



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

TÍTULO

Estudio de la viabilidad y los beneficios de implementar redes ópticas pasivas en la zona rural “El Morro” para mejorar la conectividad y el acceso a servicios de comunicación

AUTOR

López Jaime, Luis Vicente

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR

Velásquez Vargas, Washington Adrián

Santa Elena, Ecuador

Año 2025



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

**Ing. Alicia Andrade Vera, Mgtr.
COORDINADORA DEL PROGRAMA**

**Ing. Washington Velásquez Vargas, Ph.D.
TUTOR**

**Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Ing. Lucrecia Llerena Guevara, Ph.D.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Abg. María Rivera González, MSc.
SECRETARIA GENERAL
UPSE**



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

CERTIFICACIÓN

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

TUTOR

Ing. Washington Adrián Velásquez Vargas, Ph.D.

Santa Elena, 28 de julio de 2025



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

Yo, **LÓPEZ JAIME, LUIS VICENTE**

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, **Estudio de la viabilidad y los beneficios de implementar redes ópticas pasivas en la zona rural “El Morro” para mejorar la conectividad y el acceso a servicios de comunicación** previo a la obtención del título en Magíster en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Santa Elena, 28 de julio de 2025

EL AUTOR

Luis Vicente López Jaime



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

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado **Estudio de la viabilidad y los beneficios de implementar redes ópticas pasivas en la zona rural “El Morro” para mejorar la conectividad y el acceso a servicios de comunicación**, presentado por el estudiante, Luis Vicente López Jaime fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 8%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

 CERTIFICADO DE ANÁLISIS magister		
Tesis MT Luis López (1)		
Nombre del documento: Tesis MT Luis López (1).pdf ID del documento: e98f7c7f91490285e1c3e031a89809ce47f4d8b7 Tamaño del documento original: 2,91 MB	Depositante: WASHINGTON ADRIAN VELASQUEZ VARGAS Fecha de depósito: 28/7/2025 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 28/7/2025	Número de palabras: 20.726 Número de caracteres: 142.818

TUTOR

Ing. Washington Adrián Velásquez Vargas, Ph.D.



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

AUTORIZACIÓN

Yo, LÓPEZ JAIME, LUIS VICENTE

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

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

Santa Elena, 28 de julio de 2025

EL AUTOR

Luis Vicente López Jaime

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por darme la oportunidad de cumplir un anhelo más en mi carrera profesional, el poder obtener esta maestría, por darme la fortaleza para derribar cada barrera en este largo camino de la vida y por poner a personas importantes quienes han dado cada uno de sus conocimientos y ayuda durante este proceso.

"Si una persona no es agradecida con lo que tiene ahorita, difícilmente lo será cuando lo obtenga". - Frank A. Clark, tenemos que agradecer por todo, el camino puede ser largo, pero la meta es solo una. No puedo dejar de agradecerle a mi esposa Tecnóloga, Narcisa Luzuriaga sin su ayuda y empuje para terminar para terminar este proceso de obtención de la Maestría en Telecomunicaciones, gracias amor por su apoyo en todo momento, gracias la amo.

López Jaime, Luis Vicente

DEDICATORIA

Quiero dedicarle esta tesina a mi esposa, madre y suegros, cuya constante inspiración y apoyo incondicional me han guiado en cada paso de este viaje académico. Su confianza en mí ha sido el faro que me ha iluminado incluso en los momentos más desafiantes.

A mis hijos Caleb, Otoniel y Eliette que son el motor para cada día luchar por ellos, por mis sueños y que puedan ver que con constancia todo se puede lograr.

Finalmente, a mi propia perseverancia y dedicación, que me han permitido alcanzar esta meta y que seguirán guiándome hacia nuevos desafíos en el mundo de las telecomunicaciones.

López Jaime, Luis Vicente

ÍNDICE GENERAL

TÍTULO	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
RESUMEN	XV
ABSTRACT	XVI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	7
1.1. Revisión de Literatura	7
1.2. Desarrollo teórico y conceptual.....	8
1.2.1. Telecomunicaciones para zonas rurales y remotas	8
1.2.2. Modelos de configuración de la red	10
1.2.3. Tecnologías de acceso	10
1.2.3.1. Fibra hasta las instalaciones.....	10
1.2.3.2. Cable de par trenzado a las instalaciones (xDSL)	12
1.2.3.3. Televisión por Cable (CATV)	13

1.2.3.4. WiFi	15
1.2.3.5. Acceso móvil por satélite.....	18
1.2.4. Visión general de las redes óptica pasivas.....	21
1.2.5. Arquitectura del sistema GPON	22
1.2.5.1. Terminal de línea óptica (OLT)	23
1.2.5.2. Unidad de red óptica (ONU) y terminal de red óptica (ONT).....	24
1.2.5.3. Red de distribución óptica (ODN)	24
1.2.5.4. Redes de servicios y de usuarios.....	24
1.2.6. Pila de protocolos de GPON.....	25
1.2.6.1. Visión general de la arquitectura GTC	26
1.2.7. Transmisión de tráfico GPON	27
1.2.7.1. Transmisión descendente	28
1.2.7.2. Transmisión ascendente	29
1.2.8. Asignación de ancho de banda (BW)	30
1.2.9. Formato de transmisión	32
1.2.9.1. Trama descendente	33
1.2.9.2. Trama ascendente	34
1.2.10. Importancia de la conectividad en zonas rurales	35
1.2.11. Infraestructura de telecomunicaciones en zonas rurales.....	37
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	39
2.1. Contexto de la investigación.....	39
2.2. Diseño y alcance de la investigación.....	40
2.3. Tipo y métodos de investigación	41
2.4. Población y muestra	42
2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	42
2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información.	43

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1. Análisis del estado actual de la infraestructura de comunicaciones en “El Morro”	45
3.1.1. Diagnóstico de la infraestructura actual	45
3.1.2. Diagnóstico técnico de la infraestructura actual.....	49
3.1.3. Identificación de brechas y limitaciones de conectividad	53
3.1.4. Percepciones comunitarias sobre la conectividad	54
3.2. Propuesta de Diseño de la Red Óptica Pasiva (PON) para «El Morro»	56
3.2.1. Caracterización técnica y validación de GPON	56
3.2.2. Modelado de GPON	57
3.2.3. Metodología de simulación e implementación de algoritmos	59
3.3. Análisis detallado de resultados obtenidos mediante simulación computacional	61
3.3.1. Análisis comparativo de velocidad vs. distancia	62
3.3.2. Análisis comparativo de latencia y pérdida de paquetes	63
3.3.3. BER vs SNR y Q-Factor vs SNR	64
3.4. Análisis técnico y económico del proyecto.....	66
3.4.1. Cálculo del presupuesto óptico.....	66
3.4.2. Análisis de factibilidad económica.....	67
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES.....	71
REFERENCIAS	72
ANEXOS.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1: Tecnologías utilizadas para las conexiones de banda ancha	10
Tabla 1. 2: Recomendaciones de la UIT para las configuraciones FTTx.....	11
Tabla 1. 3: Bandas de frecuencia para posibles escenarios de comunicaciones por satélite y referencias relacionadas.....	20
Tabla 3. 1: Frecuencias y medidas de tendencia central de la encuesta realizada(N=250)	45
Tabla 3. 2: Resultados de la encuesta sobre la conectividad a Internet en «El Morro ...	48
Tabla 3. 3: Comparativa técnica entre estándares de la UIT y mediciones en "El Morro"	52
Tabla 3. 4: Comparativa técnica entre estándares de la UIT y mediciones en "El Morro"	66
Tabla 3. 5: Coste estimado del proyecto.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Arquitectura de auto-backhaul.	9
Figura 1. 2: Arquitectura de una red de servicios xDSL.	13
Figura 1. 3: Arquitectura de la red de cable de banda ancha DOCSIS.	14
Figura 1. 4: Arquitectura CMTS.	15
Figura 1. 5: Evolución de las tecnologías y estándares Wi-Fi.	17
Figura 1. 6: Sistema de comunicación por red de satélites.	18
Figura 1. 7: Topología de redes ópticas pasivas (GPONs).	23
Figura 1. 8: Comparación del modelo OSI contra pila de protocolos GPON.	25
Figura 1. 9: Nomenclatura de las redes de acceso óptico.	26
Figura 1. 10: Transmisión descendente en el tramo GPON	28
Figura 1. 11: Transmisión ascendente en el tramo GPON	29
Figura 1. 12: Multiplexación en el servicio GEM	33
Figura 1. 13: Trama descendente para GPON	34
Figura 1. 14: Mapa de asignación de ancho de banda ascendente.	34
Figura 1. 15: Unidad de trama ascendente para 10-GPON.	35
Figura 1. 16: Arquitecturas de red: (a) CO-VDSL; (b) FTTC; (c) FTTH	38
Figura 2. 1: Ubicación geográfica de la parroquia rural “El Morro”	39
Figura 3. 1: Tipos de conexiones de Internet usadas por los hogares en "El Morro"	46
Figura 3. 2: Nivel de satisfacción de los usuarios con la conexión a Internet.	47
Figura 3. 3: Nivel de degradación en función de la distancia.	50

Figura 3. 4: Nivel de satisfacción de los usuarios con la conexión a Internet.	51
Figura 3. 5: Estabilidad de señal percibida por usuarios.	54
Figura 3. 6: Principales causas técnicas identificadas de limitación.	54
Figura 3. 7: Principales causas técnicas identificadas de limitación.	58
Figura 3. 8: Resultado obtenido de la velocidad de descarga vs. distancia del enlace. ..	62
Figura 3. 9: Resultado obtenido de la latencia promedio para cada tecnología.....	63
Figura 3. 10: Resultado obtenido de la velocidad de descarga vs. distancia del enlace. 64	
Figura 3. 11: Resultado obtenido de la BER vs. SNR.	65
Figura 3. 12: Resultado obtenido del Factor Q vs. SNR.....	65

RESUMEN

En el presente documento se presenta el desarrollo del tema de titulación denominado “Estudio de la viabilidad y los beneficios de implementar redes ópticas pasivas en la zona rural “El Morro” para mejorar la conectividad y el acceso a servicios de comunicación”. En la parte introductoria, se describe el planteamiento de la investigación, justificación, formulación del problema de investigación, objetivo general, objetivos específicos, y planteamiento de la idea a defender. En el capítulo 1 se desarrolla el marco teórico referencial. En el capítulo 2 se describe marco metodológico de investigación. En el capítulo 3 se presenta el análisis del estado actual de la infraestructura de comunicaciones en “El Morro”, así como la propuesta de Diseño de la Red Óptica Pasiva (PON), la discusión de los resultados obtenidos mediante simulación computacional, y un análisis técnico y económico del proyecto. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Palabras claves: Redes, Fibra Óptica, Conectividad

ABSTRACT

This document presents the development of the degree topic called “Study of the feasibility and benefits of implementing passive optical networks in the rural area ”El Morro“ to improve connectivity and access to communication services”. The introductory part describes the research approach, justification, formulation of the research problem, general objective, specific objectives, and the idea to be defended. Chapter 1 develops the theoretical framework. Chapter 2 describes the research methodological framework. Chapter 3 presents the analysis of the current state of the communications infrastructure in “El Morro”, as well as the Passive Optical Network (PON) design proposal, the discussion of the results obtained through computational simulation, and a technical and economic analysis of the project. Finally, conclusions and recommendations are presented.

Keywords: Networks, Fiber Optics, Connectivity

INTRODUCCIÓN

Las redes ópticas pasivas (PON) son una tecnología de acceso de banda ancha que utiliza fibra óptica y componentes pasivos para proporcionar servicios de comunicación de alta velocidad a los usuarios (Méndez C., 2022; Santiana C., 2022). En una PON, una única fibra óptica se divide en múltiples conexiones ópticas individuales que se extienden hasta los hogares y las empresas, lo que permite una conectividad de alta velocidad y una mayor capacidad de ancho de banda (Fischer et al., 2021).

La implementación de redes ópticas pasivas (PON) en comunidades rurales, como el caso de El Morro (Guayas, Ecuador), constituye una estrategia viable y sostenible para reducir la brecha digital, mejorar la calidad de vida de los habitantes y promover un desarrollo socioeconómico inclusivo, al garantizar conectividad de alta velocidad, confiabilidad en los servicios y acceso equitativo a educación, salud, productividad y comunicación.

En la actualidad, la conectividad se ha convertido en un factor determinante para el desarrollo y la inclusión social en todas las regiones del mundo (IICA, 2022). Sin embargo, las zonas rurales suelen enfrentar desafíos significativos en cuanto al acceso a servicios de comunicación eficientes y de calidad (IICA, 2020). La brecha digital entre áreas urbanas y rurales se ha vuelto una preocupación creciente, ya que limita el acceso a información, educación (Caiza et al., 2015), salud, oportunidades laborales y servicios básicos para los habitantes de estas comunidades (Primicias, 2020).

Las redes ópticas pasivas han surgido como una solución tecnológica innovadora y eficiente para mejorar la conectividad en zonas rurales (Precision, 2024). Por ejemplo, Méndez C., (2022) propuso el diseño de una GPON para transformar a la comuna Olón en una Smart City, también Cardozo T., (2023) propuso el diseño e implementación de una red GPON para la zona rural en la Vereda el salitre de la Calera Cundinamarca. Estas propuestas tecnológicas se enfocaron en la implementación de una red GPON, ya que este tipo de infraestructura ofrece velocidades superiores y garantiza la transmisión confiable de datos, facilita la detección y resolución inmediata de problemas de seguridad y de comunicación.

Los sistemas ópticos se basan en las transmisiones de datos por fibra óptica y proporcionan mayor capacidad y velocidad que los métodos tradicionales (Tejedor, 2010). El despliegue y mantenimiento a largo plazo resulta más rentable, sobre todo para las redes ópticas pasivas, razón por la cual resultan idóneas en zonas con recursos limitados (Chica P. et al., 2021). Además, la migración de las redes de fibra óptica resulta necesaria en las regiones en desarrollo para eliminar la brecha digital, sobre todo en América Latina, ya que los servicios móviles de banda ancha están creciendo rápidamente (Piña G., 2024).

Por otro lado, la infraestructura de acceso a redes ópticas pasivas en zonas rurales permite no solo mejorar la accesibilidad a internet de banda ancha y comunicaciones avanzadas (Paz D. & Camacho A., 2019), permitiendo a las comunidades rurales un mayor desarrollo económico, social y cultural. Asimismo, el acceso a la red óptica pasiva en zonas rurales mejora las condiciones de acceso a la educación en línea, telemedicina, agroindustria, entre otras áreas clave para el desarrollo rural.

En este sentido, resulta necesario estudiar cómo la implementación de redes ópticas pasivas en zonas rurales puede servir como una estrategia para cerrar la brecha digital, mejorar la calidad de vida de los habitantes, y promover un desarrollo sustentable e inclusivo. Esta propuesta de estudio pretende analizar el caso específico de “El Morro”, ubicada en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas, a unos 70 km al suroeste de la ciudad para entender cómo esta comunidad rural puede transformarse con el aumento en la conectividad y el acceso a servicios de telecomunicaciones.

A continuación, se describen las ventajas de las PONs en zonas rurales:

- Mejora de la conectividad: las PONs mejoran las comunicaciones y el acceso a Internet en las zonas rurales, al ofrecer una conexión más estable, velocidades más altas y un mayor ancho de banda. (Martínez D. & Gómez N., 2020)
- Acceso a servicios básicos: las PONs facilitan las conexiones de banda ancha en zonas rurales, donde el acceso a Internet es un requisito para el desarrollo de la economía local. (Chica P. et al., 2021)
- Promoción del desarrollo socioeconómico: las redes ópticas pasivas (PON) y las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) desempeñan un papel

crucial en el desarrollo rural, mejorando la conectividad y el acceso a servicios (Durán B. et al., 2022).

A continuación, se describen las limitaciones de las PONs en esta zona rural:

La investigación se enfoca en un estudio de caso específico (El Morro), por lo que los resultados no se generalizan automáticamente a todas las comunidades rurales, aunque sí ofrecen una base metodológica replicable.

El análisis económico se limita a estimaciones de costos y beneficios, sin incluir proyecciones de largo plazo sobre variaciones de mercado o políticas públicas.

La factibilidad técnica se aborda mediante simulaciones y modelos de red, no mediante una implementación física real.

El presente trabajo de investigación se divide en tres capítulos. En el Capítulo 1 se desarrolla el marco teórico, donde se analizan las redes ópticas pasivas (PON), su arquitectura, las condiciones tecnológicas en el ámbito de las telecomunicaciones, así como los problemas de conectividad, en particular, en las áreas rurales. El Capítulo 2 es el más aplicativo de la investigación y consiste en describir los métodos y herramientas utilizados en el diseño y análisis de las redes. El Capítulo 3 analiza las condiciones técnicas actuales en «El Morro», junto con simulaciones y evaluaciones de rendimiento de la infraestructura GPON propuesta. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de este estudio, donde se destaca tanto la factibilidad técnica como el impacto socio-económico esperado de la implementación de redes ópticas en la comunidad rural de El Morro.

Planteamiento de la investigación

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar la factibilidad técnica, económica y social de implementar redes ópticas pasivas (PON) en la parroquia rural “El Morro”, perteneciente al cantón Guayaquil, en la provincia del Guayas. El principal propósito es mejorar el acceso a internet en la zona rural, el mismo que presenta dificultades en la conexión a internet, es decir, que no se cuenta con una conexión estable y de calidad. La parroquia se encuentra al suroeste del cantón, alejada del centro urbano

y rodeada de manglares y otras zonas que no son fáciles de alcanzar. Esto ha dificultado bastante el desarrollo de redes de telecomunicaciones en el área.

Pensando en esto, se considera que las redes ópticas podrían ser una opción válida para mejorar el acceso en los hogares. Con una mejor conexión, más personas podrían tener internet rápido y confiable, lo cual es fundamental hoy en día. En lo técnico, hace falta revisar la infraestructura disponible y si es compatible con una red óptica. En lo económico, hay que considerar los costos de instalación y mantenimiento. También es clave pensar en el impacto social y cómo este tipo de tecnología podría beneficiar a la comunidad en su día a día

Justificación

Ante la creciente demanda de conectividad segura a Internet y servicios avanzados de comunicación, implementar redes ópticas pasivas (PON) en comunidades rurales como «El Morro» se hace cada vez más necesario. En la actualidad, las zonas rurales de Ecuador, incluido «El Morro», están expuestas a importantes retos de conectividad por una infraestructura de telecomunicaciones inadecuada y su aislamiento geográfico. Esto limita el acceso de los residentes a la educación, los servicios sanitarios, oportunidades de empleo remoto y la inclusión digital. En consecuencia, el propósito de este estudio es evaluar si es técnicamente factible y económicamente viable para esta comunidad rural la implementación de la tecnología de fibra óptica, GPON.

Además, al abordar esta problemática coincide con el objetivo nacional de reducir la brecha digital, impulsar la inclusión social y estimular el desarrollo económico de las comunidades. De este modo, las autoridades políticas, los proveedores de Internet y las entidades locales podrán adoptar medidas de inversión y renovación de infraestructuras con conocimiento de causa, lo que redundará significativamente en la calidad de vida de los ciudadanos.

Formulación del problema de investigación

La comunicación y el acceso a servicios de conectividad son pilares para el crecimiento socioeconómico en ámbitos rurales. No obstante, estas regiones suelen presentar problemas con la infraestructura de telecomunicaciones, lo que limita la calidad de los

servicios disponibles. Ante esta realidad, las redes ópticas pasivas (PON) han comenzado a aparecer como una posible alternativa para mejorar la conectividad a internet en zonas rurales.

Las investigaciones sobre el uso de la tecnología impulsan la creación de redes ópticas pasivas, las cuales han demostrado que las PON son una alternativa eficaz para solucionar problemas de comunicación y acceso a diferentes servicios en el área rural. La escasa población en las áreas rurales, sumada a la falta de infraestructura de telecomunicaciones a medida que se avanza en el desarrollo, así como las condiciones topográficas y geográficas, han resultado en el estancamiento del acceso a tecnología moderna. Las anteriores son características que revelan la gran brecha que hay entre zonas urbanas y rurales, así como la limitación de los servicios básicos, tales como, educación virtual, telemedicina y telecomercio.

Una solución coste-eficiente y rentable es el despliegue de redes ópticas pasivas en zonas rurales con la finalidad de potenciar los servicios de telecomunicaciones. Las PONs facilitan el acceso por Internet de alta velocidad y capacidad a los hogares y negocios de las zonas rurales, lo que permite a los habitantes mejorar su calidad de vida e impulsar el desarrollo socioeconómico.

Objetivo General:

Evaluar la factibilidad del despliegue de redes ópticas pasivas en la zona rural de «El Morro» ubicada en la provincia del Guayas, Ecuador, para mejorar los servicios de telecomunicaciones y conectividad en la región.

Objetivos Específicos:

1. Analizar el estado de la infraestructura de comunicaciones en la zona rural “El Morro” a través de visitas de campo y entrevistas, que permitan la identificación de las brechas y limitaciones de conectividad y disponibilidad de servicios de telecomunicaciones, con el propósito de fundamentar el diseño e implementación de una red óptica pasiva.
2. Realizar la simulación de la infraestructura de red óptica pasiva, utilizando la infraestructura existente y verificando su rendimiento a través de modelados y

pruebas de rendimiento, a fin de que el proyecto propuesto cumpla con los requisitos técnicos necesarios antes de su implementación real.

3. Evaluar la factibilidad técnico-económica del proyecto de implementación de redes ópticas pasivas en la zona rural “El Morro” mediante el estudio comparativo y el análisis financiero del proyecto, de modo que la implementación de redes ópticas pasivas en la zona rural «El Morro» sea factible desde el punto de vista técnico y económico, garantizando una mejor calidad de vida para la comunidad.
4. Analizar las ventajas que la implementación de las redes ópticas pasivas ofrece en términos de conectividad y acceso a los servicios de telecomunicaciones en la comunidad a través de estudios de casos y encuestas sobre la conectividad y la satisfacción de los usuarios, de tal forma que se determine de qué manera esta infraestructura contribuirá a mejorar significativamente la calidad de vida de los residentes.

Planteamiento de la idea a defender

¿Cómo podría beneficiar la implementación de redes ópticas pasivas en la zona rural “El Morro” a sus habitantes?

¿Cuáles son los principales desafíos técnicos y económicos que enfrentaría la implementación de redes ópticas pasivas en “El Morro”?

¿Qué impacto podría tener la mejora de la conectividad en “El Morro” en términos de desarrollo socioeconómico y acceso a servicios básicos?

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Revisión de Literatura

Durante años las zonas rurales en el mundo experimentaban limitaciones de conectividad debido a factores geográficos, socioeconómicos y de infraestructura. Sin embargo, investigaciones recientes demostraron que la brecha digital entre los habitantes de zonas urbanas y rurales es un factor determinante en el desarrollo económico y social. Con este fin, resulta indispensable contar con una infraestructura de redes de comunicaciones, por ejemplo, acceso de banda ancha, para que las zonas rurales y remotas accedan a servicios como la educación, sanidad y trabajo remoto (Białoń, 2008).

El despliegue de redes de acceso de banda ancha de alta capacidad en zonas rurales de Europa no se diferencia de las urbanas y suburbanas. Este estudio analiza los costos de implementar redes fijas que permitan a los ciudadanos acceder a velocidades de internet de 30 y 100 Mbps, metas establecidas en la Agenda Digital Europea para 2020 (Rendon Schneir & Xiong, 2016).

