino que también evidencia el papel estratégico de estas tecnologías en el desarrollo de redes de nueva generación.

Objetivos

Objetivo General

Analizar comparativamente la eficiencia de la migración de redes de última milla basadas en HFC a arquitecturas ópticas GPON, mediante la evaluación de parámetros técnicos, operativos y económicos, para establecer los beneficios y orientar los procesos de modernización tecnológica.

Objetivos Específicos

Caracterizar, a partir de la revisión bibliográfica y normativa, las tecnologías de última milla HFC y GPON, para identificar y comparar sus principales parámetros técnicos (ancho de banda, latencia, jitter) y operativos (eficiencia del medio)

Implementar en un entorno de laboratorio basado en una arquitectura FTTH, un escenario de red GPON para evaluar su desempeño técnico, a partir de parámetros de monitoreo óptico y compararlo con métricas de referencia reportadas para redes HFC.

Analizar, a partir de los resultados teóricos y experimentales obtenidos, comparativamente las ventajas técnicas y operativas de GPON frente a HFC, para sustentar la viabilidad de la migración tecnológica en redes de última milla.

Metodología

El presente trabajo de grado se desarrolla bajo un enfoque descriptivo, comparativo y aplicado, orientado al análisis de la eficiencia en la migración de redes de última milla basadas en HFC hacia arquitecturas ópticas GPON. El estudio combina la revisión documental con la validación experimental de un escenario GPON contrastando sus resultados con métricas teóricas y operativas reportadas en la literatura especializada para redes HFC. En cuanto al alcance tecnológico, el análisis experimental se delimita exclusivamente a GPON, por ser la arquitectura sobre la cual se contó con infraestructura de laboratorio disponible y condiciones de medición reproducibles. XG(S)-PON, si bien forma parte del marco teórico y contextual del estudio, se aborda únicamente desde una perspectiva documental, con base en recomendaciones de la UIT-T (series G.987 y G.9807) y literatura especializada, y su evaluación experimental queda planteada como línea de trabajo futuro.

Enfoque Metodológico

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, orientado a la medición y análisis de parámetros técnicos definidos en la literatura. En particular, se evalúan métricas como latencia, jitter, ancho de banda y eficiencia en el uso de la fibra óptica, con el fin de comparar el comportamiento de las tecnologías analizadas y sustentar los resultados a partir de datos verificables. Es importante precisar que, dentro de este enfoque, los datos cuantitativos corresponden a mediciones reales obtenidas en el entorno de laboratorio GPON. Los valores asociados a XG(S)-PON provienen exclusivamente de fuentes documentales —estándares, reportes técnicos y estudios previos— y no de mediciones propias, lo que implica que su tratamiento es de carácter teórico-referencial.

El trabajo se enmarca en una metodología de tipo comparativo, en la que se analizaron las diferencias de desempeño y eficiencia entre las arquitecturas HFC y GPON, considerando criterios técnicos y operativos. Este enfoque permite establecer lineamientos de migración tecnológica que pueden servir de base para la toma de decisiones en el ámbito de los proveedores de servicios.

Diseño Metodológico

El estudio se estructura en cuatro fases principales, desarrolladas de manera secuencial y complementaria, lo cual garantiza el cumplimiento de los objetivos específicos, siguiendo el enfoque metodológico propuesto por (Javier et al., 2023), quien señala que las fases constituyen la dimensión metodológica del proceso investigativo en estudios proyectivos.

Fase 1. Revisión bibliográfica y contextualización:

Recopilar información de fuentes académicas, técnicas y normativas relacionadas con las tecnologías HFC y GPON, caracterizar las tecnologías de última milla y establecer el marco teórico y conceptual del estudio.

Fase 2. Definición de parámetros técnicos y operativos:

Seleccionar los parámetros de evaluación que sirven de base para el análisis comparativo, definir los métodos de medición, los rangos de referencia y las herramientas empleadas para el monitoreo.

Fase 3. Diseño e implementación del entorno experimental:

Realizar la configuración de un entorno de laboratorio basado en una topología FTTH (*Fiber To The Home*), establecer los escenarios de prueba para medir los parámetros técnicos definidos, y validar en la práctica el comportamiento de la red GPON contrastando con los valores de referencia para HFC(Cablelabs, 2023).

Esta fase se circunscribe a GPON como única tecnología bajo evaluación experimental. XG(S)-PON no forma parte de este entorno de pruebas; su inclusión en el análisis comparativo se apoya en los parámetros reportados por la UIT-T y en la literatura académica disponible, y su validación experimental se propone como extensión natural del presente trabajo.

Fase 4. Análisis comparativo y síntesis de resultados:

Realizar un análisis comparativo entre HFC (teórico-documental) y GPON (experimental), integrando los resultados teóricos y experimentales, y formular lineamientos estratégicos orientados a la migración tecnológica hacia redes ópticas pasivas en la última milla.

Técnicas e Instrumentos de Recolección

Utilizar diversas herramientas y técnicas para facilitar la obtención y análisis de la información:

Instrumentos de medición y monitoreo: software de gestión Huawei Network Cloud Engine (NCE), interfaz CLI de OLT, plataforma Speedtest.net y herramientas ópticas como medidores de potencia.

Fuentes documentales: normas UIT-T G.984.x y G.987.x, reportes de la CRC, y artículos técnicos de IEEE Xplore y bases de datos académicas especializadas.

Técnicas de análisis: comparación de resultados, análisis descriptivo de tendencias y evaluación de desempeño conforme a los valores de referencia establecidos por la UIT.

Validación y Confiabilidad

Los resultados obtenidos serán contrastados con datos teóricos reportados en la literatura especializada y con mediciones documentadas en estudios previos. Esta triangulación metodológica buscará garantizar la confiabilidad de los resultados y su correspondencia con las condiciones reales de operación en redes ópticas de acceso. En el caso particular de XG(S)-PON, la triangulación se realiza íntegramente sobre fuentes secundarias —recomendaciones UIT-T

G.987 y G.9807, estudios de desempeño publicados y reportes de organismos reguladores—
dado que esta tecnología no fue implementada en el entorno experimental. Los hallazgos
relativos a XG(S)-PON tienen, por tanto, carácter orientador y apuntan a escenarios de adopción
futura, sin pretender constituir evidencia experimental propia.

Marco Teórico y Contextualización

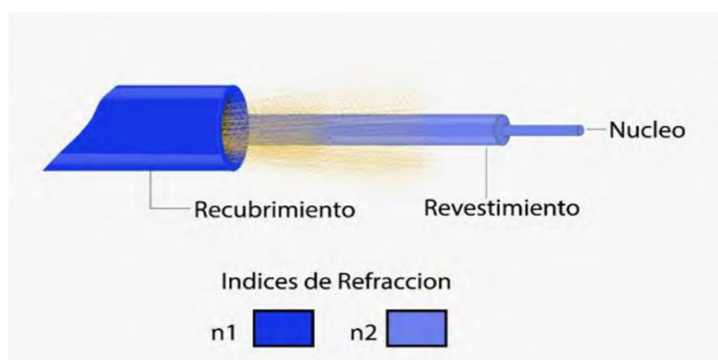
Evolución de las Redes de Acceso y el Rol de la Fibra Óptica

La fibra óptica (FO) se define como un medio físico que transporta una señal sobre un haz de luz; se requiere para una transmisión efectiva de dispositivos electrónicos en cada extremo con el fin de enviar y recibir la información de manera adecuada. Esta fibra óptica está compuesta por filamentos de alta pureza, delgados y flexibles. Este medio permite la propagación de ondas electromagnéticas; la composición principal de una fibra óptica está dada por núcleo, revestimiento y recubrimiento (Chan, 2021).

La estructura básica de la fibra óptica está conformada por tres elementos principales: núcleo, revestimiento y recubrimiento, los cuales garantizan la adecuada propagación de la luz y la protección mecánica del cable, como se observa en la Figura 1. El núcleo, de índice de refracción mayor, permite la conducción de los haces de luz mediante reflexión interna total, mientras que el revestimiento actúa como límite óptico, evitando pérdidas por dispersión.

Figura 1

Elementos de la Fibra Óptica



Nota. Elementos encontrados en la fibra óptica tomado de *Fibra Óptica: Evolución, Estándares y Aplicaciones*, Chan (2021).

Existen dos tipos principales de fibra óptica: monomodo y multimodo. La fibra monomodo posee un núcleo de pequeño diámetro ($9\ \mu\text{m}$) que permite la transmisión de un solo modo de luz, lo que permite una baja atenuación y una alta capacidad de ancho de banda. Este tipo de fibra es el estándar en redes de acceso de última milla (UM) debido a su alcance (hasta 20 km sin repetición) y a su estabilidad (ITU-T, 2016). Por su parte, la fibra multimodo, con núcleos de 50 o $62,5\ \mu\text{m}$, se utiliza en entornos de corta distancia (como redes locales o de edificios).

A lo largo de su desarrollo, la fibra óptica ha superado limitaciones físicas importantes, como la absorción por el pico de agua, fenómeno que afectaba la transmisión en longitudes de onda cercanas a 1.400 nm. La adopción de los estándares ITU-T G.652.C y G.652.D redujo este efecto, garantizando un rendimiento óptimo en los rangos de operación de la tecnología GPON.

En el contexto de la última milla, la evolución de las redes de acceso ha transitado desde soluciones de cobre (ADSL/VDSL), pasando por arquitecturas HFC, hasta alcanzar las PON, que hoy constituyen la base de las infraestructuras modernas de banda ancha.

Caracterización Técnica de las Tecnologías HFC

Tecnología HFC: Características y Desempeño

La tecnología HFC combina tramos de fibra óptica desde la cabecera (*Headend*) hasta los nodos de distribución, y cable coaxial desde dichos nodos hasta los usuarios finales. Este último tramo corresponde a la última milla, donde se concentran las principales limitaciones de desempeño debido a la atenuación del medio, al ruido electromagnético y a la necesidad de equipos activos de amplificación (Prodnik & Lavric, 2024).

En esta arquitectura, la fibra óptica transporta la señal óptica hasta un nodo óptico, donde se convierte en una señal eléctrica y se distribuye a los usuarios a través de un cable coaxial. Este diseño permitió ampliar la cobertura de las redes de televisión por cable e incorporar servicios de

internet y telefonía, pero, con el tiempo, ha demostrado limitaciones técnicas y operativas significativas frente a las arquitecturas ópticas pasivas.

Una característica clave del HFC es su asimetría. El espectro de transmisión del cable coaxial está dividido de forma desigual:

El canal *downstream* (de la red hacia el usuario) ocupa la mayor parte del espectro, entre 54 MHz y 1.2 GHz, lo que permite altas velocidades de descarga.

El canal *upstream* (del usuario hacia la red) se restringe a un rango mucho más reducido, entre 5 MHz y 204 MHz, lo que limita la capacidad de subida.

Esto provoca una gran diferencia entre las velocidades de descarga y de subida, haciendo que las redes HFC sean intrínsecamente asimétricas, adecuadas para consumo de contenido, pero poco eficientes para servicios interactivos o de creación (Prodnik & Lavric, 2024). Esta asimetría estructural se traduce de forma directa en limitaciones operativas concretas: aunque la especificación DOCSIS 4.0 contempla velocidades de descarga de hasta 10 Gbps en condiciones ideales, los valores reales en operación oscilan entre 300 Mbps y 1 Gbps, con degradación significativa durante las horas de mayor demanda, dado que el canal coaxial es compartido entre todos los usuarios conectados al mismo nodo. La capacidad de subida resulta aún más restringida: los registros típicos se sitúan entre 20 Mbps y 100 Mbps, muy por debajo del umbral teórico, lo que penaliza de manera perceptible las aplicaciones que requieren un flujo bidireccional equilibrado. A estas limitaciones de ancho de banda se suman comportamientos desfavorables en latencia y jitter: la latencia real puede superar los 35 ms, alcanza valores de hasta 10 ms en condiciones de carga elevada. Por último, la distancia efectiva entre el nodo óptico y el suscriptor, que en la práctica puede reducirse a menos de 500 metros, condiciona directamente la calidad del enlace coaxial, puesto que cada amplificador adicional en ese tramo

introduce retardo y ruido acumulativo. La Tabla 1 resume comparativamente los principales parámetros técnicos del estándar HFC, contrastando los valores teóricos con los resultados típicos observados en operación real.

