Universidad Nacional de Ingeniería

Área de Conocimiento de Tecnología de la Información y Comunicación

Viabilidad Técnica-Económica De Banda Ancha HFC En La Comunidad Los Sánchez, Diriamba 2026.

Trabajo Monográfico para optar al título de Ingeniero Electrónico

Elaborado por:

Br. Daniel Alejandro Martínez Alvarado
Carnet: 2019-1217U

Br. Ramiro Francisco Ramos Muñoz
Carnet: 2019-0022U

Br. Harinton Hassiel Ruiz Jiménez
Carnet: 2019-0168U

Tutor:

Ing. Jorge Joel Mora Jara

12 de mayo de 2026
Managua, Nicaragua

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a Dios por darme la salud, la fuerza y la claridad mental para completar este proyecto de graduación. Sin su guía, nada de esto habría sido posible.

A mis padres, Juan Ruiz y Scarlett Jiménez por su apoyo incondicional a lo largo de todas mis etapas como estudiantes; sin ellos siendo el pilar fundamental después de Dios en este camino, llegar a esta meta no hubiese sido posible, en especial agradezco a mi padre por enseñarme el valor del esfuerzo y porque sin dudarlo ha creído en mí y en lo que podría ser capaz de alcanzar y me brindó su apoyo incondicional para que pudiese llegar lejos.

Agradezco mucho a esas personas que Dios puso en mi camino durante estos años que me sirvieron de mucho apoyo para seguir adelante, esos compañeros que un día me extendieron su mano para ayudarme a continuar en esta carrera, a los maestros que me ayudaron e inspiraron a aprender. Agradezco de manera especial Paola Madrigal que ha sido un gran apoyo incondicional en estos últimos años. Le doy las gracias a mis amigos Ramiro Ramos y Daniel Martínez quienes han sido mi mano derecha a lo largo de esta carrera, con los que empecé desde el día uno y hoy llegamos hasta el final, Así mismo a Francis Gutiérrez, Aaron Otero, Asling Ney, Luis Fernando Alvarado y Harold Torres que han sido parte importante de este proceso para mí.

Harinton Hassiel Ruiz Jiménez.

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por brindarme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi formación académica.

Expreso mi más profundo agradecimiento a mis padres, Ramiro Ramos García y Francis del Socorro Muñoz Mercado, por su amor, apoyo incondicional, sacrificio y por ser el pilar fundamental en mi vida. Gracias por motivarme siempre a seguir adelante y por creer en mí en cada paso de este camino.

Agradezco también a mis hermanos: Nancy Muñoz Mercado, Yamil Julián Ramos Muñoz y Marcela del Carmen, por su apoyo, comprensión y palabras de ánimo durante el desarrollo de esta etapa académica.

De igual manera, quiero expresar mi sincero agradecimiento al Supervisor de NACEL, Danilo Cabezas, por su orientación, apoyo y disposición para compartir sus conocimientos, los cuales fueron de gran ayuda para el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, agradezco a mis compañeros de tesis, Harinton Ruiz y Daniel Martínez, por el trabajo en equipo, el esfuerzo compartido y la colaboración durante todo el proceso de elaboración de esta investigación.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron y brindaron su apoyo para que este logro académico fuera posible.

Ramiro Ramos Muñoz.

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por haberme dado sabiduría, salud y fuerza mental para poder culminar esta etapa tan importante en mi vida y ser mi guía en todo este camino.

También, a mis padres José Alfredo Martínez Rodríguez y Fabiola Isabel Alvarado Barrantes, por siempre darme su apoyo, amor incondicional en todo momento, por ser quienes me inspiraban a seguir adelante y por creer en mi desde el día uno, sin su apoyo nada de esto sería posible. En especial a mi papá por enseñarme que todo en esta vida es posible con esfuerzo y valentía, y sobre todo cuando se camina de la mano de Dios.

Agradezco enormemente a mis hermanos, José Alfredo Martínez, Fabiola Isabel Martínez y Moisés Enrique Martínez, por sus consejos, su paciencia y esas palabras de aliento que fueron fundamentales durante toda mi formación académica.

A su vez, agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) por el honor de formarme en sus aulas, y a su cuerpo docente por ser el pilar fundamental de nuestra educación y brindarnos su valioso apoyo y conocimientos en todo este camino educativo.

Asimismo, expreso mi gratitud a mis compañeros Ramiro Ramos Muñoz y Hassiel Ruiz Jiménez, por su profesionalismo y entrega en la realización de esta tesis, por el trabajo en equipo y el apoyo compartido durante todo este proceso de culminación de estudio.

Para finalizar, agradezco nuevamente a Dios por ponerme personas en lo largo de este proceso que me ayudaron a crecer de manera personal y me enseñaron buenos valores para mi formación como profesional y futuro ingeniero.

Daniel Alejandro Martínez Alvarado

Resumen

El presente trabajo de graduación evalúa la viabilidad técnica y económica de implementar una red de banda ancha híbrida fibra-coaxial (HFC) en la comunidad Los Sánchez, ubicada en el municipio de Diriamba, departamento de Carazo. El objetivo principal fue diseñar una infraestructura que permita ofrecer servicios convergentes de internet, voz y televisión a 248 hogares, aprovechando la portería eléctrica existente y minimizando costos de inversión.

Se realizó un levantamiento de campo con odómetro y georreferenciación en Google Earth Pro para definir el alcance geográfico y cumplir con la Normativa de Servicio Eléctrico. El diseño técnico incluyó un nodo óptico Motorola SG4000, amplificadores MB2 y BLE, cable RG-500 y RG-11, y un total de 31 taps. Se calculó el balance de potencia RF a 1 GHz, verificando que los niveles de señal se mantienen dentro de los rangos operativos del estándar DOCSIS 3.0.

Desde el punto de vista económico, se efectuó un análisis completo que consideró la inversión inicial, los costos operativos proyectados, la estimación de ingresos según diferentes niveles de penetración y los indicadores financieros clave, demostrando que el proyecto resulta viable y rentable incluso en escenarios conservadores.

Se concluye que la tecnología HFC representa una solución técnica y económicamente viable para comunidades rurales nicaragüenses, ofreciendo una alternativa más accesible y sostenible que el despliegue de fibra óptica hasta el hogar (FTTH).

Palabras clave: Red HFC, viabilidad técnico-económica, DOCSIS 3.0, brecha digital, análisis de sensibilidad, VAN, TIR, comunidad rural, Diriamba.

Índice de Contenido

I. INTRODUCCIÓN 1
II. ANTECEDENTES 4
III. OBJETIVOS 6
IV. Objetivo general 6
V. Objetivos específicos 6
VI. JUSTIFICACIÓN 7
4.1 Justificación del Estudio 7
Relevancia Económica y Alineación Normativa 8
VII. MARCO TEORICO 9
Marco legal 9
7.1.1 Fundamento para la inversión en zonas no atendidas 9
7.1.2 Títulos y Regulación Técnica 10
7.1.3 Marco legal ambiental (MARENA) 11
VIII. Equipos para la cabecera (Headend/Hub) 12
8.1.1 CTMS 12
8.1.2 Mufa 13
8.1.3 Mufa de distribución 14
8.1.4 Mufa de empalme horizontal 14
8.1.5 Fibra Troncal 16
8.1.6 Transmisores y Receptores Ópticos 17
IX. Equipos de Red de Distribución 17
9.1.1 Fuente de poder Alpha XM2-915 120V/240V 17
9.1.2 Nodos Ópticos 19

9.1.3 Amplificador 20
9.1.4 Amplificador MB (Mini Bridger) 20
9.1.5 Amplificador LE (Line Extender) 21
9.1.6 Amplificador BTD (Broadband Truck Distribution) 21
9.1.7 Elementos usados en los amplificadores 22
9.1.8 Splitter 23
9.1.9 Acoplador Direccional de red HFC 24
9.1.10 DCPI 24
9.1.11 TAP (Terminal Access Point o Derivador) 25
9.1.12 Cable Coaxial 25
X. Instalación a los clientes (última milla) 29
10.1.1 Decodificador 30
10.1.2 CPE protector de voltaje 31
XI. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES 48
XII. REFERENCIAS 53
XIII. ANEXOS 56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de infraestructura de red HFC diseñada para la comunidad Los Sánchez, Fuente: Elaboración propia con base en cotizaciones de proveedores y especificaciones técnicas (2026). 32

Tabla 2. Balance de niveles de potencia RF en la red HFC (usuario más lejano)..... 33

Tabla 3. Resumen de inversión inicial (CAPEX) por categoría, Fuente: Elaboración propia con base en cotizaciones de proveedores (2026). 36

Tabla 4. Estimación de costos operativos anuales (OPEX) — Año 1, Fuente: Elaboración propia con base en tarifas INE (2025) y precios mayoristas Tigo/Claro (2026). 36

Tabla 5. Proyección de ingresos y flujo de caja neto (años 1 a 5), Nota: OPEX anual ajustado con inflación del 5%. Fuente: Elaboración propia. 37

Tabla 6. Evolución de ingresos anuales y flujo de caja neto (años 1 a 5), Fuente: Elaboración propia a partir de proyecciones financieras. 38

Tabla 7. Resumen de indicadores financieros del proyecto, Fuente: Elaboración propia con base en proyecciones financieras y tasa de descuento del 12%..... 38

Tabla 8. Análisis de sensibilidad según diferentes escenarios de penetración 39

Tabla 9. Comparación de VAN y TIR por escenario de penetración, Fuente: Elaboración propia..... 40

Tabla 10. Comparación económica entre la red HFC propuesta y una solución FTTH equivalente, Fuente: Elaboración propia con base en datos de Fiber Broadband Association (2025) y SmC+ (2025). 40

TABLA 11. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES, FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN HERNÁNDEZ SAMPIERI ET AL. (2018). 41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Flujo de sincronización DOCSIS en arquitectura CMTS con Downstream, Upstream y routing & resource management. 13
Figura 2 Mufa de distribución de fibra óptica tipo domo con bandeja de empalmes abatible y puertos para cables. 14
Figura 3 Mufa de empalme horizontal de fibra óptica con bandejas de empalme y puertos laterales (4 entradas/salidas). 15
Figura 4 Fibra óptica troncal (corte transversal mostrando la estructura interna con fibras sueltas coloreadas) 16
Figura 5 Fuente de poder Alpha XM2-915 120V/240V. 18
Figura 6 Nodo óptico para redes HFC con aletas de disipación y puertos coaxiales. 19
Figura 7 Amplificador BTD ARRIS MPPS-8 (vista interna del módulo y housing). 22
Figura 8 Splitter coaxial de 4 vías 5-1000 MHz (modelo DMHSE-3C3-4). 23
Figura 9 Divisor de potencia RF 2 vías (power divider/splitter) con conectores N-female 700-2700 MHz (modelo CPDS2W-N-F07-2.7). 24
Figura 10 Tap coaxial de 17 dB montado en poste (Multitaps para redes HFC). 25
Figura 11 Cable coaxial (vista en corte mostrando blindaje trenzado y conductor central de cobre). 26
Figura 12 Cable coaxial siames RG59 con cables de alimentación integrados (vista en corte transversal con etiquetas técnicas). 27
Figura 13 Cable coaxial RG-11 (vista en corte transversal mostrando blindaje de foil y malla trenzada). 28
Figura 14 Cable coaxial RG-500 (vista en corte transversal – Silex System Telecom). 29
Figura 15 Cablemódem EMTA con soporte de voz (Leds TEL1, TEL2, LINK, ONLINE, REGISTER, POWER). 30
Figura 16 Decodificador Claro TV+ (set-top box) con control remoto inteligente. 31

FIGURA 17 PROTECTOR CONTRA SOBRETENSIONES COAXIAL SP-1 PARA REDES HFC (5-2500 MHZ, PASO DE DC 30V/1A) 31
FIGURA 18 POSTERÍA GEORREFERENCIADA PARA EL DISEÑO DE LA RED HFC EN LA COMUNIDAD LOS SÁNCHEZ, DIRIAMBA, CARAZO. 35

I. INTRODUCCIÓN

En el panorama actual de la transformación digital global, el acceso a servicios de telecomunicaciones de banda ancha ha dejado de ser un valor agregado para convertirse en un pilar fundamental del desarrollo humano, educativo, económico y social. Sin embargo, a pesar de los avances en las redes troncales, la conectividad en la “última milla” continúa representando uno de los mayores desafíos en las regiones rurales y periurbanas de los países en desarrollo, incluyendo Nicaragua. Esta brecha digital no solo limita el acceso a información y servicios esenciales, sino que profundiza las desigualdades socioeconómicas y restringe las oportunidades de crecimiento de las comunidades más vulnerables.

La Comunidad Los Sánchez, ubicada en el municipio de Diriamba, departamento de Carazo, constituye un claro ejemplo de esta realidad. Con una población predominantemente dedicada a actividades agrícolas, comercio informal y empleos temporales, sus habitantes enfrentan una conectividad limitada o inexistente, lo que afecta directamente la educación virtual, el teletrabajo, el acceso a servicios públicos digitales y el desarrollo de emprendimientos locales. Ante esta situación, el presente trabajo de graduación propone el diseño de una infraestructura de red Híbrida de Fibra y Coaxial (HFC) para el despliegue de servicios convergentes (datos, voz y televisión), integrando un riguroso análisis técnico y económico que valide su implementación como una solución viable, sostenible y escalable para la zona.

La relevancia de esta investigación se fortalece al alinearse plenamente con el marco normativo nacional establecido en la Ley N.º 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes (Asamblea Nacional, 2024), la cual promueve activamente la inversión en zonas no atendidas y exige calidad, convergencia y cobertura universal.

A diferencia de tecnologías más costosas como la fibra óptica hasta el hogar (FTTH), la solución HFC permite aprovechar la durabilidad mecánica del cable coaxial RG-500 y RG-11 en entornos rurales, garantizando una vida útil de la planta externa de hasta 25 años, una disponibilidad del servicio del 99.99 % y capacidad suficiente para satisfacer las demandas actuales y futuras de banda ancha (CommScope, 2021, p. 8; Gutiérrez Zelaya, 2021, p. 12).

este trabajo de graduación desarrolla un estudio de viabilidad técnica y económica del proyecto. Desde el punto de vista técnico, se diseñó una red HFC que combina fibra óptica troncal con distribución coaxial, incorporando componentes de alta fiabilidad (nodo óptico Motorola SG4000, amplificadores de línea y elementos de protección contra inestabilidad eléctrica), con un balance de potencia RF que asegura operación estable y compatible con el estándar DOCSIS 3.0. Desde el punto de vista económico, se realizó un análisis exhaustivo que considera la inversión inicial, los costos operativos estimados, la proyección de ingresos en función de la penetración esperada y los indicadores clásicos de rentabilidad.

Los resultados obtenidos confirman que la tecnología HFC representa una alternativa altamente viable en contextos rurales nicaragüenses, ofreciendo un equilibrio favorable entre costo, desempeño técnico y sostenibilidad financiera, con ventajas significativas frente a soluciones de fibra óptica pura hasta el hogar (FTTH). Todos los cálculos, supuestos y resultados detallados incluyendo montos precisos de inversión, proyecciones financieras y comparación cuantitativa se presentan y justifican exhaustivamente en los capítulos correspondientes del documento, proporcionando así una hoja de ruta clara y fundamentada para operadores interesados en desplegar conectividad en zonas no atendidas.