Las PONs son una solución para los problemas de conectividad por su seguridad, escalabilidad y rentabilidad a largo plazo. Una PON está compuesta normalmente por un terminal de línea óptica (OLT), varias unidades de red óptica (ONU) y una red de distribución óptica (ODN), y utiliza fibra óptica para la transmisión de datos sin elementos activos, lo que reduce significativamente los costes de mantenimiento. (Méndez C., 2022)

Por su parte, la PON de alta capacidad (Gigabit Passive Optical Network, GPON) es considerada una tecnología avanzada de redes ópticas, no sólo porque tiene una tasa de transmisión de datos muy alta, sino también porque ofrece múltiples servicios, tales como, internet de alta velocidad, voz y contenidos multimedia. Además, su velocidad de transmisión y recepción es de hasta 2.5 Gbps y 1.25 Gbps, respectivamente, lo que la hace ideal en zonas residenciales y comerciales, especialmente en zonas rurales que carecían de conectividad adecuada. (Sadin et al., 2022)

En la última década, los despliegues de GPON en zonas rurales han demostrado que tiene el potencial de resolver la falta de conectividad. Además, otras investigaciones en el

diseño e implementación de redes de fibra hasta el hogar (Fiber To The Home, FTTH) sobre la tecnología de acceso GPON, han demostrado un mejoramiento considerable en los servicios y la satisfacción de los usuarios, destacando ventajas de esta infraestructura con respecto al crecimiento de las zonas rurales. (M.Al-Quzwini, 2014)

1.2. Desarrollo teórico y conceptual

Esta sección corresponde al desarrollo teórico y conceptual de la investigación, donde se presentan los fundamentos técnicos y contextuales que sustentan el presente trabajo. En las secciones siguientes, se abordan las telecomunicaciones en zonas rurales y remotas, los modelos de configuración de la red, las tecnologías de acceso y la arquitectura de redes ópticas pasivas (GPON), entre otros para comprender la problemática de conectividad en áreas rurales y las soluciones tecnológicas propuestas.

1.2.1. Telecomunicaciones para zonas rurales y remotas

La red suele estar configurada en dos partes: backhaul y partes de acceso (Chu et al., 2024). A veces se divide en tres partes: núcleo, backhaul y acceso, donde el backhaul encamina el tráfico desde los emplazamientos de las celdas (o puntos de presencia) hacia la red central (Aggarwal et al., 2024). La Figura 1.1 muestra un esquema representativo de la arquitectura de auto-backhaul, en la que se observa la interconexión entre la red central, el backhaul y las redes de acceso.

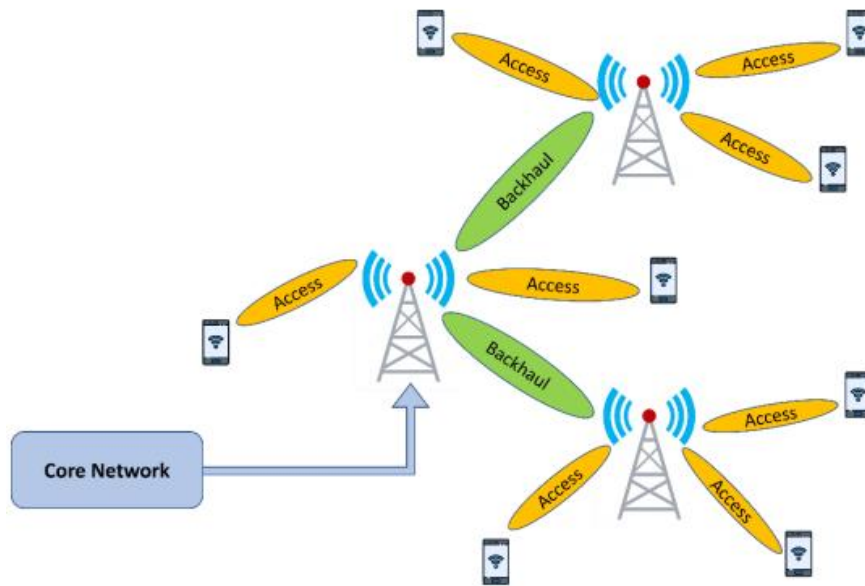


Figura 1. 1: Arquitectura de auto-backhaul.

Fuente: (Tariq, 2024)

Debido a la complejidad de la configuración de los sistemas de comunicaciones electrónicas modernas, y con la finalidad de simplificar los argumentos, en este estudio se emplea el término backhaul para referirse a la sección que conecta la red de acceso con la red central o núcleo. (Maljević et al., 2025)

Backhaul tiene mayor velocidad para transferir gran cantidad de información enviada desde varios equipos terminales. Tanto las partes de backhaul como las de acceso pueden realizarse mediante soluciones cableadas o inalámbricas (Zakrzewski et al., 2024). En los siguientes apartados se incluye una visión general de las soluciones por cable de fibra, inalámbricas terrestres y por satélite.

Tanto las tecnologías inalámbricas como las cableadas se utilizan en las partes de backhaul y de acceso (Wen et al., 2024). Estas dos tecnologías han sido competitivas y a veces complementarias entre sí durante mucho tiempo (Makondo et al., 2024). Tras la invención del cable óptico, su uso para backhaul se ha convertido en el patrón de diseño estándar de las redes nacionales. Por otro lado, la dispersión de la red de acceso hace que la tecnología inalámbrica sea tan eficaz como la cableada (Tariq, 2024). Es el caso concreto de las zonas rurales y remotas, donde tirar del cable es una tarea difícil.

1.2.2. Modelos de configuración de la red

En la Tabla 1.1 se muestran las tecnologías utilizadas para la parte de acceso y la parte de backhaul de la red. La clasificación y la correspondiente descripción técnica que figuran a continuación corresponden a los métodos de transmisión adecuados para la conexión de banda ancha. Se mencionan algunas tecnologías históricas a efectos comparativos, aunque muchas de ellas siguen utilizándose.

Tabla 1. 1: Tecnologías utilizadas para las conexiones de banda ancha

Tecnología	Movilidad del Terminal	Acceso	Backhaul	Velocidad Promedio	Latencia Aproximada
Alámbrico					
Cable óptico	--	Fibra hasta el hogar (FTTH)	Anillos ópticos	1 a 10 Gbps	1 – 10 ms
Cable de cobre	--	Par de cables hasta el hogar (DSL/VDSL)	Cables coaxiales	10 a 300 Mbps	10 – 50 ms
Inalámbrico					
Terrestre	Móvil	Red móvil (4G/5G)	--	4G: 50 a 1 Gbps 5G: 1 a 10 Gbps	4G: 30 – 50 ms 5G: 1 – 10 ms
	Fijo	Enlace fijo inalámbrico	Enlace de microondas	50 Mbps a 1 Gbps	10 – 30 ms
Vía satélite	Móvil	Red móvil satelital	--	10 a 150 Mbps	500 – 900 ms
	Fijo	Enlace satelital	Enlace satelital	10 a 300 Mbps	500 – 800 ms

Fuente: (Cepeda Cabeza, 2018; Koo L. & Laurente G., 2024; Luzón C., 2023)

1.2.3. Tecnologías de acceso

1.2.3.1. Fibra hasta las instalaciones.

La fibra óptica es capaz de proporcionar un gran ancho de banda (BW), que transporta la señal integrada de voz, datos y vídeo en la red de acceso. La distancia es superior a 20 km sin repetidores. Una red alámbrica de fibra óptica puede tener varias configuraciones,

dependiendo del punto de terminación de la fibra: (Abdellaoui et al., 2021; Sugumaran et al., 2019)

1. Fibra hasta el hogar (FTTH),
2. Fibra hasta el edificio (FTTB),
3. Fibra hasta la acera (FTTC) y
4. Fibra hasta el nodo (FTTN).

En cada caso, la red óptica termina en una unidad de red óptica (ONU). Las versiones de FTTx se diferencian por la ubicación de la ONU. En el caso de FTTH, la ONU se encuentra en las instalaciones del abonado y sirve de demarcación entre las instalaciones del operador y las del cliente. Para FTTB y FTTC, la ONU sirve de interfaz común para varios abonados (por ejemplo, el sótano de un edificio de apartamentos o un poste telefónico), y el servicio se suministra a través de los cables de bajada TWP (par trenzado) existentes de los clientes. (Skoufis et al., 2023)

xDSL sobre TWP se utiliza a menudo para proporcionar servicio desde la ONU en configuraciones FTTB y FTTC. En el caso de la FTTN, la ONU se encuentra en un nodo activo de la red que da servicio a decenas o cientos de abonados desde el que se suministra el servicio a través de los bucles locales TWP existentes. Existen dos arquitecturas comunes para FTTx: (Usman et al., 2020)

1. punto a punto (PtP),
2. red óptica pasiva (PON).

En una configuración PtP, una fibra óptica dedicada (una o dos fibras) conecta la ONU directamente con la central telefónica. En una red PON, varias ONUs (normalmente hasta 32) comparten una única conexión de fibra a la red (Sugumaran et al., 2019). La señal se divide para cada ONU en un nodo pasivo de la red (Bakarman et al., 2021). La Tabla 1.2 enumera las recomendaciones de la UIT para las configuraciones FTTx.

Tabla 1. 2: Recomendaciones de la UIT para las configuraciones FTTx

Norma ITU-T	Descripción del sistema de acceso óptico	Velocidad permitida
ITU-T G.983.x	Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas (PON)	Variable según implementación

ITU-T G.984.x	Redes ópticas pasivas con capacidad de gigabit (GPON)	Hasta 2.5 Gbps (downstream) y 1.25 Gbps (upstream)
ITU-T G.985	Sistema de acceso óptico punto a punto basado en Ethernet	100 Mbps
ITU-T G.986	Sistema de acceso óptico punto a punto basado en Ethernet	1 Gbps
ITU-T G.987.x	Sistemas de redes ópticas pasivas con capacidad de 10-Gigabit (XG-PON)	Hasta 10 Gbit/s (downstream) y 2.5 Gbit/s (upstream)
ITU-T G.988	Especificación de la interfaz de gestión y control de la ONU (OMCI)	No aplica (define protocolos de gestión)

Fuente: (ITU-T, 2005, 2008; Iyer et al., 2018)

1.2.3.2. Cable de par trenzado a las instalaciones (xDSL)

La Red Digital de Servicios Integrados (RDSI) fue el primer intento de crear una red de telefonía/telecomunicaciones completamente digitales (a diferencia del uso de módems sobre circuitos analógicos conmutados). La RDSI proporciona uno o dos canales de servicio digital de 64 kbps y un canal de señal digital de 16 kbps a cada abonado. (Bingham, 2000)

Fue diseñada para transportar voz, datos, imágenes y vídeo en formato digital, con una interfaz de red y dispositivos estándar a través de la RTPC heredada, utilizando cable de bucle local TWP, y no se estableció como una tecnología popular de acceso de banda ancha. Sin embargo, la velocidad de 128kbps, es decir, dos veces 64kbps fue reconocida como la velocidad de las conexiones digitales de «banda ancha» cuando fue introducida. (Maeda & Feigel, 2001)

La RDSI no se adoptó de forma generalizada como servicio digital y fue sustituida por la Línea de Abonado Digital (DSL - originalmente «Bucle de Abonado Digital») como tecnología alámbrica de banda ancha. DSL transporta señales digitales por la RTPC utilizando frecuencias más altas que las empleadas para el tráfico de voz. Así, el cliente puede utilizar el teléfono y el ordenador al mismo tiempo, de modo que la conexión a Internet del ordenador está «siempre encendida». Existen varias versiones de la tecnología DSL (xDSL): DSL asimétrica (ADSL), con mayor velocidad de subida que de bajada, DSL simétrica (SDSL), con las mismas velocidades de subida y bajada, DSL

simétrica de alta velocidad (SHDSL) y DSL de muy alta velocidad (VDSL) (Bacis V. et al., 2015). La figura 1.2 muestra la arquitectura de red de la tecnología xDSL.

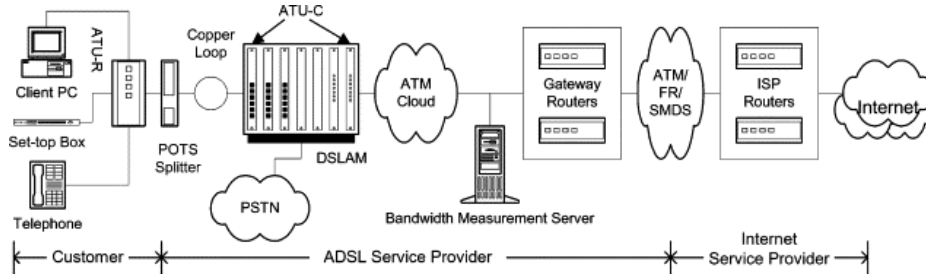


Figura 1. 2: Arquitectura de una red de servicios xDSL.

Fuente: (Nguyen, 2018)

Las diferencias de rendimiento se consiguen cambiando los niveles de potencia y las características del espectro, las técnicas de modulación, la unión de canales y la gestión del ruido. También existen versiones avanzadas de ADSL y VDSL, como ADSL2, VDSL2 y ADSL2+ (Gorshe et al., 2014; Moeyaert & Maier, 2011).

DSL es fácil de desplegar porque utiliza la planta física de la RTPC heredada. Sin embargo, las características físicas del bucle local definen una cierta limitación en la calidad de la transmisión. La velocidad de transmisión se reduce a medida que aumenta la distancia entre el módem DSL del operador de red (DSLAM, DSL Access Multiplexer) y el módem DSL del abonado.

1.2.3.3. Televisión por Cable (CATV)

En algunos países, CATV es habitual para satisfacer la demanda de servicios de vídeo. Dado que CATV emplea cables coaxiales con capacidad para enviar señales de vídeo, y que CATV se adapta a los servicios de banda ancha para competir con operadores de telecomunicaciones existentes. La Especificación de Interfaz de Servicio de Datos por Cable (DOCSIS) se publicó en 1997. Define la adición de comunicaciones de datos de alta velocidad a un sistema de CATV. (Hisyam Ng & Mahmoodi, 2024)

Con DOCSIS, los operadores de CATV ofrecían comunicaciones de datos en su red de vídeo (Hisyam Ng & Mahmoodi, 2024) y, con el desarrollo del protocolo de voz por Internet (VoIP), ofrecían servicios similar al POTS (Eze, 2025). La última versión, DOCSIS 3.0, enlaza hasta 8 canales de la red al terminal, para suministrar hasta 343 Mbps al nodo óptico. Con esta tecnología, los operadores ofrecen a los abonados velocidades

de acceso de hasta 100 Mbps. Las normas del UIT-T que describen esta aplicación figuran en la serie J de Recomendaciones del UIT-T.

La Figura 1.3 muestra una estructura simplificada de una red de cable. Hay dos componentes principales en la red: un cable módem (CM), situado en las instalaciones del cliente, y un sistema de terminación de cable módem (CMTS), situado en la cabecera de la compañía de cable. El CMTS es responsable de gestionar un gran número de cable módems que residen en los hogares de los abonados (Nguyen, 2018)

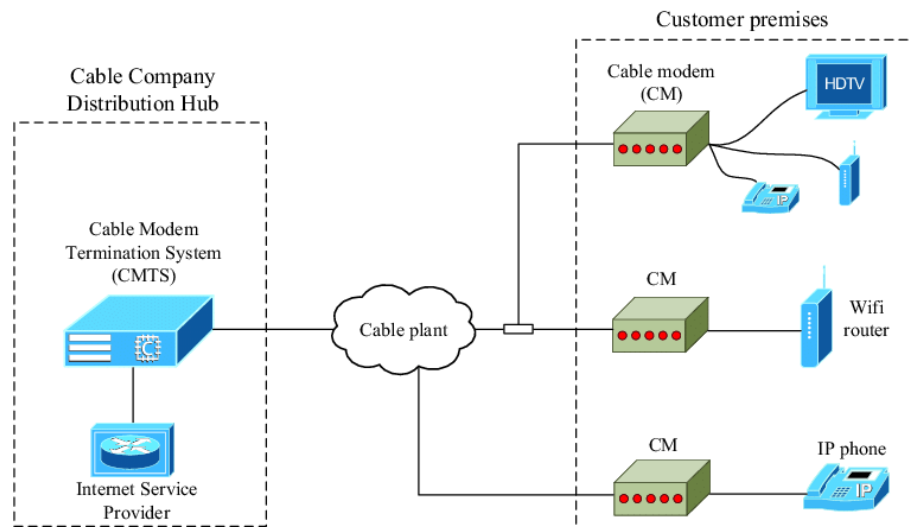


Figura 1. 3: Arquitectura de la red de cable de banda ancha DOCSIS.

Fuente: (Nguyen, 2018)

El CMTS dispone de interfaces Ethernet y de radiofrecuencia (RF), de modo que el tráfico de Internet puede enrutarse desde la interfaz Ethernet, a través del CMTS y, a continuación, a los puertos de RF que están conectados a las redes de cable coaxial, llegando finalmente al cable módem en el hogar del abonado. Un sistema CMTS puede desplegarse con las distintas opciones que se muestran en la Figura 1.4. Los escenarios CMTS son:

1. CMTS integrado tradicional,
2. Sistema DAA con un núcleo CMTS (o arquitectura MAC flexible [FMA]) y un dispositivo PHY remoto (RPD), y
3. Dispositivo MACPHY remoto DAA (RMD).

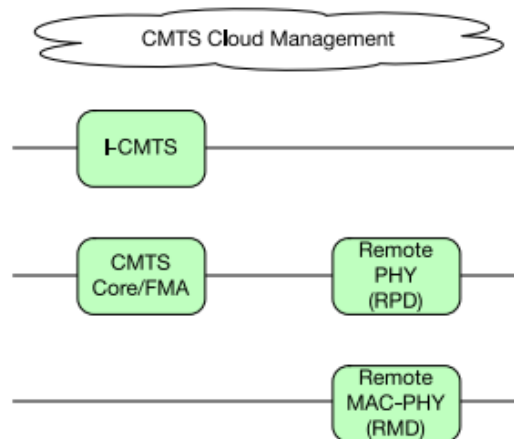


Figura 1. 4: Arquitectura CMTS.
Fuente: (Andreoli-Fang et al., 2019)

1.2.3.4. WiFi

Las redes de área local por radio (Radio Local Area Network, RLAN) conocidas como “RLAN de banda ancha”, comúnmente denominadas WiFi, como las basadas en la norma IEEE 802.11 (Cruz O. et al., 2023), permiten acceder a Internet a alta velocidad y a corta distancia. Las RLAN, unidas a una arquitectura de red en malla, proporcionan una cobertura ampliada de los hot spots. Este WiFi enmallado es una forma cómoda de proporcionar una red de acceso local sin licencias.

La Recomendación UIT-R M.1450 contiene las «Características de las redes radioeléctricas de área local de banda ancha» e incluye parámetros técnicos e información sobre normas RLAN y características operativas (Chela T., 2023). La recomendación contiene cada norma RLAN de banda ancha y la información de los anexos puede utilizarse para obtener información general sobre las RLAN, incluidas sus características. También se proporciona información sobre cómo obtener los estándares completos descritos en la Recomendación:

- IEEE Std 802.11-2012 Cláusula 17, comúnmente conocida como 802.11b.
- IEEE Std 802.11-2012 Cláusula 18, comúnmente conocida como 802.11a
- IEEE Std 802.11-2012 Cláusula 19, comúnmente conocida como 802.11i
- IEEE Std 802.11-2012 Cláusula 20, comúnmente conocida como 802.11n
- IEEE 802.11ac

- IEEE Std 802.11ad-2012

Por ejemplo, WLAN es una red que conecta muchos ordenadores mediante emisiones de radiofrecuencia (RF), a diferencia de una LAN por cable, que utiliza cableado para conectar ordenadores dentro de un área determinada, como una sala, un edificio o un solar, con el fin de establecer una red. Las LAN inalámbricas o WLAN suelen funcionar a una velocidad de transferencia de datos que oscila entre 11 y 54 Mbps. Las WLANs suelen utilizarse junto con dispositivos móviles con capacidad inalámbrica, como ordenadores portátiles, PDA, Tablet PC, teléfonos móviles y cámaras digitales. (Nourildean et al., 2025)

La configuración de redes inalámbricas puede clasificarse en dos modos principales: modo ad-hoc y modo infraestructura. Las redes ad-hoc son redes inalámbricas básicas establecidas por dos o más ordenadores con capacidades inalámbricas que se comunican directamente entre sí. El modo infraestructura requiere la presencia de uno o varios puntos de acceso (AP) para facilitar la comunicación entre las tarjetas de red. En una LAN inalámbrica convencional, un dispositivo transceptor, conocido como punto de acceso, suele estar físicamente conectado a la red por cable mediante un cableado Ethernet estándar. Sirve de intermediario entre la red cableada y el ordenador u ordenadores remotos.

Aunque el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) está trabajando en el establecimiento de estándares para futuros protocolos de alta velocidad como 802.11ac, 802.11bc, 802.11ad, 802.11ax (Boujnoui et al., 2024) y otros WLAN. El estándar IEEE 802.11 es un estándar ampliamente utilizado para WLAN, comúnmente denominado Wi-Fi en entornos comerciales. Tiene su origen en el procedimiento de prueba y certificación administrado por la Wi-Fi Alliance. El avance de la tecnología Wi-Fi condujo al uso inicial de tecnologías de espectro ensanchado, comunicaciones ópticas de alta velocidad, OFDM, MIMO y transmisión de pulsos mmWave en entornos comerciales. Posteriormente, estas tecnologías fueron adoptadas por los sectores de la telefonía móvil y las redes de sensores inalámbricos.

Además, los estándares IEEE 802 definen las especificaciones MAC y PHY de las redes locales como normas para que los proveedores puedan interoperar. La Figura 1.5 muestra

la evolución de las capas PHY y MAC de las normas IEEE 802.11 desde el principio hasta la actualidad.

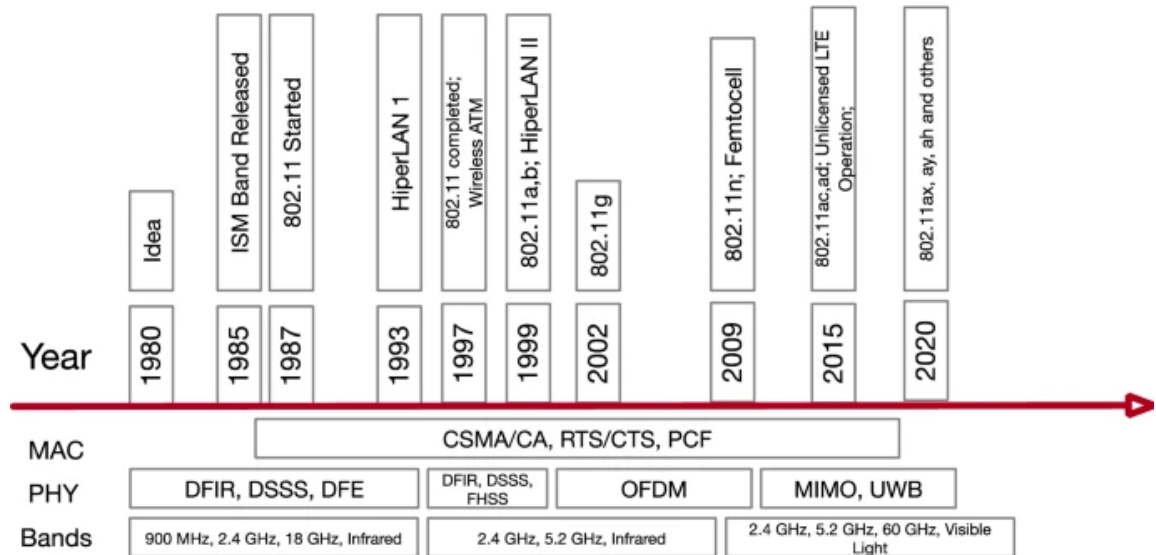


Figura 1. 5: Evolución de las tecnologías y estándares Wi-Fi.

Fuente: (Pahlavan & Krishnamurthy, 2021)

El primer paso de la evolución del estándar, tras la finalización del estándar 802.11 heredado en 1997, fue el estándar IEEE 802.11b, que utilizaba una compleja codificación ortogonal M-Ary conocida como Codificación Complementaria (Complementary Code, Keying, CCK). El estándar IEEE 802.11b se completó en 1999. Los dispositivos que utilizaban este estándar funcionaban a velocidades de hasta 11 Mbps con una caída a 1-2 Mbps utilizando el estándar 802.11 heredado.