Tabla 1

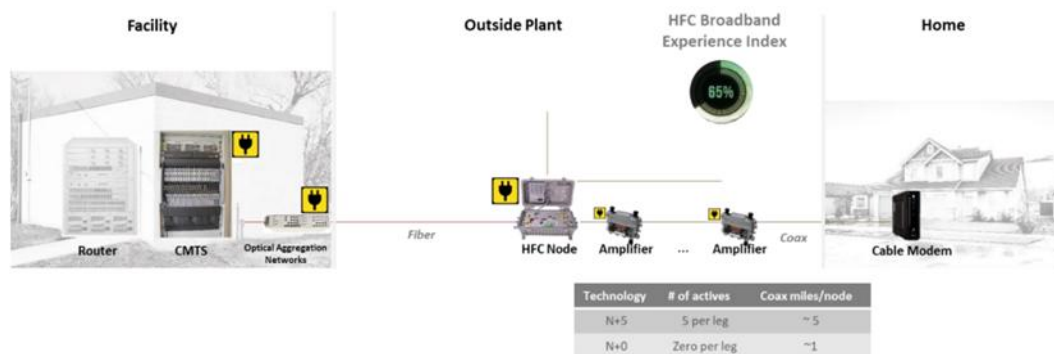
Parámetros HFC

Parámetro	Valor teórico (DOCSIS 3.1 / 4.0)	Valor promedio real en operación	Observaciones
Velocidad de descarga (<i>Downstream</i>)	Hasta 10 Gbps (DOCSIS 4.0 Full Duplex)	300 Mbps – 1 Gbps (promedio global 480 Mbps)	El canal compartido reduce el rendimiento efectivo, especialmente en horas pico (Ookla, 2024).
Velocidad de subida (<i>Upstream</i>)	Hasta 6 Gbps (Full Duplex DOCSIS 4.0)	20 Mbps – 100 Mbps (promedio global 60 Mbps)	Limitada por el espectro de subida y la compartición entre usuarios.
Latencia promedio	10 – 30 ms	15 – 35 ms	Aumenta con la cantidad de amplificadores entre el nodo y el usuario.
Jitter (variación de retardo)	1 – 5 ms	2 – 10 ms	Inestabilidad perceptible en aplicaciones en tiempo real (voz y video).
Distancia máxima del nodo al usuario	1.5 – 2 km	500 m – 1.5 km	Depende de la calidad del coaxial y la cantidad de amplificadores.

Nota. Características de tecnología HFC elaboración propia (2025).

Limitaciones de las Redes Tradicionales

Entre las redes tradicionales se encuentran aquellas basadas en cobre y cable coaxial; en el contexto de la última milla, las arquitecturas HFC, como se observa en la Figura 2. Sin embargo, en el contexto de la última milla, estas arquitecturas comienzan a evidenciar serias limitaciones frente a las demandas actuales de velocidad, estabilidad y capacidad de usuarios.

Figura 2*Arquitectura Típica de HFC*

Nota. Arquitectura desarrollada de HFC de Fiber Broadband (2022).

Entre las tecnologías desarrolladas sobre esta infraestructura se destacan las siguientes variantes de Línea de Abonado Digital (*Digital Subscriber Line, DSL*), una familia de tecnologías que utiliza el par de cobre para la transmisión de datos:

ADSL (Asymmetric DSL): Común en entornos residenciales, se caracteriza por ofrecer una mayor capacidad de descarga que de subida.

ADSL2/2+: Mejora las tasas de transmisión y el alcance de la señal respecto a su antecesora.

SDSL (Symmetric DSL): Proporciona velocidades simétricas en subida y bajada y se ha adoptado especialmente en redes empresariales.

VDSL (Very High Bit Rate DSL): Ofrece velocidades muy altas, aunque con un alcance limitado.

El cable coaxial, empleado en las redes HFC, combina fibra óptica desde la cabecera hasta los nodos ópticos y cable coaxial desde el nodo hasta el usuario final. Esta arquitectura fue

ampliamente utilizada por los operadores de televisión e Internet, basada en el estándar de especificación de la interfaz para servicios de datos por cable (*Data Over Cable Service Interface Specification*, DOCSIS). Las versiones recientes (DOCSIS 3.1 y 4.0) han aumentado la capacidad de transmisión teórica hasta 10 Gbps; sin embargo, en la última milla real las tasas de transferencia son mucho menores debido al ruido, la atenuación y la congestión en el canal compartido (M. Macas, 2020).

Esta tecnología emplea el estándar DOCSIS, que habilita la transmisión de datos sobre redes HFC. Desde su introducción en 1997, este estándar ha evolucionado notablemente, alcanzando en su versión más reciente (DOCSIS 4.0) velocidades de hasta 10 Gbps.

Entre los componentes principales de una red HFC se destacan:

CMTS (*Cable Modem Termination System*): Equipo ubicado en la cabecera, encargado de gestionar el tráfico entre la red del operador y los usuarios finales.

Nodos ópticos: Transforman la señal óptica en una señal eléctrica, lo que permite su distribución por el cable coaxial.

Amplificadores: Refuerzan la señal para garantizar su integridad y alcance a través de toda la red.

De acuerdo con (E. Macas, 2022), las principales limitaciones de las redes tradicionales en la última milla son:

Ancho de banda limitado: las redes coaxiales operan en canales compartidos, lo que genera congestión y degradación en horas pico.

Atenuación de la señal: las pérdidas de potencia aumentan con la distancia, lo que afecta la estabilidad y la calidad de los servicios en tiempo real.

Susceptibilidad a interferencias: el cobre y el coaxial son vulnerables al ruido electromagnético y a la diafonía.

Escalabilidad restringida: la expansión de usuarios requiere nuevos amplificadores, divisores y balanceos, lo que complica la operación.

Mantenimiento y energía: la dependencia de elementos activos eleva los costos y genera fallas frecuentes.

Estas deficiencias convierten la última milla en un cuello de botella para la conectividad moderna, lo que limita el rendimiento global de la red y la experiencia del usuario final. La migración a arquitecturas ópticas pasivas, como GPON, surge, por tanto, como una alternativa eficiente y sostenible para superar estas limitaciones (Escallón-Portilla et al., 2020)

Estas limitaciones refuerzan la necesidad de adoptar tecnologías más modernas, como GPON, que responden de manera más eficiente a los desafíos actuales de las redes de telecomunicaciones.

La Necesidad de la Fibra Óptica

El crecimiento exponencial del consumo digital, impulsado por servicios como el streaming en alta definición, las videoconferencias, el teletrabajo y el IoT, exige infraestructuras capaces de soportar altas tasas de transmisión y baja latencia. La última milla, al ser el tramo de conexión directa con el usuario, es el componente más crítico en la entrega de QoS y calidad de experiencia (*Quality of Experience, QoE*).

La fibra óptica ofrece ventajas que la convierten en la solución ideal para modernizar este segmento:

Mayor capacidad y simetría del ancho de banda.

Menor atenuación y eliminación de interferencias electromagnéticas.

Reducción de costos de mantenimiento gracias a su naturaleza pasiva.

Mayor eficiencia energética y seguridad física.

Estudios recientes demuestran que la adopción de fibra en la UM permite disminuir los costos de mantenimiento hasta en un 40 % y reducir la latencia en más del 60 % en comparación con redes coaxiales tradicionales (Fba & Cartesian, 2023). Además, su integración con redes 5G y tecnologías emergentes fortalece la capacidad del ecosistema digital (Valverde, 2024)

En la última milla, el paso de HFC a GPON no solo representa una mejora técnica, sino también una transformación operativa hacia modelos más rentables, escalables y respetuosos con el medio ambiente.

Última Milla y Arquitecturas FTTx

En la arquitectura de redes de telecomunicaciones, la “última milla” (*Last Mile*) se define como el tramo final del sistema de acceso que conecta la infraestructura del operador con el usuario final, ya sea residencial, corporativo o institucional. Este segmento es responsable de materializar la entrega efectiva del servicio, por lo que su desempeño influye directamente en la QoE percibida.

Históricamente, la última milla se construyó utilizando cobre o cable coaxial, tecnologías que permitieron masificar los servicios de telefonía e Internet. Sin embargo, estas soluciones se

han convertido en el principal cuello de botella del ecosistema de telecomunicaciones, debido a sus limitaciones físicas, su alta demanda de mantenimiento y su incapacidad para sostener velocidades simétricas de transmisión (M. Macas, 2020)

En respuesta a esta problemática, surgieron las arquitecturas FTTx (Fiber To The x), un conjunto de configuraciones basadas en fibra óptica cuyo objetivo es acercar el medio óptico lo más posible al usuario final, reduciendo la dependencia de los tramos eléctricos y aumentando la eficiencia de la red.

Fiber to the Home (FTTH)

FTTH es la forma más avanzada de acceso óptico, en la que la fibra llega directamente hasta la vivienda del usuario final. En esta configuración, el enlace óptico cubre por completo la última milla, eliminando elementos activos intermedios y proporcionando la máxima capacidad, estabilidad y seguridad.

Las redes FTTH utilizan tecnologías GPON, operan en modo punto a multipunto y soportan múltiples servicios simultáneamente (voz, datos, TV, IoT). Su implementación conlleva un mayor CAPEX inicial, pero reduce significativamente el OPEX a largo plazo (ITU-T, 2025)

En el contexto colombiano, el FTTH es el modelo más implementado por los operadores en la actualidad. ETB, Claro y Movistar han liderado la sustitución progresiva de las redes HFC por FTTH, alcanzando coberturas urbanas y suburbanas en expansión (CRC, 2024).

FTTB (Fiber to the Building)

En el modelo FTTB, la fibra óptica llega hasta un edificio o un conjunto residencial, donde un equipo de distribución (ONU u ONT compartida) se encarga de la conversión óptico-

eléctrica. Desde ese punto, la señal se distribuye internamente mediante cableado de cobre o por Ethernet.

FTTB ofrece un equilibrio entre el costo de implementación y la mejora de la capacidad, siendo ideal para edificaciones verticales o entornos empresariales donde no es viable un tendido individual de fibra a cada unidad (Franke & Neef, 2023). Sin embargo, al conservar un tramo eléctrico corto, la calidad del servicio depende de la infraestructura interna del edificio, lo que puede generar variaciones de latencia o pérdida de velocidad.

FTTO (Fiber to the Office)

El modelo FTTO está diseñado principalmente para entornos corporativos o institucionales, donde se requiere alta confiabilidad, simetría de tráfico y gestión avanzada. En este esquema, la fibra llega hasta los puestos de trabajo o gabinetes de red de cada oficina, lo que permite conexiones ópticas directas o mediante switches Ethernet con módulos SFP (*Small Form-Factor Pluggable*).

FTTO se asocia con escenarios de baja latencia y alta seguridad, donde la demanda de datos es crítica (como en universidades, hospitales o centros de datos). Aunque su implementación es más costosa, su rendimiento supera ampliamente al de las redes basadas en cobre (Valverde, 2024).

Tecnologías GPON y XG(S)-PON

GPON (Gigabit Passive Optical Network)

GPON (Gigabit Passive Optical Network) se define como una tecnología de red óptica pasiva que permite la transmisión de datos a velocidades de hasta 2,5 Gbps de descarga y 1,25

Gbps de subida. Esta tecnología garantiza servicios de alta velocidad a los usuarios finales mediante una infraestructura compartida.

Su arquitectura se basa en un modelo punto a multipunto. El servicio inicia desde una central mediante una fibra troncal, que se ramifica hacia los usuarios a través de divisores ópticos, lo que permite optimizar el presupuesto óptico y facilitar el acceso compartido. Los principales componentes de una red GPON son:

OLT (Optical Line Terminal): Dispositivo ubicado en la central, encargado de enviar la señal principal a través de la fibra troncal hacia la red de acceso.

Divisores ópticos (Splitters): Dispositivos pasivos que distribuyen la señal óptica desde la OLT a múltiples usuarios, sin requerir alimentación eléctrica.

ONT (Optical Network Terminal): Ubicado en las instalaciones del usuario final, recibe la señal óptica y la convierte en una señal eléctrica para el uso de los servicios contratados.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) estableció una serie de recomendaciones bajo el estándar ITU-T G.984, que definen los aspectos técnicos esenciales de la tecnología GPON, incluyendo arquitectura, protocolos, velocidades, seguridad, gestión e interoperabilidad. Entre las principales variantes de este estándar se encuentran:

G.984.1: Características generales de GPON.

G.984.2: Especificaciones de la capa física.

G.984.3: Requisitos de la capa de transmisión y convergencia.

G.984.4: Interfaz de control y gestión de la ONT (OMCI).

G.984.5: Integración de capacidad DWDM.

G.984.6: Extensión del alcance de la red GPON.

G.984.7: Especificaciones para GPON de largo alcance.

En cuanto a la seguridad, GPON implementa cifrado de estándar Avanzado (*Advanced Encryption Standard*, AES) como parte de las recomendaciones del estándar ITU-T G.984.x. Este mecanismo tiene como objetivo garantizar la confidencialidad de la información transmitida desde la OLT hasta la ONT. AES emplea un algoritmo simétrico, utilizando la misma clave en ambos extremos de la comunicación, típicamente con una longitud de 128 bits. Esta técnica ofrece un equilibrio entre seguridad y rendimiento, y se aplica específicamente al payload de las tramas GEM (*GPON Encapsulation Method*), el formato de encapsulación principal en las redes GPON (Franke & Neef, 2023).

La arquitectura pasiva de GPON convierte la última milla en un segmento energéticamente eficiente y de alta estabilidad, reduciendo el OPEX del operador.