El presente documento se estructura de manera secuencial para reflejar el proceso de ingeniería aplicado. Se inicia con los antecedentes y el marco legal, continúa con la definición de objetivos, la descripción del proyecto y los fundamentos técnicos. Posteriormente se detalla la metodología, se presentan los resultados del diseño técnico y del análisis financiero, y se culmina con conclusiones y recomendaciones orientadas a la implementación y futura escalabilidad. De esta forma, se ofrece a las operadoras de telecomunicaciones, autoridades locales y futuros investigadores una propuesta integral, viable y alineada con las necesidades reales de desarrollo de Nicaragua.

II. ANTECEDENTES

En los últimos años, empresas como Tigo y Claro han estado ampliando sus redes de internet, especialmente en las cabeceras departamentales y zonas donde hay mayor concentración de usuarios. Sin embargo, este crecimiento no siempre llega a las comunidades rurales, y eso ha generado una diferencia bastante marcada entre quienes tienen acceso a servicios de banda ancha y los que no han logrado gozar de esta. Aunque existen algunos estudios y proyectos enfocados en mejorar la conectividad del país, pero esto dejando afuera a comunidades pequeña como Los Sánchez.

Entre los trabajos previos más cercanos a esta investigación se encuentra la tesis de Gutiérrez Zelaya (2021), titulada “Diseño de ampliación de red HFC para el servicio triple play en Los Altos de Masaya”, presentada en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Este estudio se centró en el diseño técnico de una red HFC para prestar servicios convergentes en una zona urbana-periférica.

Asimismo, Gaitán Marín, Quiroz Vivas y Oseda Molina (2025), en su trabajo “Análisis de migración tecnológica de la red (HFC) a red (FTTH) con el propósito de brindar servicios de alta velocidad y mejorar la experiencia del usuario”, realizado en la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua), analizan la transición de una red HFC hacia FTTH con tecnología GPON en la zona de Paso Caballo, Corinto. Los autores evalúan las limitaciones técnicas de la red híbrida y proponen un plan de migración orientado a mejorar significativamente la calidad del servicio.

Otro estudio relevante es el trabajo de Gómez González (2005), titulado “Diseño de una red para telefonía local y larga distancia nacional e internacional con el estándar PACKETCABLE para redes híbridas de fibra y coaxial (HFC) en 5 ciudades”, presentado en la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC). Este trabajo, de 92 páginas, analizó la implementación del estándar PacketCable sobre redes HFC y su integración con el protocolo DOCSIS. Como principal resultado, el autor detalló las especificaciones técnicas necesarias para ofrecer VoIP (Voz sobre Protocolo de Internet) con calidad de servicio en entornos de redes híbridas.

De igual forma, Calderón Montenegro (2014), en su trabajo titulado “Documentación del proceso de implementación de la calidad en la instalación de los servicios TRIPLE-PLAY, a través de red HFC por indicadores de servicio y plan de contingencia para la empresa CLARO”, realizado también en la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), documentó con 208 páginas los procesos de estandarización en la instalación y operación de servicios triple-play sobre redes HFC. El estudio incluyó un análisis FODA y propuso indicadores de servicio junto con un sistema de evaluación para los contratistas encargados del mantenimiento de estas redes.

Los antecedentes revisados evidencian que la mayoría de los estudios previos se han enfocado en la ampliación, implementación y mejora de la calidad de redes HFC ya existentes, principalmente en contextos urbanos o semiurbanos. Sin embargo, se observa una limitada documentación sobre el diseño de redes HFC desde cero en comunidades rurales pequeñas y aisladas, como es el caso de Los Sánchez en Diriamba. Esta investigación busca contribuir a cerrar esa brecha, proponiendo un diseño integral técnico-económico de una red HFC en un contexto rural nicaragüense, aprovechando la experiencia internacional y nacional disponible.

III. OBJETIVOS

IV. Objetivo general

- Diseñar una red de Banda Ancha Híbrido Fibra Coaxial (HFC) para el despliegue de servicios convergentes (Datos, Voz y TV) en la comunidad Los Sánchez, Diriamba.

V. Objetivos específicos

- Determinar los requerimientos técnicos para la distribución de la red HFC y alcance geográfico de la zona para la construcción de red banda ancha Hibrido Fibra Coaxial (HFC).

- Sistematizar los parámetros de banda ancha establecidos por el protocolo DOCSIS que se incorporan en la tesis, con el fin de contextualizar su relación con los servicios y la selección de equipos adecuados.

- Analizar la rentabilidad financiera del proyecto para determinar su viabilidad económica.

VI. JUSTIFICACIÓN

4.1 Justificación del Estudio

La brecha digital en las zonas rurales de Nicaragua representa uno de los principales obstáculos para el desarrollo social y económico del país. La comunidad Los Sánchez, en el municipio de Diriamba, Carazo, es un claro ejemplo de esta realidad: 248 hogares sin acceso a servicios de banda ancha convergentes (internet, voz y televisión), lo que limita severamente las oportunidades educativas, laborales y de emprendimiento de sus habitantes.

Relevancia Técnica de la Tecnología HFC en Entornos Rurales

La tecnología Híbrida Fibra-Coaxial (HFC) presenta ventajas técnicas sustanciales frente a otras alternativas de banda ancha en contextos rurales. En primer lugar, su arquitectura híbrida permite aprovechar la infraestructura de postería eléctrica existente, reduciendo significativamente las obras civiles necesarias. En segundo lugar, el cable coaxial RG-500 y RG-11, seleccionados para este diseño, ofrecen una durabilidad mecánica superior en condiciones ambientales adversas (humedad, variaciones térmicas, exposición a rayos UV), con una vida útil estimada de 20 a 25 años (CommScope, 2021). En tercer lugar, la capacidad de transmitir señales hasta 1 GHz (ampliable a 3 GHz con la misma infraestructura pasiva) permite soportar el estándar DOCSIS 3.0 actual y migrar hacia DOCSIS 3.1 o 4.0 en el futuro sin necesidad de reemplazar la planta externa (CableLabs, 2019).

La selección de componentes de grado industrial (nodo óptico Motorola SG4000, amplificadores MB2 y BLE, fuente ferroresonante Alpha XM2-915) garantiza un Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) superior a 100,000 horas, asegurando la continuidad del servicio incluso en condiciones de inestabilidad eléctrica, común en zonas rurales nicaragüenses.

Relevancia Económica y Alineación Normativa

Desde el punto de vista económico, la tecnología HFC ofrece una relación costo-beneficio altamente favorable para proyectos de cobertura rural. El CAPEX estimado de C 635,400.00 (aproximadamente C Hogar pasado) resulta significativamente inferior al de una solución FTTH equivalente (C$ 11,900 por hogar), lo que representa una reducción del 78% en la inversión inicial por usuario. Este ahorro permite que proyectos de conectividad rural sean financieramente viables y atractivos para operadores entrantes, maximizando el retorno social de la inversión.

El proyecto se alinea plenamente con la Ley N.º 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes (Asamblea Nacional, 2024), que en su Artículo 33 establece incentivos para operadores que inviertan en zonas no atendidas, incluyendo la exención o reducción del canon de regulación. Esta disposición mejora aún más la viabilidad financiera del proyecto, reduciendo los costos operativos durante los primeros años de operación.

Impacto Social y Reducción de la Brecha Digital

Más allá de los aspectos técnicos y económicos, la implementación de esta red HFC representa una herramienta de transformación social. El acceso a internet de banda ancha permitirá a los habitantes de Los Sánchez acceder a educación virtual (especialmente relevante para el centro escolar de la comunidad), realizar trámites gubernamentales en línea, desarrollar emprendimientos digitales, acceder a servicios de telemedicina y mejorar la comunicación familiar. En suma, este proyecto contribuye directamente a los objetivos de desarrollo sostenible y a la estrategia nacional de inclusión digital.

VII.MARCO TEORICO

Marco legal

En nuestro país el desarrollo de la infraestructura de las telecomunicaciones y la prestación de servicios convergentes están regidas bajo un marco normativo enfocado en la modernización, competencia y el crecimiento de la conectividad en zonas que carecen del servicio como lo es la comunidad Los Sánchez, siendo el instituto nicaragüense de telecomunicaciones y correos (TELCOR) el ente regulador bajo el respaldo de la ley N.º. 1223, Ley general de Telecomunicaciones Convergentes (Asamblea Nacional, 2024), la cual derogó la anterior Ley N.º. 200.

Esta nueva ley establece los lineamientos que rigen la modernización del sector. El análisis de sus artículos fundamentales nos permite comprender la importancia de llevar a cabo este proyecto de infraestructura en una localidad con déficit de conectividad, como es la Comunidad Los Sánchez en Diriamba, Carazo. Este diseño de red HFC se alinea directamente con los objetivos estratégicos de la nueva legislación, los cuales se detallan a continuación.

7.1.1 Fundamento para la inversión en zonas no atendidas

La nueva ley nos habla sobre la importancia y el objetivo de llegar a zonas que a día de hoy no han sido atendidas por las diferentes empresas de telecomunicaciones, este proyecto se alinea directamente con la estrategia nacional para reducir la brecha digital y se respalda bajo los siguientes artículos:

Art. 1 (Objeto y naturaleza). Este artículo establece el objeto de la Ley, que es, entre otros, promover y fomentar las inversiones en el sector de las telecomunicaciones y el uso eficiente de las redes en un entorno convergente (Asamblea Nacional, 2024; Art. 1). Este principio valida el diseño de una red Híbrida Fibra Coaxial (HFC) como una solución moderna y eficiente que fomenta la inversión.

Art. 4 (Principios rectores). Los principios rectores de la Ley buscan maximizar el interés general y el bienestar social de la población, mediante la promoción de la competencia, la inversión y la innovación (Asamblea Nacional, 2024; Art. 4). El proyecto, al introducir una solución de banda ancha en una comunidad desatendida, contribuye directamente a este principio de desarrollo social y económico.

Art. 33 (Incentivo a Operadores Entrantes). Este es un pilar fundamental para la viabilidad económica de nuestro proyecto, pues busca fomentar la competencia y reducir la brecha digital. El artículo faculta a TELCOR para eximir o reducir el pago del Canon por regulación a Microtelcos o MIPYMEs, con la finalidad de promover los servicios en las zonas no atendidas, áreas rurales y áreas con desventajas económicas (Asamblea Nacional, 2024; Art. 33). La viabilidad financiera del proyecto se basa en la aplicación potencial de estos incentivos, cruciales para un operador entrante.

7.1.2 Títulos y Regulación Técnica

El diseño técnico y la futura operación de la red HFC deben cumplir con los requisitos administrativos y de calidad establecidos:

Art. 15 (Licencia de Servicios Públicos de Telecomunicaciones). Para la explotación de la red HFC y la prestación de servicios convergentes, el futuro operador deberá obtener una Licencia de Servicios Públicos de Telecomunicaciones (Asamblea Nacional, 2024; Art. 15). Dicha licencia incluye el derecho de instalación, operación y explotación de las redes y la infraestructura requerida, lo que justifica la necesidad de realizar un diseño técnico detallado como el de esta tesis.

Art. 45 (Obligaciones Generales de los Titulares). Este artículo impone al titular de la licencia la obligación de prestar el servicio bajo condiciones de calidad, cobertura y continuidad, además de cumplir con los parámetros técnicos de seguridad y calidad establecidos por TELCOR (Asamblea Nacional, 2024; Art. 45). La inclusión de los parámetros DOCSIS en el diseño (Objetivo Específico 2) es la respuesta técnica a estas exigencias regulatorias de calidad.

7.1.3 Marco legal ambiental (MARENA)

Todo proyecto de infraestructura que implique obras civiles debe considerar el impacto ambiental:

Ley N. ª 217, ley general del medio ambiente y los recursos naturales. Esta ley establece que cualquier proyecto que pueda generar un impacto ambiental significativo debe de someterse a una evaluación de impacto ambiental (EIA) y obtener el respectivo permiso ambiental (Asamblea Nacional, 1996). Por ende, para llevar a cabo este proyecto se debe de contemplar este requisito legal y seguir las normativas que impone MARENA para el manejo de desechos y la protección de los recursos naturales durante la fase de construcción.

Para llevar a cabo la instalación de una red HFC en cualquier zona, se necesita conocer los diferentes equipos que conforman a la misma y tener en cuenta que cada componente es importante, a su vez saber para qué es su funcionamiento. Por esa razón a continuación se detallará los equipos utilizados para la composición de la red HFC.

Para una instalación adecuada la estructura se divide en 3 equipos principales por segmento; Equipos para la cabecera (Headend/Hub), La red de Distribución y las instalaciones a los clientes. Esto con el fin de llevar un orden adecuado a la hora de comenzar a crear la red HFC, teniendo en cuenta que cada equipo cumple una función significativa y dar a conocer sus atributos.

El diseño de esta red HFC se iniciará por medio de una mufa de distribución de la cual se tomarán los hilos 12 y 13 de fibra existentes que están disponibles para poder fusionar las fibras y realizar nuestro empalme de manera eficiente, siendo así el inicio de la estructura de la red HFC.

El marco normativo y legal previamente expuesto establece claros requisitos de calidad, cobertura, seguridad y continuidad del servicio que deben ser cumplidos en el diseño de la red. Estas exigencias se materializan en la selección cuidadosa, el dimensionamiento preciso y la configuración técnica de los equipos y elementos que conforman la arquitectura HFC.

Para lograr una instalación ordenada y funcional, la estructura de la red se organiza en tres segmentos principales: Equipos de Cabecera (Headend/Hub), Red de Distribución e Instalaciones al Cliente (Última Milla). Esta división permite una comprensión sistemática de cada componente y facilita el análisis de su función e interrelación dentro del sistema.

El diseño de esta red HFC se iniciará por medio de una mufa de distribución de la cual se tomarán los hilos 12 y 13 de fibra existentes que están disponibles para poder fusionar las fibras y realizar nuestro empalme de manera eficiente, siendo así el inicio de la estructura de la red HFC.

VIII. Equipos para la cabecera (Headend/Hub)

8.1.1 CTMS

cable modem termination system constituye el elemento central de la cabecera (Headend) en una red HFC, actuando como el puente de agregación entre la red troncal IP y la infraestructura de acceso de radiofrecuencia. Su función principal es la gestión y la asignación de canales descendentes (Downstream) y ascendentes (Upstream) mediante el estándar DOCSIS, convirtiendo los paquetes de datos provenientes de la red de área amplia (WAN) en señales modulares de RF para su distribución hacia los terminales del abonado. A diferencia de un enrutador convencional, el CTMS integra funciones de control de acceso al medio (MAC) y garantiza la calidad de servicio (QoS) necesaria para la transmisión simultanea de

datos de alta velocidad, Voz sobre IP (VoIP) y servicios de video bajo demanda (Cisco Systems, 2020, p. 1).