Tanto los dispositivos bajo los estándares IEEE 802.11b y IEEE 802.11 heredados operaban en la banda de 2.4 GHz. Para el año 1999, la IEEE también completó las especificaciones del estándar IEEE 802.11a que operaba a una mayor frecuencia de 5.2 GHz, pero para alcanzar una tasa de datos de 54 Mbps utilizando la tecnología de transmisión OFDM. En el mismo estándar de IEEE 802.11a la capa PHY fue coordinada con los esfuerzos del estándar HIPERLAN-2 en Europa. En comparación con Wi-Fi, se esperaba que la MAC centralizada de HIPERLAN-2 permitiera una mejor gestión de la calidad de servicio, todo esto para ser utilizado en la industria de la telefonía celular.

Las tecnologías inalámbricas ATM, HIPERLAN, Femto-cell, LTE-U y Wi-MAX crearon un importante revuelo en los foros de publicación científica y entre las agencias

nacionales de financiación, pero no consiguieron mantener a los inversores en el desarrollo de estas tecnologías tan contentos como a los que invirtieron en Wi-Fi. Más tarde, en 2003, el grupo de trabajo IEEE 802.11g definió el funcionamiento OFDM en 2.4 GHz con las mismas velocidades de datos que IEEE 802.11a, lo que amplió el horizonte del mercado Wi-Fi.

El siguiente paso de gigante en la evolución de la tecnología para la comunidad IEEE 802.11 fue la introducción de IEEE 802.11n en 2009, que utilizaba tecnología MIMO para permitir múltiples flujos de datos y alcanzar velocidades de transmisión de datos brutos de hasta 600 Mbps tanto en la banda de 2,4 como en la de 5,2 GHz. Otros estándares, como IEEE 802.11ac y 802.11ax, siguieron la misma tecnología OFDM/MIMO (Peng et al., 2024).

1.2.3.5. Acceso móvil por satélite

El sistema de comunicación por satélite se compone principalmente de los segmentos espacial, terrestre y de usuario, tal como se muestra en la Figura 1.6.

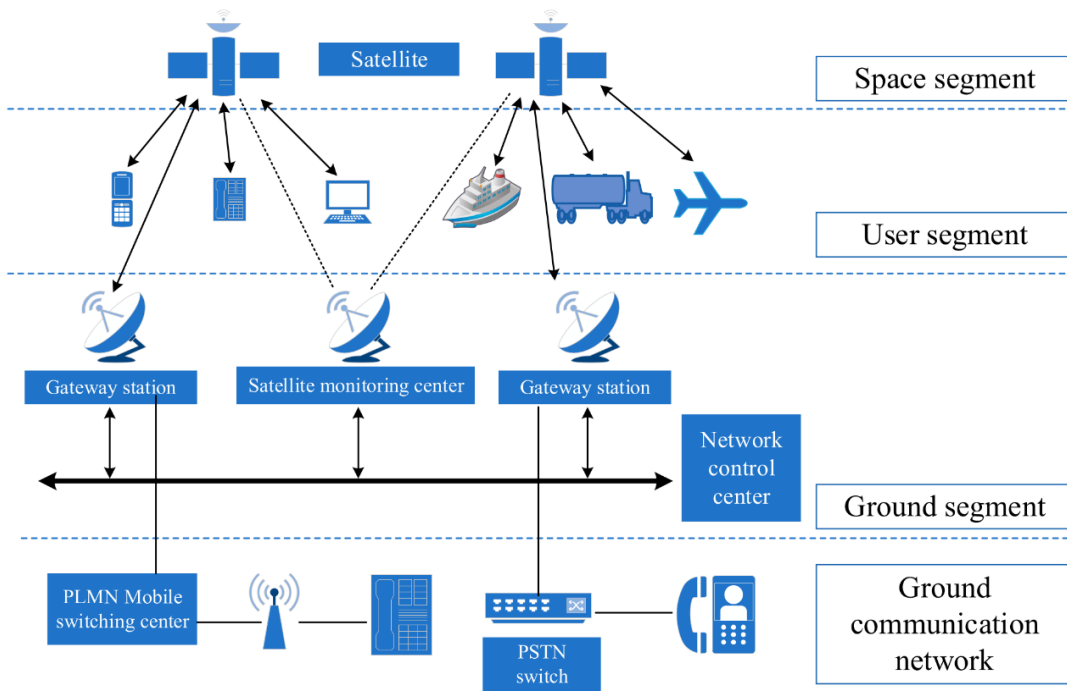


Figura 1. 6: Sistema de comunicación por red de satélites.

Fuente: (Wang et al., 2023)

En el caso del segmento espacial, con los satélites de comunicación como cuerpo principal, se utiliza para recibir y reenviar señales de las estaciones terrestres de comunicación por satélite, para lograr la comunicación entre las estaciones terrestres o entre las estaciones terrestres y las naves espaciales. Para el segmento terrestre, incluye el transpondedor del satélite, la estación pasarela, el Centro de Control de Satélites (SCC) y la estación de Seguimiento, Telemetría y Mando (TT&C), para realizar la comunicación entre usuarios. Finalmente, el segmento de usuario: compuesto principalmente por diversos dispositivos terminales de usuario, como estaciones de terminales de antena muy pequeñas (Very Small Antenna Terminal, VSAT), terminales de mano y terminales móviles montados en coches, barcos y aviones, así como diversas aplicaciones y servicios basados en la comunicación por satélite.

Las bandas de frecuencia utilizadas en las comunicaciones por satélite definen el tamaño de la antena parabólica necesaria y sus capacidades:

- Banda L (1.5/1.6 GHz), es utilizada por los sistemas de órbita terrestre no geoestacionaria (N GEO) y órbita terrestre geoestacionaria (GEO). En los sistemas GEO se utilizan grandes antenas (por ejemplo, de 10 a 20 m de diámetro) en la plataforma del satélite para proporcionar un gran número de pequeños haces puntuales sobre la superficie terrestre. Debido al escaso espectro disponible en esta gama, las velocidades de transmisión de datos son limitadas (actualmente, en torno a 500 kbps). En la banda L, las frecuencias no se vieron afectadas por las interferencias debidas a la propagación. (Mahboob & Liu, 2024)
- Banda C (4/6 GHz), muy utilizada en enlaces satelitales a través de antenas parabólicas cuyo diámetro es más grande que las empleadas en las bandas Ku y Ka. Por ejemplo, en la banda C los enlaces son afectados significativamente a causa del desvanecimiento por lluvia y otras condiciones meteorológicas frente a frecuencias más altas debido a las características de propagación que son muy favorables en este espectro. (Wang et al., 2023)
- Banda Ku (11-12/14 GHz) tiene una longitud de onda más corta que la banda C, lo que permite antenas parabólicas más pequeñas. Sin embargo, las frecuencias más altas hacen que la banda Ku sea más susceptible a las condiciones atmosféricas, como el desvanecimiento por lluvia. Sus aplicaciones incluyen

VSAT, telefonía rural y banda ancha, recogida de noticias por satélite, enlaces de retorno, videoconferencia y multimedia.

- Banda Ka (20/30 GHz) tiene longitudes de onda aún más cortas que la banda Ku, lo que permite reducir aún más el tamaño de las antenas parabólicas; sin embargo, las transmisiones son aún más susceptibles a las malas condiciones meteorológicas. Es posible ofrecer servicios interactivos de gran ancho de banda, como Internet de alta velocidad, videoconferencias y aplicaciones multimedia.

En la Tabla 1.3 se ha cotejado las posibles bandas de frecuencias, así como los servicios por satélite disponibles en ellas. Debido al funcionamiento de las ondas milimétricas en los próximos sistemas de quinta generación (5G) y posteriores, el uso compartido del espectro en bandas superiores a 20 GHz se está convirtiendo en un tema candente.

Tabla 1. 3: Bandas de frecuencia para posibles escenarios de comunicaciones por satélite y referencias relacionadas.

Satellite band	Frequency range	Uplink (UL)/Downlink (DL)	Orbit	Satellite services
L band [4]	1525.0–1559.0 MHz 1626.5–1660.5 MHz	DL UL	GSO NGSO	Mobile satellite services (MSS)
S band [5], [7]	1980-2010 MHz 2170-2200 MHz 2500-2520 MHz 2520-2670 MHz 2670-2690 MHz	DL UL DL DL UL	GSO GSO NGSO GSO NGSO	Broadcasting satellite services (BSS) BSS Fixed satellite services (FSS), MSS BSS FSS, MSS
C band [8], [11]	3400-3800 MHz	DL	GSO	FSS
Ku band [12]	10.7-12.75 GHz 12.75-13.25 GHz 13.75-14.5GHz	UL DL DL	GSO GSO GSO	FSS, BSS FSS FSS
Ka band [5], [6], [10], [14], [15]	17.3-17.7 GHz 17.7-19.7 GHz 27.5-29.5 GHz	DL DL UL	GSO GSO, NGSO GSO	BSS FSS, BSS (up to 18.4 GHz) FSS
Q/V band [17]	37.0-38.6 GHz 39.5-40 GHz	DL DL	GSO and NGSO	FSS FSS
W band	71-76 GHz 81-86 GHz	DL UL	GSO and NGSO	FSS FSS

Fuente: (Hoyhtya et al., 2017)

Dada su exclusiva capacidad de cobertura regional y mundial, los satélites pueden ofrecer conectividad inmediata a Internet y banda ancha incluso en zonas remotas utilizando los recursos satelitales existentes. Un sistema de comunicación por satélite en órbita terrestre geostacionaria (Geostationary Earth Orbits, GEO) puede prestar servicios de banda ancha a terminales de usuario fijos o móviles (Ryan, 2002). Con el uso de grandes antenas

de satélite, se pueden prestar servicios de banda ancha a pequeños terminales de usuario aprovechando la gran ganancia de las antenas de satélite. Un sistema de satélites GEO con antenas multihaz tiene mayor capacidad que un sistema con un único haz global sobre la misma zona de servicio. (Yastrebova, 2019)

Los sistemas de satélites que utilizan órbitas terrestres no geoestacionarias (Non-GEO, N GEO) suelen tener una altitud orbital inferior a la de los satélites GEO, que operan a unos 36.000 km de altitud. Un tipo de sistema de satélites N GEO utiliza una órbita terrestre media (Medium-Earth Orbit, MEO), que sigue órbitas circulares alrededor del Ecuador. Otros sistemas de satélites N GEO operan en órbitas terrestres bajas (Low-Earth Orbit, LEO), a veces en órbitas circulares pero inclinadas que proporcionan mejor cobertura a latitudes más altas, como los países escandinavos. (Hoyhtya et al., 2017)

Mientras que otros sistemas MEO emplean órbitas muy elípticas que están más cerca de la Tierra en un punto de su órbita y más lejos en el punto opuesto. Los sistemas de satélites MEO tienen varias ventajas sobre los GEO: coste asequible, alto rendimiento, menor retardo. Los países en desarrollo están experimentando un enorme crecimiento en el despliegue de VSAT.

1.2.4. Visión general de las redes óptica pasivas.

La tecnología de redes ópticas pasivas (Passive Optical Networks, PON) ha sido fundamental en la evolución de las telecomunicaciones, puesto que ofrece soluciones escalables y eficientes para la transmisión de datos a altas velocidades (Skubic & Wosinska, 2020). Durante los últimos años han evolucionado diversas versiones de PON, todas ellas con mejoras significativas en términos de capacidad y eficiencia. (Uzunidis et al., 2022)

En la actualidad, la industria de las telecomunicaciones evoluciona sin cesar. La red óptica pasiva de banda ancha (Broadband PON, BPON) y la red óptica pasiva Ethernet (Ethernet PON, EPON) han sido implementadas a gran escala en muchas redes de todo el mundo. e.g., para la transmisión de datos en BPON, utilizaban tecnologías como el modo de transferencia asíncrono (Asynchronous Transfer Mode, ATM), con lo que se conseguía

un mejor aprovechamiento al máximo del ancho de banda existente. (Kani & Van Veen, 2020)

No obstante, a mayor demanda de servicios de banda ancha, más evidentes eran las limitaciones de BPON en términos de velocidad y capacidad, lo que propició el desarrollo de tecnologías más avanzadas como EPON y GPON (G.983.1, 2003). EPON fue un avance significativo gracias a la transmisión de datos mediante el protocolo Ethernet, lo que facilitaba la integración con otras redes basadas en Ethernet (Ma & Jia, 2017). La adopción de EPON, una tecnología que permitía velocidades de transmisión superiores a las de BPON, fue muy significativa en Asia, donde se extendió a grandes zonas urbanas para atender la creciente demanda de servicios de Internet de alta velocidad. (Lam & Yin, 2020)

Por su parte, el estándar de las redes ópticas pasivas Gigabit (Gigabit PON, GPON) ha sido desarrollada con un formato de trama capaz de transmitir eficientemente paquetes de longitud variable a velocidades de gigabit por segundo (Gbps=Gbits/s). Dado que se trata de un estándar versátil, GPON tiene mayor velocidad de transmisión que BPON y EPON. (Abdellaoui et al., 2021)

De hecho, el sistema GPON EDA1500 de Ericsson tiene una capacidad total de transmisión de 2.5 Gbps en sentido descendente y 1.25 Gbps en sentido ascendente por cada puerto (Shirvani M., 2024). En el ámbito de la investigación tecnológica, las próximas generaciones de soluciones de acceso a redes ópticas son el centro del proyecto de la tecnología FTTx. En este sentido, los sistemas 10G-GPON, 40G-GPON y 100G-GPON están integrados en este proyecto de evolución de las comunicaciones ópticas, según el cual, por ejemplo, 10G-GPON puede incrementar la velocidad de descarga a 10 Gbps y la de subida a 2.5 Gbps. (Abdellaoui et al., 2021)

1.2.5. Arquitectura del sistema GPON

Esta sección describe en detalle las características de la especificación GPON 984.3. El sistema GPON está constituido por una terminal de línea óptica (Optical Line Terminal, OLT) y múltiples unidades de red óptica (Optical Network Unit, ONUs) o terminal de red óptica (Optical Network Terminals, ONTs) interconectadas con la red de distribución

óptica (Optical Distribution Network, ODN) (Holik et al., 2019). En consecuencia, entre la OLT y las ONU/ONTs existe una relación de uno a muchos, tal como se muestra en la Figura 1.7. (Holik et al., 2019)

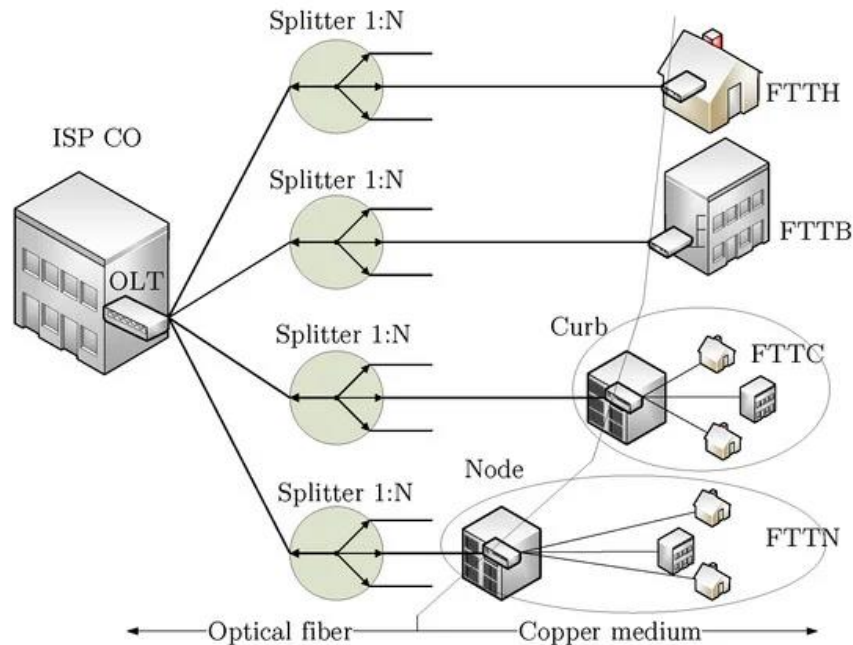


Figura 1. 7: Topología de redes ópticas pasivas (GPONs).
Fuente: (Holik et al., 2019)

1.2.5.1. Terminal de línea óptica (OLT)

La OLT es necesaria para conectar la red de servicio y la sección de la red PON (Sadin et al., 2022). Para la parte de la red de servicio utiliza interfaces normalizadas y para la parte de la red óptica utiliza interfaces de acceso óptico. Las principales funciones de OLT son:

- ✚ Traducción de formato de mensaje desde la interfaz de red de servicio a la interfaz de trama interna de convergencia de transmisión GPON (G-PON Transmission Convergence, GTC);
- ✚ Gestión de la ONU, incluido el registro de la ONU, el ajuste del nivel de potencia y la modificación de otros parámetros;
- ✚ Control de acceso al medio, incluido el cálculo del retardo del tiempo de transmisión, la asignación del ancho de banda, etc.;
- ✚ Control de trama descendente y ascendente.

1.2.5.2. Unidad de red óptica (ONU) y terminal de red óptica (ONT)

La ONU se sitúa en el barrio del abonado para terminar la transmisión por fibra óptica y convertir las señales en eléctricas a través de una línea metálica hasta los abonados. Las señales se adaptarán al tráfico del usuario a través del Terminal de Red (Network Terminal, NT). Las principales funciones de la ONU son:

- ✚ Traducción de formato de mensaje desde la interfaz de red de usuario a la interfaz de trama interna GPON (trama GTC);
- ✚ Control de trama descendente y ascendente en la sección GPON.

Una ONT combina las funciones de la ONU y del NT en una sola unidad. En este caso, no hay conexión externa entre las funciones de la ONU y del NT. Es el tipo de terminal más común para viviendas unifamiliares y pequeñas empresas.

1.2.5.3. Red de distribución óptica (ODN)

La ODN tiene la función de interconectar una OLT con varias ONU/ONT a través de un dispositivo óptico pasivo. En la ODN se encuentran uno o más divisores ópticos para distribuir o agregar las señales ópticas.

1.2.5.4. Redes de servicios y de usuarios

Existen varios tipos de redes de servicio: Red IP, red ATM, red Frame Relay, entre otras, destinadas a prestar distintos servicios o con diversos medios de transmisión. Las redes tienen diferentes interfaces, por lo que una OLT las mapea a tramas GTC para que puedan ser transferidas a través de la sección GPON a las ONUs. Desde el punto de vista de los servicios y de las redes de usuario, el sistema GPON es transparente puesto que no se ha modificado nada en los datos de tráfico de usuario en la sección GPON. En la transmisión de datos en la sección GPON, el tráfico se encapsulará en la trama GTC. Sin embargo, la cabecera relacionada con GTC se eliminará en cuanto los datos de tráfico abandonen la sección GPON para realizar un transporte transparente.

1.2.6. Pila de protocolos de GPON.

A diferencia del modelo OSI, el conjunto de protocolos GPON también se define en 7 capas. En el modelo OSI, la pila de protocolos GPON tiene una capa dependiente del medio físico (Physical Media Dependent, PMD) y una capa GTC que tienen funciones similares a las capas correspondientes del modelo OSI. La comparación de la pila puede verse en la Figura 1.8.

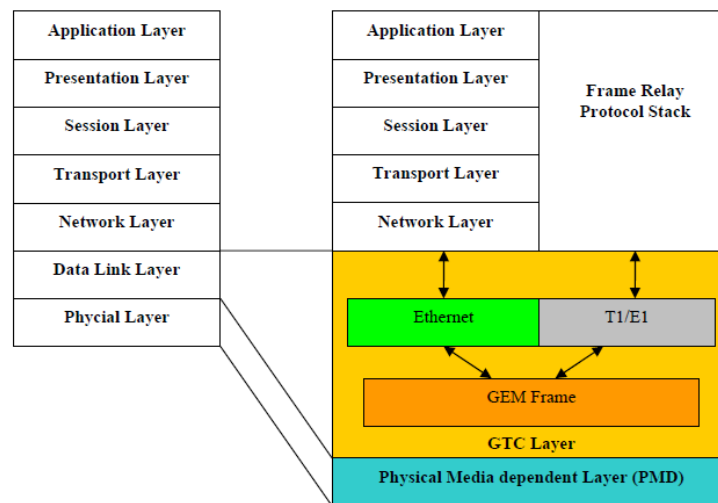


Figura 1. 8: Comparación del modelo OSI contra pila de protocolos GPON.
Fuente: (Abbas & Gregory, 2016)

La capa PMD se encarga principalmente de las funciones relacionadas con la transmisión física para controlar la señal, el medio, la dirección, el nivel de potencia, el rendimiento del jitter, el alcance físico máximo, y así sucesivamente.

La capa GTC se ocupa del control de acceso al medio y del registro de la ONU. Además de contener funciones similares a las de la capa de enlace en el modelo OSI, también puede gestionar el registro de la ONU de acuerdo con la configuración del usuario. En la capa GTC, se utiliza el método de encapsulado GPON (G-PON Encapsulation Method, GEM) para transportar los datos de tráfico Ethernet del usuario a través de la sección GPON.

Actualmente, el tráfico Ethernet es el único que puede transmitirse en el contexto experimental. Durante la transmisión del tráfico en la sección GPON, la información de dirección relacionada se añadirá en la cabecera para garantizar que cada paquete de tráfico de usuario llega al destino correcto. Tras la capa GTC, el resto de las capas son las mismas

que en el modelo OSI, que incluye la capa de red, la capa de transporte, la capa de sesión, la capa de presentación y la capa de aplicación. Estas capas también se encapsularán en la trama GEM sin modificaciones.

1.2.6.1. Visión general de la arquitectura GTC

La arquitectura de la capa de convergencia de transmisión GPON (GTC) que se muestra en la Figura 1.9 implementa el plano de control/gestión GPON y el plano de tráfico de usuario. Desde el punto de vista del protocolo, puede dividirse en subcapa de encuadre TC y subcapa de adaptación TC. En la subcapa de entramado TC, las particiones ATM, GEM, OAM (Operación, Administración y Mantenimiento) integrada y OAM de la capa física (Physical Layer OAM, PLOAM) se reconocen de acuerdo con estas ubicaciones en una trama GTC.

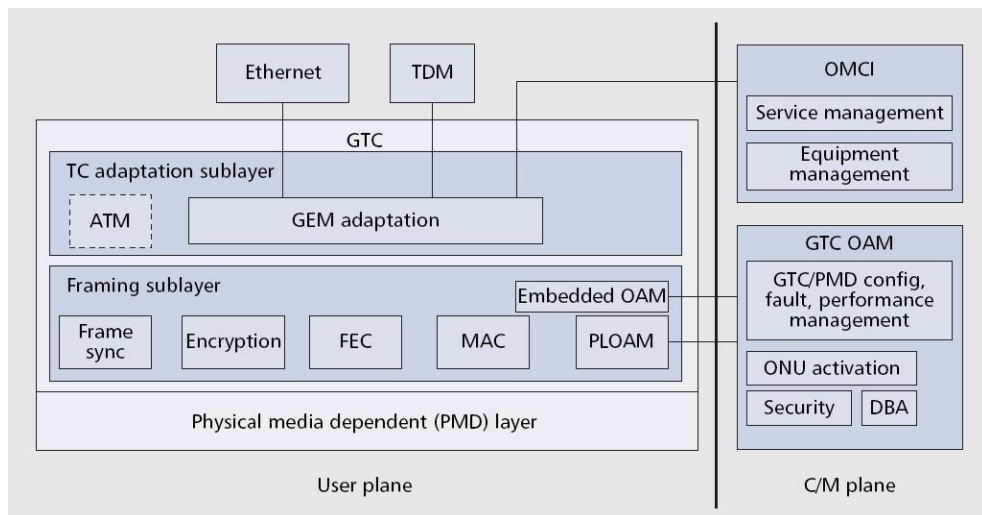


Figura 1. 9: Nomenclatura de las redes de acceso óptico.