XG(S)-PON (10 Gigabit-capable Symmetric PON)

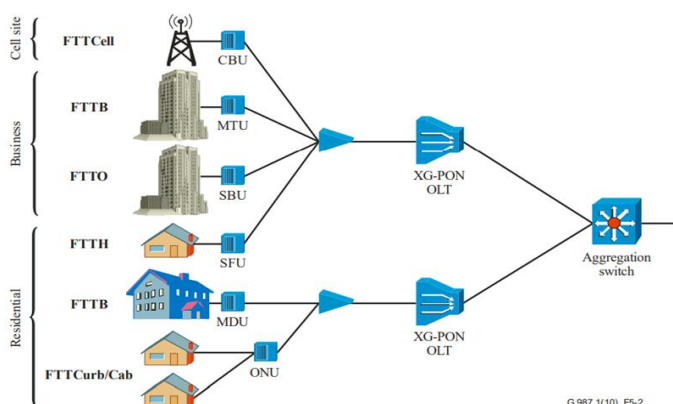
XG-PON forma parte de la evolución tecnológica de GPON y está definido por los estándares ITU-T G.987.x. Surge como respuesta a la creciente necesidad de incrementar las tasas de transmisión, impulsada por la demanda de aplicaciones y usuarios que requieren mayores capacidades de conectividad. Esta tecnología permite alcanzar velocidades de hasta 10 Gbps, lo que representa un salto significativo en el rendimiento de las redes de acceso.

Uno de los aspectos más relevantes de XG-PON es su capacidad de coexistencia con redes GPON, lo cual permite una migración escalable sin necesidad de reemplazar completamente la infraestructura existente. Esta compatibilidad reduce considerablemente los costos de implementación y facilita la adopción progresiva de la nueva tecnología.

En cuanto a su arquitectura, XG-PON conserva la misma estructura física utilizada por GPON según la Figura 3. Sin embargo, su evolución radica principalmente en el uso de diferentes longitudes de onda, lo que permite alcanzar las velocidades superiores requeridas, manteniendo al mismo tiempo la eficiencia y estabilidad de la red.

Figura 3

Arquitectura de XGPON



Nota. Arquitectura típica de XGPON tomada de *ITU-T* (2016).

La serie de recomendaciones que define la tecnología XG-PON está contenida en el estándar ITU-T G.987, que establece la primera evolución significativa de GPON en términos de capacidades operativas. Los principales aspectos abordados en estas recomendaciones incluyen:

Ancho de banda: Incremento en la capacidad de transmisión, alcanzando hasta 10 Gbps de descarga y 2,5 Gbps de carga.

Arquitectura: Se mantiene la arquitectura punto a multipunto de GPON, así como los componentes estructurales clave.

Coexistencia: Utiliza longitudes de onda específicas (1575–1580 nm para downstream y 1260–1280 nm para upstream), lo que permite que XG-PON y GPON operen simultáneamente sin interferencias.

Eficiencia: Se introducen mejoras en la modulación y en los mecanismos de corrección de errores, optimizando el rendimiento en la transmisión de datos.

Seguridad: Se continúa utilizando el cifrado AES como mecanismo de protección para garantizar la confidencialidad de los datos.

Estándares asociados: ITU-T G.987 y ITU-T G.9807.1.

La evolución siguiente a XG-PON es XGS-PON, cuya principal característica es la simetría del ancho de banda, ofreciendo 10 Gbps tanto de subida como de bajada, lo que la convierte en una opción altamente atractiva para sectores industriales y entornos donde se requieren altas tasas de transmisión bidireccional (E. Macas, 2022).

Ventajas destacadas:

Alta simetría, ideal para aplicaciones con alto consumo de subida de datos, como telemedicina, videovigilancia y trabajo remoto.

Compatibilidad con GPON, lo que facilita una migración gradual sin necesidad de reemplazar completamente la infraestructura existente.

Línea de Tiempo Redes de Acceso y sus Respectivas Características.

En la tabla 2 se presentan las tecnologías que se han presentado en los últimos años como medios de acceso, junto con sus respectivas características y fechas clave.

Tabla 2*Evolución Redes de Acceso*

Año	Tecnología	Características Clave
1980s	Redes de Cobre (DSL)	Transmisión de datos sobre líneas telefónicas existentes.
1990s	Redes Coaxiales (HFC)	Combinación de fibra óptica y cable coaxial para servicios de televisión e Internet.
2003	GPON	Introducción de redes ópticas pasivas con capacidades de gigabit.
2010	XG-PON	Evolución de GPON con velocidades de hasta 10 Gbit/s.

Nota. Evolución en los años de las redes de acceso, Elaboración propia (2025).

Seguridad en Redes GPON y XG(S)-PON

Este tipo de redes, al formar parte de la infraestructura tanto de hogares como de empresas, es responsable de transportar información sensible. Esto las convierte, en muchas ocasiones, en blancos potenciales de ciberataques, lo que genera la necesidad de implementar mecanismos de seguridad robustos que garanticen la integridad, la confidencialidad y la disponibilidad de la información (Itu-t, 2024)

El principal mecanismo de seguridad utilizado es el AES, adoptado por tecnologías como GPON y XG-PON. GPON emplea el cifrado AES de 128 bits, mientras que XG-PON puede utilizar claves de 128, 192 o 256 bits, según los requisitos de seguridad. Entre los modos de operación más comunes se encuentran:

AES-CTR (Counter Mode): Utilizado para cifrar cargas útiles. Ofrece alta eficiencia sin añadir latencia significativa.

AES-ECB (Electronic Codebook): Aplicado al cifrado entre la OLT y la ONU.

La autenticación de la ONU se lleva a cabo durante el proceso de activación. Para ello, la ONU debe proporcionar a la OLT un número de serie único y una contraseña mediante los mensajes PLOAM (*Physical Layer Operations, Administration, and Maintenance*). Si se requiere un nivel de autenticación más robusto, se puede emplear el mecanismo basado en OMCI (*ONT Management and Control Interfaz*) y estándares como IEEE 802.X.

En cuanto a la seguridad física, uno de los beneficios de la fibra óptica es su alta resistencia a la interceptación de datos. A diferencia de los cables de cobre, cualquier intento de manipular o degradar la señal en una fibra óptica afecta directamente su desempeño, lo que facilita su detección. Por ello, las redes ópticas son consideradas más seguras en entornos sensibles donde la confidencialidad es crítica.

Parámetros Técnicos del Análisis: Definición y Relevancia

En el contexto de las redes de acceso, y particularmente en la última milla (UM), los parámetros técnicos seleccionados para el presente estudio —latencia, ancho de banda y eficiencia en el uso de la fibra óptica— son muy importantes para realizar un análisis comparativo y evaluar el desempeño y la eficiencia de las arquitecturas HFC y GPON. Estos indicadores no solo cuantifican el rendimiento técnico de la red, sino que también reflejan la calidad de la experiencia (QoE) percibida por el usuario final, la sostenibilidad operativa y la capacidad de expansión del sistema (Casasnovas et al., 2024).

Latencia

La latencia se define como el tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde el origen hasta el destino y en volver al punto de partida (round-trip time, RTT). En la última milla,

este parámetro es fundamental, ya que representa el nivel de respuesta de los servicios interactivos, como videoconferencias, juegos en línea, transmisión en vivo y aplicaciones en la nube (Casasnovas et al., 2024).

En redes HFC, la latencia se ve afectada por la conversión óptico-eléctrica en los nodos y por el número de amplificadores intermedios, que introducen retardos adicionales y variaciones en el retardo (jitter). En cambio, las redes GPON, al ser pasivas, reducen significativamente la latencia al eliminar dispositivos activos en la UM, logrando tiempos promedios inferiores a 5 ms (Zhu et al., 2024).

Una menor latencia se traduce en una mejor calidad de la experiencia (QoE), especialmente en servicios sensibles al retardo. Por ello, la comparación de la latencia entre HFC y GPON constituye un indicador directo de la eficiencia técnica de la migración tecnológica en la última milla.

Ancho de Banda

El ancho de banda es la capacidad máxima de transmisión de datos que puede soportar un canal de comunicación, expresada normalmente en megabits o gigabits por segundo (Mbps o Gbps). En la última milla, este parámetro determina la cantidad de información que puede enviarse simultáneamente a los usuarios y define la percepción general de la velocidad del servicio (Cabezas & Cabrera, 2020).

En las redes HFC, el ancho de banda disponible está limitado por la capacidad del canal coaxial y por la cantidad de usuarios conectados a un mismo nodo, lo que produce una distribución desigual del recurso y reduce la velocidad efectiva durante las horas de mayor demanda.

Por su parte, las redes ópticas pasivas (GPON) ofrecen una capacidad de transmisión mucho mayor y estable, con velocidades que alcanzan 2,5 Gbps en el canal de bajada y 1.25 Gbps en el canal de subida, distribuidas de manera equitativa mediante mecanismos de asignación dinámica de ancho de banda (DBA). Esta característica permite mantener la calidad del servicio incluso en escenarios de alta concurrencia, lo que hace que el ancho de banda sea un parámetro esencial para medir la mejora efectiva tras la migración tecnológica.

Eficiencia en el Uso de la Fibra Óptica

La eficiencia en el uso de la fibra óptica se refiere al grado en que la infraestructura óptica se aprovecha en términos de capacidad, alcance y sostenibilidad del recurso físico. En el contexto de la última milla, este parámetro se relaciona con la escalabilidad de la red, la optimización del presupuesto óptico y la racionalización de los recursos físicos existentes (Escallón-Portilla et al., 2020)

En HFC, la señal óptica se detiene en el nodo y el tramo final hasta el usuario se realiza por medio de cable coaxial, lo que limita el aprovechamiento de la fibra y genera pérdidas adicionales por conversión y amplificación. En cambio, en GPON, la señal óptica llega directamente al usuario (FTTH), lo que garantiza un uso pleno del medio, menores pérdidas y mayor estabilidad de la potencia óptica.

La eficiencia también puede evaluarse a partir del presupuesto óptico (optical link budget), que considera la potencia transmitida, la atenuación por la distancia, las pérdidas por conectores y divisores, y el margen de seguridad (ITU-T G.984.2). Una gestión adecuada de estos factores permite diseñar redes sostenibles con capacidad de crecimiento sin degradación del servicio.

Potencia Óptica

La potencia óptica corresponde al nivel de señal luminosa que se transmite y recibe a través de la fibra, expresado en dBm. En la última milla este parámetro es fundamental porque permite verificar la calidad del enlace, la estabilidad de la transmisión y la eficiencia del medio óptico. Su adecuado control garantiza que la señal llegue a la ONT dentro de los márgenes establecidos por el presupuesto óptico definidos por la recomendación ITU-T G.984.2.

En tecnologías más antiguas como HFC, la señal óptica solo llega hasta el nodo y luego se convierte en eléctrica para distribuirse por coaxial. Esto limita el control sobre la potencia en la última milla y genera pérdidas adicionales causadas por amplificadores, derivaciones y degradación del cable, lo que afecta la estabilidad del servicio.

En una red GPON, la señal óptica se mantiene de forma continua desde la OLT hasta el usuario final, lo que permite una medición precisa de la potencia de recepción y asegura que el enlace cumpla con los niveles exigidos para garantizar altas velocidades y baja latencia. Gracias a sus rangos típicos de potencia de transmisión, los sistemas GPON ofrecen un rendimiento óptimo y una calidad de servicio superior en comparación con arquitecturas híbridas como HFC.

Jitter

El jitter corresponde a la variación en el tiempo de llegada de los paquetes durante la transmisión de datos. Este parámetro es esencial en la última milla porque refleja la estabilidad temporal del enlace, lo cual impacta directamente la calidad de servicios interactivos como videollamadas, gaming, voz sobre IP y aplicaciones sensibles al retardo. Un jitter elevado provoca fluctuaciones en la entrega de paquetes y deteriora la experiencia del usuario, incluso cuando el ancho de banda disponible es adecuado.

En tecnologías tradicionales como HFC, la presencia de amplificadores, el ruido impulsivo en el cable coaxial y la compartición del canal generan variaciones frecuentes en los tiempos de entrega de paquetes. Estos factores producen jitter que puede oscilar entre 2 y 10 ms en condiciones normales, con picos mayores en horarios de congestión, lo que afecta de forma notable los servicios en tiempo real.

En contraste, las redes ópticas GPON presentan un comportamiento estable debido a que la transmisión es completamente pasiva y la señal se mantiene en formato óptico hasta el usuario final. Aunque el mecanismo de asignación dinámica de ancho de banda puede generar variaciones puntuales, los valores de jitter suelen mantenerse dentro de los rangos recomendados por la UIT-T, inferiores a 1-5 ms, y con un comportamiento mucho más predecible que en arquitecturas híbridas.

La menor variabilidad del jitter en redes GPON se traduce en enlaces con mayor consistencia temporal en la entrega de paquetes, lo que favorece una mejor calidad de experiencia (QoE) y una mayor idoneidad para soportar servicios sensibles al retardo. Por ello, el jitter representa un parámetro clave para contrastar la eficiencia operativa entre redes HFC y GPON, y sustenta técnicamente las ventajas de migrar hacia tecnologías ópticas avanzadas en la última milla.