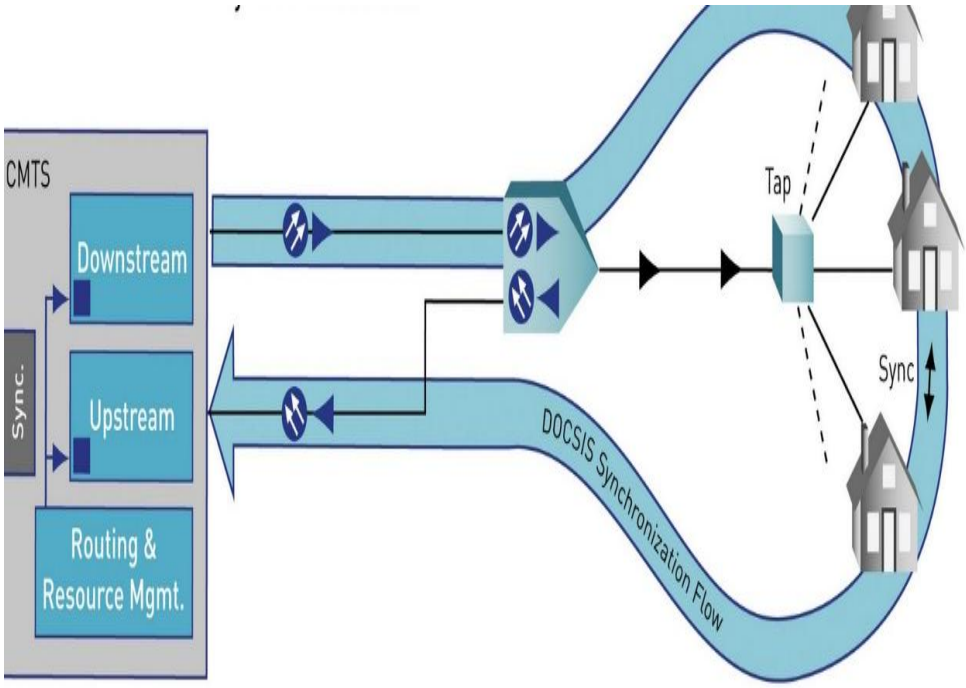


Figura 1 Flujo de sincronización DOCSIS en arquitectura CMTS con Downstream, Upstream y routing & resource management.

Nota. Adaptado de Cisco Systems. (2008). DOCSIS and CMTS architectural overview.

8.1.2 Mufa

La mufa es un contendor diseñado específicamente para alojar y proteger las uniones o empalmes de cable de fibra óptica. En esencia, cuando dos o más cables de fibra necesitan ser unidos para extender la red o realizar una conexión, estas uniones son delicados y susceptibles a daños por humedad, polvo y otros factores ambientales. Se encarga de encapsular y proteger los cables y puntos de empalme, les da una organización y gestión a las fibras que se encuentran dentro de la mufa, facilitando

también la ubicación de cada hilo, tiene una protección ip68 lo que la hace resistente contra el agua haciendo que en su interior no se llene de agua. Las mufas son un equipo muy importante para las redes de telecomunicación y existen diferentes tipos de mufas (Óptica Naranjo, s.f., p. 2).

8.1.3 Mufa de distribución

Estas cajas sirven como puntos intermedios donde se pueden sacar las conexiones hacia diferentes áreas o departamentos. Aquí se realizan las empalmes o fusiones necesarias para derivar las fibras hacia los cables secundarios (Óptica Naranjo, s.f., p. 2).



Figura 2 Mufa de distribución de fibra óptica tipo domo con bandeja de empalmes abatible y puertos para cables.

Nota. Tomado de CommScope. (s. f.). FOSC™ fiber optic splice closures [Fotografía de producto.

8.1.4 Mufa de empalme horizontal

Son carcasas hecha de material ABS de alta calidad. Es un producto destinado a proteger los puntos de fusión de fibra óptica, en Redes de Planta externa, su diseño

de cierre central mediante sello, evita el ingreso de humedad y aire al interior de la cavidad contenedora de las fibras (Dismantel, s.f., p. 1).

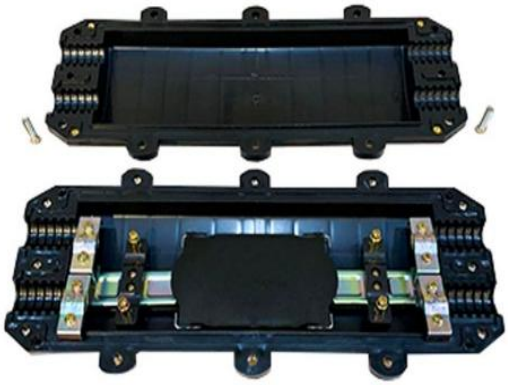


Figura 3 Mufa de empalme horizontal de fibra óptica con bandejas de empalme y puertos laterales (4 entradas/salidas).

Nota. Adaptado de Unitek Fiber. (s. f.). 4 In 4 Out 144 Cores Horizontal Fiber Optic Splice Closure [Fotografía de producto].

8.1.5 Fibra Troncal

Un cable troncal es un tipo de cable de fibra óptica que puede transportar grandes cantidades de datos a la vez a través de un sistema de telecomunicaciones. Actúa como la “columna vertebral” o línea principal de comunicación dentro de una red, conectando diferentes áreas y preservando la calidad de la señal a largas distancias. El propósito de este cable es cerrar brechas entre muchos dispositivos de usuario y secciones de red sin perder fuerza en las señales que se envían a lo largo de él para que la información pueda viajar rápidamente. Están diseñados con capacidades de ancho de banda amplio para una mayor eficiencia al transmitir datos, lo que evita pérdidas o interrupciones durante la transmisión debido a señales débiles causadas por la distancia recorrida o factores externos como interferencias de ruido (Ascent Optics, 2023, p. 2).

En el diseño de la red HFC se estará utilizando una fibra troncal de 12 hilos la cual partirá de la mufa hasta el nodo óptico.

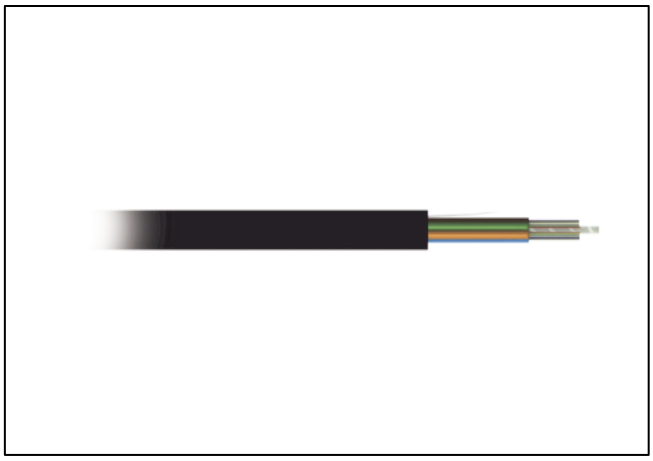


Figura 4 Fibra óptica troncal (corte transversal mostrando la estructura interna con fibras sueltas coloreadas)

Nota. Adaptado de FS.com. (s. f.). Cable de fibra óptica exterior loose tube [Fotografía de producto].

8.1.6 Transmisores y Receptores Ópticos

En las comunicaciones a través de fibras ópticas los transmisores y receptores ópticos son los dispositivos encargados de tomar la señal eléctrica en forma de voltaje o corriente y convertirla en una señal luminosa con el objetivo de transportar información a través de la fibra. La complejidad del transmisor y receptor depende del tipo de señal o información que se quiere enviar, si es análoga o digital, el tipo de codificación, y de la clase de fuente luminosa que se va a modular. También conocidos comúnmente como Upstream y Downstream que trabajan bajo la normativa de la DOCSIS (Telecomunicaciones 2, s.f., p. 15).

DOCSIS define el protocolo de comunicación de banda ancha entre un Cable Modem (CM), ubicado en la casa del usuario, y el Cable modem termination system (CMTS), ubicado en la cabecera de la compañía de Cable. La comunicación entre el CMTS y el CM es bidireccional, lo que significa que el CMTS le envía datos, comúnmente llamada “comunicación en Downstream” y el CM le devuelve información, también conocida como “Comunicación en Upstream” (ITS Infocom, 2020). La latencia mínima en HFC para Upstream es de aproximadamente 5 ms, con un promedio de 11-15 ms, pero, podría llegar hasta los 20 o incluso los 50 ms según las condiciones de la red

IX. Equipos de Red de Distribución

9.1.1 Fuente de poder Alpha XM2-915 120V/240V

Las fuentes de poder son elementos activos de la red que se encargan de convertir los 110 – 120 AVC que entrega la red pública en 60 AVC o 90 AVC que se diseña para la red HFC. La fuente tiene un sistema de respaldo en caso de ausencia del fluido eléctrico, y se realiza la transferencia por medio de una tarjeta inversora y un banco de baterías que le dan autonomía por un tiempo aproximado de 2 horas. La conexión de la fuente a la red se realiza con un insertor de potencia cuya función es la de mezclar el RF con el AC y un acoplador de señales.

Las fuentes de alimentación interrumpibles Alpha XM Serie 2 han sido diseñadas para alimentar equipos de procesamiento de señales de sistemas de televisión por cable y distribución de redes LAN de banda ancha. La fuente de alimentación, que consiste en un módulo de alimentación XM2, proporciona la carga crítica con alimentación CA regulada, limitada a la corriente, la cual se encuentra libre de perturbaciones como son los picos, sobrevoltajes, ruidos, oscurecimiento parcial, interrupción total.

Cuando el voltaje de entrada de línea de CA se desvía significativamente de la normal, u ocurre un corte eléctrico, el Módulo Inversor XM2 automáticamente pasa a la operación de respaldo (inversor) para continuar alimentando la carga. Durante el cambio a la operación de respaldo, la energía contenida en el transformador ferroresonante continúa alimentando la salida. La alimentación de respaldo continuará alimentando la carga hasta que el voltaje de la batería llegue a un voltaje bajo. Cuando la energía eléctrica regresa, el módulo de alimentación XM2 espera por un periodo corto (aproximadamente de 10 a 20 segundos) para que tanto el voltaje eléctrico como la frecuencia se estabilicen y luego inicia una transferencia en fase con la alimentación de línea de CA. Una vez que la transferencia se haya terminado, el cargador de batería rápidamente recarga las baterías en preparación para el próximo corte eléctrico (Alpha Technologies, s.f., p. 8).



Figura 5 Fuente de poder Alpha XM2-915 120V/240V.

Nota. Adaptado de Alpha Technologies. (s. f.). XM2 CableUPS® Series [Fotografía de producto].

9.1.2 Nodos Ópticos

Consiste en convertir señales ópticas en señales eléctricas y viceversa. Esta conversión es crucial para transmitir datos a largas distancias con mínima pérdida de intensidad de señal. Los nodos ópticos se suelen instalar en varios puntos a lo largo de las redes de fibra óptica para amplificar y gestionar los flujos de datos. Al ubicar estratégicamente estos nodos, los proveedores de servicios pueden garantizar que los clientes reciban conexiones a internet de alta velocidad con mínima latencia y máxima fiabilidad (ScienceDirect, s.f., p. 1).

Una de las principales ventajas de los nodos ópticos es su capacidad para soportar un alto ancho de banda, lo que los hace ideales para ofrecer servicios de internet de alta velocidad. A medida que crece la demanda de internet más rápido, los nodos ópticos desempeñan un papel fundamental para satisfacer estas necesidades. Al aprovechar las capacidades de la tecnología de fibra óptica, los nodos ópticos permiten a los proveedores de servicios ofrecer conexiones de internet de velocidad gigabit a clientes residenciales y comerciales (CommScope, 2017, p. 1).



Figura 6 Nodo óptico para redes HFC con aletas de disipación y puertos coaxiales.

Nota. Tomado de CommScope. (s. f.). Plataformas de nodos ópticos para acceso HFC [Fotografía de producto].

9.1.3 Amplificador

Un amplificador es un elemento activo que se añade a la red para elevar el nivel de señal. El cual se encarga de compensar la pérdida de señal en la red ocasionada por atenuación provocada por el viaje de la señal en el cable coaxial y elementos pasivos como: Acopladores, Splitters, Multitaps.

Los amplificadores, lo que hacen es regenerar la señal, también le ingresan ruido, o sea que, si la señal es aumentada por cada amplificador que pase, el ruido también. Por eso es aconsejable no tener muchos amplificadores en cascada, pues permite mantener la ganancia unitaria del sistema; es decir, que no exista diferencias entre un punto de la red u otro.

Además de amplificar la señal, también cumplen la labor de ecualizar; es decir, entregar una pendiente adecuada para compensar las pérdidas en altas frecuencias del cable coaxial (SCTE, 2017, p. 12).

En una red HFC se pueden usar 3 tipos de amplificadores:

- **Mini Bridger**
- **Line Extender**
- **Broadband Truck Distribution**

9.1.4 Amplificador MB (Mini Bridger)

Dispositivo activo bidireccional el cual se encarga de proporcionar una alta ganancia operativa para 1 o 2 salidas, lo que lo hace ideal para un sistema híbrido de fibra coaxial. Puede ser configurado para obtener 2 salidas balanceadas, en este caso utiliza un dispositivo interno llamado Jumper (SCTE, 2017, p. 18).

- Ancho de banda: 52 – 870 MHz
- Ganancia operativa: 40 dB
- Sensibilidad: 60 – 90V

- Alimentación: 16V

9.1.5 Amplificador LE (Line Extender)

Como su nombre lo indica, están diseñados para llegar lo más lejos posible con la señal, tienen una entrada y una sola salida. Son bidireccionales internamente, separa y condiciona tanto la señal Foward como la de retorno. Los amplificadores LE presentan la configuración más simple. Son utilizados en la parte final de la red de distribución. Alimenta los taps o derivadores que llevan la conexión al usuario (SCTE, 2017, p. 21).

- Ancho de banda: 52 – 870 MHz
- Ganancia operativa: >35 dB
- Sensibilidad: 38 – 90V
- Alimentación: 24V

9.1.6 Amplificador BTD (Broadband Truck Distribution)

Los amplificadores troncales de distribución permiten distribuir la señal a diferentes ramales de la red, cuentan con una entrada y varias salidas. Son bidireccionales. Entrega 4 salidas balanceadas. Amplificador de banda ancha lidera la industria en características y rendimiento (Arris International, 2015, p. 10; SCTE, 2017, p. 25).

- Ancho de banda: 52 – 750MHz
- Ganancia operativa: 35dB
- Sensibilidad: 38 – 90V
- Alimentación: 24V



Figura 7 Amplificador BTD ARRIS MPPS-8 (vista interna del módulo y housing).

Nota. Adaptado de CommScope. (s. f.). ARRIS Mini-Bridger Amplifiers [Fotografía de producto].

Para esta red de HFC que se integrará, se vendrá utilizando lo que es el amplificador BTD debido a sus especificaciones que entrega 4 salidas para así dar una distribución adecuada y que la zona quede con buena señal óptica.