Fuente: (Abbas & Gregory, 2016)

En esta capa sólo se termina la OAM integrada, que gestiona la concesión de ancho de banda, la conmutación de claves y la asignación dinámica de ancho de banda, ya que la información de la OAM integrada está contenida directamente en la cabecera de la trama GTC y es de fácil acceso al desempaquetar una trama. La información PLOAM se procesa en un bloque PLOAM especial que funciona como cliente de esta subcapa para que el envío de mensajes PLOAM sea fácil de controlar por un proceso específico.

En la subcapa de adaptación TC, la unidad de datos de servicio (SDU) en las particiones ATM y GEM se convertirá de/a la unidad de datos de protocolo (PDU) convencional. La información de la interface de gestión y control de ONT (ONT Management and Control Interface, OMCI) puede reconocerse a partir de estas particiones y enviarse a la entidad OMCI a través del canal OMCI. OAM integrado, PLOAM y OMCI se clasifican en el plano de tráfico de control/gestión, mientras que las PDU en ATM y la partición GEM, excepto OMCI, se consideran plano de usuario.

El plano de control y gestión del sistema GTC consta de tres partes: OAM integrado, PLOAM y OMCI. En el plano de control, se llevan a cabo algunas funciones de la capa PMD y GTC que contienen el flujo de control de acceso a los medios, el registro de la ONU/ONT, etcétera. OMCI también se encarga de la gestión de las ONU/ONT, como la gestión de la configuración, la gestión de fallos, la gestión del rendimiento y la gestión de la seguridad.

El flujo de tráfico en el plano de tráfico de usuario se identifica por el tipo de tráfico (modo ATM o GEM) y el Port-ID o VPI. En nuestro caso, sólo se ha implementado el modo GEM, lo que significa que sólo se utiliza Port-ID de 12 bits para reconocer el tráfico descendente de usuario. Para el tráfico ascendente de usuario, se utiliza Alloc-ID en la trama GTC para encontrar el destino del paquete.

Durante la transmisión de datos, una trama siempre contiene juntos el plano de usuario y el plano de control. En los lados OLT/ONT, el paquete saliente se empaquetará con el plano de usuario y el plano de control, mientras que el paquete entrante se dividirá en el plano de usuario y el plano de control. El plano de usuario se transmitirá al lado del usuario fuera de la sección GPON, y el plano de control se analizará como información OAM, PLOAM y OMCI incrustada. La acción de gestión del sistema correspondiente se ejecutará de acuerdo con la información del plano de control. El campo relacionado con el plano de control se terminará en los lados OLT u ONT.

1.2.7. Transmisión de tráfico GPON

Los dos sentidos de transmisión del tráfico que se analizan en este apartado son el descendente (Downstream, DS) y ascendente (Upstream, US). En la dirección

descendente, las ONUs reciben un mismo paquete transmitido en el cual sólo una parte del paquete pertenece a la ONU específica. En la dirección ascendente, todas las ONUs comparten una misma trama de transmisión destinada a enviar mensajes a la OLT de acuerdo con la política de asignación de ancho de banda programada por la OLT de forma predeterminada.

1.2.7.1. Transmisión descendente

Cuando es necesario transmitir paquetes desde la red de servicio a la red de usuario a través de la sección GPON, la transmisión descendente tiene lugar en la sección GPON que se muestra en la Figura 1.10.

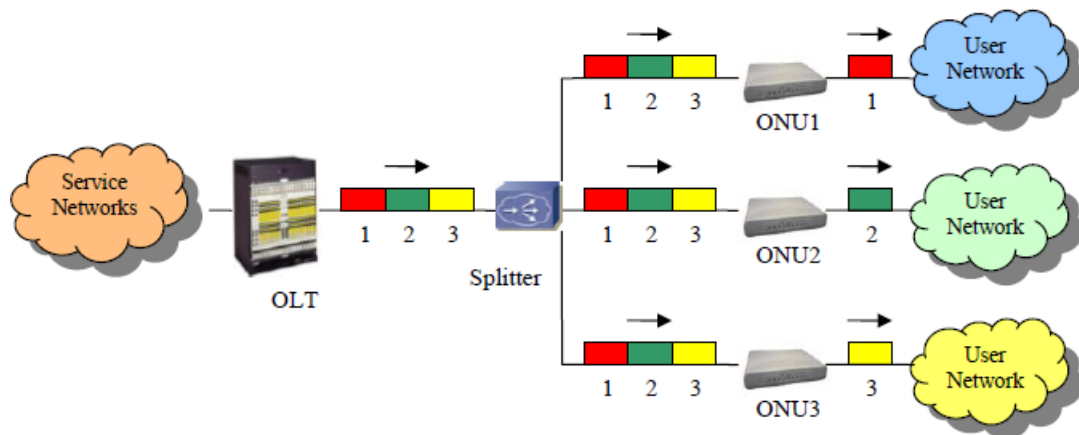


Figura 1. 10: Transmisión descendente en el tramo GPON

Fuente: (Chen et al., 2013)

La transmisión para el tráfico Ethernet puede describirse con los siguientes pasos:

- ✚ La OLT recibe el tráfico Ethernet de la red de servicio y comprueba la dirección del control de acceso al medio (Medium Access Control, MAC) de destino.
- ✚ La OLT comprueba la tabla de búsqueda para obtener el Port-ID relacionado según la dirección MAC.
- ✚ La OLT encapsula el tráfico en una trama GEM añadiendo la cabecera GEM que incluye el Port-ID y otros campos necesarios. Al mismo tiempo, el mensaje OMCI también puede incluirse en la cabecera GEM.
- ✚ La OLT empaqueta varias tramas GEM juntas.

- ✚ La OLT añade estas tramas GEM al campo PCBd que tiene relacionado un mensaje de plano de control, un mapa de asignación de ancho de banda ascendente y otros campos de control de trama. Con toda esta información se construye una trama GTC.
- ✚ La OLT difunde la trama GTC a las ONU.
- ✚ La ONU recibe la trama GTC de la OLT.
- ✚ La ONU analiza el campo PCBd para comprobar la integración de datos, leer la información PLOAM y el mapa de asignación de ancho de banda ascendente. Las acciones de gestión del sistema relacionadas deben realizarse en el lado de la ONU de acuerdo con la información PLOAM.
- ✚ La ONU obtiene las tramas GEM deshaciéndose del PCBd. Puede encontrar una o más tramas que le pertenezcan comprobando el campo Port-ID de la cabecera GEM. Al mismo tiempo, el mensaje OMCI que está encapsulado en la cabecera GEM puede ser leído por la ONU. En consecuencia, se llevará a cabo una acción de gestión del sistema relacionada en la ONU.
- ✚ Por último, la ONU recibe la carga útil de GEM, que es el tráfico Ethernet. Enviará el tráfico Ethernet a la red de usuario prevista.

1.2.7.2. Transmisión ascendente

La transmisión ascendente (upstream) se establece en la estructura GPON cuando hay paquetes que deben transmitirse de la red de usuario a la red de servicio a través de esta, tal como se muestra en la Figura 1.11.

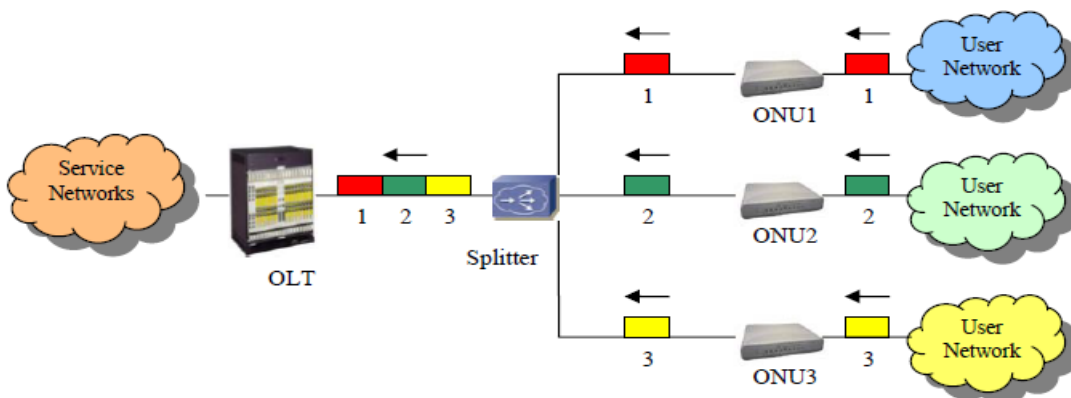


Figura 1. 11: Transmisión ascendente en el tramo GPON
Fuente: (Chen et al., 2013)

La transmisión para el tráfico Ethernet puede describirse con los siguientes pasos:

- ✚ La ONU obtiene el tráfico Ethernet de la red de usuario
- ✚ La ONU verifica las asignaciones del ancho de banda que se encuentran en el campo PCBd de una transmisión descendente previa. De acuerdo con el T-CONT y el mapa de asignaciones, la ONU sabe cuánto ancho de banda se le ha asignado y las franjas horarias correspondientes.
- ✚ La ONU es la encargada de encapsular el tráfico Ethernet en la carga útil GEM y añadiendo la cabecera GEM necesaria. Por ejemplo, si el mensaje OMCI se desea transmitir desde la ONU hacia la OLT, este será encapsulado en la cabecera GEM.
- ✚ La ONU adjunta el campo PLOu, que es obligatorio. Los campos PLOAMu, PLSu y DBRu también pueden adjuntarse en función de los diferentes requisitos, incluido el envío de la respuesta PLOAM, la información relacionada con el nivel de potencia y la información del informe de ancho de banda dinámico.
- ✚ La ONU envía la trama empaquetada al divisor. Todas estas tramas ONU se empaquetan en una trama ascendente y se transmiten a la OLT.
- ✚ Cuando la OLT recibe esta trama, la dividirá en varias unidades según el ONU-ID en los campos PLOu. La OLT comprobará los campos PLOAMu, PLSu y DBRu y enviará una respuesta si es necesario.
- ✚ La OLT recibe las tramas GEM, comprueba los mensajes OMCI en las cabeceras GEM y actualiza las entidades gestionadas relacionadas si es necesario.
- ✚ La OLT comprueba la tabla de búsqueda para obtener la dirección MAC de destino relacionada según el Alloc-ID.
- ✚ Por último, la OLT recibe las cargas útiles GEM, que son tramas Ethernet de las redes de usuario. Las tramas Ethernet se transmitirán a la red de servicio según la dirección de destino.

1.2.8. Asignación de ancho de banda (BW)

La asignación de BW es un elemento decisivo durante la transmisión ascendente. Hay dos formas de asignación de BW que se pueden utilizar en un sistema GPON: (1) Asignación Estática de Ancho de Banda (Static Bandwidth Allocation, SBA), y (2) Asignación Dinámica de Ancho de Banda (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA). La

información relativa a la asignación de BW se intercambia tanto en sentido descendente como ascendente. La unidad básica para la asignación de ancho de banda es el contenedor de transmisión (Transmission Container, T-CONT), que se identifica mediante el Alloc-ID. Cada T-CONT tiene su propia configuración de asignación de ancho de banda.

En la transmisión descendente, en modo SBA, la información relacionada con la asignación de ancho de banda, conocida como US BW Map, se enviará en el campo PCBd. En caso de que el administrador del sistema decida modificar la planificación de la asignación del BW en sentido ascendente, los parámetros modificados se ajustarán en función de las necesidades; de lo contrario, el mapa de BW en sentido ascendente se mantendrá invariable durante la transmisión en sentido descendente. El nuevo mensaje de asignación se enviará a las ONU con la siguiente trama GTC saliente.

Sin embargo, en el modo DBA, el mapa US BW continúa utilizándose en el envío de la asignación de ancho de banda a las ONUs en la trama descendente. Sin embargo, ya no hay asignación manual de BW después de la configuración inicial realizada por el administrador. La OLT puede asignar el ancho de banda dinámicamente obteniendo el estado de transmisión del tráfico de la ONU en tiempo real. Es más útil que el modo SBA, ya que el ancho de banda se puede utilizar de forma eficiente. Existen dos métodos que permiten intercambiar el estatus del tráfico entre la OLT y las ONUs:

- ✚ DBA con informe de Estado: la OLT es capaz de obtener el estado de congestión de las ONU y determinar el correspondiente mapa de ancho de banda estadounidense. Esto se realiza mediante la información rápida del estado del tráfico que se transmite en el campo PLOu, el informe DNA piggy-back o el informe DBA de la ONU completa.
- ✚ DBA sin informe de Estado: Cada OLT proporciona un DBA de monitorización de tráfico. La OLT monitoriza el tráfico entrante procedente de las ONUs y calcula el mapa de ancho de banda estadounidense a partir de esta información de tráfico. No se necesita información ni protocolo adicional para realizar este tipo de DBA.

1.2.9. Formato de transmisión

Una OLT puede soportar una o más ONUs. La ONU-ID se utiliza para identificar una ONU. La trama GTC tiene diferentes estructuras según sea descendente o ascendente. Los métodos de transmisión son diferentes:

- En la dirección descendente, cada ONU recibirá del lado OLT una trama completa que contiene los mensajes para todas las ONU incluidas. Un ONU sólo desempaquetará la parte que le pertenece según el Port-ID.
- En el sentido ascendente, todas las ONU comparten una trama, pero en diferentes franjas horarias, que son asignadas por la OLT en los mensajes descendentes. La asignación de ancho de banda en sentido ascendente se identifica mediante el Alloc-ID, lo que significa que la OLT asignará las franjas horarias de acuerdo con el Alloc-ID. En la figura 1.12, tanto ONU-ID, Alloc-ID y Port-ID se utilizan para identificar la ONU, el T-CONT y el puerto. En la transmisión descendente, dado que los ONU comparten un mensaje descendente a la vez, Port-ID se utiliza para identificar la parte específica de un ONU concreto. En la transmisión ascendente, Alloc-ID se utiliza para la asignación del ancho de banda ascendente. ONU-ID se utiliza para la gestión de la ONU en los mensajes PLOAM. Cada ONU debe tener un ONU-ID y uno o más Alloc-ID y Port-id correspondientes al tráfico ascendente y descendente

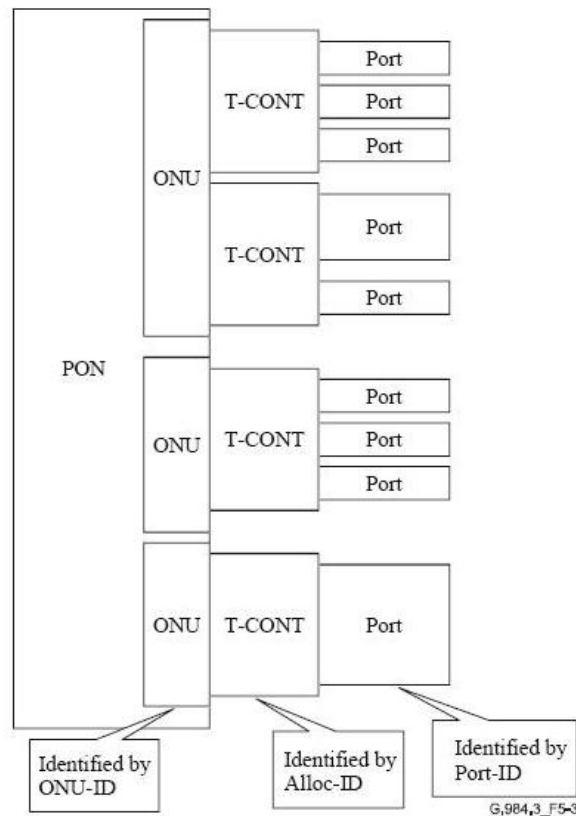


Figura 1. 12: Multiplexación en el servicio GEM
Fuente: (Abbas & Gregory, 2016)

1.2.9.1. Trama descendente

La trama descendente (ver Figura 1.13) consta del bloque de control físico descendente (PCBd) y de la carga útil que contiene la partición ATM o la partición GEM. Una OLT difunde el tráfico descendente para asegurarse de que todas las ONU reciben el mismo tráfico descendente. Después de recibir el flujo descendente, cada ONU desempaquetará el bloque PCBd para obtener la información relacionada, por ejemplo, la información PLOAMd o la información de asignación de ancho de banda ascendente (ver Figura 1.14); para el bloque de carga útil, la ONU desempaquetará su propia parte de carga útil de acuerdo con el área Port-ID.

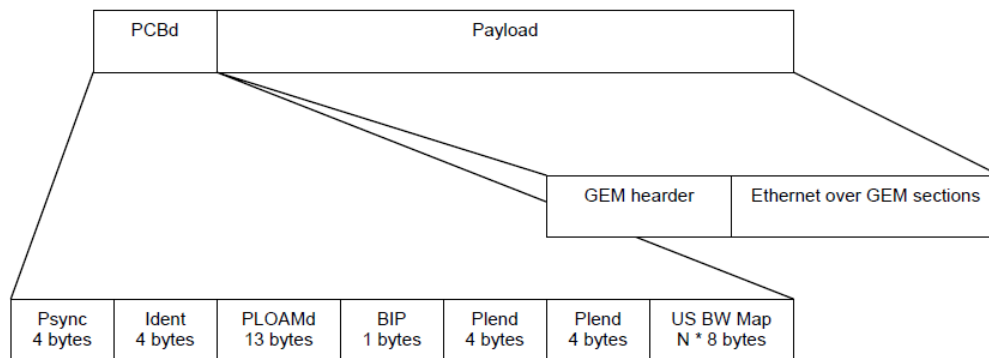


Figura 1. 13: Trama descendente para GPON

Fuente: (Abbas & Gregory, 2016)

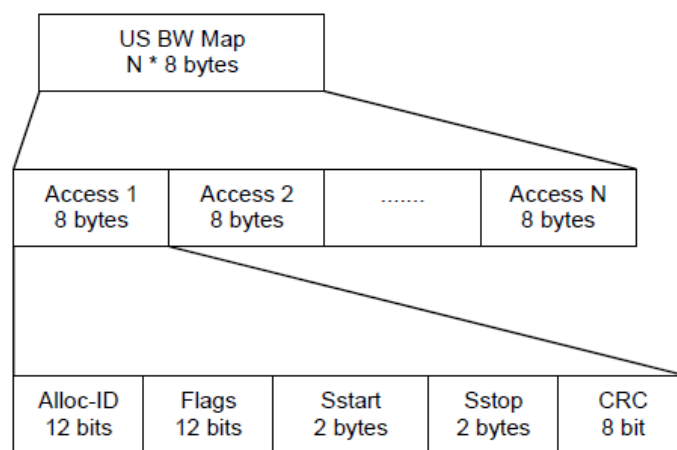


Figura 1. 14: Mapa de asignación de ancho de banda ascendente.

Fuente: (Abbas & Gregory, 2016)

1.2.9.2. Trama ascendente

En la transmisión ascendente, la trama contiene una o más unidades de transmisión que se muestran en la Figura 1.15. Cada unidad lleva los campos PLOu y Payload. Cada unidad lleva los campos PLOu y Payload. PLOAMu, PLSu y DBRu sólo se transmiten cuando es necesario. Al recibir el mensaje upstream, la OLT desempaquetará la trama por el ONU-ID para conocer el destino del mensaje. En el lado OLT se ejecutarán las siguientes acciones:

- a. Analiza el campo PLOAMu y lleva a cabo la acción de gestión correspondiente.
- b. Inicializa o cambia el modo de potencia del transmisor de la ONU de acuerdo con el campo PLSu, que contiene el informe de medición de control de potencia.

- c. Asigna un ancho de banda ascendente dinámicamente de acuerdo con el informe de ancho de banda dinámico en el campo DBRu si se está ejecutando el modo DBA.
- d. Dirige la carga útil de subida a los receptores correspondientes.

PLOu	PLOAMu 13 bytes	PLSu 120 bytes	DBRu X 2,3,5 bytes	Payload X
------	--------------------	-------------------	-----------------------	-----------

Figura 1. 15: Unidad de trama ascendente para 10-GPON

Fuente: (Abbas & Gregory, 2016)

1.2.10. Importancia de la conectividad en zonas rurales

Una red de conectividad puede clasificarse en red de retorno o de acceso. Las redes de acceso proporcionan la llamada conectividad de "última milla", que conecta a los usuarios finales con la red de retorno, que finalmente se conecta a Internet. Las tecnologías de red de acceso existentes consisten en cables de cobre mejorados basados en línea de abonado digital (Digital Subscriber Line, xDSL), cable coaxial, tecnologías inalámbricas fijas y móviles, inalámbricas por satélite y de fibra óptica.

Las tecnologías xDSL utilizan la infraestructura existente de la Red Telefónica Pública Conmutada (Public Switched Telephone Network, PSTN) para ofrecer servicios de datos de banda ancha. En xDSL, la línea telefónica transporta tanto señales/paquetes de voz como de datos; hay un divisor en las instalaciones del usuario final donde se separan los servicios de voz y datos. Los sistemas xDSL abarcan varias tecnologías, como:

1. DSL asimétrica (ADSL),
2. DSL de muy alta velocidad (VDSL) y
3. DSL de alta velocidad binaria (HDSL).

Sus velocidades de datos máximas teóricas (downlink/uplink en Mbps) son: 2/1.05 (HDSL), 8/0.8 (ADSL) y 52/26 (VDSL) respectivamente.

La tecnología de módem por cable utiliza el cable coaxial para ofrecer servicios de datos de Internet junto con la televisión digital. El ancho de banda máximo teórico es de hasta 30 Mbps. Hay que tener en cuenta que las tecnologías por cable tienen limitaciones de distancia. Por tanto, la velocidad de transmisión de datos depende de la distancia

recorrida. La velocidad de datos disminuye en cuanto la distancia recorrida supera el rango especificado.

La fibra óptica es otra opción para las redes de acceso; con ella, se obtiene un ancho de banda considerable, del orden de los Gbps. Un simple filamento de fibra proporciona un ancho de banda total de 25.000 GHz. Las redes ópticas pasivas (PON) están muy extendidas para implantar las redes de acceso de fibra óptica. Una PON suele considerarse el segmento final de la fibra óptica hasta el hogar (FTTH) o cerca de él (FTTx). Las redes de acceso PON comercialmente disponibles y ampliamente desplegadas son la IEEE 802.3ah Ethernet PON (EPON), con una velocidad simétrica de 1.25 Gbps, o la G.984 Gigabit PON (GPON) de UIT-T, con una velocidad de subida de 1.244 Gbps y una velocidad de bajada de 2.488 Gbps.

Las infraestructuras xDSL y de cable coaxial están bien establecidas en los países desarrollados. Por ejemplo, en la mayoría de los países europeos y Estados Unidos casi todos los hogares tienen cableado de par trenzado y las ciudades enteras están conectadas por sistemas de telecomunicaciones convencional (Plain Old Telecommunications System, POTS). Además, casi todos los hogares disponen de cableado para servicios por cable.

Sin embargo, no ocurre lo mismo en las zonas rurales de los países en desarrollo, que se caracterizan por su baja densidad y escasa densidad de población. Las características de las zonas rurales de los países en desarrollo suponen un reto en términos de costes de red y tiempo de despliegue para implantar tecnologías cableadas como xDSL, cables coaxiales y fibras ópticas. Por ello, las tecnologías inalámbricas se consideran adecuadas para el medio rural.

Aunque Ecuador ya ha dado un gran salto en la revolución digital, aún queda mucho camino por recorrer para conectar a los desconectados. Según un informe de resultados del Ministerio de Telecomunicaciones (MINTEL) del año 2023, hay un 93% de penetración de la banda ancha móvil y fija en Ecuador 73.81% a nivel urbano (13.45 millones de personas beneficiarias), frente a un mero 76.58% de 631 parroquias rurales de Ecuador. Exacerbada por el COVID-19, esta brecha digital agrava las desigualdades sociales y económicas existentes en el país. Además, existe la preocupación de que

aumente la brecha debido a la adopción de nuevos desarrollos digitales como los sistemas de dinero electrónico, la Internet de las cosas y la inteligencia artificial.