Estado Actual del Despliegue Tecnología GPON y XGPON

Panorama en Colombia

Indudablemente, existen dos factores primordiales que han impulsado significativamente el despliegue de tecnologías ópticas en el país. El primero es la creciente necesidad de mayor ancho de banda, motivada por el aumento del consumo de contenido digital, que exige conexiones más veloces y confiables. El segundo factor es la modernización de la

infraestructura, dado que los operadores invierten en la actualización de sus redes con el objetivo de mantenerse competitivos y fidelizar a sus usuarios, respondiendo a la creciente demanda de un servicio esencial, como el acceso a Internet.

Actualmente, Colombia está experimentando un proceso de modernización hacia tecnologías GPON. Desde el año 2018 se ha evidenciado un aumento de la inversión destinada a redes de acceso soportadas en fibra óptica. Entre los principales actores que lideran este despliegue se encuentran ETB, Claro, Movistar y Tigo, junto con otros proveedores regionales como Emcali y Celsia Internet, que han comenzado a implementar esta tecnología en distintas zonas del país.

Uno de los retos fundamentales para Colombia es aprovechar la infraestructura compartida. Según la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC,2024), se han implementado normativas que promueven el uso compartido de ductos y postes, lo que facilita el despliegue. Sin embargo, aún existen regiones donde esta tecnología no ha llegado, debido a limitaciones económicas y dificultades asociadas con la baja rentabilidad en ciertas zonas. Factores como el teletrabajo, la educación virtual y el uso masivo de servicios OTT han sido determinantes para acelerar la transición hacia tecnologías como XGS-GPON(Kirschenmann, 2024).

Además de los proveedores privados de servicios de Internet (ISP), el Gobierno, a través del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), ha promovido proyectos de conectividad mediante el desarrollo de una red nacional de fibra óptica. Estos proyectos buscan conectar municipios del país mediante redes de alta velocidad, con especial énfasis en el fortalecimiento de servicios académicos y educativos en colegios y universidades (6W, 2025).

Panorama en Latinoamérica

América Latina no ha sido ajena a la evolución y adopción de la FO como medio de transmisión en las redes de alta velocidad, impulsadas por la creciente demanda de servicios con anchos de banda y velocidades elevadas, lo que ha llevado a los diferentes países a la modernización de sus infraestructuras. La adopción de hogares en tecnologías FTTH ha venido aumentando; según el panorama latinoamericano, Brasil y México siempre han encabezado la lista de países con mayor despliegue de la tecnología, como lo muestra la Tabla 3 (Rooney et al., 2022).

Tabla 3

Penetración de Fibra Óptica en América Latina

País	Penetración de fibra óptica (%)	Fuente
Brasil	74%	DPL News (2024)
México	60%	Statista (2024)
Colombia	32%	CRC (2025)
Argentina	28%	Statista (2024)
Perú	25%	Statista (2024)

Nota. Elaboración propia (2025).

Se estima que, para finales de 2024, la adopción de banda ancha por fibra óptica (FO) en países en vías de desarrollo como México, Chile, Colombia y Costa Rica habrá crecido aproximadamente un 225 % respecto de 2020. Además, se proyecta que para el año 2025 el número de suscriptores en América Latina alcance los 70 millones, lo que representaría cerca del 60 % del total de usuarios de Internet en la región.

Los principales objetivos y tendencias en este contexto se centran, en primer lugar, en inversiones en infraestructura, necesarias para impulsar el crecimiento y reducir la brecha digital, especialmente en las zonas rurales y de difícil acceso. La adopción de tecnologías como GPON, XG-PON y XGS-PON permitirá ofrecer mayores velocidades y capacidades de conexión a los usuarios, facilitando así la implementación e integración de redes 5G y el desarrollo de Smart Cities. Estas tecnologías están preparadas para soportar aplicaciones modernas, servicios en la nube y soluciones empresariales que requieren altos niveles de rendimiento (Valverde, 2024).

Panorama Internacional

El crecimiento global de las redes GPON ha sido notable en los últimos años. En 2023, se estimó un valor de mercado de aproximadamente 7,5 mil millones de dólares, con tasas de crecimiento anual compuesto que oscilan entre el 5,9 % y el 7,5 %, impulsadas por la creciente demanda de canales de alta velocidad y la expansión de nuevas redes como 5G.

Como se muestra en la Tabla 4, a nivel internacional, la región con mayor despliegue es Asia-Pacífico, que lidera tanto en la fabricación como en el consumo de soluciones GPON. China, en particular, domina este mercado con más del 50 % de participación, gracias a planes estratégicos orientados a proporcionar conectividad por fibra óptica en zonas rurales. Por su parte, Europa ha venido adoptando progresivamente la banda ancha por fibra en países como Alemania, Francia e Italia, impulsando el desarrollo económico regional mediante la conectividad.

Tabla 4*Penetración de Fibra Óptica a nivel Global*

País	Penetración de fibra óptica (%)	Fuente
Corea del Sur	83%	Statista (2024)
Japón	80%	Statista (2024)
España	77%	Statista (2024)
Colombia	32%	CRC (2025)
R. Dominicana	30%	Statista (2024)

Nota. Elaboración propia (2025).

En Norteamérica, la migración hacia redes GPON alcanza cerca del 70 %, principalmente mediante implementaciones de redes FTTH (Fiber to the Home) y la integración con despliegues de redes 5G (Fba & Cartesian, 2023).

Las transiciones de las tecnologías a nivel global están en la nueva generación de redes como XGS-PON y NG-PON2 ofreciendo mayores velocidades y capacidad simétricas, cada día se busca también la integración con tecnología 5G.

Comparación Tecnológica

La Tabla 5 muestra la comparación de tecnologías de las redes, destacando las principales características de cada una (Escallón-Portilla et al., 2020)(Escallón-Portilla et al., 2020),(Aguilar & Narváez, 2018)(Aguilar & Narváez, 2018).

Tabla 5*Descripción Tecnologías de Acceso*

Parámetro	Coaxial	HFC	GPON	XGS-PON
	Hasta ~1.2			
	Gbps			
Velocidad de descarga	(DOCSIS 3.0, capacidad agregada)	Hasta 10 Gbps (DOCSIS 3.1/4.0, capacidad agregada)	2.488 Gbps (tasa de línea DS)	9.953 Gbps (tasa de línea DS ≈10G)
	Hasta ~200			
	Mbps			
Velocidad de subida	(DOCSIS 3.0, agregada)	Hasta 6 Gbps en DOCSIS 4.0 (agregada)	1.244 Gbps (tasa de línea US)	9.953 Gbps (US simétrica ≈10G)
	Intervalo			
	MAP típico ~2 ms	MAP ~2 ms + enfoque	Trama GTC = 125 μs	Trama XGTC ~125 μs
Latencia	(planificació n upstream DOCSIS)	Low Latency DOCSIS (reducción de cola)	(granularidad de asignación)	(granularidad equivalente)
	Grupo			
Compartición de ancho	DOCSIS (segmento)	Idem (service group por nodo / segmentación)	Split típico 1:32–1:64 (compartición óptica)	Split típico 1:64–1:128 (según

Parámetro	Coaxial	HFC	GPON	XGS-PON
	compartido)			presupuesto
	:			óptico)
	típicamente			
	~500			
	hogares/pas			
	o, suele			
	segmentarse			
	a ~125 o			
	menos			
Alcance sin repetidores	Requiere “activos” (cascadas tipo N+X)	Requiere “activos” (arquitecturas N+0 / N+X)	Hasta 20 km en ODN sin equipos activos intermedios	Hasta 20 km (ODN, sin activos intermedios)
Escalabilidad	Evolución DOCSIS (capacidad limitada por espectro/coa x)	DOCSIS 3.1 → 4.0 (10G DS / hasta 6G US)	De 2.5/1.25G hacia 10G (migración por coexistencia/actualizac ión)	10G simétrico (base para multi-gig empresarial)
Seguridad	BPI+ (AES- 128) en el	BPI+ (AES-128) en el enlace DOCSIS	Cifrado de enlace AES-128 (PON)	Cifrado de enlace AES

Parámetro	Coaxial	HFC	GPON	XGS-PON
Costo de implementación	enlace DOCSIS (Referencia típica de upgrade)			(PON/XGS-PON)
	DOCSIS 4.0: ~US\$250–400 / hogar-paso (estimaciones)	DOCSIS 4.0: ~US\$250–400 / hogar-paso (estimaciones)	Colombia FTTH (hogar-paso): US\$249 aéreo / US\$292 subterráneo / US\$1,658 rural; mantenimiento ~1.7% inversión	Misma ODN de FTTH (costos de despliegue similares); equipo 10G en cabecera/cliente eleva
	es)			costo unitario XGS-PON
Eficiencia energética	Mayor huella operativa vs FTTH (por activos en campo)	HFC: ~11.38–11.53 kg CO2e/año por hogar-paso (operación); (referencia comparativa)	Menor que HFC (planta pasiva)	OLT: ~0.42–0.83 kg CO2e/año por hogar-paso (operación)
	Servicios soportados	IP sobre DOCSIS; TV/voz/datos (multi-gig según versión)	IP/Ethernet (GEM), VoIP/SD-	IP/Ethernet a 10G (mejor ajuste a

Parámetro	Coaxial	HFC	GPON	XGS-PON
Mantenimiento	s (según cabecera)		WAN/servicios empresariales	servicios simétricos)
	Requiere atención de activos y ajustes RF; mayor complejidad operacional	Mantiene activos en campo (nodo/amplificación/energía): complejidad operacional	Menos puntos de falla en planta externa (ODN pasiva)	Menos puntos de falla en planta externa (ODN pasiva)
	~500 hogares/pas o por nodo (frecuente segmentar a ~125 o menos)	~500 hogares/paso por nodo, segmentación típica a ~125 o menos	Hasta ~128 ONT por puerto PON (típico)	Orden similar (64–128 ONT/puerto), con mayor capacidad por usuario

Nota. elaboración propia (2025).

Las redes ópticas pasivas (PON), y en particular las tecnologías GPON, desempeñan un papel fundamental en la evolución de las infraestructuras de telecomunicaciones a nivel global. Su capacidad para proporcionar conectividad de alta velocidad, eficiencia energética y escalabilidad la posiciona como una solución clave para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda y soportar nuevas aplicaciones emergentes.

La evolución de GPON ha dado lugar a tecnologías de próxima generación como XG-PON, XGS-PON y NG-PON2, que alcanzan velocidades de transmisión de hasta 10 Gbps en ambos sentidos, mejorando significativamente la capacidad y eficiencia de las redes ópticas. Asimismo, la integración de GPON con redes 5G se encuentra en estudio para proporcionar soluciones de backhaul robustas, esenciales para soportar altas tasas de datos y baja latencia, requeridas por aplicaciones modernas. Estas innovaciones responden a la creciente necesidad de infraestructuras más eficientes y sostenibles (James, 2022.).

El mercado global de GPON está experimentando un crecimiento significativo, con proyecciones que estiman un aumento de USD 6,6 mil millones en 2022 a USD 11,34 mil millones para 2032, impulsado por la expansión de redes 5G y la creciente demanda de servicios de banda ancha de alta velocidad. Además, se están explorando avances en comunicación cuántica utilizando fibra óptica convencional, lo que podría transformar radicalmente la seguridad y capacidad de las redes ópticas en el futuro.

En este contexto, las redes GPON se sitúan en el centro de la transformación digital global, ofreciendo soluciones eficientes y escalables que responden a las exigencias actuales y futuras de conectividad. Con avances continuos en velocidad, seguridad y sostenibilidad, GPON está preparada para liderar el futuro de las telecomunicaciones, habilitando desde ciudades inteligentes hasta el Internet de las Cosas y más allá.

Aspectos Económicos: CAPEX y OPEX

En el sector de las telecomunicaciones, se está dando una transición acelerada de las redes HFC a las redes FTTx, en particular mediante la tecnología GPON. Los operadores tradicionales de cable han invertido grandes sumas en actualizar sus redes HFC con estándares DOCSIS para ofrecer banda ancha, mientras que los operadores de telecomunicaciones han

apostado por redes FTTH basadas en GPON enfatizando sus ventajas en capacidad y eficiencia (Vintimilla Murillo, 2024). Esta comparativa analiza ambas tecnologías en cuanto a su arquitectura, desempeño, costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX), así como sus ventajas y desventajas, con un enfoque especial en el contexto colombiano. La transformación digital ha impulsado la demanda de mayores velocidades y fiabilidad, generando presión competitiva para migrar hacia infraestructuras de fibra óptica más robustas (M. Macas, 2020). En Colombia, por primera vez la cantidad de conexiones de fibra óptica al hogar ha superado a las de HFC, reflejando esta tendencia global en la modernización de redes de acceso fijo. A continuación, se presentan definiciones clave y un análisis comparativo detallado siguiendo un estilo académico.