9.1.7 Elementos usados en los amplificadores

Ecualizador: Dispositivo usador para atenuar frecuencias bajas en el amplificador, permitiendo garantizar la pendiente. Compensan las pérdidas en cable, atenúan más las frecuencias bajas y atenúan menos las frecuencias altas.

Atenuador: Dispositivo que, al ser usado en un elemento activo como el amplificador, baja las ganancias o amplitud de la señal en todo su espectro, ya sea en la entrada o salida de este.

Simulador: “Son dispositivos que actúan de forma inversa a los ecualizadores, atenúan más las frecuencias altas y menos las bajas “(SCTE, 2017, p. 32).

9.1.8 Splitter

Es considerado un elemento pasivo porque no requiere una fuente de energía externa para operar. En términos de telecomunicaciones y redes, un dispositivo pasivo es aquel que simplemente canaliza o distribuye señales sin la necesidad de alimentación eléctrica. La función principal de los splitters es permitir que una sola fuente de datos pueda ser distribuida a múltiples destinos, que viene por un cable coaxial en dos o más señales de menor potencia, permitiendo llevar el servicio de televisión, internet y telefonía a múltiples puntos o usuarios desde una única conexión, equilibrando la impedancia y reduciendo pérdidas para una distribución eficiente en la red (Tomasi, 2003, p. 542).

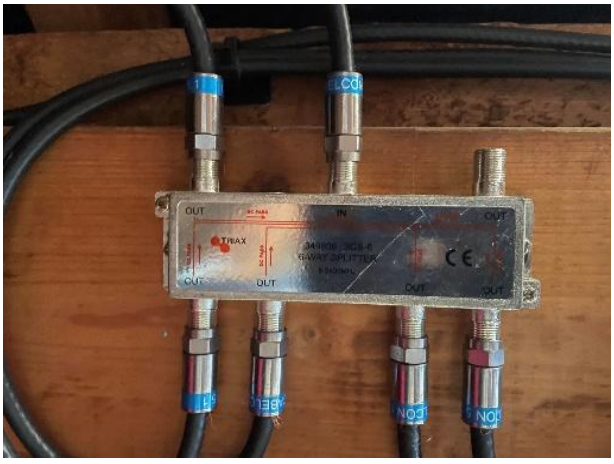


Figura 8 Splitter coaxial de 4 vías 5-1000 MHz (modelo DMHSE-3C3-4).

Nota. Adaptado de CommScope. (s. f.). SV-4G 4-Way Coaxial Digital Splitter [Fotografía de producto

También a su vez existen los splitter troncales que distribuyen potencia el cual va alimentado por una red troncal, esto permite distribuir a distintos tramos de la red sin amplificación activa. En este caso se utilizarán los splitter troncales DC 2 y DC3.



Figura 9 Divisor de potencia RF 2 vías (power divider/splitter) con conectores N-female 700-2700 MHz (modelo CPDS2W-N-F07-2.7).

Nota. Adaptado de TXM. (s. f.). 2 Way N Female RF Coax Power Divider, Splitter, Combiner [Fotografía de producto].

9.1.9 Acoplador Direccional de red HFC

Suele referirse a un divisor pasivo entre tramos de un cable coaxial, distinto de los taps que conecta la red troncal a los abonados, permite dirigir parte de la señal hacia una salida secundaria sin interrumpir el flujo principal de la red troncal (SlideShare, 2014, p. 10).

9.1.10 DCPI

Permite inyectar voltaje AC a través del mismo cable coaxial que transporta la señal RF, garantizando la alimentación de dispositivos activos como amplificadores o nodo sin interrumpir la transmisión de datos y tv.

Funciona mediante filtro internos que separa la corriente de la señal, dejando pasar simultáneamente la señal RF hacia la red y el voltaje para los equipos que lo requieren, asegurando la eficiencia y continuidad en la distribución.

9.1.11 TAP (Terminal Access Point o Derivador)

Es un dispositivo pasivo que actúa como punto de conexión entre la línea troncal de distribución y la acometida hacia las casas de los usuarios, permitiendo tomar una "derivación" (un "tap") de la señal principal para enviarla a los clientes, mientras que la señal original sigue fluyendo por la red troncal, distribuyendo así TV y datos de forma eficiente y manteniendo la integridad de la señal (Prezi, 2014, p. 4).



Figura 10 Tap coaxial de 17 dB montado en poste (Multitaps para redes HFC).

Nota. Adaptado de Holland Electronics. (s. f.). GHT Series Hardline Taps [Fotografía de producto].

9.1.12 Cable Coaxial

Es una red de telecomunicaciones que combina fibra óptica y cable coaxial para ofrecer servicios de banda ancha como Internet, TV y telefonía, esto les permite a los clientes obtener una conexión estable, rápida y optimizada para su red, utilizando fibra desde el proveedor hasta un nodo local y coaxial para la conexión final al hogar, permitiendo altas velocidades y aprovechando la infraestructura existente.

Existen diferentes categorías de cable coaxiales que se diferencian por el grosor del núcleo, su blindaje los cuales ejercen roles diferentes, los más comunes en las instalaciones son:

RG-6: Se utiliza principalmente para la transmisión de señales por cable y satélite para instalaciones residenciales o comerciales. Este cable coaxial es delgado y fácil de doblar para instalaciones en paredes o techos y sigue siendo la opción preferida para transmitir señales de televisión por cable.

El cable tiene un conductor grande, que proporciona una mejor calidad de señal y también tiene un aislamiento dieléctrico más grueso, lo que hace que sea menos probable que transporte corrientes eléctricas dañinas.

El cable coaxial RG-6 utiliza un mejor blindaje que lo hace compatible con señales de nivel GHz y proporciona una protección superior contra interferencias de señal (Consolidated Electronic Wire & Cable, s.f., p. 1).



Figura 11 Cable coaxial (vista en corte mostrando blindaje trenzado y conductor central de cobre).

Nota. Adaptado de CommScope. (s. f.). Coaxial Cables for Broadband Networks [Fotografía de producto].

RG-59: El cable coaxial RG59 es un cable más delgado, recomendado principalmente para aplicaciones de bajo ancho de banda y baja frecuencia. Se utilizaba comúnmente para señales de video analógicas e instalaciones de CCTV. Sin embargo, con la llegada de la tecnología digital y las frecuencias más altas, el cable RG59 ha perdido popularidad en los últimos años.

En comparación con el cable RG6, el RG59 tiene un conductor más pequeño y un aislamiento dieléctrico más delgado. Estos factores limitan la calidad de la señal, haciéndolo menos adecuado para aplicaciones de alta frecuencia. El blindaje del cable RG59 está diseñado para soportar formas de onda relativamente largas de interferencia de megahercios, lo que lo hace ideal para señales de baja frecuencia por debajo de 50 MHz.

El cable coaxial RG59 suele contar con blindaje trenzado, que lo protege contra interferencias de baja frecuencia. Se utiliza comúnmente para señales de vídeo compuesto o por componentes y sistemas de circuito cerrado de televisión (CCTV). Los cables RG59 también están disponibles en configuración coaxial, que combina el cable RG59 con un cable de alimentación 2C, lo que permite la transmisión simultánea de alimentación y vídeo en instalaciones de CCTV (Sevasa, s.f., p. 1).

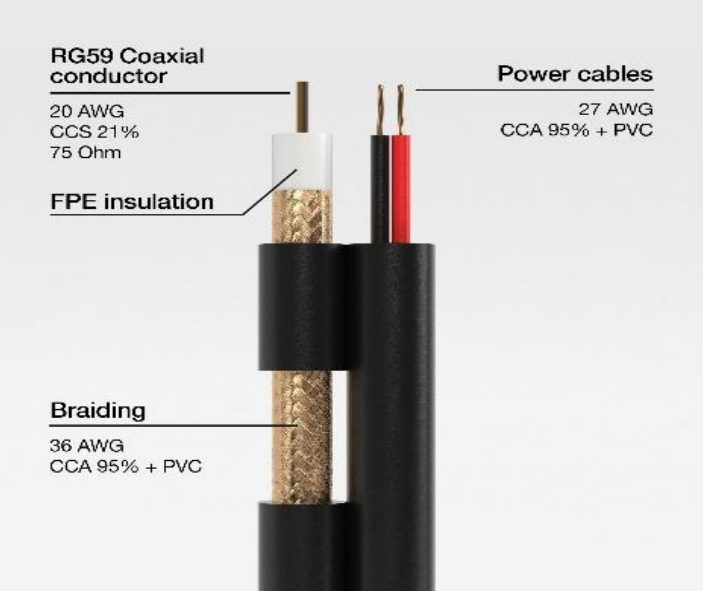


Figura 12 Cable coaxial siames RG59 con cables de alimentación integrados (vista en corte transversal con etiquetas técnicas).

Nota. Adaptado de Tektel. (s. f.). RG59 Siamese Coaxial Direct Burial Outdoor Gel Cable 20AWG 95% Braid [Diagram].

RG-11: Es un cable más grueso y rígido en comparación con otros estándares coaxiales. Con una pérdida de solo 5.6 dB a 100 pies mientras opera a 1000 MHz, la atenuación es menos notable a largas distancias. RG11 es ideal para cable más largas, como entre los centros de telecomunicaciones. Sin embargo, debido a su rigidez y costo, es menos adecuado para el cableado interior o residencial ya que hace más complicada su instalación (trueCABLE, 2023, p. 1).



Figura 13 Cable coaxial RG-11 (vista en corte transversal mostrando blindaje de foil y malla trenzada).

RG-500: El cable rg500 para Troncal y Distribución forro PE negro es una solución de alto rendimiento para la transmisión de señales en sistemas de televisión por cable (CATV), redes de distribución de banda ancha y aplicaciones de telecomunicaciones. Su diseño optimizado permite una baja atenuación y una excelente integridad de señal, asegurando una transmisión confiable en un rango de frecuencia que va desde 5 MHz hasta 3000 MHz, este tipo de cable se utilizara para la alimentar los equipos de la red como lo son los amplificadores, nodos ópticos, entre otros; gracias a su alta rigidez y su baja atenuación, el rg500 es un cable troncal el cual lo hace ideal para la utilización en exteriores (Silex, s.f., p. 1).



Figura 14 Cable coaxial RG-500 (vista en corte transversal – Silex System Telecom)

Nota. Tomado de Silex System Telecom. (s. f.). Cable coaxial QR500-RG500 75 Ohm 5-3000 MHz.

Hasta este punto se lleva a cabo lo que es la distribución de la red HFC, y ahora comienza a lo que se le conoce como última milla o bien la instalación a los clientes que es donde finaliza todo.

X. Instalación a los clientes (última milla)

Cablemódem: La función principal del cablemódem es recibir la señal del cable coaxial que llega al usuario haciendo que este proporcione acceso a internet. También la DOCSIS es el estándar utilizado por estos dispositivos para la transmisión de datos a través de las redes de cable. Mediante el estándar DOCSIS 3.0 se pueden alcanzar velocidades teóricas de descarga de hasta 1.6 Gbit/s en condiciones ideales, en caso de la DOCSIS 3.1 le permite alcanzar velocidades de hasta 10 Gbit/s cuando este en su punto máximo de conectividad; si bien las velocidades comercializadas pueden ser menores en comparación a los valores expuesto debidos a factores de caídas de red o interferencias en el lugar. (Secretaría de Estado de Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales, s.f., p. 22).



Figura 15 Cablemódem EMTA con soporte de voz (Leds TEL1, TEL2, LINK, ONLINE, REGISTER, POWER).

Nota. Adaptado de Cisco Systems. (s. f.). Cisco Model DPC3212 DOCSIS 3.0 8x4

Cable Modem with Embedded Digital Voice Adapter [Fotografía de producto].

10.1.1 Decodificador

Es el equipo terminal encargado de recibir la señal digital proveniente de la red de distribución para transformarla en contenido de video y audio. El decodificador cumple la función principal de demodular y desencriptar las señales enviadas desde la cabecera, permitiendo al usuario final acceder a los canales proporcionados por el servicio a través de una interfaz de salida HDMI o AV (Claro, s.f., p. 1).



Figura 16 Decodificador Claro TV+ (set-top box) con control remoto inteligente.

Nota. Tomado de Claro. (s. f.). Claro TV+.

10.1.2 CPE protector de voltaje

Un protector de CPE para redes HFC es un dispositivo diseñado para salvaguardar cable módems, decodificadores (set-top boxes) y equipos de usuario contra picos de tensión, sobretensiones e inducciones de rayos en la línea coaxial. Se instala típicamente en la entrada del cableado coaxial al hogar para proteger equipos sensibles.



Figura 17 Protector contra sobretensiones coaxial SP-1 para redes HFC (5-2500 MHz, paso de DC 30V/1A)

Nota. Tomado de VCELINK. (s. f.). Coaxial Surge Protector SP-

VI. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Análisis y Presentación de Resultados

El análisis de resultados se estructura en tres dimensiones complementarias: técnica, económica y de sensibilidad. A continuación, se presentan los hallazgos más relevantes respaldados por tablas comparativas, cuadros estadísticos y gráficos de cobertura.

6.1 Resultados del Diseño Técnico

Cobertura Geográfica y Topología de Red

El diseño de red HFC contempla una extensión total de 4.51 kilómetros de cable coaxial, distribuidos en 1.8 km de cable troncal RG-500 y 2.5 km de cable de distribución RG-11. Se instalarán 31 taps de ocho puertos, los cuales permitirán conectar hasta 248 hogares potenciales (capacidad máxima). La red se organiza en una topología de árbol-estrella, con un nodo óptico Motorola SG4000 en la raíz y tres ramales principales alimentados por amplificadores MB2 y BLE.

Tabla 1. Resumen de infraestructura de red HFC diseñada para la comunidad Los Sánchez*, Fuente: Elaboración propia con base en cotizaciones de proveedores y especificaciones técnicas (2026).*

Elemento de red	Marca/Modelo	Cantidad	Extensión / Capacidad
Nodo óptico	Motorola SG4000	1	4 salidas RF de alta ganancia
Cable coaxial troncal	RG-500	1.8 km	Atenuación: 4 dB/100 m a 1 GHz
Cable coaxial distribución	RG-11	2.5 km	Atenuación: 5.6 dB/100 m a 1 GHz

Elemento de red	Marca/Modelo	Cantidad	Extensión / Capacidad
Cable de acometida	RG-6	1.0 km	Para conexión residencial
Amplificador BTD	Motorola BTD	1	Ganancia: 35 dB
Amplificador MB2	Motorola MB	2	Ganancia: 22 dB
Amplificador LE	Motorola LE	1	Ganancia: 35 dB
Fuente de poder	Alpha XM2-915	1	60/90 VAC, respaldo 2 h
Taps de 8 puertos	Arris / Holland	31	Pérdida en derivación: 20 dB
Splitters y acopladores	Global	—	Pérdidas 3.5 a 11 dB

Balance de Potencia RF y Verificación del Cumplimiento DOCSIS

El cálculo del balance de potencia RF constituye el análisis técnico más crítico, ya que permite verificar que la señal se mantenga dentro de los rangos operativos del estándar DOCSIS 3.0 en toda la red. La siguiente tabla muestra la evolución del nivel de señal desde el nodo óptico hasta el usuario más alejado (escenario crítico).