Es necesario empoderar a los miembros de las comunidades rurales mediante una conectividad fiable y dotarles de las habilidades necesarias para disfrutar de los beneficios que actualmente se reparten de forma desigual entre Ecuador urbano y la rural. Aprovechado y ampliado, el poder del intercambio de información puede ofrecer diversas oportunidades, como la agricultura inteligente, la educación, los servicios de telemedicina, la facilidad de transferencia de pagos a través de planes gubernamentales, el comercio electrónico, la concienciación sobre el desarrollo urbano y las oportunidades de empleo a distancia.

Los principales retos a la hora de aumentar la penetración de Internet son la falta de fiabilidad de la electricidad, la asequibilidad de la conectividad y de los equipos de usuario, los escasos incentivos de la industria a la conectividad de bajo coste, los problemas topográficos, el coste de la infraestructura, los problemas de backhaul y las compensaciones de rendimiento.

Además, la falta de conciencia digital en el uso de la tecnología, las reservas culturales y las barreras lingüísticas que provocan la brecha digital constituyen un enorme reto en Ecuador. La solución pasa por formular estrategias e iniciativas que requieran aportaciones de operadores, fabricantes de equipos, universidades, gobiernos y organismos civiles para comprender las necesidades de las comunidades rurales y crear soluciones sostenibles que puedan aprovechar para su desarrollo.

1.2.11. Infraestructura de telecomunicaciones en zonas rurales

En la actualidad, el acceso a las redes fijas de banda ancha se divide en tres tipos: redes de cobre, de fibra y de cable. Para el presente estudio, se consideran las redes de acceso basadas en cobre y fibra. En la Figura 1.16 se muestran los componentes de las distintas arquitecturas de red.

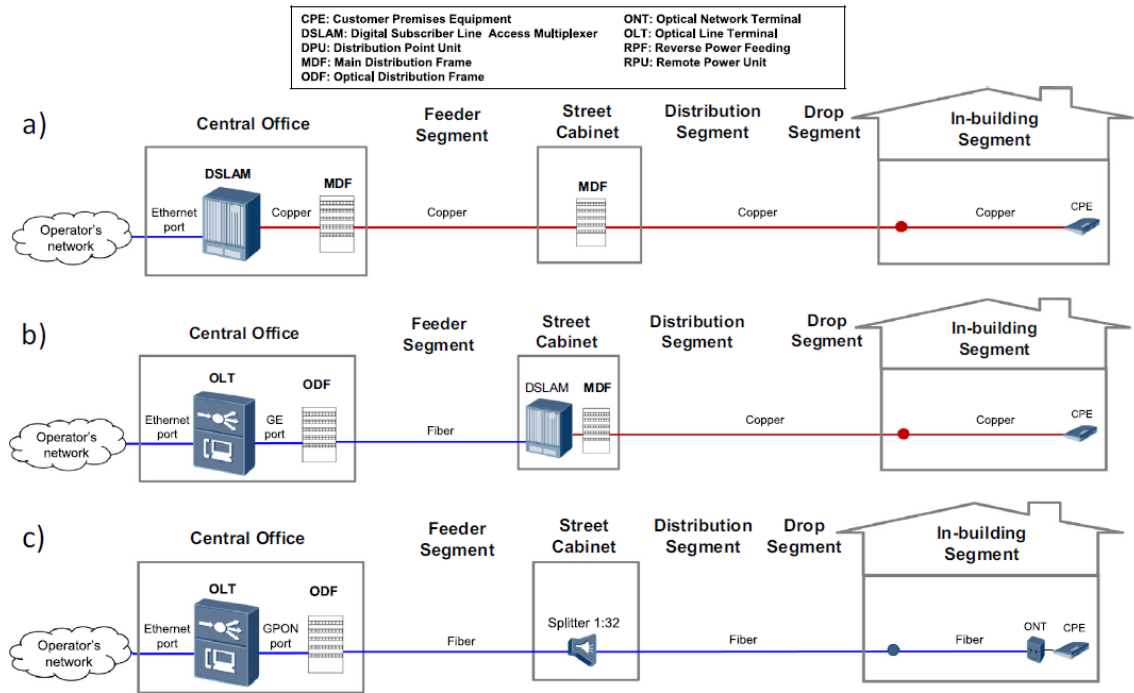


Figura 1. 16: Arquitecturas de red: (a) CO-VDSL; (b) FTTC; (c) FTTH
Fuente: (Rendon Schneir & Xiong, 2016)

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Contexto de la investigación

La zona rural de "El Morro" se encuentra ubicada en la Provincia del Guayas (véase la Figura 2.1 el mapa obtenido de Google Maps), en el sector costero de Ecuador. Esta comunidad, caracterizada por su entorno natural y su economía basada principalmente en la pesca, enfrenta desafíos significativos en cuanto a conectividad y acceso a servicios de comunicación. La falta de infraestructura tecnológica adecuada ha limitado el desarrollo y la calidad de vida de sus habitantes, dificultando el acceso a educación, salud, oportunidades laborales y servicios públicos.

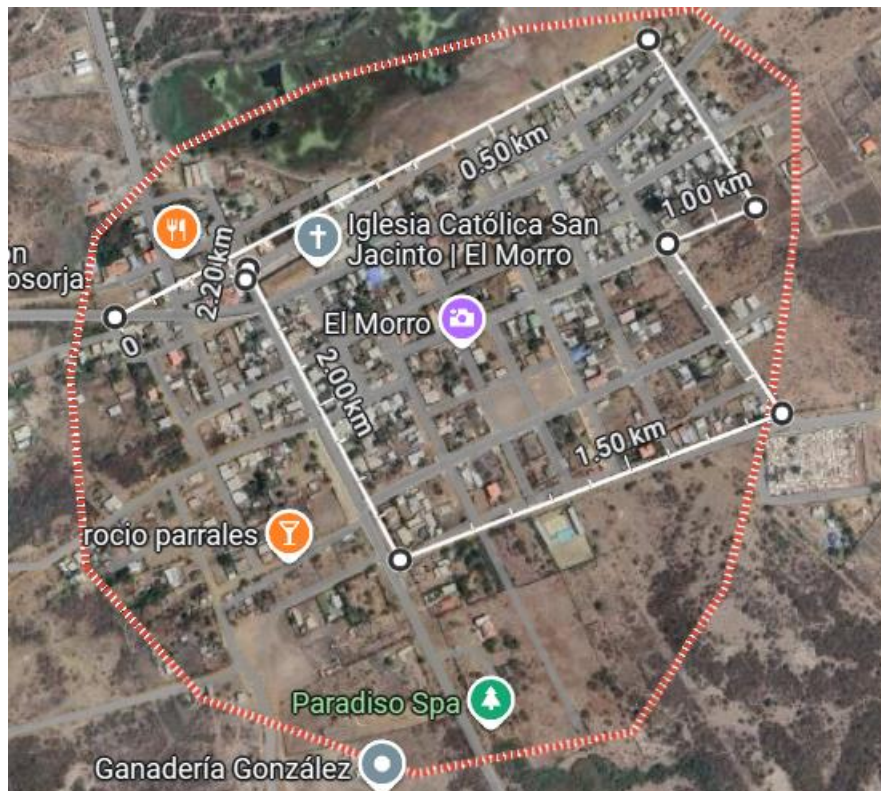


Figura 2. 1: Ubicación geográfica de la parroquia rural "El Morro"

Fuente: Google Maps

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), la población de El Morro está estimada en unos 6.502 habitantes (Parroquia Rural El Morro, 2023), de los cuales un porcentaje significativo habita en hogares de bajos ingresos. El acceso a Internet

es limitado, y muchos hogares cuentan con conectividad a Internet débil y de baja fiabilidad a través de infraestructuras o redes móviles que no tienen suficiente cobertura. Todo ello evidencia una brecha digital cada vez mayor entre las ciudades y las comunidades rurales como El Morro.

Este proyecto se fundamenta a partir de la premisa de que una conexión a internet de calidad y alta velocidad es un servicio básico para la educación, la atención sanitaria y la actividad comercial, y ha dejado de ser un lujo. Se estudia el despliegue propuesto de una red óptica pasiva (GPON) con el fin de proponer una solución práctica y a largo plazo para reducir esa brecha digital.

2.2. Diseño y alcance de la investigación

En el presente estudio el método utilizado es no experimental, es decir, no se manipulan los parámetros ni están controlados. Por el contrario, se propone un análisis basado en los datos recogidos de la situación actual de la comunidad rural de El Morro. En este sentido, la investigación emplea entrevistas de campo, encuestas y simulaciones para conocer el estado de la conectividad en la zona y la factibilidad de implementar una red óptica pasiva. Este método no experimental está considerado como pertinente y válido, ya que evita la introducción de cambios y, al mismo tiempo, permite conocer la situación y los resultados deseados.

Esta investigación propone un método analítico y explicativo. El propósito del proyecto radica en el análisis de la conectividad actual de El Morro y de la manera en que la fibra óptica, especialmente GPON, permitiría solucionar esta situación en un futuro. En este sentido, el enfoque analítico considera tres dimensiones principales:

- Efectos tecnológicos, relacionados con la capacidad de transmisión, estabilidad de la red y potencial de modernización de los servicios digitales en la zona.
- Efectos sociales, vinculados con la mejora en la educación, la atención en salud y las oportunidades de las microempresas locales.
- Efectos medioambientales, orientados a evaluar el impacto de la implementación de la infraestructura óptica en el entorno natural. Este análisis contempla aspectos como el uso eficiente de la energía eléctrica en comparación con tecnologías

tradicionales, la reducción de residuos electrónicos por la mayor durabilidad de los equipos ópticos, y la disminución de emisiones indirectas de CO₂ gracias a una conectividad más estable que reduce la necesidad de desplazamientos físicos para acceder a servicios esenciales.

Por su parte, el método explicativo está orientado a demostrar que el establecimiento de una red óptica puede mejorar la accesibilidad a servicios digitales como la educación, la atención de la salud y las empresas vinculadas a la actividad productiva. Todos estos componentes representan la base para entender la influencia de la tecnología en el desarrollo de la zona rural.

2.3. Tipo y métodos de investigación

La metodología empleada en este trabajo es mixta, es decir, tanto métodos cuantitativos como cualitativos. Este enfoque se basa en la necesidad de comprender no sólo los datos cuantitativos, como la velocidad y la disponibilidad de Internet, sino también las percepciones y experiencias de los habitantes de El Morro. A continuación, se describen brevemente los métodos de Investigación que se utilizaron en el presente trabajo de titulación:

- Inductivo: se utilizó para observar y describir las características de conectividad de la comunidad. De este modo, se identificaron directrices y enfoques sobre la factibilidad de las redes ópticas pasivas en la parroquia rural “El Morro”.
- Deductivo: se utilizó para contrastar la teoría de las redes de servicios a zonas rurales con el caso específico de El Morro. De esta manera se consiguió un análisis bien estructurado de la validez de estas definiciones en un escenario real.
- Hipotético-Deductivo: consiste en formular una hipótesis concreta sobre la utilidad de la implementación de GPON. Por último, la hipótesis se evaluó mediante encuestas, entrevistas y simulaciones basadas sobre la tecnología.

2.4. Población y muestra

La muestra poblacional del presente trabajo se compone de todos los pobladores, instituciones y empresas del área rural de El Morro, Guayas, Ecuador. Para la recogida de datos se utiliza el muestreo aleatorio probabilístico para elegir una muestra representativa. Este método permite identificar a cada uno de los encuestados con la misma probabilidad de ser seleccionado, con lo cual se fortalece la validez de los resultados.

Para conocer el tamaño de la muestra se ha utilizado la fórmula estadística aplicada a poblaciones finitas:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{(N - 1) \cdot E^2 + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

Basándose en una confianza del 95%, un índice de 0.5 y un margen de error ajustado del 6.1% en función de las necesidades de cada caso, se obtuvo una muestra de 250 encuestados aproximadamente.

$$n = \frac{6000(1.96)^2(0.5)(0.5)}{(6000 - 1)(0.061)^2 + (1.96)^2(0.5)(0.5)} = \frac{5762.4}{22.3223 + 0.9604}$$
$$n = \frac{5762.4}{23.2827} = 247.4971 \cong 250$$

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- Cuantitativa: se emplearon encuestas para recopilar datos numéricos sobre la percepción de los habitantes respecto a la conectividad en la zona y las expectativas sobre las redes ópticas pasivas.
- Cualitativa: Entrevistas semiestructuradas y grupos focales para profundizar en las experiencias y opiniones de los habitantes sobre la conectividad y la implementación de tecnologías en "El Morro".
- Instrumentos de Recolección: Cuestionarios, guías de entrevistas y moderación de grupos focales.

- Instrumentos técnicos en el diagnóstico de conectividad: se utilizan aplicaciones para evaluar el rendimiento de la infraestructura de telecomunicaciones permitiendo una medición objetiva de parámetros técnicos relevantes, y las herramientas son:
 - NetSpot: permite visualizar y analizar la distribución del espectro inalámbrico.
 - WiFi Analyzer: se utilizó en puntos estratégicos de la comunidad (escuela, centro comunal y parque central) para medir intensidad y estabilidad de la señal. Los resultados obtenidos no fueron incorporados en la sección de resultados, ya que se emplearon únicamente como medición exploratoria para verificar la existencia de variabilidad significativa en la cobertura.
 - Ookla Speedtest: se aplicó en tres hogares y un establecimiento educativo de la comunidad para medir velocidad de descarga, subida, latencia y pérdida de paquetes. Aunque estos datos permitieron validar la baja calidad de la conectividad existente, no se integraron en los resultados finales porque su propósito fue únicamente de verificación preliminar, siendo la simulación GPON la base principal para el análisis de viabilidad.

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

Los instrumentos de validación y confianza que se utilizaron en este estudio fueron seleccionados para garantizar la calidad y exactitud de los datos recogidos.

Validación de Instrumentos:

Previamente a la aplicación de las encuestas y entrevistas, se validó su contenido con la ayuda de tres expertos en telecomunicaciones y desarrollo rural. Sus observaciones permitieron afinar las preguntas a fin de que se ajustaran a los objetivos de la investigación. Además, se procede a la validación de la interpretación de las preguntas para corroborar que estas miden exactamente lo que se pretende con ellas. De esta manera se comprueba que el cuestionario recoge con precisión el contenido de las preguntas relativas, por ejemplo, a la “satisfacción con la conectividad” o a la “calidad percibida del servicio”.

Confiabilidad de los Instrumentos:

Los resultados fueron examinados utilizando la prueba alfa de Cronbach, que es una herramienta estadística empleada muy a menudo para la evaluación de la fiabilidad. Los resultados obtenidos revelaron un valor de 0.87, un valor que demuestra un nivel de fiabilidad considerable, lo que confirma la fiabilidad de la herramienta.

Garantía de Calidad

Para que el estudio tenga validez, los cuestionarios y las entrevistas se realizan de forma coherente. Además, se comprueba periódicamente la exactitud de la información para buscar posibles sesgos o errores y subsanarlos rápidamente.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis del estado actual de la infraestructura de comunicaciones en “El Morro”

Se realizó un análisis exhaustivo de la infraestructura de telecomunicaciones existente en la comunidad rural de «El Morro», situada en la provincia de Guayas, Ecuador. El objetivo de la evaluación fue conocer las condiciones actuales, las limitaciones y las áreas de mejora. Esta sección presenta información detallada obtenida a través de visitas de campo (ver Anexo 2), entrevistas estructuradas, encuestas e inspecciones técnicas.

3.1.1. Diagnóstico de la infraestructura actual

Para determinar con precisión el estado actual de la infraestructura de telecomunicaciones en la comunidad rural de “El Morro”, entre febrero y marzo de 2024 se realizó una visita de campo y encuestas estructuradas en los hogares. El propósito fue determinar la dependencia de la comunidad de las tecnologías de la comunicación existentes, su eficacia y los niveles generales de satisfacción de los habitantes.

Para obtener una cobertura representativa de toda la comunidad, este estudio se realizó con una muestra aleatoria de 250 hogares. Con esta selección se garantiza una cobertura adecuada de zonas geográficas de “El Morro”, que comprende tanto zonas densamente pobladas y cercanas al centro de la ciudad al igual que zonas rurales más alejadas de los nodos de la red principal. La Tabla 3.1 muestra la tabla de frecuencias de las encuestas realizadas.

Tabla 3. 1: Frecuencias y medidas de tendencia central de la encuesta realizada(N=250)

Pregunta/Ítem	Frecuencia	Porcentaje (%)
Tipo de conexión a Internet		
Inalámbrica (Wi-Fi comunitario, 3G/4G)	212	84.8%
DSL de cobre (línea fija)	38	15.2%
Nivel de satisfacción		
Muy satisfecho	8	3.2%

Satisfecho	30	12.0%
Moderadamente satisfecho	50	20.0%
Insatisfecho	100	40.0%
Muy insatisfecho	62	24.8%
Interrupciones en la conectividad		
Interrupciones frecuentes	195	78.0%
Raras o sin interrupciones	55	22.0%

Elaborado por: Autor.

La encuesta evidenció una fuerte dependencia de los residentes locales de las tecnologías inalámbricas terrestres, tal como se muestra en la Figura 3.1. Aproximadamente el 85% (212 hogares) declararon utilizar redes Wi-Fi gestionadas por la comunidad o redes móviles (principalmente servicios de datos celulares 3G y 4G) como principales métodos de acceso a Internet. Estos encuestados destacaron la comodidad, la disponibilidad inicial y la facilidad de acceso como las principales razones para adoptar las conexiones inalámbricas. No obstante, los encuestados han manifestado su preocupación por la estabilidad de la conexión, especialmente durante las horas pico (normalmente por la tarde) y bajo condiciones meteorológicas adversas, tales como lluvias intensas o tormentas costeras comunes en la región.

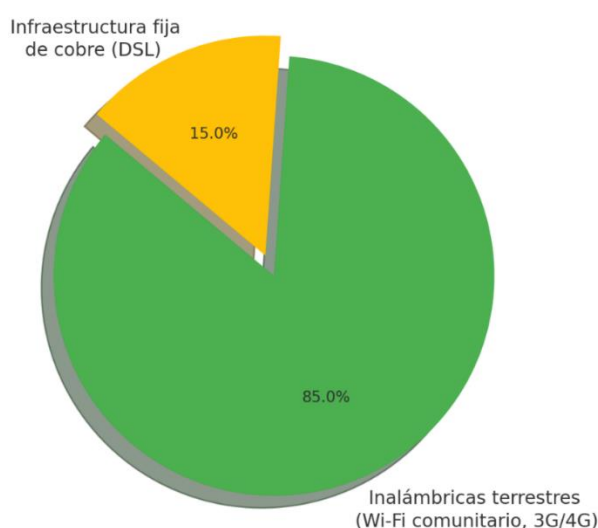


Figura 3. 1: Tipos de conexiones de Internet usadas por los hogares en "El Morro"

Elaborado por: Autor.

Por otro lado, el 15% de los hogares (38) indicaron que utilizaban la infraestructura tradicional de línea fija de cobre, es decir, los servicios de línea de abonado digital (Digital Subscriber Line, DSL). Estos usuarios residían cerca de los nodos centrales de distribución, normalmente entre 2 y 3 km. Aunque la proximidad es ventajosa, los encuestados se mostraron insatisfechos con el servicio DSL, tal como se observa en la Figura 3.2 del nivel de satisfacción de los usuarios. La mayoría describía el servicio como deficiente, señalando interrupciones frecuentes y velocidades de conexión notablemente lentas. Es decir, que la velocidad de descarga superaba los 5 Mbps, y la de carga alrededor o por debajo de 1 Mbps, afectando gravemente a sus actividades diarias en Internet.

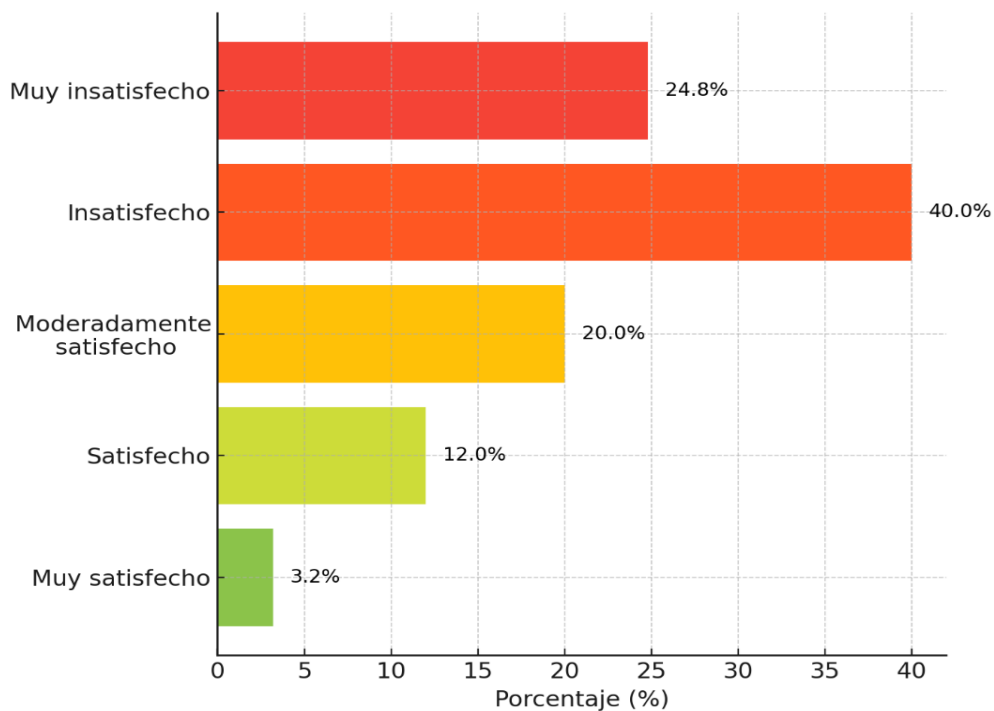


Figura 3. 2: Nivel de satisfacción de los usuarios con la conexión a Internet.
Elaborado por: Autor.

Durante las visitas de campo, la investigación permitió establecer un contacto directo con los miembros de la comunidad y los proveedores locales de telecomunicaciones con el fin de respaldar los datos de la encuesta. Se mantuvieron varias conversaciones informales pero perspicaces, lo que aportó información cualitativa a los resultados cuantitativos. Las compañías proveedoras aseguraron que la infraestructura de cobre fue instalada hace casi dos décadas, coincidiendo con los comentarios de la comunidad. Por otro lado, los

proveedores reconocieron que el mantenimiento se había reducido considerablemente con el paso del tiempo, por lo que la calidad del servicio había empeorado progresivamente. Asimismo, las entrevistas con los dirigentes comunitarios reflejaron los problemas, destacando el descontento general de los residentes por el continuo deterioro de los servicios en los últimos años.

La visita de campo también reveló una degradación física significativa de la infraestructura de telecomunicaciones existente. La inspección detectó signos visibles de corrosión, cableado dañado e inadecuada protección del entorno, lo que se atribuye al clima costero húmedo y salino de la región. Todo ello afecta en gran medida a la vida útil y a la calidad general del servicio de las instalaciones de cobre existentes, confirmando así la mala calidad de la experiencia del usuario mencionada por los residentes.

En el caso de la conectividad inalámbrica, los residentes mencionaron con frecuencia interrupciones de la señal, que se hicieron más habituales durante los periodos de uso intensivo de la red, normalmente por la noche, los fines de semana y, sobre todo, en condiciones meteorológicas adversas. Según las entrevistas, los puntos de acceso Wi-Fi de la comunidad, proporcionados en su mayoría por las autoridades locales y pequeñas empresas privadas, se encontraban saturados y a menudo no lograban mantener conexiones estables durante periodos prolongados.

A continuación, en la Tabla 3.2, se resumen los principales resultados obtenidos en la encuesta para mostrar las percepciones de la comunidad.