CAPEX (Capital Expenditure)

En el contexto de redes de telecomunicaciones, el CAPEX corresponde a los gastos de capital necesarios para el despliegue y ampliación de la infraestructura. Incluye inversiones en bienes duraderos como cableado, postes o ductos, equipos electrónicos (nodos ópticos, amplificadores, OLT/ONT, etc.), mano de obra de instalación y otros activos físicos. Estos gastos se capitalizan y amortizan a lo largo de la vida útil de los activos (Anitua Valluerca, s.f.); es decir, su impacto contable y financiero se distribuye en varios años según la depreciación estimada. Un proyecto FTTH requiere, por ejemplo, la adquisición y tendido de fibra hasta cada hogar, instalación de divisores ópticos, OLTs en centrales y ONTs en casas, lo cual implica un alto CAPEX inicial por sus costos de construcción civil y equipamiento. En cambio, una expansión sobre la red HFC existente puede tener un CAPEX incremental menor si reutiliza la infraestructura coaxial ya instalada (UIT, 2021).

OPEX (Operating Expenditure)

Son los gastos operativos asociados a la operación continua y el mantenimiento de la red una vez desplegada. En telecomunicaciones, OPEX abarca los costos de energía eléctrica para los equipos activos, el personal técnico para el mantenimiento preventivo y correctivo, los alquileres de espacios (por ejemplo, sitios de nodo o centrales), los costos de soporte y atención al cliente, el reemplazo de componentes averiados, los seguros, etc. A diferencia del CAPEX, el OPEX se registra como gasto corriente anual (UIT, 2021) Las redes que utilizan componentes activos en campo tienden a tener OPEX más elevados debido al consumo eléctrico permanente y a la necesidad de intervenciones frecuentes para ajustar o reparar los equipos. Por el contrario, infraestructuras más simples y robustas (como FTTH pasivo) suelen presentar gastos operativos menores, al requerir menos energía en la distribución y menos trabajos de mantenimiento periódico. La distinción entre CAPEX y OPEX es crucial al evaluar la rentabilidad de largo plazo de HFC vs. FTTH: una solución puede ser más barata de implementar inicialmente, pero más costosa de operar año tras año, y viceversa.

Diseño e Implementación del Entorno Experimental

Con el fin de validar experimentalmente las ventajas de GPON frente al modelo tradicional de fibra óptica dedicada, se realizó una prueba de laboratorio. La actividad consistió en configurar una conexión de acceso FTTH a través de una OLT Huawei, garantizando un plan de internet con velocidad mínima de 800 Mbps, y posteriormente contrastar los resultados con un esquema clásico de fibra dedicada.

Plan de Pruebas de Laboratorio

El presente plan de pruebas tiene como objetivo validar experimentalmente el desempeño de la tecnología GPON en comparación con el modelo tradicional de fibra dedicada, mediante la implementación de un entorno de laboratorio controlado. Este ejercicio permitirá medir, analizar y documentar los parámetros técnicos que determinan la eficiencia del acceso óptico en la última milla, en concordancia con las recomendaciones internacionales de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (Itu-t, 2024)

Topología de la Prueba

La topología de laboratorio se fundamenta en una arquitectura punto a multipunto, característica de las redes GPON, implementada con una OLT Huawei MA5800, divisores ópticos pasivos (splitters) y terminales ópticos de red (ONT) ubicadas en los puntos de usuario. La OLT actúa como nodo central encargado de la asignación dinámica de ancho de banda (DBA) y de la gestión de los perfiles de servicio (E. Macas, 2022)

Cada ONT se autentica con su número de serie (SN) y se asocia a un perfil de servicio con parámetros definidos de Committed Information Rate (CIR) y Peak Information Rate (PIR).

El enlace se establece sobre fibra monomodo G.652.D, con una distancia aproximada de 6,3 km entre OLT y ONT, siguiendo los límites de potencia óptica definidos por la

recomendación ITU-T G.984.2 (2018). El splitter empleado fue de relación 1:8, asegurando un equilibrio entre la atenuación total y el número de usuarios simulados.

La Figura 4 ilustra la arquitectura de red de la plataforma Huawei NCE (*Network Cloud Engine*), donde se representan los componentes y las rutas ópticas utilizadas.

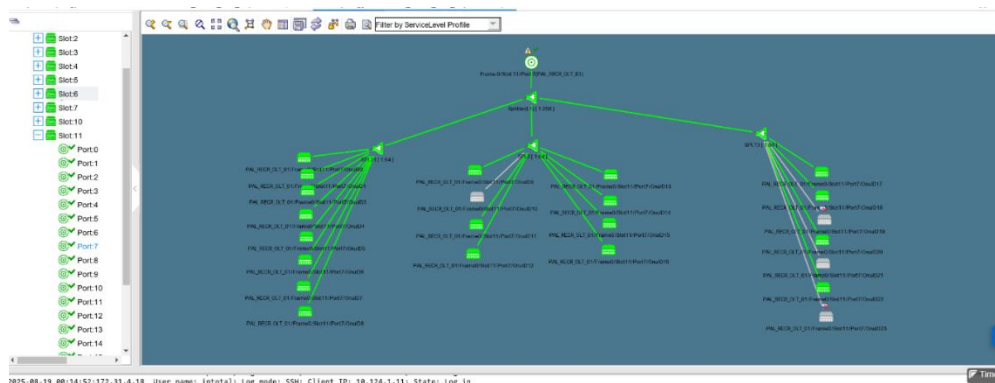
OLT (*Optical Line Terminal*): equipo central que gestiona la red GPON.

Splitters ópticos: elementos pasivos que permiten distribuir la misma fibra entre múltiples usuarios.

ONT (*Optical Network Terminal*): dispositivo ubicado en las instalaciones del cliente, donde finaliza la fibra y se habilita el servicio.

Figura 4

Arquitectura desde Plataforma NCE



Nota, arquitectura obtenida desde NCE Tomado de. Autoría Propia (2025)

Parámetros Sujetos a la Medición

Los parámetros definidos para la evaluación de desempeño se seleccionaron con base en estudios recientes sobre redes ópticas de (Escallón-Portilla et al., 2020) y en los lineamientos de la ITU-T G.984.x. Estos son:

Ancho de banda efectivo (Mbps): Mide la tasa real de transferencia en sentido descendente y ascendente. Se registra mediante pruebas en la plataforma speedtest.net, asegurando que los valores alcanzaran el CIR y PIR definidos (E. Macas, 2022)

Latencia (ms): Tiempo promedio que tarda un paquete en completar un recorrido de ida y vuelta (RTT). Se obtiene a partir del valor de ping a un servidor de prueba, un indicador crítico para aplicaciones sensibles al retardo.

Jitter (ms): Variación temporal de la latencia entre paquetes consecutivos, evaluada durante las pruebas de speedtest y medidas con la herramienta nPerf (Escallón-Portilla et al., 2020)

Potencia óptica (dBm): Se midió la potencia transmitida desde la OLT y la potencia recibida en la ONT mediante medidor de potencia óptica, verificando el cumplimiento del presupuesto óptico establecido por la ITU-T G.984.2 (2018).

Procedimiento General

Para evaluar el desempeño de la red GPON en el entorno de laboratorio se siguió un procedimiento estructurado que permitió medir de forma precisa los parámetros técnicos definidos en el estudio. El proceso inició con la configuración de los perfiles de servicio en la OLT y la activación de la ONT, continuó con la verificación del enlace óptico y luego avanzó hacia la ejecución de pruebas de rendimiento orientadas a medir el ancho de banda, la latencia y el jitter. Finalmente, se realizó un monitoreo continuo del comportamiento del enlace y se consolidaron los resultados para compararlos con los valores de referencia establecidos por la ITU-T y los reportados en estudios previos. Este conjunto de actividades permitirá validar la estabilidad, eficiencia y calidad del servicio proporcionado por la arquitectura GPON en la última milla, a nivel general se muestran a continuación las actividades a ejecutar:

Configuración de perfiles de línea y servicio en la OLT, definiendo el ancho de banda garantizado y máximo.

Registro y autenticación de la ONT por número de serie (SN) y asignación de VLAN de datos.

Medición de potencia óptica entre OLT y ONT, y verificación de los niveles de recepción y transmisión.

Ejecución de pruebas de speedtest para medir ancho de banda, latencia y jitter, haciendo uso de herramientas de medición como Nperf, Speed Test de Ockla y NCE.

Monitoreo continuo de estabilidad mediante herramientas NCE.

Registro de los resultados y comparación con valores de referencia definidos por la ITU-T y estudios previos.

Criterios de Aceptación

Velocidad mínima alcanzada: ≥ 95 % del perfil CIR.

Latencia promedio: ≤ 15 ms en enlace local.

Potencia recibida en ONT: entre -27 dBm y -8 dBm (ITU-T, 2018).

Estabilidad del enlace: sin pérdidas de sesión durante la ventana de observación.

Jitter máximo tolerado: 10 ms.

El cumplimiento de estos valores confirma que la red GPON implementada ofrece un rendimiento estable, eficiente y competitivo frente a la fibra dedicada, en línea con las métricas internacionales de calidad de servicio (QoS) y experiencia (QoE).

Implementación en OLT

Para habilitar el servicio, se realizaron los siguientes pasos en la OLT (Huawei MA5800 como referencia):

Creación de perfiles de línea y servicio: Como lo muestra la Figura 5 se definieron parámetros de ancho de banda garantizado (CIR) y máximo (PIR) ajustados al plan de 800 Mbps.

Figura 5

Anchos de Banda en OLT

```
prfId 9, item 1, name FTTH_DBA_HSI_800M
ServType  FixBw  AsrBw  MaxBw
-----
data      0      0  901120
-----
```

Nota, información obtenida desde equipo OLT por fuente propia (2025)

Registro de la ONT: Como se muestra en la Figura 6 por medio del comando reservado la ONT se autenticó en la OLT utilizando su número de serie (SN) y se asoció al perfil de servicio.

Figura 6

ONT Autenticada en OLT

```
Command: display current-configuration ont 0/1/2 2
[EA5800V100R020: 7310]
#
[gpon]
<gpon-0/1>
interface gpon 0/1
ont add 2 2 sn-auth "485754438D153EA2" omci ont-lineprofile-id 10 ont-srvprofile-id 5 desc "67729"
ont optical-alarm-profile 2 2 profile-id 3
ont tr069-server-config 2 2 profile-id 3
#
```

Nota. ONT autenticada en OLT y sistemas se obtiene vía cli por fuente: propia (2025)

Asignación de VLAN y gempport: La Figura 7 muestra cómo se configuró la VLAN de datos para el usuario y se enlazó con el gempport respectivo en la OLT.

Figura 7

Asignación de Gemports a la ONT

```
#
[ubs-config]
<ubs-config>
service-port 105 vlan 2508 gpon 0/1/2 ont 2 gemport 0 multi-service user-vlan 1000 tag-transform default inbound traffic-table index 29 outbound traffic-table index 28
#
return
```

Nota. se realiza configuración de ONT para asignación de propiedades de fuente propia (2025)

Provisionamiento de ancho de banda: La Figura 8 muestra cómo se aplicaron políticas de DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) que aseguran un uso eficiente de la fibra y cumplimiento de la velocidad contratada.

Figura 8

Ancho de Banda Asignado a la ONT

```
Command:
display current-configuration | include 800
It will take a long time if the content you search is too much or the string you input is too long, you can press CTRL_C to break
[EA500V100R020: 7310]
traffic table ip index 30 name "800M_Download-ftth_dba_hsi" cir 901120 cbs 1140000 pir 921600 pbs 1500000 color-mode color-blind priority 0 priority-policy local-setting
traffic table ip index 31 name "800M_upload-ftth_dba_hsi" cir 901120 cbs 1140000 pir 921600 pbs 1500000 color-mode color-blind priority 0 priority-policy local-setting
```

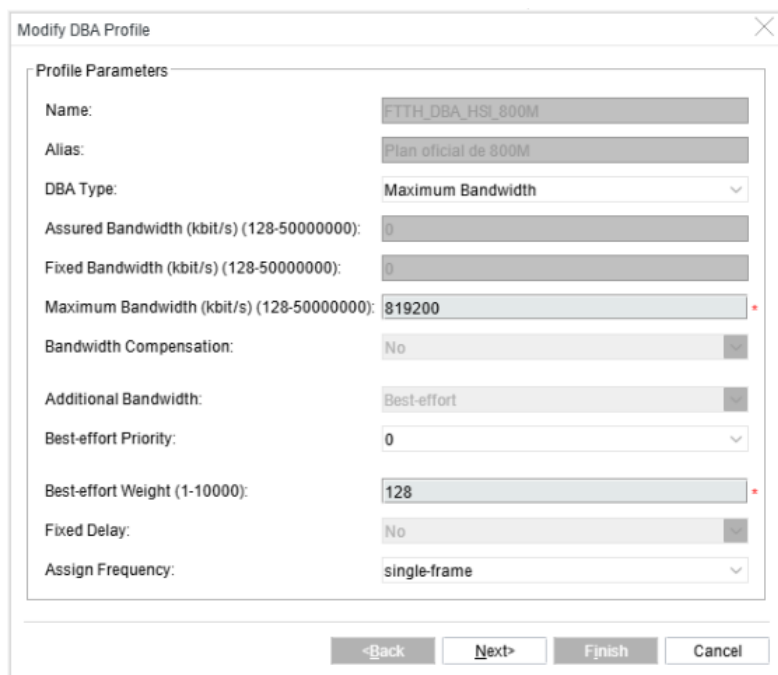
Nota. Asignación de propiedades a la ONT vía cli de fuente propia (2025)

De igual manera, la Figura 9 muestra la configuración del ancho de banda (BW) desde la plataforma, la cual permite asignar perfiles y realizar cambios en estos de acuerdo con la configuración requerida por el usuario. Entre los elementos configurables se encuentran el nombre de los perfiles, los parámetros de transmisión, el tipo de DBA (Dynamic Bandwidth Allocation), los valores de pico de ancho de banda y la prioridad asignada a cada perfil. Cabe resaltar que la Figura 9 ofrece una disposición visual clara e intuitiva, lo que facilita la supervisión y gestión de los perfiles de servicio directamente desde la plataforma. Esta capacidad de administración dinámica resulta especialmente útil durante los procesos de configuración y

ajuste del BW, ya que permite identificar con rapidez cualquier parámetro que requiera modificación, sin necesidad de intervenciones complejas en la infraestructura.