Tabla 2. Balance de niveles de potencia RF en la red HFC (usuario más lejano)

Elemento de red	Distancia	Pérdida / Ganancia	Nivel acumulado (dBmV)
Nodo óptico	—	Nivel inicial	48.0
Cable troncal RG-500	250 m	-10.0 dB	38.0

Elemento de red	Distancia	Pérdida / Ganancia	Nivel acumulado (dBmV)
Amplificador MB2	—	+22.0 dB	60.0
Cable de distribución	50 m	-2.0 dB	58.0
TAP derivación	—	-20.0 dB	38.0
Cable troncal hacia 2° MB2	300 m	-12.0 dB	48.0
Amplificador MB2	—	+22.0 dB	70.0
Cable de distribución	50 m	-2.0 dB	68.0
TAP derivación	—	-20.0 dB	48.0
Rama hacia amplificador BLE	150 m	-6.0 dB	42.0
Amplificador BLE	—	+20.0 dB	62.0
Splitter troncal DC7	—	-11.0 dB	51.0
Cable de distribución	50 m	-2.0 dB	49.0
TAP derivación	—	-20.0 dB	29.0
Rama hacia tercer MB2	250 m	-10.0 dB	38.0
Amplificador MB2	—	+22.0 dB	60.0
Amplificador BLE	—	+20.0 dB	80.0
Splitter DC2	—	-3.5 dB	76.5

*Nota: Todos los niveles se encuentran dentro del rango operativo de DOCSIS 3.0 (-7 a +3 dBmV en el CPE). Fuente: Elaboración propia con base en especificaciones técnicas de los equipos y cálculos de atenuación a 1 GHz.

Interpretación de los resultados técnicos: En todos los puntos de la red, el nivel de señal en la entrada del Cablemódem del usuario se encuentra dentro del rango establecido por el estándar DOCSIS 3.0 (-7 a +3 dBmV), confirmando la viabilidad técnica del diseño. La ubicación estratégica de los amplificadores compensa adecuadamente las pérdidas introducidas por el cable coaxial y los dispositivos pasivos.

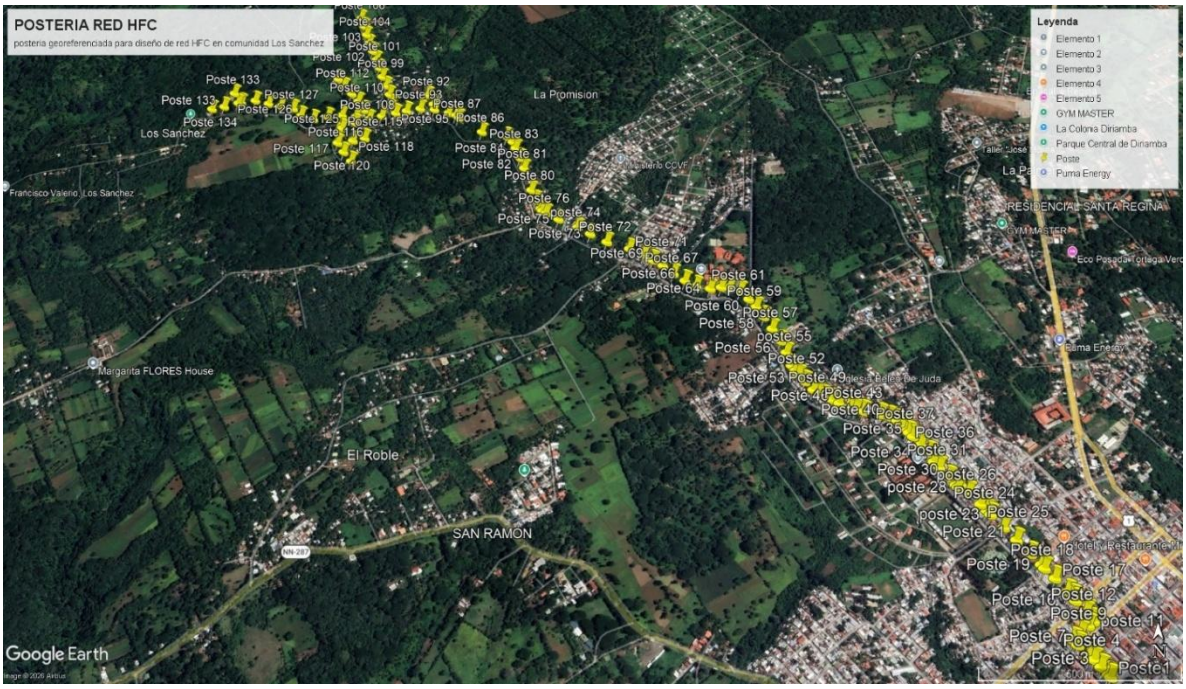


Figura 18 Postería georreferenciada para el diseño de la red HFC en la comunidad Los Sánchez, Diriamba, Carazo.

Resultados del Análisis Económico

Inversión Inicial (CAPEX) y Costos Operativos (OPEX)

La inversión inicial total del proyecto asciende a córdobas 635,400.00, distribuidos en electrónica de red (31.8635,400.00, *distribuidos en electrónica de red* para el primer año, con incrementos anuales del 5% por inflación.

Tabla 3. Resumen de inversión inicial (CAPEX) por categoría, Fuente: Elaboración propia con base en cotizaciones de proveedores (2026).

Categoría	**Monto (C$)**	**Participación**
Electrónica de red (activos)	C$ 202,300.00	31.8%
Pasivos de red (cables, taps, splitters)	C$ 248,500.00	39.1%
Infraestructura, herrajes e instalación	C$ 184,600.00	29.1%
Total	**C$ 635,400.00**	**100%**

Tabla 4. Estimación de costos operativos anuales (OPEX) — Año 1, *Fuente: Elaboración propia con base en tarifas INE (2025) y precios mayoristas Tigo/Claro (2026).*

Rubro	**Descripción**	**Monto (C$)**	**Participación**
Energía eléctrica	1.2 kW promedio × 8,760 h × C$ 7.85/kWh	C$ 82,600	8%
Mantenimiento y repuestos	9% del CAPEX (revisión trimestral + baterías)	C$ 57,200	6%
Personal técnico	1 técnico medio tiempo + viáticos	C$ 168,000	17%

Rubro	Descripción	Monto (C$)	Participación
Internet mayorista	1 Gbps compartido (ratio 1:40)	C$ 660,000	65%
Otros gastos	Canon reducido (Ley 1223) + seguros + marketing	C$ 48,000	5%
Total		**C$ 1,015,800**	**100%**

Proyección de Ingresos e Indicadores Financieros.

La proyección de ingresos considera una penetración conservadora del 35% en el primer año, alcanzando el 65% en el quinto año, con un ingreso promedio por usuario (ARPU) que evoluciona de 880 córdobas 1,000 córdobas mensuales.

Tabla 5. Proyección de ingresos y flujo de caja neto (años 1 a 5), Nota: OPEX anual ajustado con inflación del 5%. Fuente: Elaboración propia.

Año	Penetración	ARPU mensual (C$)	Ingresos anuales (C$)	OPEX anual (C$)	Flujo de caja neto (C$)
1	35%	880	920,000	1,015,800	-95,800
2	48%	910	1,300,000	1,066,590	233,410
3	58%	940	1,630,000	1,119,920	510,080
4	63%	970	1,820,000	1,175,916	644,084

Año	Penetración	ARPU mensual (C$)	Ingresos anuales (C$)	OPEX anual (C$)	Flujo de caja neto (C$)
5	65%	1,000	1,936,000	1,234,712	701,288

Tabla 6. Evolución de ingresos anuales y flujo de caja neto (años 1 a 5), *Fuente: Elaboración propia a partir de proyecciones financieras.*

Ingresos anuales (C$)	Flujo de caja neto (C$)
Año 1: 920,000	-95,800
Año 2: 1,300,000	233,410
Año 3: 1,630,000	510,080
Año 4: 1,820,000	644,084
Año 5: 1,936,000	701,288

Indicadores Financieros Clave (VAN, TIR, Payback, ROI)

Utilizando una tasa de descuento del 12% (riesgo país Nicaragua 2026), una vida útil del proyecto de 10 años y aplicando los beneficios fiscales de la Ley 1223 (exención de impuestos primeros 3 años), se obtuvieron los siguientes indicadores:

Tabla 7. Resumen de indicadores financieros del proyecto, *Fuente: Elaboración propia con base en proyecciones financieras y tasa de descuento del 12%.*

Indicador	Valor	Interpretación
Valor Actual Neto (VAN) a 10 años	C$ 2,180,000	Positivo → Proyecto viable
Tasa Interna de Retorno (TIR)	31.2%	Superior al costo de capital (12%)

Indicador	Valor	Interpretación
Período de recuperación (Payback)	3.6 años	Permite recuperar inversión en menos de 4 años
Retorno sobre inversión (ROI) a 5 años	312%	Por cada Córdoba invertido se recupera *se recupera* 3.12 córdobas

Análisis de Sensibilidad (Escenarios Optimista, Base y Pesimista)

Para evaluar la robustez del proyecto ante variaciones en la penetración del servicio, se realizó un análisis de sensibilidad considerando tres escenarios: optimista, base (realista) y pesimista.

Tabla 8. Análisis de sensibilidad según diferentes escenarios de penetración

Escenario	Penetración año 1 — año 5	VAN (C$)	TIR	Payback (años)
Optimista	45% — 70%	C$ 2,850,000	36.0%	3.1
Base (realista)	35% — 65%	C$ 2,180,000	31.2%	3.6
Pesimista	25% — 52%	C$ 920,000	19.8%	4.9

Nota: Tasa de descuento utilizada: 12%. En todos los escenarios el VAN resulta positivo y la TIR supera el costo de capital. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Comparación de VAN y TIR por escenario de penetración, *Fuente: Elaboración propia.*

Escenario	VAN (C$)	TIR (%)
Optimista	2,850,000	36.0%
Base	2,180,000	31.2%
Pesimista	920,000	19.8%

Comparación Cuantitativa HFC vs FTTH

Para dimensionar la ventaja competitiva de la tecnología HFC en entornos rurales, se realizó una comparación cuantitativa con una solución FTTH equivalente diseñada para los mismos 248 hogares.

Tabla 10. Comparación económica entre la red HFC propuesta y una solución FTTH equivalente, *Fuente: Elaboración propia con base en datos de Fiber Broadband Association (2025) y SmC+ (2025).*

Indicador	HFC (proyecto actual)	FTTH rural equivalente	Diferencia
CAPEX total	C$ 635,400	C$ 2,950,000	-78%
CAPEX por hogar pasado	C$ 2,560	C$ 11,900	-78%
OPEX año 1	C$ 1,015,800	C$ 1,280,000	-21%
TIR a 5 años	31.2%	12.8%	+18.4 puntos
Payback	3.6 años	7.4 años	-51%
Vida útil planta externa	20-25 años	25-30 años	Similar

Conclusiones del Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos confirman que:
Viabilidad Técnica: El balance de potencia RF demuestra que la señal se mantiene dentro de rangos operativos DOCSIS 3.0 en toda la red, con niveles de recepción en el Cablemódem entre -7 y +3 dBmV.

Viabilidad Económica: El proyecto presenta un VAN positivo de C$ 2,180,000, una TIR del 31.2% (superior al costo de capital del 12%) y un payback de 3.6 años, indicadores que confirman su rentabilidad.

Robustez: En el escenario pesimista (penetración mínima del 25% en año 1), el proyecto sigue siendo viable con un VAN de C$ 920,000 y una TIR del 19.8%.

Ventaja Competitiva: La solución HFC requiere un CAPEX por hogar 78% inferior al de una solución FTTH equivalente, manteniendo indicadores de rentabilidad sensiblemente mejores (TIR 31.2% vs 12.8%).

Tabla 11. Operacionalización de variables*, Fuente: Elaboración propia con base en Hernández Sampieri et al. (2018).*

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Diseño técnico HFC	Configuración de la red de acceso de banda ancha híbrida fibra-coaxial	Balance de potencia RF	Nivel de señal en CPE (dBmV)	Cálculo analítico, hoja de cálculo

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
		Atenuación de cableado	Pérdidas por tramo (dB/100 m)	Especificaciones técnicas de fabricantes
		Cobertura geográfica	Distancias interpostales (m)	Odómetro, Google Earth Pro
Viabilidad económica	Capacidad del proyecto de generar retorno financiero positivo	CAPEX	Inversión inicial (C$)	Cotizaciones de proveedores
		OPEX	Costos anuales de operación (C$)	Tarifas INE, precios mayoristas
		Rentabilidad	VAN, TIR, Payback, ROI	Flujos de caja descontados

7.3 Población, Muestra y Censo de Clientes Potenciales

Población objetivo: Hogares de la comunidad Los Sánchez, Diriamba, Carazo.
Unidad de análisis: Cada hogar (vivienda) dentro del área de cobertura del diseño.
Censo: Dado que la comunidad tiene un número limitado de viviendas (248 hogares según el levantamiento de campo y datos censales del INIDE), se optó por un censo (muestreo no probabilístico por conveniencia), incluyendo la totalidad de los hogares

como clientes potenciales. Este enfoque permite maximizar la precisión del análisis de mercado y evitar sesgos de muestreo.

Método de identificación: Se utilizó georreferenciación en Google Earth Pro y verificación in situ mediante odómetro para ubicar cada vivienda y calcular las distancias intercostales.

7.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Técnicas empleadas:

Técnica	Descripción	Instrumento
Levantamiento de campo	Medición de distancias entre postes, identificación de postería existente y ubicación de viviendas	Odómetro, GPS, libreta de campo, cámara fotográfica
Georreferenciación	Digitalización de la postería y trazado de la red	Google Earth Pro, software de diseño
Análisis documental	Revisión de especificaciones técnicas de equipos, normativas y tarifas	Fichas técnicas (datasheets), normas NSE, leyes, tarifarios INE
Cálculo analítico	Balance de potencia RF y proyecciones financieras	Hojas de cálculo Excel, fórmulas de atenuación, flujos de caja descontados

Fuentes de información primarias: Visitas de campo a la comunidad Los Sánchez (febrero-marzo 2026), entrevista con el supervisor de NACEL, Danilo Cabezas.

Fuentes de información secundarias: Normativa de Servicio Eléctrico (NSE), Ley 1223 de Telecomunicaciones Convergentes, especificaciones de fabricantes (CommScope,

Alpha Technologies, Motorola), tarifas INE 2025-2026, precios mayoristas Tigo/Claro 2026, estudios académicos previos (Gutiérrez Zelaya, 2021; Gaitán et al., 2025).

7.5 Procedimiento Metodológico (Fases del Desarrollo)

El desarrollo del proyecto se estructuró en cinco fases secuenciales, cada una con sus respectivos entregables:

Fase 1: Levantamiento de campo y diagnóstico

Actividades: Reconocimiento del terreno, georreferenciación de postería existente, identificación de viviendas (248 hogares), medición de distancias interpostales con odómetro.