Tabla 3. 2: Resultados de la encuesta sobre la conectividad a Internet en «El Morro

Tipo de conectividad	Porcentaje (%)	Viviendas (N=250)	Nivel de satisfacción (percepción general)
Inalámbrico terrestre (Wi-Fi, 3G, 4G)	85%	212	De moderado a bajo (interrupciones frecuentes)
Línea fija DSL (cobre)	15%	38	Baja (insatisfacción significativa, velocidades bajas)

Elaborado por: Autor.

Además, para dar sentido a estos resultados, a continuación, se incluyen algunas opiniones recopiladas durante las encuestas y entrevistas, que permiten comprender mejor la realidad de los residentes:

1. Morador del Sector “Las Brisas”: dependemos de la conexión inalámbrica del punto de acceso Wi-Fi de la comunidad. En general funciona durante el día, pero al anochecer se ralentiza mucho y a veces se corta por completo. Es un problema para mis hijos, sobre todo cuando tienen deberes o clases en línea.
2. Pequeño empresario del centro de “El Morro”: nuestro negocio utiliza ADSL, pero la conexión es mala, sobre todo cuando llueve mucho. Esto afecta gravemente a nuestra capacidad para procesar pedidos en línea o utilizar sistemas de pago digitales, y perdemos ventas regularmente por la mala calidad de la señal.
3. Profesor de una escuela primaria local: los problemas de conectividad afectan a la mayoría de los estudiantes cuando toman clases en línea. Los padres me comentan las desconexiones frecuentes y la lentitud de Internet. Esto afecta significativamente su rendimiento en su educación en línea.

En resumen, las visitas de campo y encuestas realizadas proporcionaron pruebas sólidas que apoyan la necesidad de mejoras significativas en la infraestructura de telecomunicaciones en “El Morro”. Los resultados indican claramente una insatisfacción generalizada con los servicios actuales, sobre todo debido al estado obsoleto de la infraestructura de líneas fijas de cobre y a la escasa cobertura de las redes inalámbricas. Resolver estas deficiencias infraestructurales es, por tanto, un factor decisivo para garantizar un acceso equitativo a una conectividad de calidad y segura en la comunidad.

3.1.2. Diagnóstico técnico de la infraestructura actual

Para complementar las encuestas, se llevó a cabo un diagnóstico de la infraestructura de telecomunicaciones existente en “El Morro”. Esta evaluación comprendió efectuar mediciones de campo, observación directa y entrevistas estructuradas con los proveedores de servicios locales con el propósito de registrar claramente el estado tecnológico actual, identificar fallos específicos y determinar las principales limitaciones a las que se enfrenta la comunidad.

1. Condiciones técnicas de la infraestructura basada en cobre (DSL): la infraestructura actual de líneas telefónicas fijas en “El Morro” se caracteriza por el uso de cables de cobre tradicionales, que llevan en funcionamiento aproximadamente dos décadas. Durante las inspecciones de campo directas de estos cables se confirmó un deterioro físico significativo, especialmente corrosión y daños visibles a lo largo de varios tramos de líneas de cable (ver Anexo 3). Las condiciones climáticas costeras, con una humedad y salinidad elevadas y lluvias torrenciales regulares, han acelerado el proceso de deterioro, lo que ha mermado considerablemente la calidad del servicio.

Los resultados de las pruebas de campo evaluaron la atenuación de la señal en varios puntos, concretamente a distancias de 1, 2 y más de 3 km del nodo de distribución central. Los resultados fueron claros: la infraestructura de cobre presentaba una grave degradación del rendimiento (ver Figura 3.3) a partir de los 2 km, provocando reducciones significativas en la calidad de la conexión.

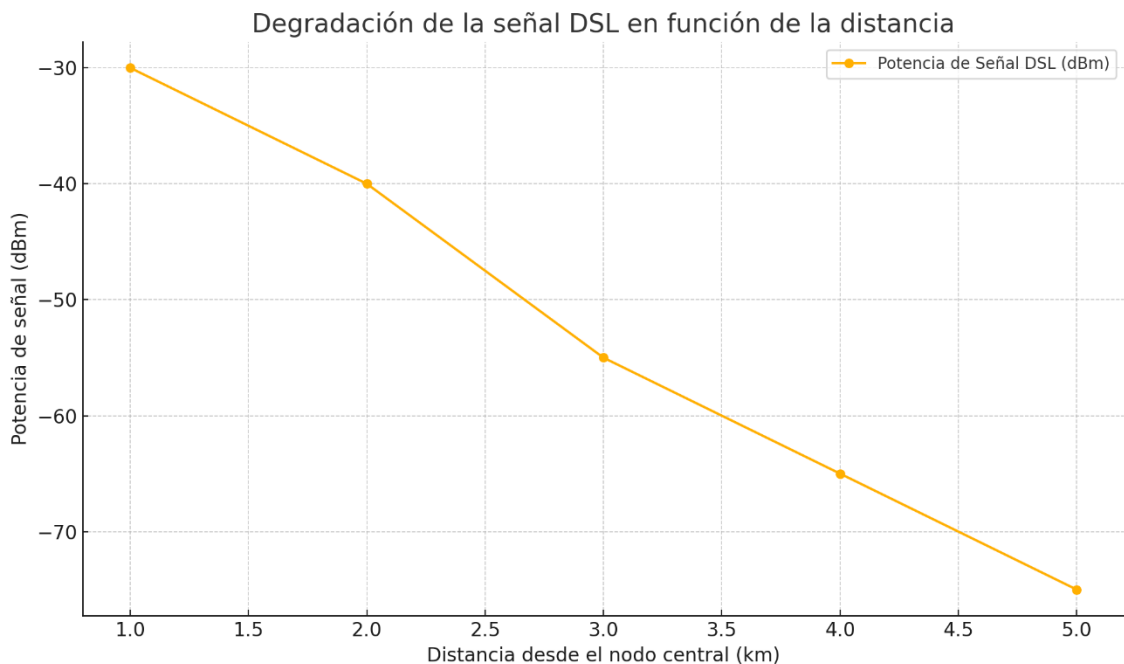


Figura 3. 3: Nivel de degradación en función de la distancia.

Elaborado por: Autor.

A más de 3 km, el promedio de pérdida de paquetes superaba el 20% durante las horas pico (entre 18.00 y 22.00 horas), tal como se muestra en la Figura 3.4. Tales niveles de pérdida de paquetes perjudican la capacidad de la red como proveedor de servicios de Internet estables y la vuelven inadecuada para aplicaciones modernas como el aprendizaje en línea, las videoconferencias o incluso la telemedicina.

Pérdida de paquetes (%) según distancia del nodo central (infraestructura DSL)

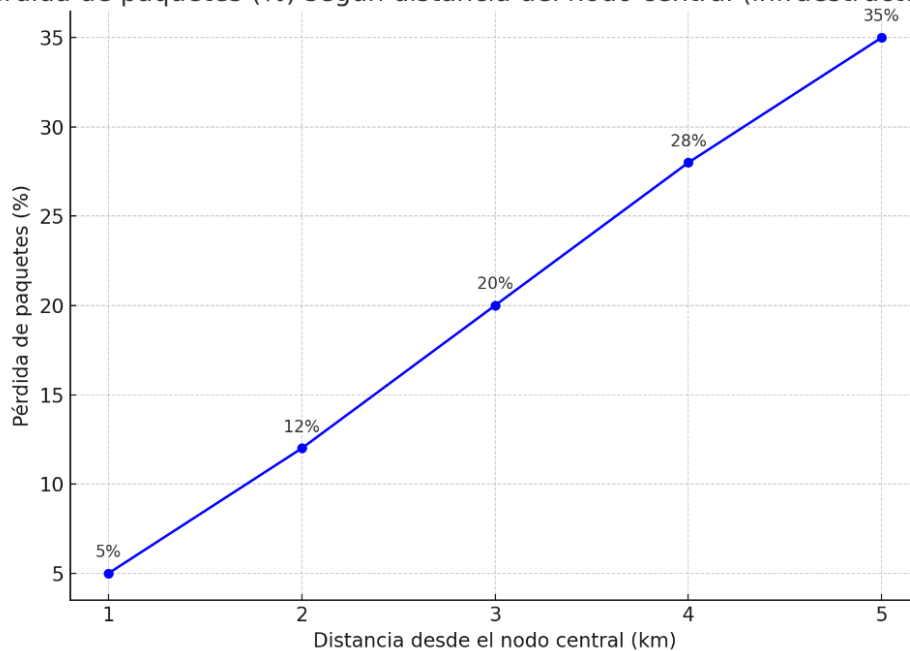


Figura 3. 4: Nivel de satisfacción de los usuarios con la conexión a Internet.

Elaborado por: Autor.

2. Condiciones técnicas de la infraestructura inalámbrica (3G/4G y WiFi comunitario): la infraestructura de red inalámbrica, muy utilizada en la zona, presentaba también fallos técnicos. El rendimiento, la latencia y la pérdida de paquetes fueron evaluados por medio de herramientas para diagnóstico de redes especializadas, tales como NetSpot, Wi-Fi Analyzer y Speedtest. Pese a su mayor cobertura, las redes inalámbricas mostraron variaciones de intensidad de señal y del rendimiento durante los picos de tráfico.

Por ejemplo, la tasa de descarga máxima en la zona rural, “El Morro” fue entre 3 y 7 Mbps, siendo velocidades muy pequeñas y que no llegan al valor mínimo de

banda ancha recomendada en la UIT. El análisis de latencia ha mostrado cambios importantes, en promedio 150 ms y hasta 350 ms. Por lo general, los tiempos de latencia (jitter) tienen variaciones de hasta 25 ms, por lo que los servicios de telecomunicación en tiempo real se ven aún más afectados. Los proveedores de red en entrevistas técnicas confirmaron estos resultados y señalaron que los fallos de rendimiento están relacionados con la saturación de la infraestructura inalámbrica, una capacidad de backhaul baja y los recursos de red limitados para la zona rural de El Morro.

Con el propósito de lograr una mayor claridad, se han comparado los resultados obtenidos con las normas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para la conectividad de banda ancha en zonas rurales, tal como se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3. 3: Comparativa técnica entre estándares de la UIT y mediciones en "El Morro"

Métrica	Estándares por la UIT	Promedios medidos en "El Morro"
Velocidad mínima de descarga	≥ 10 Mbps	~5 Mbps (DSL), 3-7 Mbps (Inalámbrico)
Latencia máxima recomendada	≤ 50 ms	~150 ms (Inalámbrico), >50 ms (DSL)
Pérdida de paquetes	<1%	~20% DSL (>3km), ~15% Inalámbrico
Jitter (variabilidad del retardo)	<10 ms	~25 ms
Fiabilidad de la infraestructura (disponibilidad de servicio)	$\geq 95\%$	Aproximadamente 80%

Elaborado por: Autor.

La Tabla 3.3 muestra diferencias importantes entre los estándares y las condiciones de conectividad, en las cuales se presentan métricas por debajo de lo recomendado, tales como, velocidad de descarga, latencia, pérdida de paquetes y Jitter. Esto dificulta que la población acceda a plataforma digitales, videollamadas y educación virtual. En el caso de

la latencia en redes WiFi, supera ampliamente los niveles aceptables y la disponibilidad del servicio apenas llega a una 80%. La implementación de una PON permitiría superar estas limitaciones, mejorando la velocidad, estabilidad y disponibilidad de servicio.

3.1.3. Identificación de brechas y limitaciones de conectividad

Según el diagnóstico y los resultados obtenidos en las encuestas de campo, fue posible identificar las brechas de conectividad y sus limitaciones en la infraestructura de telecomunicaciones con que actualmente dispone la comunidad de «El Morro». Entre las fallas identificadas se destaca un ancho de banda insuficiente, situación que afecta tanto la conectividad fija (DSL) como las soluciones inalámbricas.

La tecnología DSL, por su parte, presenta una velocidad de descarga de unos 5 Mbps, muy por debajo de los estándares mínimos de banda ancha recomendados por la UIT, a consecuencia del deterioro físico y antigüedad de los cables de cobre. Del mismo modo, la infraestructura inalámbrica, a pesar de su mayor cobertura, tiene una velocidad de descarga de entre 3 y 7 Mbps, que no alcanza para la prestación de servicios digitales actuales, tales como la transmisión multimedia, videoconferencias y aplicaciones de telemedicina.

Otra brecha de conectividad relevante se relaciona con la cobertura geográfica limitada e inestabilidad de la señal, que es notorio en redes inalámbricas. A pesar de que las tecnologías inalámbricas, entre ellas Wi-Fi comunitaria y redes celulares 3G/4G, dan cobertura a una mayor proporción de hogares. Los residentes señalan la inestabilidad de la señal en un 65% (véase la Figura 3.5) y la degradación del rendimiento del 70% en horas pico y condiciones meteorológicas adversas del 65% (véase la Figura 3.6).

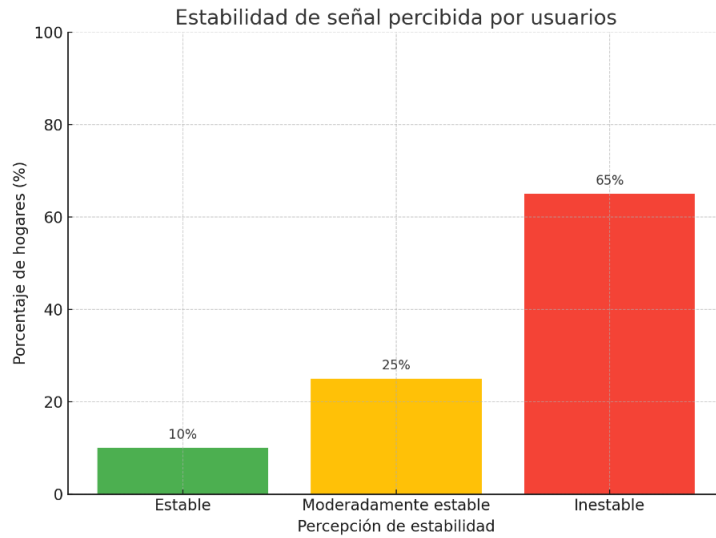


Figura 3. 5: Estabilidad de señal percibida por usuarios.

Elaborado por: Autor.

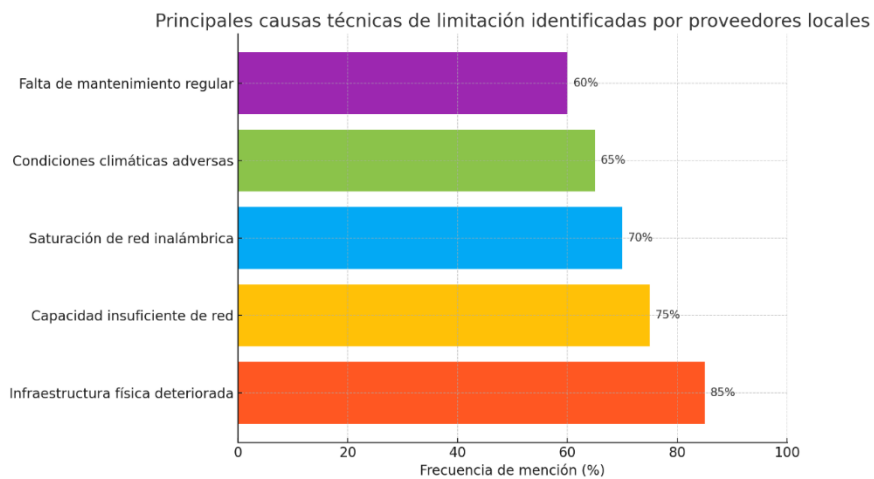


Figura 3. 6: Principales causas técnicas identificadas de limitación.

Elaborado por: Autor.

Este panorama supone que la conectividad inalámbrica se vea muy afectada a la hora de realizar actividades en Internet, lo que agudiza aún más las desigualdades digitales en la región.

3.1.4. Percepciones comunitarias sobre la conectividad

Además de los datos cuantitativos obtenidos mediante encuestas, las entrevistas semiestructuradas y los grupos focales permitieron comprender con mayor profundidad las experiencias y expectativas de los habitantes de El Morro respecto a la conectividad

digital. El análisis cualitativo de estas interacciones permitió identificar tres categorías principales:

- 1) **Educación:** los docentes manifestaron que la baja calidad del servicio limita gravemente el acceso a plataformas educativas y afecta el rendimiento escolar. Un profesor de primaria señaló: *“los problemas de conectividad afectan a la mayoría de los estudiantes cuando toman clases en línea. Los padres me comentan las desconexiones frecuentes y la lentitud de Internet. Esto afecta significativamente su rendimiento educativo”*. Estas percepciones coinciden con lo expuesto por Graves et al., (2021), quienes destacan que la falta de conectividad y las desigualdades tecnológicas en zonas rurales generan impactos negativos tanto en la educación como en la salud.
- 2) **Salud y servicios públicos:** los residentes y dirigentes comunitarios subrayaron que la falta de internet estable limita el acceso a servicios básicos y de telemedicina. Un morador del sector “Las Brisas” afirmó: *“dependemos de la conexión inalámbrica del punto de acceso Wi-Fi de la comunidad. En general funciona durante el día, pero al anochecer se ralentiza mucho y a veces se corta por completo”*. Este hallazgo se alinea con estudios como los de Rendon Schneir & Xiong, (2016), quienes señalan que la brecha digital en áreas rurales no solo responde a limitaciones técnicas, sino también a los altos costos de despliegue de redes que impiden garantizar una conectividad estable y universal.
- 3) **Economía y productividad:** los emprendedores locales resaltaron que la conectividad deficiente perjudica directamente a la actividad comercial. Un pequeño empresario del centro de El Morro expresó: *“nuestro negocio utiliza ADSL, pero la conexión es mala, sobre todo cuando llueve mucho. Esto afecta gravemente nuestra capacidad para procesar pedidos en línea o utilizar sistemas de pago digitales, y perdemos ventas regularmente por ello”*. Este resultado guarda similitud con lo reportado en Sundeen & Kalos, (2022), quienes señalan que las condiciones climáticas y la degradación de las infraestructuras de cobre representan un desafío recurrente para los emprendedores en áreas rurales de países en desarrollo.

En síntesis, los resultados cualitativos muestran que la comunidad percibe la conectividad no solo como un tema tecnológico, sino como un factor determinante en la educación, salud y economía local. Estos hallazgos complementan los datos técnicos y cuantitativos, y refuerzan la conclusión de que la brecha digital en El Morro responde tanto a fallas de infraestructura como a carencias en la capacidad de los servicios para satisfacer necesidades sociales básicas. La comparación con investigaciones en otros escenarios rurales evidencia que las dificultades de El Morro no son aisladas, sino que forman parte de un patrón estructural más amplio en zonas rurales de América Latina y Europa.

3.2. Propuesta de Diseño de la Red Óptica Pasiva (PON) para «El Morro»

Con base a las limitaciones técnicas y brechas de conectividad identificadas en las secciones anteriores, se propuso una solución para mejorar la conectividad en la comunidad rural de “El Morro” mediante la implementación de una Red Óptica Pasiva con capacidad de Gigabit (GPON). Se opta por GPON debido a su capacidad de proporcionar un gran ancho de banda, disponibilidad, mantenimiento de bajo coste y por su escalabilidad futura. En esta sección se describen las especificaciones técnicas, consideraciones de diseño y simulación de la infraestructura GPON propuesta.

3.2.1. Caracterización técnica y validación de GPON

GPON representa una solución robusta que permite mejorar tanto el ancho de banda como la capacidad de transmisión de datos de la tecnología DSL y de las tecnologías inalámbricas existentes. Además, la ventaja principal de GPON consiste en su capacidad para ofrecer velocidades de transmisión más elevadas (normalmente 2.5 Gbps en sentido descendente y 1.25 Gbps en sentido ascendente) en trayectos largos sin degradación de la señal. Por esta razón, es idónea para hacer frente a las necesidades de conectividad de las comunidades rurales como “El Morro”.

La infraestructura GPON, en comparación con las de cobre tradicionales, utiliza cables de fibra óptica resistentes a las interferencias electromagnéticas, corrosión y condiciones climáticas en entornos costeros. Además, GPON necesita un equipamiento activo reducido en sus trayectos de red, reduciendo así los costes de mantenimiento. De este

modo, se optimiza la disponibilidad de la red, se garantiza la continuidad del servicio y se mejora la satisfacción de los usuarios.

El diseño de la red GPON no implica un reemplazo total de la infraestructura existente, sino una integración progresiva con los recursos ya instalados en El Morro. Se propone aprovechar los postes de distribución eléctrica y las canalizaciones subterráneas existentes, donde actualmente se encuentran los cables de cobre, para el tendido de la nueva fibra óptica. Asimismo, los espacios físicos de las centrales comunitarias utilizadas por los proveedores locales servirían como emplazamientos para los OLTs y splitters. De este modo, la migración hacia GPON puede realizarse con una inversión más eficiente, reutilizando infraestructuras ya disponibles y reduciendo los costos de despliegue

3.2.2. Modelado de GPON

El modelo de red GPON que se propone para «El Morro» se basa en una arquitectura de red óptica pasiva estándar, que se muestra en la Figura 3.7, en la cual se muestran los componentes principales y sus interacciones. En el esquemático de la red GPON, el diseño consta de los siguientes componentes:

1. OLT
2. Splitters ópticos
3. ONUs

La transferencia de datos se realiza siempre entre la OLT y las distintas ONUs a través de divisores (splitters) ópticos que realiza la multiplexación y demultiplexación de las señales. La OLT y la ONU son partes activas de la red PON, ya que realizan la conversión electro-óptica y opto-eléctrica de la señal. La OLT se encuentra en la oficina central (Central Office, CO) del proveedor de servicios de internet (ISP). Representa la interfaz entre la red pública y la red de acceso y también controla el flujo bidireccional de información a través de la ODN. La OLT debe ser capaz de soportar transmisiones a una distancia de 20 km.

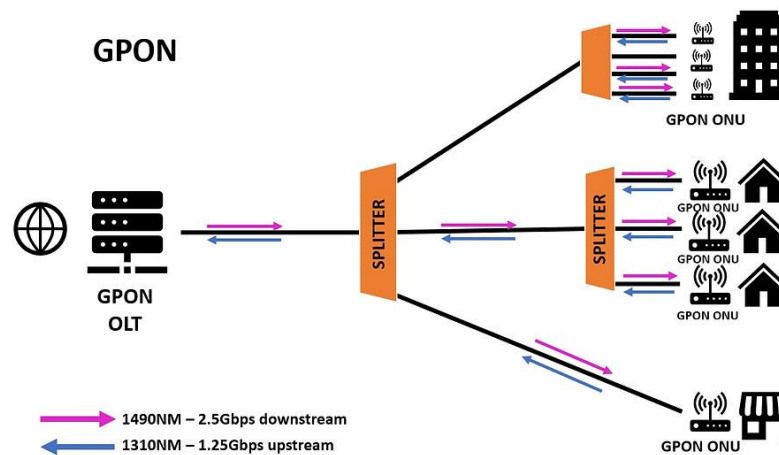


Figura 3. 7: Principales causas técnicas identificadas de limitación.
Elaborado por: Autor.

La función de la OLT, en la dirección del enlace descendente (de la OLT a los usuarios), es transmitir datos, voz y vídeo desde la red pública, a través de una fibra óptica monomodo, a las ONUs. La OLT también realiza la conversión electroóptica en el sentido del enlace descendente. En la dirección de enlace ascendente (de los usuarios a la OLT), por su parte, la OLT se encarga de recibir y realizar la conversión opto-eléctrica, así como de distribuir el tráfico procedente de los usuarios.

En la ODN, se puede transmitir de forma simultánea servicios a través de la misma fibra óptica con longitudes de onda diferentes en cada sentido. En el caso de las transmisiones descendentes, PON utiliza 1490 nm de longitud de onda para voz y datos combinados, y 1550 nm para contenidos de vídeo. Por el contrario, PON utiliza la longitud de onda de 1310 nm para la transmisión de voz y datos. En el enlace ascendente, los servicios de vídeo no están disponibles, puesto que no hay datos de vídeo que se envíen en esta dirección.