Figura 9

Configuración BW desde Herramienta



Profile Parameters	
Name:	FTTH_DBA_HSI_800M
Alias:	Plan oficial de 800M
DBA Type:	Maximum Bandwidth
Assured Bandwidth (kbit/s) (128-50000000):	0
Fixed Bandwidth (kbit/s) (128-50000000):	0
Maximum Bandwidth (kbit/s) (128-50000000):	819200
Bandwidth Compensation:	No
Additional Bandwidth:	Best-effort
Best-effort Priority:	0
Best-effort Weight (1-10000):	128
Fixed Delay:	No
Assign Frequency:	single-frame

<Back Next> Finish Cancel

Nota. configuración de ONT para su ancho de banda de fuente propia (2025)

Pruebas de Desempeño

La validación del servicio se realizó con pruebas en speedtest.net y Nperf, conectando un equipo de usuario final a la ONT provisionada. Los resultados obtenidos fueron:

Velocidad de descarga y carga (Downlink/Uplink): cercana o superior a los 800 Mbps, estable y con valores acordes al perfil asignado.

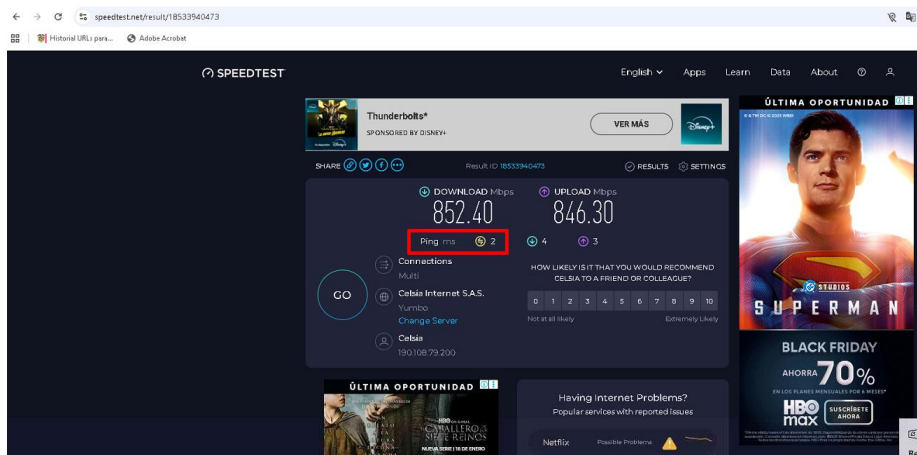
Latencia: Entre 2 a 18 ms, constante, apta para servicios sensibles como videollamadas y juegos en línea.

Jitter: Rango de 0.2 a 2 ms, estable, lo cual garantiza una experiencia adecuada para el usuario final.

En las Figura 10 se observa la prueba de velocidad realizada a un usuario configurado con 800 Megas, se destacan los resultados exitosos de las velocidades de carga y descarga según lo ofrecido por la tecnología GPON así como el ping con s baja medida.

Figura 10

Prueba en Cliente con SpeedTest

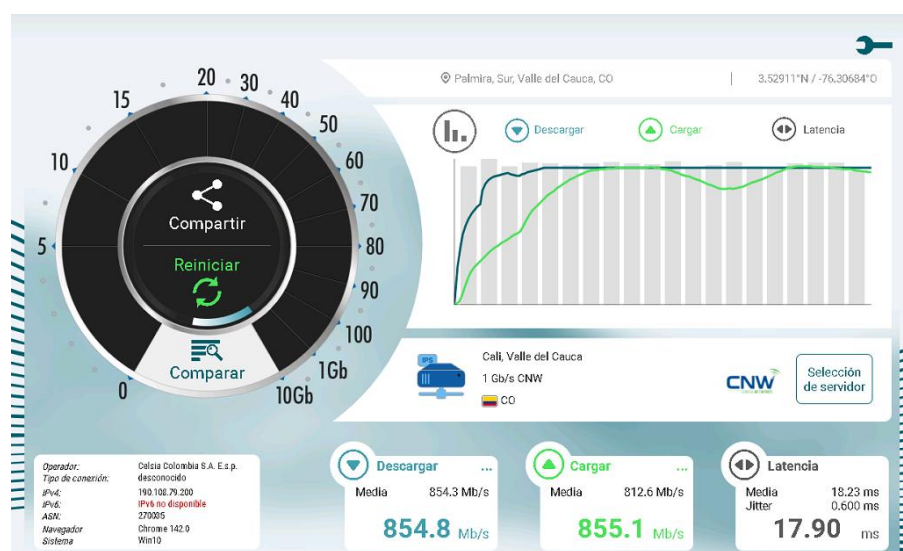


Nota. captura de velocidad de página Speedtest de fuente propia, 2025

Por su parte, la Figura 11 muestra la interfaz de la herramienta, la cual permite observar las medidas de velocidad; la línea gráfica refleja estabilidad durante el proceso de las pruebas, mientras que las medidas de jitter y latencia media, visibles en el cuadro inferior izquierdo, arrojan resultados de 2 ms y 0,6 ms respectivamente, valores estables que se asemejan a los obtenidos teóricamente.

Figura 11

Prueba de en Cliente con Nperf



Nota. Prueba con Nperf a cliente de fuente propia, 2025

Las pruebas fueron realizadas durante el mes de octubre y se ejecutaron considerando diferentes condiciones de carga en la red. Para ello, se establecieron tres horarios representativos del comportamiento típico del tráfico en la última milla: un primer periodo en horas de la mañana a las 7:00 a. m., un segundo periodo a las 2:00 p. m., correspondiente a un intervalo de demanda intermedia, y un tercer periodo nocturno a las 9:00 p. m., asociado a las horas de mayor congestión. Las mediciones se efectuaron de lunes a domingo a lo largo de toda la semana con el

fin de capturar variaciones en el canal, fluctuaciones en el tráfico y posibles alteraciones propias de las condiciones operativas de la red, la recopilación de datos está en la Tabla 6.

Tabla 6

Recopilación de Datos en Cliente GPON

Día	Fecha	7:00 Down	7:00 Up	7:00 Lat	7:00 Jit	14:00 Down	14:00 Up	14:00 Lat	14:00 Jit	21:00 Down	21:00 Up	21:00 Lat	21:00 Jit
Lunes	13	854.8	855.1	18.23	0.6	826.5	810.5	12.9	0.6	799.25	810.5	15.2	0.8
Martes	14	806.9	845.7	11.51	1.37	811.2	822.1	16.83	0.17	800	800.7	17.24	0.81
Miércoles	15	860	855.9	11.28	0.79	823.3	823.3	12.19	1.22	800.7	808	18.97	1.54
Jueves	16	834.2	827.5	11.18	0.05	803.9	815.7	13.19	1.32	802.1	807.8	14.45	0.71
Viernes	17	848.5	816.8	11.17	1.61	828.3	803.9	16.55	1.47	804.7	810.4	16.52	0.11
Sábado	18	809.5	811.7	10.4	0.67	828.2	800	12.04	0.15	810.3	807	14.93	0.82
Domingo	19	817.6	801.7	11.88	0.83	811.8	817.5	11.32	1.82	814.9	808.1	15.71	0.98
Promedio		833.1	830.6	12.2	0.8	819	813.3	13.6	1	804.6	807.5	16.1	0.8

Nota. información tomada de una semana del mes de octubre del 2025, fuente propia, 2025

La Figura 12 muestra el resultado de una de las pruebas realizadas sobre la ONT provisionada, la cual está a una distancia de aproximadamente 6km entre ONT y OLT.

Figura 12

Distancia de ONT a OLT

```
Command:
display ont info 14 1 | include distance
It will take a long time if the content you search is too much or the string you input is too long, you can
press CTRL_C to break
ONT distance(m)      : 6329
ONT last distance(m) : 6329
```

Nota. toma donde se observa vía CLI la distancia de ONT a OLT de fuente propia, 2025

En las mediciones realizadas en el cliente sobre la red GPON se obtuvieron valores cercanos a 850 Mb/s tanto en descarga como en carga, por encima del perfil configurado de 800 Mb/s. Este comportamiento es coherente con redes FTTH basadas en GPON, donde la capacidad física del puerto PON supera la velocidad comercial asignada y permite sostener el caudal

contratado con un margen adicional cuando el enlace óptico se encuentra dentro de los parámetros de potencia y atenuación establecidos.

Es importante señalar que la ONT se encuentra a una distancia aproximada de 6.3 km de la OLT, valor que se mantiene dentro del alcance operativo típico y del presupuesto óptico contemplado para GPON en la recomendación ITU-T G.984. En consecuencia, los resultados muestran que, a distancias del orden de varios kilómetros, la tecnología conserva un desempeño consistente en términos de capacidad y respuesta. La simetría observada entre subida y bajada confirma un uso eficiente del canal óptico y refleja el funcionamiento adecuado de los mecanismos de asignación dinámica de ancho de banda, sin las limitaciones estructurales que suelen presentarse en redes heredadas como HFC.

En cuanto a los indicadores de calidad, la latencia cercana a 18 ms y el jitter de aproximadamente 0,60 ms registrados en nPerf se ubican dentro de rangos adecuados para aplicaciones sensibles al retardo. En particular, un jitter del orden de sub-milisegundo (< 1 ms) evidencia una variación temporal mínima en la entrega de paquetes, lo que se traduce en una transmisión consistente para servicios en tiempo real.

Este comportamiento es coherente con redes ópticas pasivas, donde la ausencia de equipos activos intermedios en la planta externa reduce fuentes de variación asociadas a amplificación, ruido y fluctuaciones eléctricas. En conjunto, los resultados muestran un desempeño alineado con lo esperado para una red GPON correctamente dimensionada en la última milla y confirman su capacidad para soportar un servicio de alta exigencia con comportamiento simétrico y con niveles de latencia y jitter acordes a los requerimientos de aplicaciones críticas.

Análisis de Resultados

Los resultados de la prueba de laboratorio confirman que GPON es una alternativa viable y eficiente frente a la fibra dedicada, ya que ofrece un balance óptimo entre capacidad técnica, uso de infraestructura y costos. Además, la gestión centralizada en OLT y la posibilidad de escalar hacia XGS-PON permiten asegurar la evolución futura de la red sin necesidad de reemplazar la infraestructura base. Este comportamiento resulta coherente con la trayectoria de desarrollo histórico de las redes ópticas fijas, donde la transición desde arquitecturas híbridas y cobre hacia topologías totalmente pasivas ha consolidado mejoras sustantivas en capacidad, alcance y eficiencia operativa (Uzunidis et al., 2022).

Análisis Comparativo de Desempeño entre HFC y GPON

El análisis comparativo se realizó tomando como referencia los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio para la red GPON y los valores teóricos y operativos verificados en literatura especializada para la red HFC. De esta forma, se contrastaron los parámetros técnicos más relevantes de la última milla definidos a lo largo del presente documento (ancho de banda, latencia y jitter), con el fin de determinar la eficiencia técnica de la migración hacia redes ópticas pasivas. Los valores de referencia para HFC se sustentan en la literatura técnica fundacional del cable y en el análisis comparativo de alternativas de acceso de banda ancha reportado por (Gorshe et al., 2014), complementados por los marcos normativos internacionales vigentes para la capa física y de interfaz del sistema híbrido.

Ancho de Banda

El ancho de banda constituye el principal indicador de capacidad de transmisión y de experiencia de usuario. En el escenario teórico, las redes HFC presentan un desempeño asimétrico, con velocidades de descarga entre 300 y 800 Mbps y velocidades de subida entre 20

y 100 Mbps, comportamiento condicionado estructuralmente por la asignación desigual del espectro de frecuencias en los canales descendente (54 MHz – 1.2 GHz) y ascendente (5 MHz – 204 MHz) (ITU-T, 2007), tal como recoge también la documentación vigente de la UIT (ITU-T, 2025). Si bien la especificación DOCSIS 3.1 introduce modulaciones OFDM capaces de alcanzar tasas nominales de hasta 10 Gbps en descarga y 1–2 Gbps en subida, y DOCSIS 4.0 propone Full Duplex y espectro extendido para mitigar esta asimetría (CableLabs, 2019, 2020), la planta coaxial desplegada en operaciones reales mantiene la limitación estructural en el canal de retorno observada en los valores anteriores.