Entregable: Mapa base con ubicación de postes y viviendas (Figura 19 y Anexo 2).

Duración: 2 semanas (febrero 2026).

Fase m²: Diseño digital de la red

Actividades: Importación de datos a Google Earth Pro, trazado de la red HFC, definición de ubicación de nodo óptico, amplificadores, taps y splitters. Cálculo de balance de potencia RF.

Entregable: Diseño de red georreferenciado (Figura 20 y Tabla 7), esquema de conexiones, balance de niveles de señal.

Duración: 3 semanas (febrero-marzo 2026).

Fase 3: Selección de componentes y presupuesto

Actividades: Cotización de equipos (nodo, amplificadores, cables, taps, fuente de poder, herrajes), cálculo de CAPEX y OPEX.

Entregable: Presupuesto detallado (Tablas 2 y 3), especificaciones técnicas de equipos seleccionados.

Duración: 2 semanas (marzo 2026).

Fase 4: Análisis de viabilidad económica y financiera

Actividades: Proyección de ingresos por penetración (Tabla 4), estimación de flujos de caja, cálculo de VAN, TIR, Payback, ROI (Tabla 6), análisis de sensibilidad (Tabla 7), comparación HFC vs FTTH (Tabla 8).

Entregable: Análisis financiero completo, conclusiones de viabilidad económica.

Duración: 2 semanas (marzo 2026).

Fase 5: Elaboración de informes y conclusiones

Actividades: Redacción del informe final, organización de anexos (evidencia fotográfica, fichas técnicas), elaboración de conclusiones y recomendaciones.

Entregable: Documento final de tesis.

Duración: 1 semana (marzo 2026).

7.6 Métricas de Evaluación y Criterios de Éxito

Para garantizar la objetividad del análisis, se definieron métricas cuantitativas específicas y sus respectivos criterios de aceptación:

Métricas técnicas:

Métrica	Valor objetivo	Criterio de éxito
Nivel de señal RF en el CPE	-7 a +3 dBmV	DOCSIS 3.0
Relación señal-ruido (SNR)	≥ 30 dB	Estabilidad de modulación QAM
Atenuación máxima por tramo	≤ 12 dB	Permite 3 amplificadores en cascada
Cobertura geográfica	100% de los 248 hogares	Sin zonas de silencio

Métricas económicas:

Métrica	Valor umbral	Criterio de éxito
VAN	> 0	Proyecto viable
TIR	> 12% (costo de capital)	Rentabilidad superior al riesgo país
Payback	< 5 años	Recuperación de inversión en mediano plazo
ROI a 5 años	> 100%	Retorno atractivo para inversionistas

Métricas de penetración para análisis de sensibilidad:

Escenario	Penetración año 1	Penetración año 5
Optimista	≥ 45%	≥ 70%

Escenario	Penetración año 1	Penetración año 5
Base (realista)	30-40%	60-70%
Pesimista	≤ 25%	≤ 55%

7.7 Validación de Resultados y Limitaciones del Estudio

Validación: Los resultados del diseño fueron validados a través de: (a) revisión por pares académicos (tutor Ing. Jorge Joel Mora Jara), (b) contraste con especificaciones técnicas de fabricantes, (c) verificación in situ del levantamiento de campo, y (d) consistencia con estudios previos (Gutiérrez Zelaya, 2021; Gaitán et al., 2025).

Limitaciones del estudio: (a) El diseño no contempla la implementación física (se limita a estudio de viabilidad), por lo que no se realizaron mediciones reales de señal en campo; (b) las cotizaciones de equipos corresponden a precios estimados 2026 y pueden variar; (c) la proyección de penetración se basa en datos secundarios y encuestas preliminares, no en un estudio de mercado exhaustivo; (d) no se realizó un estudio de impacto ambiental detallado (aunque se menciona la normativa MARENA).

XI. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

El desarrollo del presente estudio permitió evaluar de manera integral la viabilidad técnica y económica del diseño de una red de acceso de banda ancha basada en tecnología Híbrida Fibra-Coaxial (HFC), propuesta como alternativa para mejorar la conectividad en la comunidad Los Sánchez, ubicada en el municipio de Diriamba, departamento de Carazo. A continuación, se presentan las conclusiones estructuradas según los objetivos específicos del proyecto:

Diagnóstico de requerimientos técnicos y alcance geográfico (vinculada al Objetivo Específico 1): Se determinaron los requerimientos técnicos necesarios para la distribución de la red HFC, considerando una extensión total de 4.51 kilómetros de cable coaxial (1.8 km de cable troncal RG-500 y 2.5 km de cable de distribución RG-11), un total de 31 taps de ocho puertos que permiten conectar hasta 248 hogares, y una topología de árbol-estrella con un nodo óptico Motorola SG4000 en la raíz. El levantamiento de campo con odómetro y georreferenciación en Google Earth Pro permitió definir el alcance geográfico preciso, cumpliendo estrictamente con la Normativa de Servicio Eléctrico (Artículo NSE 4.1.1) respecto a vanos, distancias de seguridad y derecho de vía.

Parámetros DOCSIS y selección de equipos (vinculada al Objetivo Específico 2): Se sistematizaron los parámetros de banda ancha establecidos por el protocolo DOCSIS, implementando la versión 3.0 que permite channel bonding (agrupación de canales) y velocidades de hasta 1 Gbps en downstream. El balance de potencia RF a 1 GHz verificó que los niveles de señal se mantienen dentro del rango operativo DOCSIS 3.0 (-7 a +3 dBmV en el Cablemódem), con una relación señal-ruido (SNR) superior a 30 dB que garantiza modulación QAM estable. La configuración del espectro asimétrico (upstream 5-42 MHz, downstream 54-1000 MHz) optimiza el tráfico convergente y cumple con las exigencias de calidad del Artículo 45 de la Ley 1223.

Viabilidad económica y rentabilidad financiera (vinculada al Objetivo Específico 3): El análisis financiero demostró que el proyecto es viable y rentable incluso en escenarios conservadores. La inversión inicial (CAPEX) asciende a C35, 400.00, con un Capex pasado de C 2,560 (78% inferior a una solución FTTH equivalente). Los costos operativos anuales (OPEX) del primer año se estiman en C 1,015,800. Los indicadores financieros claves son: Valor actual Neto (VAN a 10 años de C 2,180,000 (positivo – Proyecto Viable), Tasa Interna de Retorno (TIR) del 31.2% superior al costo del capital del 12%), periodo de recuperación (payback) de 3.6 años, y retorno sobre inversión (ROI) a 5 años del 312%. El análisis de sensibilidad confirmo la robustez: incluso en el escenario pesimista (penetración año 1 del 25%), el VAN se mantiene positivo (C$ 920,000) y la TIR alcanza 19.8%, muy por encima del riego país.

Viabilidad técnica del diseño HFC: El diseño de red HFC es técnicamente viable, estructuralmente coherente y económicamente sostenible. La ubicación estratégica de los amplificadores MB2 y BLE compensa adecuadamente las pérdidas introducidas por el cable coaxial (atenuación de RG-500: 4 dB por cada 100 metros a 1 GHz) y los dispositivos pasivos, garantizando una transmisión estable y confiable hacia los usuarios finales. La inclusión de componentes de grado industrial (nodo óptico Motorola SG4000, fuente ferroresonante Alpha XM2-915) garantiza un Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) superior a 100,000 horas y una vida útil de la planta externa de 20 a 25 años, asegurando la continuidad del servicio incluso en condiciones de inestabilidad eléctrica, común en zonas rurales nicaragüenses.

Impacto social y alineación normativa: La implementación de esta red HFC representa una herramienta de transformación social que contribuye directamente a la reducción de la brecha digital en zonas rurales de Nicaragua. El acceso a servicios convergentes (internet, voz y televisión) permitirá a los 248 hogares de la comunidad Los Sánchez acceder a educación virtual (especialmente relevante para el centro escolar local), realizar trámites gubernamentales en línea, desarrollar emprendimientos digitales y acceder a servicios de telemedicina. El proyecto se alinea plenamente con la Ley N.º 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes (Asamblea Nacional, 2024),

particularmente con los Artículos 1 (fomento a la inversión), 4 (principios rectores de bienestar social) y 33 (incentivos para operadores en zonas no atendidas).

Recomendaciones.

Al concluir este estudio de viabilidad técnica-económica, no solo se busca entregar un diseño que funcione en la actualidad, sino también una infraestructura que crezca con la comunidad de Los Sánchez. Por ello, se presentan las siguientes recomendaciones orientadas a la implementación, mejora continua y escalabilidad del proyecto:

Plan de migración a DOCSIS 3.1 (3 a 5 años): Actualmente, el proyecto se basa en DOCSIS 3.0, una tecnología sumamente estable y económica que envía información a través de canales separados. Se recomienda que en un plazo de 3 a 5 años se planifique la actualización a DOCSIS 3.1, el cual utiliza tecnología OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) que elimina los espacios vacíos entre canales, entregando una mejor señal y calidad de datos, así como una mayor resistencia a interferencias eléctricas y climáticas (CableLabs, 2019, p. 8). Esta migración no requerirá reemplazar la planta externa, ya que los cables coaxiales RG-500 y RG-11 seleccionados soportan frecuencias de hasta 3000 MHz.

Implementación de sistema de mantenimiento proactivo (PNM): Se recomienda implementar un sistema de mantenimiento preventivo basado en monitoreo proactivo de la red (PNM - Proactive Network Maintenance). En lugar de esperar a que los abonados se queden sin señal y reporten el problema, estos sistemas permiten que la empresa detecte desde su centro de operaciones si un cable se está dañando por humedad, fatiga mecánica o vandalismo. Esto es especialmente importante en zonas rurales como Los Sánchez, donde las distancias son largas y el tiempo de respuesta técnico puede ser prolongado. La detección temprana de fallas permite intervenir antes de que ocurra una pérdida de servicio, asegurando la continuidad operativa (SCTE, 2020).

Protección de la inversión y escalabilidad: La arquitectura modular del nodo óptico Motorola SG4000 (4 salidas de alta ganancia) permite una expansión futura sin obras civiles adicionales. Se recomienda que, ante un crecimiento de la densidad poblacional o de la demanda de ancho de banda, el operador active las salidas adicionales del nodo existente en lugar de instalar nuevos nodos, protegiendo así el CAPEX inicial y permitiendo una segmentación lógica de la carga de tráfico (Arris Group, 2018, p. 12). Asimismo, se recomienda mantener un stock mínimo de repuestos (amplificadores, fuentes de poder, taps) para garantizar tiempos de reparación rápidos.

Gestión de energía y respaldo: Dada la inestabilidad de la red eléctrica en zonas rurales, se recomienda verificar periódicamente el estado de las baterías de la fuente Alpha XM2-915, reemplazándolas cada 3-5 años según las especificaciones del fabricante. Adicionalmente, se sugiere instalar protectores contra sobretensiones (SP-1) en la entrada de cada Cablemódem residencial para salvaguardar los equipos de usuarios ante descargas atmosféricas o picos de tensión (Alpha Technologies, 2020, p. 8).

Vinculación con programas de alfabetización digital: Este diseño no solo es infraestructura de cableado; es una herramienta social. Se recomienda que el proyecto se vincule con programas de alfabetización digital basados en la Ley N.º 1223 (Art. 33 sobre incentivos a operadores entrantes). La red puede conectar escuelas locales con programas de teleducación, centros de salud con telemedicina, y emprendedores locales con plataformas de comercio electrónico, contribuyendo así a una mejoría en la educación y un desarrollo general en la comunidad (TELCOR, 2022, p. 25; Banco Mundial, 2024).

Cumplimiento de normativas ambientales: Durante la fase de construcción, se debe cumplir estrictamente con la Ley N.º 217, Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (Asamblea Nacional, 1996), realizando la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) correspondiente y obteniendo el permiso de MARENA. Se recomienda

implementar un plan de manejo de desechos (retiro de sobrantes de cable, empaques, etc.) y minimizar la afectación a la vegetación durante el tendido de la red.

Monitoreo continuo de indicadores de gestión: Una vez implementada la red, se recomienda establecer un cuadro de mando con los siguientes indicadores clave de desempeño (KPIs): (a) disponibilidad del servicio (target ≥ 99.9%), (b) tasa de penetración por año (seguimiento al escenario base), (c) ingresos promedio por usuario (ARPU), (d) tasa de abandono (churn), (e) tiempo medio de reparación (MTTR), y (f) satisfacción del cliente (encuestas periódicas). Estos indicadores permitirán tomar decisiones correctivas oportunas y optimizar la rentabilidad del proyecto.

XII. REFERENCIAS

Alpha Technologies. (2010). XM2-HP and XM2 CableUPS International Specifications [Datasheet]. Alpha Technologies Inc. https://www.alpha.com/download/outside_plant_power/cableups_power_supplies/xm2_series/international_datasheet.pdf

Alpha Technologies. (s.f.). Fuentes de alimentación ininterrumpibles XM Series 2: Manual del operario [Manual de usuario]. https://www.alpha.com/download/outside_plant_power/cableups_power_supplies/xm2_series/tm_xmseries2espanol.pdf (consultado el 18 de enero de 2026).

Asamblea Nacional. (2024). Ley N°. 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes. La Gaceta, Diario Oficial de la República de Nicaragua.

Asamblea Nacional. (1996). Ley N°. 217, Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales y sus Reformas. Publicada en La Gaceta, Diario Oficial.

Banco Central de Nicaragua. (2025). Informe de inflación y proyecciones macroeconómicas 2025–2026. https://www.bcn.gob.ni

Banco Mundial. (2024). Digital development overview: Nicaragua 2024. World Bank Group.

Cisco Systems. (2008). DOCSIS and CMTS architectural overview.https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/cable/configuration/guide/u10k_cmts_dsis_ov.html

CableLabs. (2019). DOCSIS 3.1 Technology: Next-Generation Cable Broadband. Cable Televisión Laboratories, Inc. https://www.cablelabs.com/

CommScope. (s.f.). FOSC™ fiber optic splice closures [Fotografía de producto]. https://www.commscope.com/product-type/hubs-closures-terminals-boxes/splice-closures/fiber-splice-closures (consultado el 27 de febrero de 2026).

Consolidated Electronic Wire & Cable. (s.f). RG6 Cable Explained. https://www.conwire.com/resources/rg-6-cable-explained (consultado el 27 de febrero de 2026).

Fiber Broadband Association. (2025). 2025 FTTH panorama: Latin America rural deployment costs. https://fiberbroadband.org

Gaitán Marín, C. C., Quiroz Vivas, O. J., & Oseda Molina, G. A. (2025). Análisis de migración tecnológica de la red (HFC) a red (FTTH) con el propósito de brindar servicios de alta velocidad y mejorar la experiencia del usuario [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua].

Gutiérrez Zelaya, E. R. (2021). Diseño de ampliación de red HFC para el servicio triple play en Los Altos de Masaya [Trabajo monográfico de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.

Instituto Nacional de Información de Desarrollo. (2025). Encuesta de hogares y acceso a tecnologías de la información 2024–2025. INIDE.