El splitter es un componente pasivo y bidireccional con una única entrada y múltiples salidas. Por lo general, la potencia óptica de las señales que se envían a los usuarios finales se divide uniformemente en la proporción 1:N (normalmente 1:32), donde N es la cantidad de dispositivos terminales que están conectados al divisor óptico.

Los ONU se encuentran en las instalaciones del usuario y sirven de interfaz con los usuarios finales. Los ONU se conectan a la OLT a través de un divisor óptico. La ONU

realiza la conversión opto-eléctrica en el sentido del enlace descendente, la conversión electroóptica en el sentido del enlace ascendente y el filtrado de paquetes basado en la dirección de destino de la cabecera del paquete. La ODN consta de divisores ópticos pasivos y fibras ópticas. La ODN consta de divisores ópticos pasivos y fibras ópticas.

Los resultados de simulación son coherentes con hallazgos de estudios previos en entornos rurales. Por ejemplo, Graves et al., (2021) destacan cómo la falta de BW y la alta latencia en zonas rurales limitan el acceso a educación y salud, lo que coincide con las limitaciones observadas en El Morro bajo tecnologías DSL e inalámbricas. De forma similar, Sundeen & Kalos, (2022) reportan que, incluso en zonas rurales de EE.UU., la infraestructura inalámbrica no garantiza servicios estables, reforzando la necesidad de migrar a fibra óptica. Finalmente, Rendon Schneir & Xiong, (2016) realizaron un estudio de costos que evidencia la viabilidad del despliegue de GPON en zonas rurales mediante infraestructuras compartidas, lo que guarda relación directa con la presente propuesta.

3.2.3. Metodología de simulación e implementación de algoritmos

Para validar rigurosamente el rendimiento de la red GPON propuesta y establecer un análisis comparativo significativo frente a tecnologías alternativas (DSL y soluciones inalámbricas terrestres como WiFi/3G/4G), se diseñó meticulosamente una simulación computacional. El proceso de simulación se definió utilizando un enfoque de pseudocódigo estructurado, que se muestra explícitamente en el Algoritmo 1.

El pseudocódigo del Algoritmo 1 muestra el método adoptado para simular y evaluar el rendimiento de la red utilizando tres tecnologías de comunicación distintas: GPON, DSL e inalámbrica (WiFi/3G/4G). Este algoritmo evalúa el rendimiento de estas tecnologías en función de los parámetros, tales como, velocidad de descarga, velocidad de subida, latencia, pérdida de paquetes y fluctuación de fase, en función de la distancia a la que se encuentre el nodo central de distribución, dentro de un rango realista de 1 a 20 km.

En el desarrollo de la simulación del rendimiento de GPON, se utilizó la biblioteca OpticommPy (Da Silva & Herbster, 2024), una herramienta de código abierto desarrollado en Python, diseñada para simulación y análisis de redes de comunicaciones ópticas. Esta biblioteca permite modelar escenarios reales, así como parámetros velocidad

de descarga, latencia, jitter y pérdida de paquetes. Su uso permitió validar la factibilidad técnica del diseño propuesto para la parroquia rural El Morro basado en el algoritmo 1.

Algorithm 1 Algoritmo de Simulación del Rendimiento de la Red GPON

```

procedure Simulate-GPON(Usuarios, Distancia, Tecnologias)

1: RangoDistancia  $\leftarrow$  [1, 20] {Distancia en km}
2: Tecnologias  $\leftarrow$  {GPON, DSL, WiFi/3G/4G}
3: for tec  $\in$  Tecnologias do
4:   Establecer Parámetros (down, up, latency, loss, jitter)
5:   if tec = GPON then
6:     down  $\leftarrow$  2500 Mbps; up  $\leftarrow$  1250 Mbps
7:     latency  $\leftarrow$  5 ms; loss  $\leftarrow$  0.01%; jitter  $\leftarrow$  1 ms
8:   else if tec = DSL then
9:     down  $\leftarrow$  5 Mbps; up  $\leftarrow$  1 Mbps
10:    latency  $\leftarrow$  50 ms; loss  $\leftarrow$  20%; jitter  $\leftarrow$  20 ms
11:   else if tec = WiFi/3G/4G then
12:     down  $\leftarrow$  7 Mbps; up  $\leftarrow$  2 Mbps
13:     latency  $\leftarrow$  150 ms; loss  $\leftarrow$  15%; jitter  $\leftarrow$  25 ms
14:   end if
15: end for
16: Inicializar MetricasRendimiento  $\leftarrow$  []
17: for d  $\in$  RangoDistancia do
18:   for tec  $\in$  Tecnologias do
19:     if tec = GPON and d  $\leq$  20 km then
20:       Velocidad[d]  $\leftarrow$  down
21:     else if tec = DSL then
22:       if d  $\leq$  2 km then
23:         Velocidad[d]  $\leftarrow$  down
24:       else
25:         Velocidad[d]  $\leftarrow$  max(0, down - 0.8  $\times$  (d - 2))
26:       end if
27:     else if tec = WiFi/3G/4G then
28:       if d  $\leq$  10 km then
29:         Velocidad[d]  $\leftarrow$  down - 0.25  $\times$  d
30:       else
31:         Velocidad[d]  $\leftarrow$  max(0, down - 0.5  $\times$  (d - 10))
32:       end if
33:     end if
34:     MetricasRendimiento  $\leftarrow$  Guardar(tec, d, Velocidad[d])
35:   end for
36: end for
37: Generar Gráficos Comparativos(MetricasRendimiento)
38: return MetricasRendimiento

```

Primero, el algoritmo establece los parámetros en función de la tecnología evaluada. En el caso de GPON, los parámetros de simulación reflejan sus capacidades reconocidas, asignando una velocidad máxima descendente de 2.50 Gbps, así como una velocidad ascendente de 1.25 Gbps, latencia de 5 ms, pérdida de paquetes insignificante (0,01%) y un jitter mínimo (1 ms). Estos parámetros representan métricas de rendimiento óptimas y realistas alcanzables con la tecnología GPON.

En cambio, los parámetros de la tecnología DSL presentan valores de rendimiento inferiores: una velocidad máxima descendente de 5 Mbps, con una velocidad ascendente de 1 Mbps, un retardo mucho más alto, por ejemplo, de 50 ms, y tasas de pérdida de paquetes considerables (en torno al 20%), con un jitter superior (aproximadamente 20 ms) a GPON. Estos valores reflejan el rendimiento en infraestructuras de cobre envejecidas, como las que actualmente dan servicio a “El Morro”.

Los parámetros establecidos en el caso de los enlaces inalámbricos para WiFi/3G/4G son ligeramente superiores a los de tecnología DSL, aunque muy inferiores a GPON. Las tecnologías inalámbricas presentan velocidades de transmisión descendente de 7 Mbps y ascendente de 2 Mbps, retardo de 150 ms, pérdida de paquetes del 15% y fluctuación de 25 ms. Estas métricas reflejan las limitaciones reales a las que se enfrentan las tecnologías de backhaul inalámbricas, especialmente en contextos rurales donde la calidad de la señal disminuye rápidamente al aumentar la distancia.

La reducción de latencia simulada en la red GPON (5 ms frente a los 150 ms de las redes inalámbricas) implica una mejora sustancial para la prestación de servicios digitales. En el ámbito educativo, esto permitiría a los estudiantes participar en clases virtuales sin interrupciones y acceder a plataformas interactivas con tiempos de respuesta en tiempo real. En el sector salud, la baja pérdida de paquetes (0,01% frente al 20% de DSL) favorecería la implementación de servicios de telemedicina, garantizando videollamadas estables entre pacientes locales y especialistas en hospitales urbanos. Del mismo modo, los pequeños negocios locales podrían utilizar sistemas de pago en línea sin riesgo de desconexiones, mejorando la competitividad de la comunidad en actividades productivas

3.3. Análisis detallado de resultados obtenidos mediante simulación computacional

Las simulaciones basadas en Python mostraron resultados precisos sobre el rendimiento de la red GPON frente a tecnologías tradicionales como DSL y WiFi/3G/4G, tanto en términos de velocidad como de latencia, paquetes perdidos y métricas de calidad, tales como la tasa de error de bits (BER) y el factor de calidad (Q-Factor) de la señal. Los resultados confirman que, aunque DSL e inalámbricas logran mantener cierto nivel de conectividad en distancias cortas, su degradación progresiva las hace inviables para

sostener servicios digitales avanzados en zonas rurales. En contraste, GPON no solo garantiza altas velocidades constantes, sino que también minimiza la pérdida de paquetes, lo cual implica una mayor confiabilidad del servicio y un soporte real para aplicaciones críticas en tiempo real. Este contraste demuestra que, si la comunidad sigue dependiendo de DSL o WiFi/3G/4G, la brecha digital con entornos urbanos no hará más que ampliarse.

3.3.1. Análisis comparativo de velocidad vs. distancia

En la Figura 3.8 se puede ver la tendencia de la velocidad de descarga con respecto a la distancia entre el nodo principal y las tecnologías evaluadas. GPON consigue siempre velocidades de descarga muy altas (en torno a 2.5 Gbps), inclusive a distancias extremas (20 km). En cambio, la tecnología DSL experimenta una reducción rápida y considerable de su rendimiento, pasando de 50 Mbps al principio cercanos al nodo hasta llegar a valores cercanos a los 10 Mbps en distancias intermedias (8-10 km). Finalmente, la tecnología WiFi/3G/4G, aunque al principio resultaba prometedora por su velocidad de 100 Mbps, registra un decrecimiento más pronunciado, hasta llegar a velocidades mínimas una vez recorridos los primeros kilómetros.

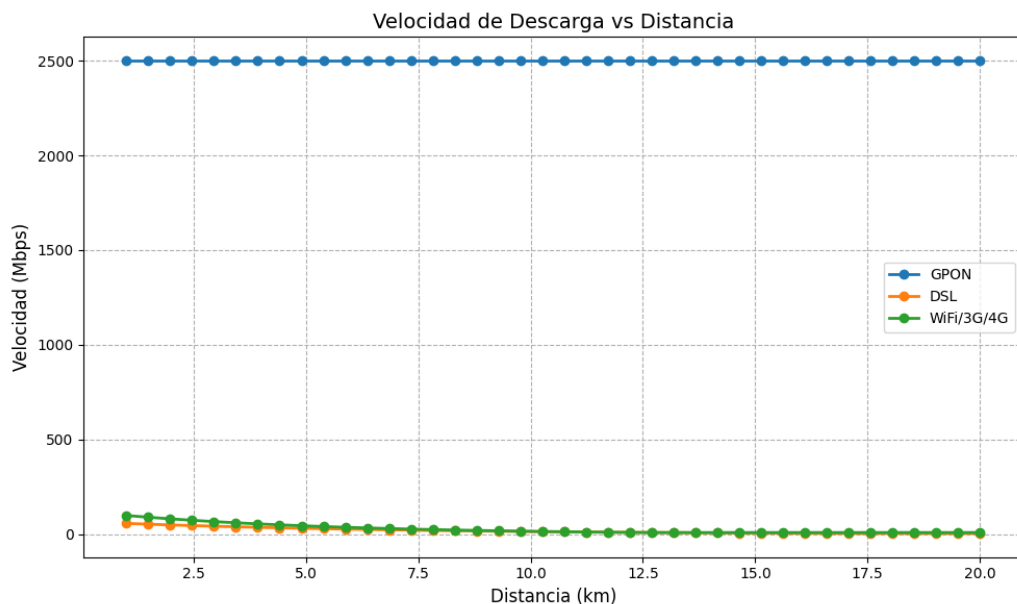


Figura 3. 8: Resultado obtenido de la velocidad de descarga vs. distancia del enlace.
Elaborado por: Autor.

Estos resultados indican claramente que GPON es la tecnología que garantiza mayor estabilidad en la entrega de velocidades elevadas en toda la zona rural evaluada.

3.3.2. Análisis comparativo de latencia y pérdida de paquetes

En las Figuras 3.9 y 3.10 se observan la latencia y la pérdida de paquetes promedio, respectivamente. La latencia de la tecnología GPON es significativamente menor (aproximadamente 2 ms), lo que resulta óptimo para aplicaciones en tiempo real como la educación en línea o incluso los servicios de medicina por Internet. Por el contrario, el DSL presentó una latencia promedio de 20 ms, en tanto que las tecnologías inalámbricas presentaban latencias más altas, cercanas a los 30 ms

En cuanto a la pérdida de paquetes, GPON ha mostrado niveles muy bajos (por debajo del 0,001%), lo que demuestra su superioridad en comparación con DSL (en torno al 2%) y, sobre todo, frente a WiFi/3G/4G, cuya tasa de pérdida es mucho mayor (alrededor del 5%). Por tanto, GPON presenta un rendimiento técnico superior en términos de confiabilidad y seguridad del servicio.

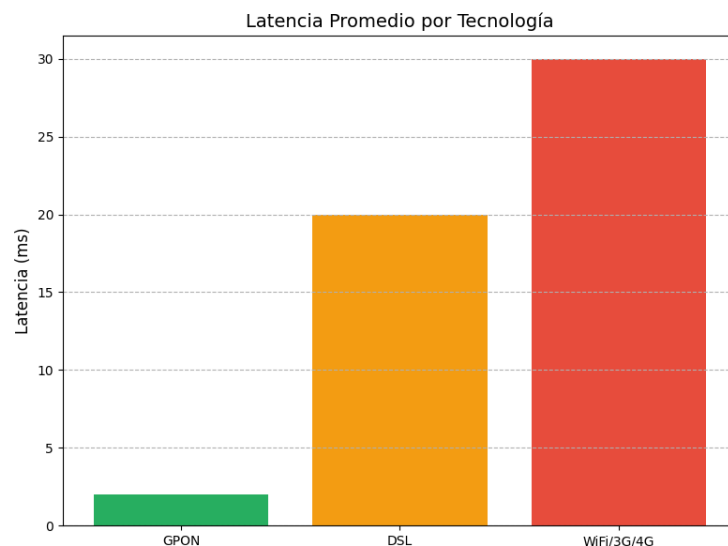


Figura 3. 9: Resultado obtenido de la latencia promedio para cada tecnología.

Elaborado por: Autor.

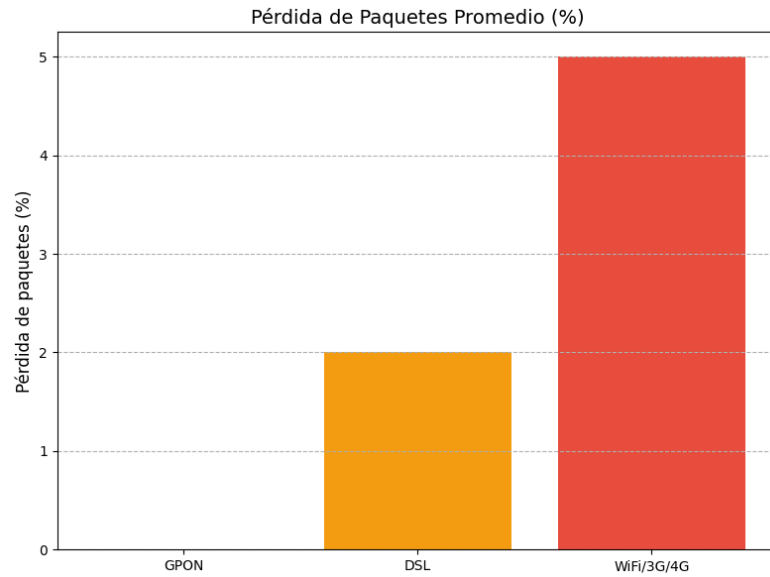


Figura 3. 10: Resultado obtenido de la velocidad de descarga vs. distancia del enlace.
Elaborado por: Autor.

La reducción de latencia observada en GPON (<5 ms) es particularmente relevante para la implementación de telemedicina, ya que garantiza videollamadas sin cortes entre médicos de Guayaquil y pacientes de El Morro. Del mismo modo, la estabilidad en la velocidad de descarga (>2.5 Gbps) permite que las escuelas rurales accedan a plataformas educativas virtuales sin riesgo de desconexión, lo que fortalece la inclusión digital de los estudiantes. En el ámbito económico, la baja tasa de errores y mínima pérdida de paquetes ofrece a los emprendedores locales la posibilidad de usar sistemas de pago en línea, comercio electrónico y servicios en la nube, ampliando sus oportunidades de negocio. Por tanto, los resultados técnicos de GPON trascienden los parámetros de red y se traducen en mejoras tangibles de calidad de vida.

3.3.3. BER vs SNR y Q-Factor vs SNR

En las Figuras 3.11 y 3.12, se analizan detalladamente las métricas avanzadas BER vs SNR y Q-Factor vs SNR. La curva BER vs SNR evidencia cómo GPON logra tasas de errores extremadamente bajas, hasta 10^{-21} para valores moderados de SNR por lo general mayor a 15 dB, mientras que DSL y las tecnologías inalámbricas muestran tasas de errores considerablemente mayores 10^{-12} para DSL y 10^{-6} para soluciones inalámbricas.

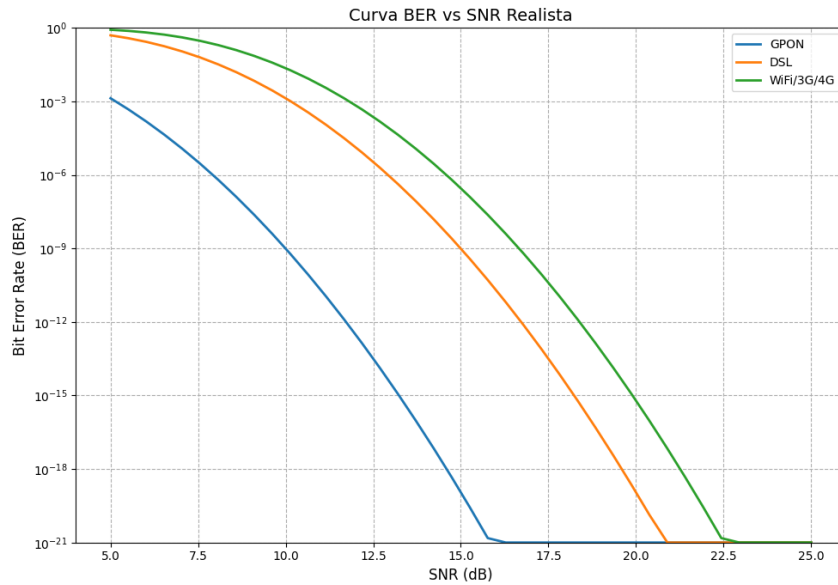


Figura 3. 11: Resultado obtenido de la BER vs. SNR.
Elaborado por: Autor.

El análisis del Q-Factor respalda estos hallazgos, mostrando que GPON mantiene consistentemente valores altos (cerca de o superiores a 9), garantizando mayor calidad en la transmisión de datos, en comparación con DSL y tecnologías inalámbricas que registraron valores entre 5 y 7.

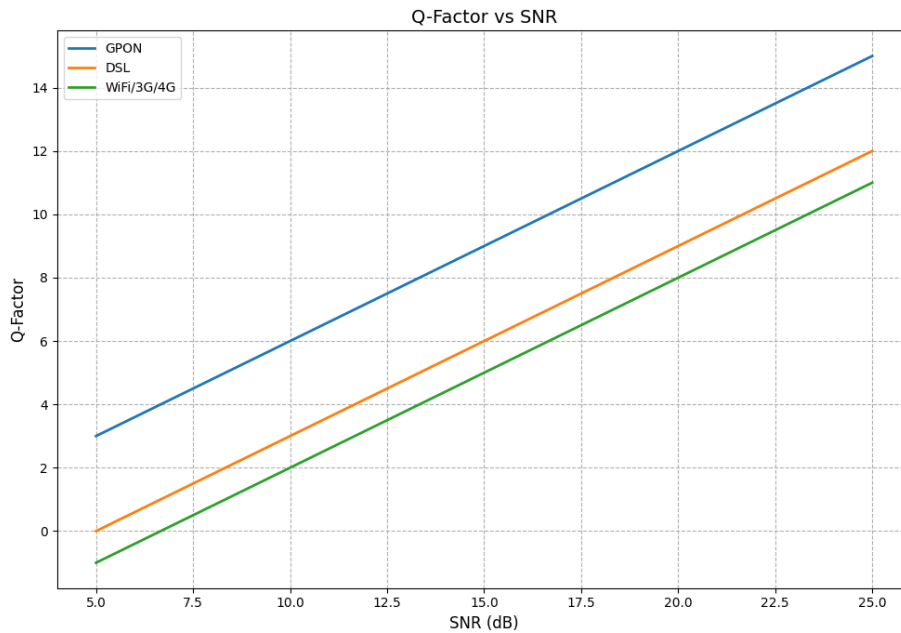


Figura 3. 12: Resultado obtenido del Factor Q vs. SNR.
Elaborado por: Autor.

Estos hallazgos son consistentes con estudios previos en contextos rurales. Graves et al. (2021) señalan que la limitada velocidad y alta latencia en zonas rurales genera desventajas en salud y educación, lo que coincide con el bajo desempeño de DSL e inalámbricas encontrado en El Morro. Asimismo, Sundeen y Kalos (2022) destacan que incluso en comunidades rurales de EE.UU. la dependencia de redes inalámbricas genera inequidad digital, lo cual refuerza la pertinencia de migrar hacia GPON. Finalmente, Rendón Schneir y Xiong (2016) demuestran que el despliegue de GPON en áreas rurales es costo-eficiente si se aprovecha infraestructura existente, alineándose con la propuesta de este estudio para El Morro

3.4. Análisis técnico y económico del proyecto

Después de realizar un análisis de la red GPON, resulta necesario desarrollar también una evaluación técnico-económica del proyecto, centrada en el presupuesto óptico, el coste y la viabilidad de la infraestructura.

3.4.1. Cálculo del presupuesto óptico

Se procedió a realizar el cálculo del presupuesto de potencia óptica con el fin de que la implementación de GPON resulte viable desde el punto de vista técnico. En él, se analizaron las pérdidas ópticas desde la OLT hasta las ONU distribuidas en la comunidad. En la Tabla 3.4 se presenta el resumen de las pérdidas ópticas previstas, y los resultados demuestran un margen aceptable de unos 5 dB, que supera con creces los requisitos mínimos para garantizar un funcionamiento óptimo de la ONU, lo que confirma su viabilidad técnica.

Tabla 3. 4: Comparativa técnica entre estándares de la UIT y mediciones en "El Morro"

Componentes	Pérdidas (dB)
Potencia de transmisión del OLT	+3 dBm
Atenuación de la fibra (20 km a 0,2 dB/km)	4 dB
Pérdidas del divisor óptico (1:32)	17 dB

Pérdidas por conector (4 conectores × 0,5 dB)	2 dB
Margen de seguridad	3 dB
Potencia recibida por la ONU	-23 dBm
Sensibilidad de la ONU (típica)	-28 dBm
Margen de potencia disponible	5 dB (aceptable)

Elaborado por: Autor.

La experiencia de despliegue de GPON en comunidades rurales de Colombia (Rendon Schneir & Xiong, 2016) mostró que, mediante el uso de infraestructura existente y esquemas de cooperación público-privada, se logró reducir en un 30% los costos de instalación frente a soluciones inalámbricas. De forma similar, en zonas rurales de España, Graves et al., (2021) documentaron que el reemplazo de DSL por fibra óptica permitió triplicar la velocidad media disponible y reducir la latencia en más de un 80%, con impactos directos en la digitalización educativa. Estas experiencias refuerzan la pertinencia del diseño propuesto en El Morro, mostrando que la inversión inicial se ve compensada en contextos rurales por la durabilidad y estabilidad de la fibra

3.4.2. Análisis de factibilidad económica

Se efectuó un análisis económico para estimar la factibilidad financiera del despliegue de la solución GPON. Esta evaluación abarca los costes de equipamiento, mano de obra, instalación y logística. Los costes estimados se resumen claramente en la Tabla 3.4.

Tabla 3. 5: Coste estimado del proyecto.