Por su parte, en el entorno de laboratorio, GPON alcanzó velocidades reales de 818 Mbps en descarga y 817 Mbps en subida, demostrando un comportamiento prácticamente simétrico, consistente con los valores definidos por el estándar ITU-T G.984 (2.5/1.25 Gbps teóricos). Este resultado confirma una mayor estabilidad y eficiencia en la distribución del ancho de banda, incluso bajo tráfico sostenido, además de una mejor relación entre velocidad teórica y velocidad efectiva (superior al 90 %). Estos valores resultan consistentes con la evolución sostenida de las redes ópticas de acceso reportada en la literatura especializada durante las últimas cinco décadas, donde la transición hacia arquitecturas pasivas punto-multipunto ha demostrado un incremento progresivo del rendimiento efectivo por usuario (Uzunidis et al., 2022).

Latencia

En redes HFC, la latencia típica oscila sobre los 30-50 ms, producto de la presencia de múltiples amplificadores eléctricos y conversiones óptico-eléctricas a lo largo del recorrido (Gorshe et al., 2014). Estas interrupciones generan retardos acumulativos y variabilidad temporal en la entrega de paquetes (UIT, 2003)

En la red GPON probada en laboratorio, se obtuvo una latencia promedio de 14 ms, manteniéndose dentro del rango óptimo establecido por la UIT-T Y.1541 (UIT, 2021) para servicios interactivos (<150 ms) y muy por debajo de los valores comunes en redes híbridas. Este resultado evidencia la eficiencia del transporte óptico pasivo, donde la ausencia de equipos activos intermedios minimiza el retardo de propagación.

Jitter

El jitter, entendido como la variación en el tiempo de llegada de los paquetes, afecta directamente la calidad percibida en aplicaciones sensibles al tiempo (voz, videollamadas, streaming). En redes HFC, el jitter promedio se sitúa entre 2 y 10 ms, con picos superiores en momentos de congestión o degradación del canal coaxial, condición frecuentemente asociada a desajustes de impedancia en componentes pasivos y a procesos de corrosión en conectores y blindajes de la planta externa, fenómenos bien documentados en la literatura técnica del cable y analizados en estudios recientes (M. Macas, 2020)

En la red GPON del laboratorio, los valores de jitter se registraron sobre los 0,7 ms, dentro de los márgenes aceptables definidos por la UIT-T (<50 ms). La variación se asocia principalmente a la asignación dinámica de ancho de banda (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA) inherente a GPON, sin representar una afectación perceptible en la calidad de servicio.

En términos generales, el comportamiento de GPON fue más estable y predecible que el de HFC, manteniendo latencia y jitter dentro de los límites óptimos para aplicaciones críticas de tiempo real, en línea con la transición global hacia redes ópticas pasivas documentada para las redes fijas de última milla (Uzunidis et al., 2022).

La Tabla 7 presenta la comparación teórica entre las redes HFC y los resultados obtenidos en laboratorio para GPON.

Tabla 7

Comparación redes Híbridas y Gpon

Parámetro	HFC (Referencia teórica verificada)	GPON (Resultados de laboratorio)	Observación
Arquitectura	Híbrida (fibra + coaxial, canal compartido, activa)	Punto a multipunto pasiva (FTTH)	GPON elimina conversión óptico-eléctrica y equipos activos.
Simetría de ancho de banda	Asimétrica (descarga 5–10× mayor que subida)	Casi simétrica (803/846 Mbps medidos)	GPON ofrece tráfico equilibrado y mejor aprovechamiento del canal.
Velocidad de descarga promedio	300 – 800 Mbps	803 Mbps	GPON mantiene la velocidad contratada y estable.
Velocidad de subida promedio	20 – 100 Mbps	846 Mbps	GPON supera hasta 700 % la capacidad de subida del HFC.
Latencia promedio (ms)	15 – 35 ms	11 ms	Reducción cercana al 68 % en retardo, mejor respuesta en tiempo real.
Jitter promedio (ms)	2 – 10 ms	0.05 – 1.82 ms	Ambos dentro de norma UIT-T, aunque GPON mantiene menor variabilidad relativa.

Nota. Propia, 2025.

Ventajas Técnicas y Operativas

Los resultados obtenidos en la red GPON permiten sustentar, con base técnica y operativa, la viabilidad de la migración de la última milla desde arquitecturas HFC hacia una red óptica pasiva. Desde la perspectiva del usuario final, las mediciones evidenciaron un desempeño consistente y superior en los parámetros que más impactan la experiencia de servicio. Se registraron velocidades cercanas a 850 Mb/s tanto en descarga como en carga, por encima del perfil configurado de 800 Mb/s, lo que confirma el cumplimiento del caudal contratado con un margen estable. En cuanto a la calidad del servicio, la latencia cercana a 18 ms y un jitter aproximado de 0,60 ms reflejan una variación temporal mínima en la entrega de paquetes, condición favorable para aplicaciones sensibles al retardo como videollamadas, teletrabajo, juegos en línea y servicios en la nube. Adicionalmente, la simetría práctica entre subida y bajada, propia del acceso óptico, representa una mejora directa frente a la naturaleza asimétrica de HFC, especialmente en escenarios donde la transmisión bidireccional es determinante.

Un aspecto relevante que refuerza estos resultados es que la ONT evaluada se encuentra ubicada a una distancia aproximada de 6,3 km respecto a la OLT, valor representativo de despliegues reales de última milla y ampliamente dentro de los límites definidos por la recomendación ITU-T G.984. A pesar de esta distancia, el enlace mantuvo estabilidad en velocidad, latencia y jitter, evidenciando que GPON conserva su desempeño aun en trayectos extensos sin requerir equipos activos intermedios. Esta característica contrasta con HFC, donde la distancia en el tramo coaxial está fuertemente condicionada por la atenuación del medio y la necesidad de amplificadores, lo que incrementa la complejidad operativa y la probabilidad de degradación del servicio.

Desde la perspectiva del operador, estos resultados se traducen en ventajas claras en términos de operación y sostenibilidad. La eliminación de elementos activos en la planta externa reduce fuentes de falla, simplifica el mantenimiento y permite un control más preciso del enlace mediante la supervisión de parámetros ópticos. Además, la capacidad de GPON para cubrir mayores distancias sin penalización significativa en el desempeño facilita la expansión de la red y la reutilización de la infraestructura existente. En conjunto, el comportamiento medido y las características estructurales de GPON respaldan que la migración desde HFC hacia redes ópticas pasivas es técnica y operativamente viable, al garantizar los parámetros técnicos contratados por el usuario y optimizar la gestión de la última milla para el proveedor de servicios.

Desafíos

Compatibilidad y Actualización de Equipos

Aunque la infraestructura de fibra óptica existente puede ser reutilizada, es necesario evaluar la compatibilidad de los equipos actuales (como ONTs y divisores pasivos) con los requerimientos de una red NGN. La actualización o sustitución del hardware puede representar un desafío tanto técnico como financiero (Palanichamy, 2025).

Gestión de la Transición Operativa

La migración hacia una arquitectura GPON implica cambios significativos en la gestión y operación de la red. Es fundamental capacitar al personal y adaptar los procesos internos para manejar tecnologías emergentes como SDN y NFV, lo que requiere inversión en formación y ajustes organizativos (OECD, 2022). En este contexto, marcos técnicos internacionales como la Recomendación UIT-T J.1108 aportan lineamientos específicos para la migración ordenada de servicios tradicionales de radiofrecuencia sobre coaxial hacia arquitecturas IP soportadas por fibra óptica, facilitando la coexistencia durante la fase de transición (ITU-T, 2020)

Seguridad y Redundancia

El entorno corporativo exige altos estándares de seguridad y resiliencia. La implementación de una red convergente debe contemplar mecanismos robustos de cifrado, firewalls de nueva generación y soluciones de redundancia que garanticen la disponibilidad y protección de los datos (JOINT TASK FORCE, 2020).

Integración de Sistemas Heterogéneos

En muchos casos, la infraestructura heredada debe coexistir con las nuevas tecnologías. Esta integración puede representar desafíos en términos de interoperabilidad y gestión del tráfico, lo que requiere estrategias de integración cuidadosamente planificadas (Dionicio Rodríguez-Díaz & Valentín García-Bermudez, s.f.).

Discusión y Perspectivas para la Implementación en el Mercado Corporativo

La transición hacia arquitecturas basadas en GPON abre oportunidades significativas para los operadores de telecomunicaciones, especialmente aquellos que buscan ampliar su portafolio de servicios hacia el segmento corporativo. La capacidad de ofrecer soluciones FTTO (Fiber to the Office), adaptadas a las exigencias de conectividad empresarial, representa un valor agregado que puede posicionar a la empresa en un nicho de mercado altamente competitivo.

En este contexto, la adopción de redes de nueva generación (NGN) permite a los operadores no solo mejorar la eficiencia operativa y reducir costos, sino también implementar soluciones avanzadas para la gestión de red. La integración de tecnologías como SDN (Software Defined Networking) y NFV (Network Functions Virtualization) facilita la automatización y administración centralizada de recursos, lo que permite responder con agilidad a cambios en la demanda y ofrecer servicios personalizados a cada cliente.

Asimismo, la convergencia de servicios sobre una única infraestructura IP abre la posibilidad de desarrollar nuevos modelos de negocio basados en la provisión de servicios integrales. La implementación de plataformas de comunicaciones unificadas, soluciones de seguridad gestionada y servicios en la nube son ejemplos de estrategias que acompañan la oferta de conectividad, fortaleciendo la fidelización de clientes corporativos (Zamora Márquez et al., 2020)

Desde el punto de vista económico, la modernización de la infraestructura y la migración a GPON han demostrado ser inversiones con un alto potencial de retorno. Diversos estudios señalan que la optimización de recursos y la reducción de costos operativos permiten alcanzar un ROI favorable a mediano y largo plazo, especialmente si se consideran los beneficios derivados de la mejora en la calidad del servicio y la disminución de incidencias operativas.

No obstante, es fundamental que esta transición se lleve a cabo de forma planificada y escalonada, teniendo en cuenta las particularidades del mercado y la capacidad operativa del proveedor. La coexistencia de infraestructuras heredadas con nuevas tecnologías puede representar desafíos en términos de interoperabilidad, lo cual exige una estrategia de integración que incluya fases piloto, evaluación de desempeño y capacitación técnica del personal involucrado.

Conclusiones

El cambio de paradigma que implica migrar desde una red tradicional, basada en nodos centralizados y fibras dedicadas, hacia una arquitectura basada en GPON (FTTH/FTTO) representa una oportunidad estratégica para los operadores de telecomunicaciones. La adopción de esta tecnología no solo permite optimizar el uso de la infraestructura existente, sino que también sienta las bases para la convergencia de servicios en el marco de las Redes de Nueva Generación (NGN).

Las ventajas de esta transición son evidentes en términos de escalabilidad, mejora en la calidad del servicio y la posibilidad de implementar soluciones avanzadas de gestión y seguridad. No obstante, los desafíos relacionados con la actualización de equipos, la integración de sistemas heterogéneos y la gestión del cambio operativo requieren una planificación detallada, así como inversión en capacitación y nuevas tecnologías.

En el contexto del mercado corporativo, donde la exigencia por conectividad de alta calidad y servicios integrados es cada vez mayor, la migración a GPON se configura como una solución capaz de satisfacer dichas demandas, permitiendo a los operadores diversificar su oferta y posicionarse competitivamente. Casos de éxito y estudios recientes evidencian que, mediante la implementación escalonada y el aprovechamiento de tecnologías como SDN y NFV, es posible alcanzar una transición viable tanto desde el punto de vista técnico como económico.

A partir de la revisión bibliográfica desarrollada, se logró identificar con claridad los parámetros técnicos fundamentales que determinan el desempeño en redes de telecomunicaciones, tales como la latencia, el ancho de banda y la eficiencia en el uso de la fibra óptica. Estos elementos resultan esenciales para comprender las capacidades y limitaciones tanto de las tecnologías tradicionales como de las actuales soluciones basadas en fibra. La

documentación consultada permitió establecer un marco técnico sólido que fundamenta las comparaciones desarrolladas en este trabajo.

La comparación entre las tecnologías tradicionales de fibra dedicada y la arquitectura GPON evidenció diferencias técnicas significativas. Se determinó que las tecnologías PON, ofrecen mejoras sustanciales en capacidad de transmisión, menor latencia, mayor eficiencia en la utilización del medio óptico y facilidad de escalabilidad. Además, se constató que la simetría en la velocidad y el soporte de múltiples servicios sobre una única infraestructura representan ventajas competitivas frente a esquemas más antiguos.

La evaluación de los beneficios derivados de la migración tecnológica hacia GPON permitió establecer ventajas claras tanto desde el punto de vista técnico como económico. Estas tecnologías no solo mejoran parámetros clave de rendimiento, como el ancho de banda y la latencia, sino que también permiten reducir los costos operativos a mediano y largo plazo, gracias a su capacidad para soportar múltiples usuarios y servicios sobre una misma red.