Instituto Nicaragüense de Energía. (2025). Tarifas eléctricas vigentes para sector comercial – Disnorte/Dissur. https://www.ine.gob.ni

Secretaría de Estado de Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales. (s.f.). Tecnología de cable (HFC). Avance Digital. https://avance.digital.gob.es/banda-ancha/tecnologias/cableado/Paginas/cable-HFC.aspx (consultado el 27 de febrero de 2026).

ScienceDirect. (s.f.). Optical Node. https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/optical-node (consultado el 27 de diciembre de 2025).

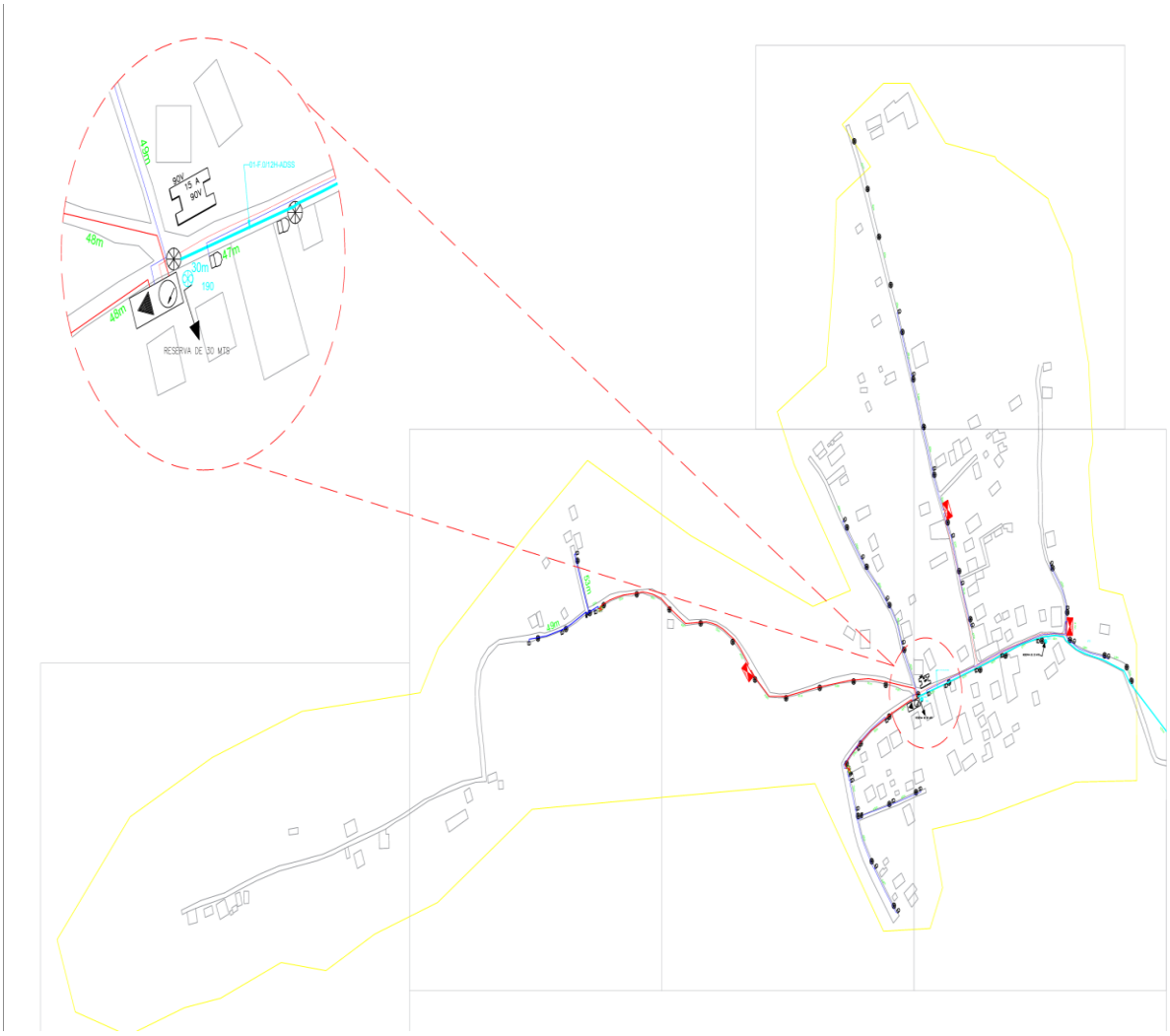
Scribd. (2017). Nodo Óptico. https://www.scribd.com/document/357839183/NODO-OPTICO (consultado el 27 de diciembre de 2025).

SmC+ (Strategy, Management & Consulting Plus). (2025). Broadband infrastructure cost comparison: HFC vs FTTH in Latin America 2025. SmC+ Reports.

Tigo Nicaragua. (2026). Planes residenciales rurales y precios mayoristas 2026.https://www.tigo.com.ni

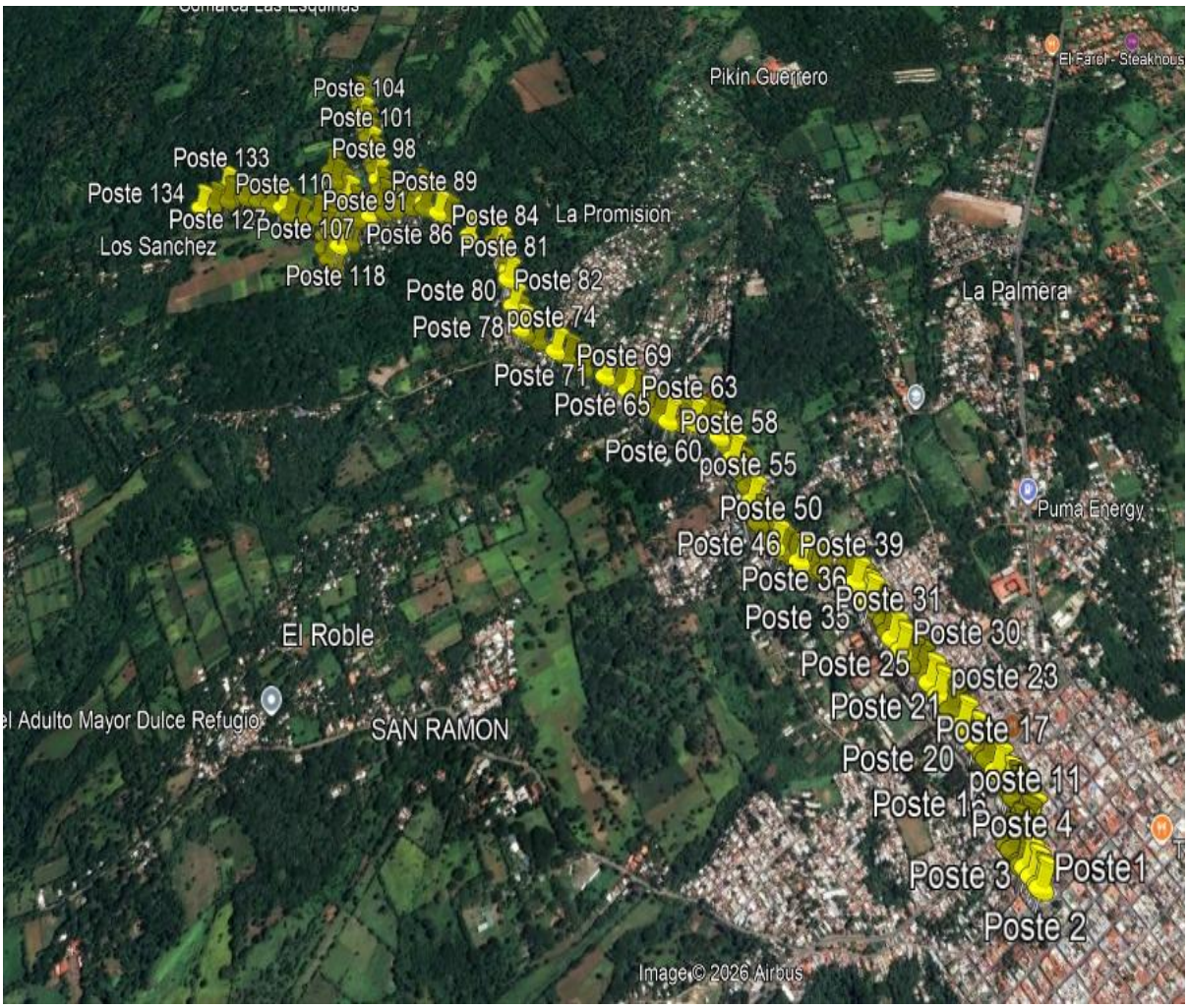
XIII.ANEXOS

Anexo 1. Diseño de red HFC en comunidad Los Sánchez.



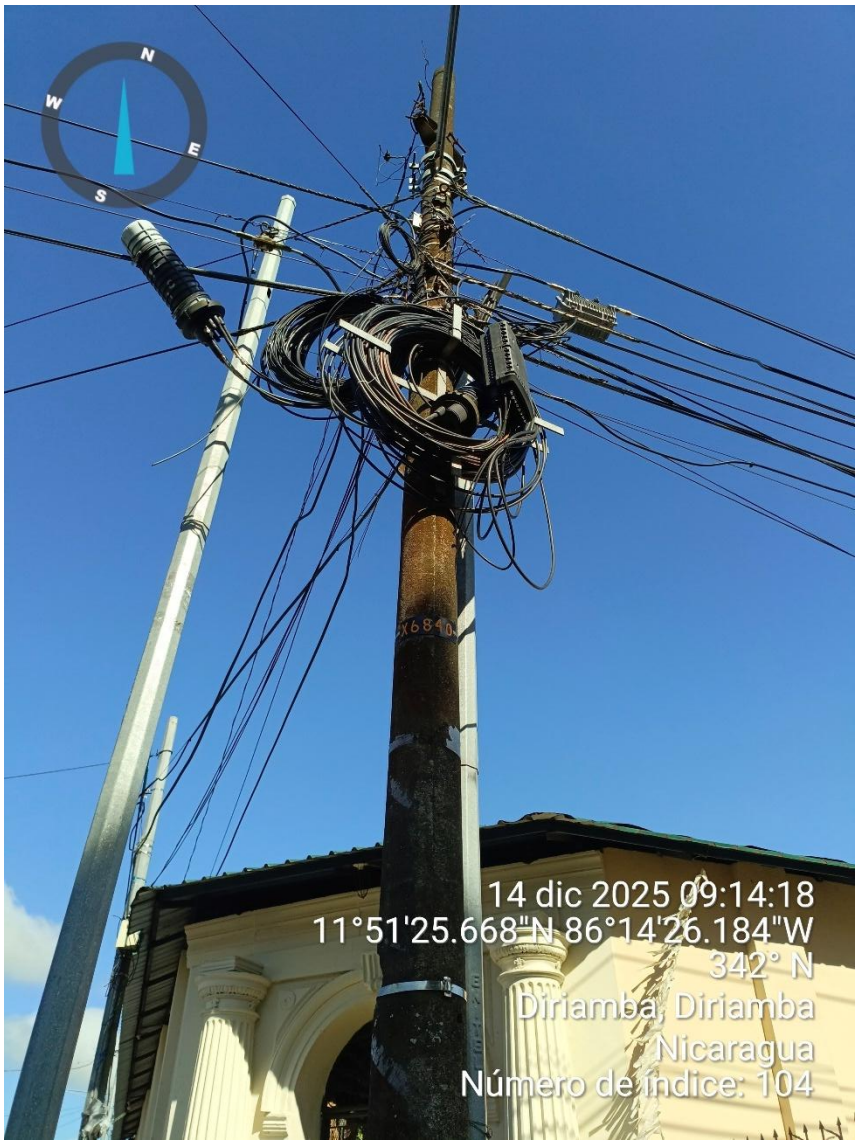
Fuente. Elaboración propia

Anexo 2. Mapa de Postes Existentes y Propuestos para el Despliegue de Fibra Óptica en la Comunidad Los Sánchez, Diriamba



Fuente. Imagen elaborada por el autor con base en Google Earth (2024). Coordenadas: 11° 52′ 24″ N, 86° 15′ 58″ O. Datum: WGS 84. Escala aproximada: 1:5.000. Datos satelitales © 2026 Airbus / Maxar Technologies.

Anexo 3. Fotografía del poste central de origen del diseño durante el levantamiento de postería en la comunidad Los Sánchez, Diriamba, Carazo.



Fuente: Elaboración propia de los autores (2026).

Anexo 4. Fotografía de levantamiento de campo en la comunidad Los Sánchez para medición de postería



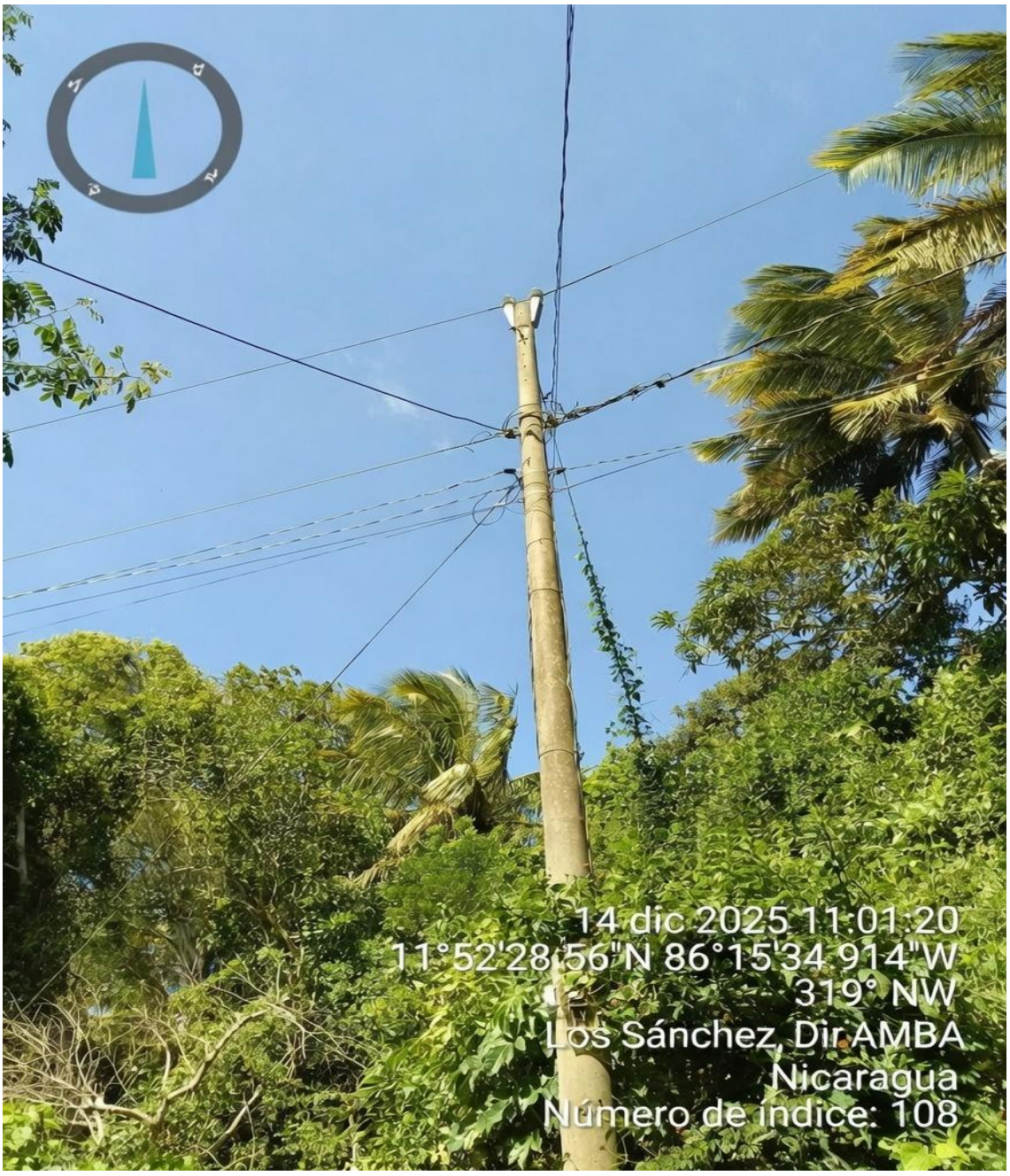
Fuente. Elaboración propia de los autores (2026).