Componentes del proyecto	Precio (USD)
OLT	5,000
ONUs (estimado 100 unidades)	7,000 (70 USD/unidad)
Splitters ópticos (4 unidades, 1:32)	800 (200 USD/unidad)
Fibra Monomodo (20 km)	6,000 (300 USD/km)
Materiales de instalación complementarios	1,500

Instalación y mano de obra especializada	4,000
Gastos administrativos y logísticos	2,000
Coste total estimado del proyecto	26,300 USD

Elaborado por: Autor.

Este presupuesto estimativo permite tener una perspectiva del coste inicial de la inversión. Aunque el coste inicial puede resultar significativo, si se compara con las infraestructuras tradicionales DSL e inalámbricas basadas en cobre, hay que tener en cuenta que el rendimiento de GPON a largo plazo compensa de manera significativa la inversión inicial. Las ventajas principales son los costes operativos y de mantenimiento mínimos, así como una mayor vida útil de la infraestructura, entre 25 y 30 años, además de una reducción de los cortes de servicio recurrentes que son comunes entre los sistemas basados en cobre o inalámbricos.

Más allá de los beneficios técnicos y económicos, la factibilidad de GPON tiene implicaciones sociales directas. En educación, una infraestructura con alta capacidad y baja latencia permitirá que las escuelas de El Morro accedan a plataformas de aprendizaje en línea y clases en vivo sin interrupciones, reduciendo la brecha educativa con zonas urbanas. En salud, la conectividad estable y la mínima pérdida de paquetes son requisitos para implementar programas de telemedicina, que faciliten la atención médica remota desde hospitales de Guayaquil. En el ámbito económico, GPON permitirá que pequeños negocios y emprendedores locales utilicen comercio electrónico, pagos digitales y servicios en la nube, ampliando sus oportunidades de mercado. Finalmente, a nivel comunitario, una red estable habilita el funcionamiento digital del GAD parroquial y el acceso ciudadano a trámites electrónicos, fortaleciendo la inclusión digital y la eficiencia administrativa

En definitiva, GPON se presenta como una infraestructura económicamente factible y con visión de futuro para El Morro, que no sólo proporcionará ventajas tecnológicas inmediatas, sino también importantes mejoras socioeconómicas sostenibles a largo plazo. La cantidad de ONUs en la que se puede proyectar 85 ONUs para atención directa a hogares, y el resto para ser utilizado en puntos estratégicos de uso comunitario, tales

como, escuelas, centros de salud, plazas o edificio del GAD El Morro. En consecuencia, el coste financiero de la infraestructura GPON puede ser justificado por sus beneficios en términos de estabilidad, rendimiento y bienestar de la comunidad.

CONCLUSIONES

- ❖ Los servicios de telecomunicaciones en El Morro son deficientes y su ancho de banda es limitado, los servicios son interrumpidos regularmente y la comunidad se muestra muy insatisfecha. Este hecho evidencia una brecha digital significativa que limita el acceso a la educación, el desarrollo económico y el bienestar de la comunidad.
- ❖ Se ha demostrado a través de los resultados obtenidos en las simulaciones que GPON es una tecnología que garantiza una mayor conectividad, con velocidades de transferencia de datos más elevadas, latencia más baja y mayor robustez. Además, los resultados de las simulaciones han permitido validar técnicamente que GPON satisface las necesidades de transmisión de datos de esta comunidad.
- ❖ El despliegue de GPON se ha considerado técnica y financieramente viable en «El Morro». Sin embargo, los beneficios del despliegue y el rendimiento a largo plazo lo convierten en una solución viable y económicamente sostenible, con capacidad de crecimiento en el futuro.
- ❖ La conectividad, de acuerdo con los resultados de las encuestas entre la población rural y el análisis de los resultados obtenidos, permitirá un mayor acceso a la educación en línea, la atención de salud remota (telemedicina) y otros servicios. La conectividad se espera que impulse el desarrollo socioeconómico, reduciendo el retraso rural y promoviendo la inclusión digital.

RECOMENDACIONES

- ❖ Para la infraestructura GPON es conveniente utilizar un método de despliegue por fases, primero en las áreas más importantes de la comunidad, como escuelas, centros de salud y edificios administrativos. De este modo se optimizaría la asignación de recursos y se obtendrían algunos beneficios tangibles inmediatos, con lo que la comunidad se mostraría más dispuesta a aceptar y apoyar el proyecto.
- ❖ Mejorar las relaciones entre las entidades gubernamentales, los municipios y el sector privado con la finalidad de lograr recursos financieros y apoyo técnico. La participación de varias entidades interesadas permitirá minimizar los problemas financieros y garantizar la sostenibilidad del proyecto compartiendo responsabilidades e inversiones.
- ❖ Elaborar programas de alfabetización digital destinados a los habitantes de El Morro. El despliegue de la infraestructura de comunicaciones también debería ir respaldado de programas educativos para aprovechar al máximo las ventajas de una mejor conectividad y garantizar que la comunidad utilice los servicios y las oportunidades digitales de forma adecuada.

REFERENCIAS

- Abbas, H. S., & Gregory, M. A. (2016). The next generation of passive optical networks: A review. *Journal of Network and Computer Applications*, 67, 53–74. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.015>
- Abdellaoui, Z., Dieudonne, Y., & Aleya, A. (2021). Design, implementation and evaluation of a Fiber To The Home (FTTH) access network based on a Giga Passive Optical Network GPON. *Array*, 10, 100058. <https://doi.org/10.1016/j.array.2021.100058>
- Aggarwal, S., Mehrotra, D., Garg, A., & Thakur, S. (2024). Challenges and Constraints of 5G: Transformation and Prospects for 6G Era. *2024 1st International Conference on Advanced Computing and Emerging Technologies (ACET)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ACET61898.2024.10730012>
- Andreoli-Fang, J., Chapman, J. T., Liu, T., & Poltz, D. (2019). *Blueprint for Mobile Xhaul over DOCSIS: How Low Latency Xhaul (LLX) and Other Technologies Make DOCSIS an Ideal Solution for Mobile Xhaul*. <https://www.nctatechnicalpapers.com/Paper/2019/2019-blueprint-for-mobile-xhaul-over-docsis>
- Bacis V., I. B., Schiopu, P., & Marghescu, C. (2015). *Modern techniques and technologies for unbundled access in the local loop* (I. Cristea, M. Vladescu, & R. Tamas, Eds.; p. 92580E). <https://doi.org/10.1117/12.2070839>
- Bakarman, H. A., Alsaqaf, A., Ba'afiah, M., Baqhoom, F., & Baraja, M. (2021). Planning, Design and Simulation of a Network Access Based on FTTH-EPON for Hadhramout University. *Journal of Physics: Conference Series*, 1962(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1962/1/012004>

- Białoń, P. (2008). Problems of Broadband in Rural Areas in Light of the BReATH Project Experiences. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 4, 97–103. <https://doi.org/10.26636/jtit.2008.4.905>
- Bingham, J. A. C. (2000). *ADSL, VDSL, and multicarrier modulation*. Wiley.
- Boujnoui, A., Taramit, H., Orozco-Barbosa, L., & Haqiq, A. (2024). An ACK-Less Broadcast Access Mechanism for the IEEE 802.11bc Enhanced Broadcast Service. *2024 13th IFIP/IEEE International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN)*, 1–7. <https://doi.org/10.23919/PEMWN62766.2024.10737621>
- Caiza, M. J., Proaño, C. E., & Jiménez, M. S. (2015). Diseño de una Red para Brindar Acceso a Internet a las Instituciones Educativas del Cantón Pujilí. *Revista Politécnica*, 35(2). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688773651005>
- Cardozo T., D. F. (2023). *Diseño e implementación de una red Gpon de fibra óptica para la zona rural en la Vereda el salitre de la Calera Cundinamarca* [Tesis, Universitaria Agustiniiana]. <http://repositorio.uniagustiniana.edu.co/handle/123456789/2214>
- Cepeda Cabeza, F. J. (2018). *Técnicas avanzadas de comunicaciones radio para 5G con MIMO masivo* [Trabajo Finde Grado, Universidad Carlos III de Madrid]. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/29572>
- Chela T., A. M. (2023). *Diseño e implementación de una red inalámbrica para proveer servicio de telecomunicaciones en las Cochas, energizado con paneles solares*. [bachelorThesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10661>
- Chen, X., Amin, A. A., Li, A., & Shieh, W. (2013). Multicarrier Optical Transmission. En *Optical Fiber Telecommunications* (pp. 337–379). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396960-6.00008-0>

- Chica P., G. A., Torres S., J. E., Macías M., G., & Montenegro N., C. (2021). *La Fibra Óptica el gran integrador para el desarrollo de la sociedad de la información en América Latina*. Universidad Santo Tomas. <https://doi.org/10.15332/dt.inv.2021.02151>
- Chu, Y., Grace, D., Shackleton, J., White, A., Hunter, D., & Ahmadi, H. (2024). Rapidly Deployable Intelligent 5G Aerial Neutral Host Networks: An O-RAN-Based Approach. *IEEE Network*, 38(6), 353–360. <https://doi.org/10.1109/MNET.2024.3379841>
- Cruz O., V. M., Ubillús G., J. P., González P., J. C., & Peña C., M. M.-. (2023). Niveles Exposición a Campos Electromagnéticos de los Sistemas Wi-Fi medidos en el Mundo y Latinoamérica. Revisión. *Perfiles de Ingeniería*, 19(20), Article 20. <https://doi.org/10.31381/perfilesingenieria.v19i20.6315>
- Da Silva, E. P., & Herbster, A. F. (2024). OptiCommPy: Open-source Simulation of Fiber Optic Communications with Python. *Journal of Open Source Software*, 9(98), 6600. <https://doi.org/10.21105/joss.06600>
- Durán B., R. J., Anzola R., C., Merayo, N., De Miguel, I., Aguado, J. C., Pérez P., M. E., Parra D., J., & Plaza H., M. (2022). Propuesta de política público-privada para el despliegue de la banda ancha en entornos rurales de Castilla y León. *Proceedings of the IV Workshop on Disruptive Information and Communication Technologies for Innovation and Digital Transformation: 18th June 2021 Online*, 117–130. <https://doi.org/10.14201/0aq0315117130>
- Eze, B. (2025). Cable as the key: Unlocking affordable internet access through TV Networks. *European International Journal of Multidisciplinary Research and Management Studies*, 5(01), Article 01.
- Fischer, U., Haupt, M., & Kußmann, P. (2021). Optical Inhouse Networks. En G. Huerta-Cuellar (Ed.), *Fiber Optics—Technology and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98921>

- Gorshe, S., Raghavan, A. R., Starr, T., & Galli, S. (Eds.). (2014). DSL Technology – Broadband via Telephone Lines. En *Broadband Access* (1a ed., pp. 143–174). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118878774.ch07>
- Graves, J. M., Abshire, D. A., Amiri, S., & Mackelprang, J. L. (2021). Disparities in Technology and Broadband Internet Access Across Rurality: Implications for Health and Education. *Family & Community Health*, 44(4), 257–265. <https://doi.org/10.1097/FCH.0000000000000306>
- Hisyam Ng, H. A., & Mahmoodi, T. (2024). Intelligent Traffic Engineering for 6G Heterogeneous Transport Networks. *Computers*, 13(3), 74. <https://doi.org/10.3390/computers13030074>
- Holik, M., Horvath, T., & Oujezsky, V. (2019). Application for GPON Frame Analysis. *Electronics*, 8(6), 700. <https://doi.org/10.3390/electronics8060700>
- Hoyhtya, M., Mammela, A., Chen, X., Hulkkonen, A., Janhunen, J., Dunat, J.-C., & Gardey, J. (2017). Database-Assisted Spectrum Sharing in Satellite Communications: A Survey. *IEEE Access*, 5, 25322–25341. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2771300>
- IICA. (2020, octubre 29). *Al menos 77 millones de personas, sin acceso a internet de calidad en áreas rurales de América Latina y el Caribe*. IICA.INT. <https://iica.int/es/prensa/noticias/al-menos-77-millones-de-personas-sin-acceso-internet-de-calidad-en-areas-rurales-de>
- IICA. (2022, diciembre 1). *Al menos 72 millones de personas, sin acceso a internet de calidad en áreas rurales de América Latina y el Caribe*. IICA.INT. <https://iica.int/es/prensa/noticias/al-menos-72-millones-de-personas-sin-acceso-internet-de-calidad-en-areas-rurales-de>
- ITU-T. (2005). *G.983.2: ONT management and control interface specification for B-PON*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.2/en>

- ITU-T. (2008, marzo). *G.984.1 : Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/en>
- Iyer, S., Sengar, S., Bajpai, R., & Singh, S. P. (2018). On the Performance of MLR Optical WDM Network Based on ITU-T Conforming Fibers in the Presence of Dominant Physical Layer Impairments. *Journal of Communications and Information Networks*, 3(3), 91–108. <https://doi.org/10.1007/s41650-018-0019-0>
- Kani, J., & Van Veen, D. (2020). Current TDM-PON Technologies. En B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. Winzer, & Y. Zhao (Eds.), *Springer Handbook of Optical Networks* (pp. 849–870). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16250-4_27
- Koo L., C. J., & Laurente G., E. (2024). *Red de Backhaul para Mejorar el Acceso a Internet en Distritos Rurales Altoandinos de Cajamarca* [Trabajo de Investigación, Universidad Tecnológica del Perú]. <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/10102>
- Lam, C. F., & Yin, S. (2020). Evolution of fiber access networks. En *Optical Fiber Telecommunications VII* (pp. 827–865). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816502-7.00022-1>
- Luzón C., Y. G. (2023). *Red 50G-PON para el sector de Cutuglagua del Cantón Mejía, en escenario de demanda de ultra banda ancha por cada usuario* [Trabajo de Titulación de Maestría]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Ma, Y., & Jia, Z. (2017). Evolution and Trends of Broadband Access Technologies and Fiber-Wireless Systems. En M. Tornatore, G.-K. Chang, & G. Ellinas (Eds.), *Fiber-Wireless Convergence in Next-Generation Communication Networks* (pp. 43–75). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42822-2_2

- Maeda, Y., & Feigel, R. (2001). A standardization plan for broadband access network transport. *IEEE Communications Magazine*, 39(7), 166–172. <https://doi.org/10.1109/35.933453>
- Mahboob, S., & Liu, L. (2024). Revolutionizing Future Connectivity: A Contemporary Survey on AI-Empowered Satellite-Based Non-Terrestrial Networks in 6G. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 26(2), 1279–1321. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3347145>
- Makondo, N., Kobo, H. I., Mathonsi, T. E., & Plessis, D. P. D. (2024). Implementing an Efficient Architecture for Latency Optimisation in Smart Farming. *IEEE Access*, 12, 140502–140526. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3466994>
- Maljević, I., Alfarhan, F., & Adve, R. (2025). Radio Access Network Architecture. En I. Maljević, F. Alfarhan, & R. Adve, *Cellular Radio Access Networks* (pp. 239–257). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76455-4_7
- M.Al-Quzwini, M. (2014). Design and Implementation of a Fiber to the Home FTTH Access Network based on GPON. *International Journal of Computer Applications*, 92(6), 30–42. <https://doi.org/10.5120/16015-5050>
- Martínez D., M., & Gómez N., D. A. (2020). Las tecnologías de la información y comunicación (TIC) en el desarrollo rural: Retos y oportunidades para México. *Textual*, 76, 243–269. <https://doi.org/10.5154/r.textual.2020.76.09>
- Méndez C., R. D. (2022). *Diseño de Red Gpon para Convertir en Smart City la Comuna de Olón* [Tesis, Universidad Ecotec]. <https://repositorio.ecotec.edu.ec/handle/123456789/419>
- Moeyaert, V., & Maier, G. (2011). Network technologies for broadband access. *2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2011.5971126>

- Nguyen, M. D. (2018). *MAC Protocol for Mixture of Half-duplex and Full-duplex Wireless Network Considering Hidden Terminal Problem* [Master's Thesis]. Japan Advanced Institute of Science and Technology.
- Nourildean, S. W., Mohammed, Y. A., Jihad, N. J., & Sabri, A. A. (2025). Wireless LAN based on optics communications (FDDI) improvement against jammers. *Journal of Optics*. <https://doi.org/10.1007/s12596-025-02521-0>
- Pahlavan, K., & Krishnamurthy, P. (2021). Evolution and Impact of Wi-Fi Technology and Applications: A Historical Perspective. *International Journal of Wireless Information Networks*, 28(1), 3–19. <https://doi.org/10.1007/s10776-020-00501-8>
- Parroquia Rural El Morro. (2023). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia El Morro: 2023-2027*. https://gadpuertocayo.gob.ec/media/gadelmorro/pdot_archivos/PDyOT_EL_MORRO_2023-2027._firmado-signed-signed.pdf
- Paz D., R. D., & Camacho A., D. A. (2019). Análisis de la demanda de redes FTTH en las parroquias Laurel, Juan Bautista Aguirre y el Limonal del Cantón Daule, provincia del Guayas. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, noviembre. <https://www.eumed.net/rev/oel/2019/11/demanda-redes-fith.html>
- Peng, X., Fang, Y., Li, C., & Guo, L. (2024). Access Point Coordination Based TWT Scheduling for the Next Generation WLAN. *2024 13th International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)*, 238–243. <https://doi.org/10.1109/ICCCAS62034.2024.10652675>
- Piña G., L. A. (2024). Convergencia de enlaces de fibra óptica monomodo en la RedUNAM. *Cuadernos Técnicos Universitarios de la DGTIC*, 2(3). <https://doi.org/10.22201/dgtic.ctud.2024.2.3.46>
- Precision. (2024, enero 31). *Trends Shaping the Future of Optical Networking in 2024*. <https://www.precisionot.com/optical-networking-in-2024/>

- Primicias. (2020, octubre 29). Profunda brecha digital afecta a la población rural de la región. *Primicias*. <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/profunda-brecha-digital-poblacion-rural-latinoamerica/>
- Rendon Schneur, J., & Xiong, Y. (2016). A cost study of fixed broadband access networks for rural areas. *Telecommunications Policy*, 40(8), 755–773. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2016.04.002>
- Ryan, M. J. (2002). Satellite-Based Mobile Communications. En *Handbook of Antennas in Wireless Communications*. CRC Press.
- Sadin, S. I., Billah, A. B., Ahad, Md. A., Fahim, K. S., Mitra, P., Shawon, D. S., & Shorna, R. T. (2022). Design and Performance Evaluation of a Gigabit Passive Optical Network (GPON) Through Fiber-To-The-Home (FTTH) Technology. *2022 International Conference on Recent Progresses in Science, Engineering and Technology (ICRPSET)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICRPSET57982.2022.10188562>
- Santiana C., P. F. (2022). *Estudio del impacto del uso de las redes GPON en Ecuador frente a otras tecnologías año 2022 y sus perspectivas de crecimiento* [Proyecto de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23888/1/UPS-GT004097.pdf>
- Shirvani M., S. (2024). The Past, Present, and Future of the Internet: A Statistical, Technical, and Functional Comparison of Wired/Wireless Fixed/Mobile Internet. *Electronics*, 13(10), 1986. <https://doi.org/10.3390/electronics13101986>
- Skoufis, A., Chatzithanasis, G., Dede, G., Filiopoulou, E., Kamalakis, T., & Michalakelis, C. (2023). Technoeconomic assessment of an FTTH network investment in the Greek telecommunications market. *Telecommunication Systems*, 82(2), 211–227. <https://doi.org/10.1007/s11235-022-00971-6>

- Skubic, B., & Wosinska, L. (2020). Introduction to Optical Access Networks. En B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. Winzer, & Y. Zhao (Eds.), *Springer Handbook of Optical Networks* (pp. 831–848). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16250-4_26
- Sugumaran, S., Sharma, L., & Choudhary, S. (2019). Optimized FWM Parameters for FTTH Using DWDM Network. *2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)*, 317–322. <https://doi.org/10.1109/ICCIKE47802.2019.9004281>
- Sundeen, T. H., & Kalos, M. (2022). Rural educational leader perceptions of online learning for students with and without disabilities before and during the COVID-19 pandemic. *Theory & Practice in Rural Education*, 12(2), 105–128. <https://doi.org/10.3776/tpre.2022.v12n2p105-128>
- Tariq, M. H. (2024). *Hybrid antenna array design and techniques for Self-Backhauled Wireless Access Points* [PhD Thesis, Aalborg University]. <https://doi.org/10.54337/aau718334904>
- Tejedor, R. (2010). *Tecnologías de banda ancha por fibra óptica*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Tecnolog%C3%ADas-de-banda-ancha-por-fibra-%C3%B3ptica-Tejedor/a4684766390fdd74895874b49b857613745cd29a>
- Usman, A., Zulkifli, N., Salim, M. R., Khairi, K., & Azmi, A. I. (2020). Optical link monitoring in fibre-to-the-x passive optical network (FTTx PON): A comprehensive survey. *Optical Switching and Networking*, 39, 100596. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2020.100596>
- Uzunidis, D., Logothetis, M., Stavdas, A., Hillerkuss, D., & Tomkos, I. (2022). Fifty Years of Fixed Optical Networks Evolution: A Survey of Architectural and Technological Developments in a Layered Approach. *Telecom*, 3(4), 619–674. <https://doi.org/10.3390/telecom3040035>

- Wang, Q., Li, W., Yu, Z., Abbasi, Q., Imran, M., Ansari, S., Sambo, Y., Wu, L., Li, Q., & Zhu, T. (2023). An Overview of Emergency Communication Networks. *Remote Sensing*, 15(6), 1595. <https://doi.org/10.3390/rs15061595>
- Wen, C.-K., Tsai, L.-S., Shojaeifard, A., Liao, P.-K., Wong, K.-K., & Chae, C.-B. (2024). Shaping a Smarter Electromagnetic Landscape: IAB, NCR, and RIS in 5G Standard and Future 6G. *IEEE Communications Standards Magazine*, 8(1), 72–78. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0008.2300036>
- Yastrebova, A. (2019). *LEO Satellite Based 5G Connectivity for Autonomous Vessels* [Master of Science Thesis, Tampere University]. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/117846/YastrebovaAnastasia.pdf?sequence=2>
- Zakrzewski, Z., Głabowski, M., Zwierzykowski, P., Eramo, V., & Lavacca, F. G. (2024). Optical Technologies Supporting 5G/6G Mobile Networks. *Photonics*, 11(9), 833. <https://doi.org/10.3390/photonics11090833>

ANEXOS

ANEXO 1: Encuesta sobre conectividad domiciliaria

1. ¿Qué tipo de conexión a Internet utiliza principalmente en su hogar?
 - Tecnología inalámbrica terrestre (Wi-Fi comunitario, redes móviles 3G o 4G)
 - Infraestructura fija (cable de cobre, servicio DSL)
 - Satelital
 - Ninguna

2. ¿Qué nivel de satisfacción tiene con la calidad de su conexión actual a Internet?
 - Muy satisfecho
 - Satisfecho
 - Moderadamente satisfecho
 - Insatisfecho
 - Muy insatisfecho

3. Según su experiencia, ¿qué velocidad aproximada tiene la conexión de descarga en su hogar?
 - Menos de 1 Mbps
 - Entre 1 y 5 Mbps
 - Entre 5 y 10 Mbps
 - Más de 10 Mbps
 - No lo sé

4. ¿Experimenta interrupciones frecuentes en su conexión a Internet?
 - Sí
 - No

5. Si respondió afirmativamente, ¿en qué horarios suelen ser más frecuentes estas interrupciones? (Puede marcar más de una opción)
 - En la mañana
 - En la tarde
 - En la noche
 - Los fines de semana
 - Durante condiciones climáticas adversas (lluvia, tormentas fuertes)

6. ¿Considera que la calidad actual de su conexión a Internet afecta significativamente las actividades cotidianas de su hogar (educación, salud, economía)?
 - Sí
 - No

7. Por favor, describa brevemente los principales problemas o limitaciones que enfrenta con su conexión actual a Internet:

ANEXO 2: Evidencia de las encuestas realizadas en campo







ANEXO 3: Evidencia del cable deteriorado