En conjunto, el análisis permitió demostrar que la migración hacia tecnologías GPON representa un avance significativo en el diseño y operación de redes corporativas. La evaluación comparativa de parámetros clave confirmó que estas tecnologías ofrecen beneficios técnicos sustanciales que mejoran la calidad del servicio, la eficiencia de la red y la sostenibilidad operativa. En consecuencia, se valida que la adopción de estas soluciones ópticas no solo responde a las exigencias actuales del entorno digital, sino que también prepara a las organizaciones para afrontar con solidez los retos de las redes de nueva generación.

Es necesario precisar que las conclusiones anteriores se fundamentan, en lo que respecta a GPON, en mediciones experimentales obtenidas directamente en el entorno de laboratorio implementado para este trabajo. En contraste, las referencias a XG(S)-PON a lo largo del

documento se derivan exclusivamente de una revisión documental —recomendaciones UIT-T de las series G.987 y G.9807, estudios académicos y reportes de organismos internacionales— sin que esta tecnología haya sido objeto de validación experimental propia. Por tanto, los beneficios atribuidos a XG(S)-PON tienen carácter teórico-referencial y deben interpretarse como proyecciones sustentadas en la literatura, no como resultados medidos.

Recomendaciones y Trabajos Futuros

A partir del análisis realizado en este trabajo de grado, que combinó la evaluación experimental de GPON con una revisión teórico-documental de XG(S)-PON, se identifican varias líneas de desarrollo que pueden ser abordadas en investigaciones futuras. Dado que XG(S)-PON no fue implementado en el entorno de laboratorio de este estudio —su análisis se sustentó en recomendaciones de la UIT-T y literatura especializada—, su validación experimental constituye en sí misma una de las prioridades más relevantes para trabajos posteriores.

En primer lugar, se recomienda ampliar el estudio hacia entornos rurales o zonas de difícil acceso, donde los desafíos de implementación de fibra óptica requieren enfoques técnicos y económicos diferenciados. Analizar esquemas de despliegue híbridos que integren tecnologías inalámbricas (como 5G FWA) con soluciones PON podría aportar alternativas más viables y sostenibles en estos contextos.

Asimismo, futuras investigaciones pueden enfocarse en realizar simulaciones o implementaciones piloto que validen en entornos reales los parámetros técnicos evaluados en este trabajo (latencia, ancho de banda, escalabilidad y eficiencia). La inclusión de herramientas de modelado como GNS3, Cisco Packet Tracer o simuladores de tráfico permitiría observar comportamientos bajo diferentes escenarios de carga, lo que enriquecería la toma de decisiones técnicas. En particular, se recomienda priorizar la implementación experimental de XG(S)-PON en un entorno de laboratorio equipado con OLT y ONT compatibles con los estándares ITU-T G.9807.1, con el fin de contrastar los valores teóricos empleados en este estudio con mediciones

reales de latencia, jitter y ancho de banda simétrico a 10 Gbps. Esta validación permitiría extender y consolidar las conclusiones aquí presentadas con evidencia experimental directa.

Otra recomendación relevante es estudiar el impacto de estas tecnologías en sectores específicos como salud, educación, manufactura o ciudades inteligentes. Analizar cómo GPON y XGS-PON pueden integrarse con tecnologías emergentes como el IoT, Big Data o redes 5G en aplicaciones críticas permitirá dimensionar de forma más precisa su aporte al desarrollo digital del país.

Desde la perspectiva de seguridad, es pertinente profundizar en el análisis de vulnerabilidades específicas asociadas a redes PON y los mecanismos de protección recomendados, especialmente frente a nuevas amenazas cibernéticas. Incluir prácticas de ciberseguridad basadas en estándares como ISO 27001, NIST o Zero Trust enriquecerá el enfoque de protección de la infraestructura.

Por último, sería útil extender el análisis económico con estudios de costo-beneficio más detallados, que incluyan variables como el tiempo de retorno de inversión (ROI), OPEX vs. CAPEX y modelos de negocio colaborativos entre operadores e instituciones públicas.

Estas recomendaciones buscan no solo fortalecer los hallazgos actuales, sino también abrir el camino hacia desarrollos más integrales que contribuyan a una planificación estratégica y sostenible de las redes de acceso de nueva generación.

Referencias Bibliográficas

- 6W, reserarch. (2025). *Colombia GPON Market Outlook*.
<https://Www.6wresearch.Com/Industry-Report/Colombia-Gpon-Market>.
- Aguilar, K., & Narváez, J. (2018). *Análisis Técnico y Económico de una migración de redes HFC a redes G-PON*.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/29848/T-100137%20AGUILAR-NARVAEZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cabezas, P. M., & Cabrera, J. B. (2020). 26 Diseño de una red pasiva GPON para el mejoramiento de los servicios de telecomunicaciones en el cantón Macará. *Revista Científica Dominio de Las Ciencias*, 6(0), 21.
- CableLabs. (2019). *Data-Over-Cable Service Interface Specifications DOCSIS® 4.0 Physical Layer Specification*. <http://www.cablelabs.com/specs/certification/trademarks>.
- CableLabs. (2020). *Data-Over-Cable Service Interface Specifications DOCSIS ® 3.1 Physical Layer Specification*. <http://www.cablelabs.com/specs/certification/trademarks>.
- Cablelabs. (2023). *DOCSIS 4.0*. <https://ao-inc.com/assets/resources-element-files/Spanish/AOI-Guia-sobre-DOCSIS-4.pdf>
- Casasnovas, M., Michaelides, C., Carrascosa-Zamacois, M., & Bellalta, B. (2024). *Experimental Evaluation of Interactive Edge/Cloud Virtual Reality Gaming over Wi-Fi using Unity Render Streaming*. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2024.08.001>
- Chan, A. E. (2021). *Fibra Óptica: Evolución, Estándares y Aplicaciones*.
<https://rasisbi.uqroo.mx/bitstream/handle/20.500.12249/2610/ta1800.2020-2610.pdf?sequence=1&isallowed=y>

Conde-Zhingre, L. E., Quezada-Sarmiento, P. A., & Labanda-Jaramillo, M. L. (2018).

Interconexión mediante tecnología GPON en una ciudad Inteligente: Caso de estudio Ciudad de Loja (Ecuador). *Espacios*, 39(3).

<https://www.revistaespacios.com/a18v39n03/a18v39n03p12.pdf>

CRC. (2024). *Accesos a internet fijo con fibra óptica crecieron en 2024 alcanzando los 3,63 millones.*

Dionicio Rodríguez-Díaz, I., & Valentín García-Bermudez, R. (s.f.). *Diseño e implementación de la red de fibra óptica del cantón Chone-Ecuador Design and implementation of the fiber optic network of the Chone-Ecuador canton.* Retrieved <http://orcid.org/0000-0003-0535-525X>

Escallón-Portilla, A. F., Ruiz-Guachetá, V. H., & López-Perafán, J. G. (2020). Evaluación del desempeño físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play después de la incorporación de un módulo RoF. *TecnoLógicas*, 23(47), 23–61.

<https://doi.org/10.22430/22565337.1391>

Fba, & Cartesian. (2023). *Fiber Deployment Annual Report 2023.*

https://fiberbroadband.org/wp-content/uploads/2024/01/Fiber-Deployment-Annual-Report-2023_FBA-and-Cartesian.pdf

Franke, M., & Neef, S. (2023). *A review of the security role of ISP mandated ONUs and ONTs in GPONs.* <http://arxiv.org/abs/2310.05687>

Gorshe, S., Raghavan, A., Starr, T., & Gali, S. (2014). *Broadband access: Wireline and wireless — alternatives for Internet services.*

<https://statics.teams.cdn.office.net/evergreen-assets/safelinks/2/atp-safelinks.html>

- ITU-T. (2007). *ITU-T Rec. J.122 (12/2007) Second-generation transmission systems for interactive cable television services - IP cable modems*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-J.122-200712-I/en>
- ITU-T. (2020). *SERIES J: CABLE NETWORKS AND TRANSMISSION OF TELEVISION, SOUND PROGRAMME AND OTHER MULTIMEDIA SIGNALS Transmission specification for radio over IP transmission systems*.
<http://handle.itu.int/11.1002/1000/11>
- ITU-T. (2024). ITUPublications International Telecommunication Union Recommendations Standardization Sector Supplement ITU-T G Suppl. 81 (07/2024) Practical aspects of PON security. <https://handle.itu.int/>
- ITU-T. (2025). *Standardization Sector GSTP-BAIN Broadband access and in-premises networks ITUPublications International Telecommunication Union*.
- James, N. (s.f.). *Unveiling the Future: Navigating the GPON Technology Market in 2024*.
<https://Www.Verifiedmarketreports.Com/Blog/Top-7-Trends-in-Gpon-Technology/>.
- Javier, N., Calixto, C., Palacios, W., Álvaro, A., & Rolón, J. C. (2023). *Conceptos y enfoques investigación investigación METODOLOGÍA METODOLOGÍA de de de la de la*.
- JOINT TASK FORCE. (2020). *Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations*. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-53r5>
- Kirschenmann, N. (2024). *Exploramos la vanguardia: las tecnologías PON actuales y el camino hacia las redes PON de 25G y 50G*.
<https://Blog.Viavisolutions.Com/Es/2024/02/12/Exploramos-La-Vanguardia-Las-Tecnologias-Pon-Actuales-y-El-Camino-Hacia-Las-Redes-Pon-de-25g-y-50g/>.

- Macas, E. (2022). *Análisis Técnico Comparativo Entre las Tecnologías de Redes de Acceso Ópticas GPON y XGS-PON*.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/22232/1/CD%2011733.pdf>
- Macas, M. (2020). *Análisis Técnico Comparativo entre las tecnologías de redes de Acceso Ópticas GPON y XGS-PON*. https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2021/01/2020_10_13_ICSG_Factbook_2020.pdf
- OECD. (2022). *OECD DIGITAL ECONOMY PAPERS BROADBAND NETWORKS OF THE FUTURE*. <http://www.oecd.org/termsandconditions>.
- Palanichamy, R. S. T. (2025). Cost-effective strategies for transitioning legacy coaxial to fiber optic broadband networks: A multi-faceted approach. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 6(2), 1805–1808.
<https://doi.org/10.54660/ijmrge.2025.6.2.1805-1808>
- Pinduisaca Quishpe, J. C. (2023). Diseño de una red de acceso FTTH con tecnología XGS-PON para el ISP SKYLINK SYSTEM del cantón Chambo de la provincia de Chimborazo. *Universidad Nacional de Chimborazo*.
[http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/12074/1/PINDUISACA QUISHPE JUAN CARLOS__Diseño de una red de acceso FTTH con tecnología XGS-PON para el ISP SKYLINK SYSTEM del cantón Chambo de la provincia de Chimborazo_V2.pdf](http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/12074/1/PINDUISACA_QUISHPE_JUAN_CARLOS__Diseño_de_una_red_de_acceso_FTTH_con_tecnología_XGS-PON_para_el_ISP_SKYLINK_SYSTEM_del_cantón_Chambo_de_la_provincia_de_Chimborazo_V2.pdf)
- Prodnik, V., & Lavric, A. (2024). Migration from Hybrid-Fiber-Coaxial to Fiber-to-the-Home Using a Passive Optical Network Architecture. *Taylor and Francis Online* .
https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01468030.2025.2514421?utm_source=chatgpt.com#abstract

- Rooney, D. R., Fernández, M., Beltrán, S., & Cabello, S. (2022). *FTTH Panorama for Latin America 2022*. <https://fiberbroadband.org/wp-content/uploads/2023/04/Latam-FTTH-Panorama-2021-Report.pdf>
- UIT. (2003). *UIT-T G.114*.
- UIT. (2021). *Directrices sobre modelización de costos: Políticas económicas y métodos de determinación de costos de los servicios relativos a las redes nacionales de telecomunicaciones/TIC*.
- Uzunidis, D., Logothetis, M., Stavdas, A., Hillerkuss, D., & Tomkos, I. (2022). Fifty Years of Fixed Optical Networks Evolution: A Survey of Architectural and Technological Developments in a Layered Approach. In *Telecom* (Vol. 3, Number 4, pp. 619–674). MDPI. <https://doi.org/10.3390/telecom3040035>
- Valverde, D. (2024). *Fiber Optic Broadband Adoption Soars 258% in Latin America Home > Tech > Article Fiber Optic Broadband Adoption Soars 258% in Latin America*. <https://Mexicobusiness.News/Tech/News/Fiber-Optic-Broadband-Adoption-Soars-258-Latin-America>.
- Vintimilla Murillo, K. A. S. M. A. D. (2024). *Diseño de un modelo de migración para redes de HFC mediante la tecnología GPON en el contexto ecuatoriano*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Zamora Márquez, M., Grrhh, E. B., Territorial Camagüey, D., & Baluja García, W. (2020). *Seguridad e Multimedia Subsystem (IMS)*.
- Zhu, S., Zhou, S., Wang, L., Zang, C., Liu, Y., & Liu, Q. (2024). Performance Analysis and Prediction of 5G Round-Trip Time Based on the VMD-LSTM Method. *Sensors*, 24(20). <https://doi.org/10.3390/s24206542>