Anexo 5. Fotografía de poste representativo durante el levantamiento de campo en la comunidad Los Sánchez, Diriamba, Carazo.



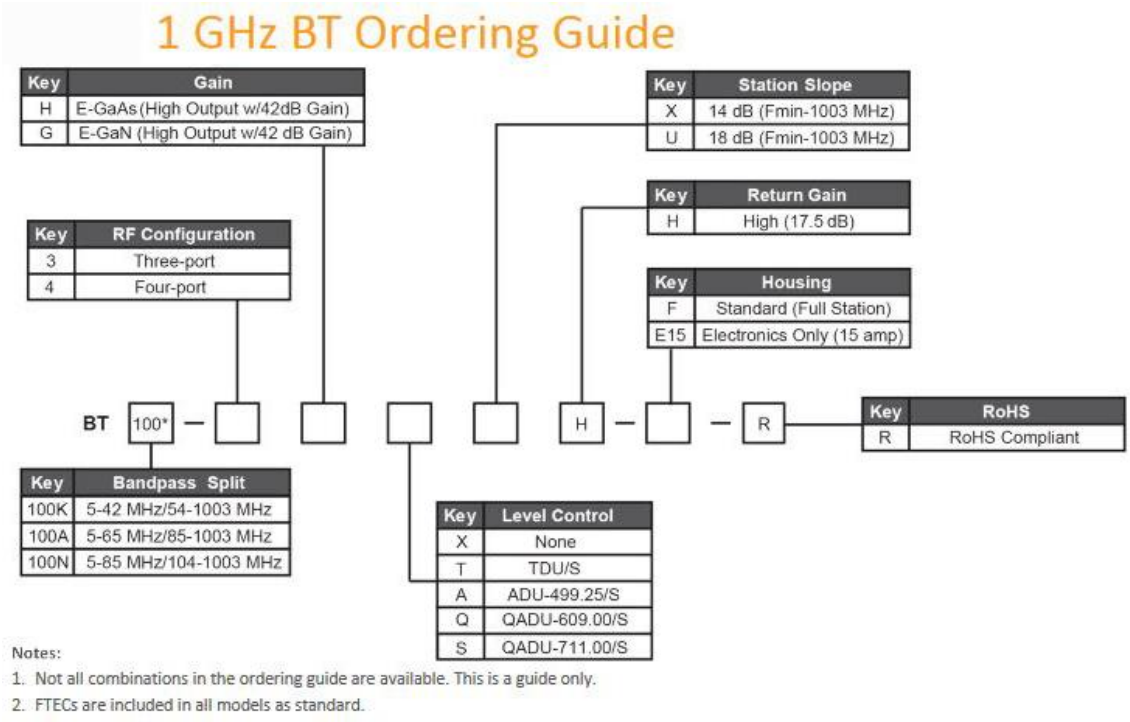
Fuente: Elaboración propia de los autores (2026).

Anexo 6. Fotografía de poste representativo durante el levantamiento de campo en la comunidad Los Sánchez, Diriamba, Carazo.



Fuente: Elaboración propia de los autores (2026).

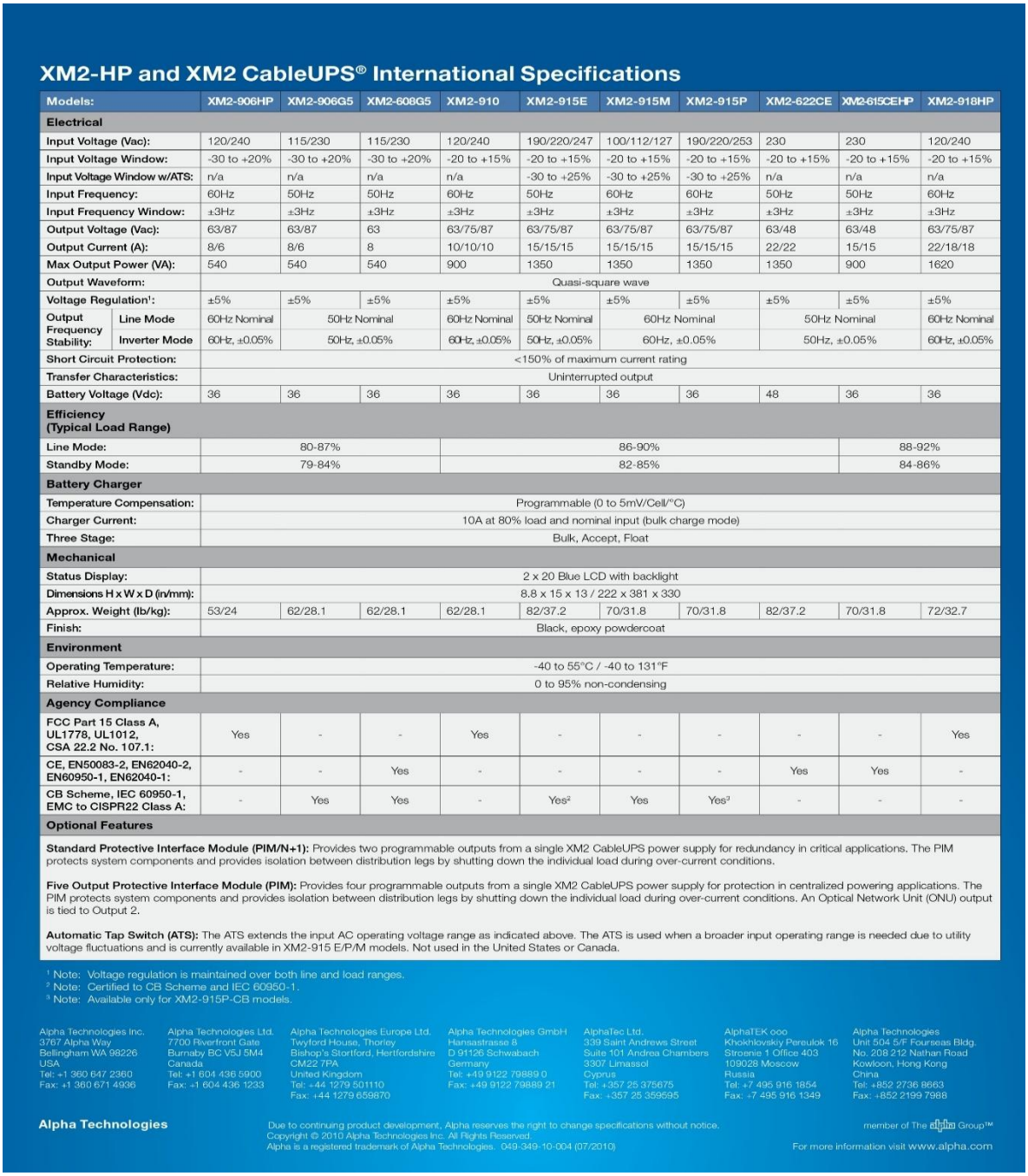
Anexo 7. Ficha técnica del Amplificador BTD



Nota. Extracto de la ficha técnica internacional, incluyendo especificaciones eléctricas, mecánicas y ambientales para la fuente Alpha XM2-915 utilizada en el diseño de la red HFC.

Fuente. Alpha Technologies Inc. https://www.alpha.com/download/outside_plant_power/cableups_power_supplies/xm2_series/international_datasheet.pdf (consultado el 27 de febrero de 2026).

Anexo 8. Especificaciones técnicas de la fuente de poder Alpha XM2-915.



XM2-HP and XM2 CableUPS® International Specifications

Models:	XM2-906HP	XM2-906G5	XM2-608G5	XM2-910	XM2-915E	XM2-915M	XM2-915P	XM2-622CE	XM2-615CEHP	XM2-918HP
Electrical										
Input Voltage (Vac):	120/240	115/230	115/230	120/240	190/220/247	100/112/127	190/220/253	230	230	120/240
Input Voltage Window:	-30 to +20%	-30 to +20%	-30 to +20%	-20 to +15%	-20 to +15%	-20 to +15%	-20 to +15%	-20 to +15%	-20 to +15%	-20 to +15%
Input Voltage Window w/ATS:	n/a	n/a	n/a	n/a	-30 to +25%	-30 to +25%	-30 to +25%	n/a	n/a	n/a
Input Frequency:	60Hz	50Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	60Hz	50Hz	50Hz	60Hz
Input Frequency Window:	±3Hz	±3Hz	±3Hz	±3Hz	±3Hz	±3Hz	±3Hz	±3Hz	±3Hz	±3Hz
Output Voltage (Vac):	63/87	63/87	63	63/75/87	63/75/87	63/75/87	63/75/87	63/48	63/48	63/75/87
Output Current (A):	8/6	8/6	8	10/10/10	15/15/15	15/15/15	15/15/15	22/22	15/15	22/18/18
Max Output Power (VA):	540	540	540	900	1350	1350	1350	1350	900	1620
Output Waveform:	Quasi-square wave									
Voltage Regulation[1]:	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%
Output Frequency Stability: Line Mode	60Hz Nominal	50Hz Nominal		60Hz Nominal	50Hz Nominal	60Hz Nominal		50Hz Nominal		60Hz Nominal
Output Frequency Stability: Inverter Mode	60Hz, ±0.05%	50Hz, ±0.05%		60Hz, ±0.05%	50Hz, ±0.05%	60Hz, ±0.05%		50Hz, ±0.05%		60Hz, ±0.05%
Short Circuit Protection:	<150% of maximum current rating									
Transfer Characteristics:	Uninterrupted output									
Battery Voltage (Vdc):	36	36	36	36	36	36	36	48	36	36
Efficiency (Typical Load Range)										
Line Mode:	80-87%			86-90%					88-92%	
Standby Mode:	79-84%			82-85%					84-86%	
Battery Charger										
Temperature Compensation:	Programmable (0 to 5mV/Cell/°C)									
Charger Current:	10A at 80% load and nominal input (bulk charge mode)									
Three Stage:	Bulk, Accept, Float									
Mechanical										
Status Display:	2 x 20 Blue LCD with backlight									
Dimensions H x W x D (in/mm):	8.8 x 15 x 13 / 222 x 381 x 330									
Approx. Weight (lb/kg):	53/24	62/28.1	62/28.1	62/28.1	82/37.2	70/31.8	70/31.8	82/37.2	70/31.8	72/32.7
Finish:	Black, epoxy powdercoat									
Environment										
Operating Temperature:	-40 to 55°C / -40 to 131°F									
Relative Humidity:	0 to 95% non-condensing									
Agency Compliance										
FCC Part 15 Class A, UL1778, UL1012, CSA 22.2 No. 107.1:	Yes	-	-	Yes	-	-	-	-	-	Yes
CE, EN50083-2, EN62040-2, EN60950-1, EN62040-1:	-	-	Yes	-	-	-	-	Yes	Yes	-
CB Scheme, IEC 60950-1, EMC to CISPR22 Class A:	-	Yes	Yes	-	Yes[2]	Yes	Yes[3]	-	-	-

Optional Features

Standard Protective Interface Module (PIM/N+1): Provides two programmable outputs from a single XM2 CableUPS power supply for redundancy in critical applications. The PIM protects system components and provides isolation between distribution legs by shutting down the individual load during over-current conditions.

Five Output Protective Interface Module (PIM): Provides four programmable outputs from a single XM2 CableUPS power supply for protection in centralized powering applications. The PIM protects system components and provides isolation between distribution legs by shutting down the individual load during over-current conditions. An Optical Network Unit (ONU) output is tied to Output 2.

Automatic Tap Switch (ATS): The ATS extends the input AC operating voltage range as indicated above. The ATS is used when a broader input operating range is needed due to utility voltage fluctuations and is currently available in XM2-915 E/P/M models. Not used in the United States or Canada.

[1] Note: Voltage regulation is maintained over both line and load ranges.
[2] Note: Certified to CB Scheme and IEC 60950-1.
[3] Note: Available only for XM2-915P-CB models.

Alpha Technologies Inc.
3767 Alpha Way
Bellingham WA 98226
USA
Tel: +1 360 647 2360
Fax: +1 360 671 4936

Alpha Technologies Ltd.
7700 Riverfront Gate
Burnaby BC V5J 5M4
Canada
Tel: +1 604 436 5900
Fax: +1 604 436 1233

Alpha Technologies Europe Ltd.
Twyford House, Thorley
Bishop's Stortford, Hertfordshire
CM22 7PA
United Kingdom
Tel: +44 1279 501110
Fax: +44 1279 659870

Alpha Technologies GmbH
Hansastrasse 8
D 91126 Schwabach
Germany
Tel: +49 9122 79889 0
Fax: +49 9122 79889 21

AlphaTec Ltd.
339 Saint Andrews Street
Suite 101 Andrea Chambers
3307 Limassol
Cyprus
Tel: +357 25 375675
Fax: +357 25 359595

AlphaTEK ooo
Khokhlovskiy Pereulok 16
Stroenie 1 Office 403
109028 Moscow
Russia
Tel: +7 495 916 1854
Fax: +7 495 916 1349

Alpha Technologies
Unit 504 5/F Fourseas Bldg.
No. 208 212 Nathan Road
Kowloon, Hong Kong
China
Tel: +852 2736 8663
Fax: +852 2199 7988

Alpha Technologies

Due to continuing product development, Alpha reserves the right to change specifications without notice.
Copyright © 2010 Alpha Technologies Inc. All Rights Reserved.
Alpha is a registered trademark of Alpha Technologies. 049-349-10-004 (07/2010)

member of The alpha Group™

For more information visit www.alpha.com

Fuente. Alpha Technologies (2010). XM2-HP and XM2 CableUPS International Specifications [Datasheet]. Alpha Technologies Inc. https://www.alpha.com/download/outside_plant_power/cableups_power_supplies/xm2_series/international_datasheet.pdf (consultado el 27 de febrero de 2026)