



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INFORMÁTICA, CIENCIAS  
DE LA COMPUTACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA**

**CARRERA DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA MESH  
ALIMENTADA CON ENERGÍA SOLAR PARA PROPORCIONAR ACCESO A  
INTERNET EN LA COMUNIDAD RURAL “NORMITA” DEL CANTON LA  
TRONCAL**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**

**AUTOR: ROMAN ALBERTO PINO CARRILLO**

**DIRECTOR: ING. MARCOS GIOVANNY ORELLANA PARRA, PhD.**

**LA TRONCAL - ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INFORMÁTICA,  
CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN E INNOVACIÓN  
TECNOLÓGICA**

**CARRERA DE TECNOLOGIAS DE LA  
INFORMACIÓN**

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA MESH  
ALIMENTADA CON ENERGIA SOLAR PARA PROPORCIONAR ACCESO A  
INTERNET EN LA COMUNIDAD RURAL “NORMITA” DEL CANTON LA TRONCAL

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN TECNOLOGIAS DE LA INFORMACIÓN**

**AUTOR: ROMAN ALBERTO PINO CARRILLO**

**DIRECTOR: ING. MARCOS GIOVANNY ORELLANA PARRA, PhD.**

**LA TRONCAL - ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## UNIDAD ACADÉMICA DE INFORMÁTICA, CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

#### UNIDAD DE TITULACIÓN

La Troncal, 24 de octubre de 2025

**Sección:** U.A. de Informática, Ciencias de la Computación e Innovación Tecnológica

**Asunto:** Certificación y aprobación de presentación del Trabajo de Titulación

Señor Ingeniero  
Guillermo Rodríguez. Mgtr  
*Director de carrera*  
*Ingeniería en Tecnologías de la Información*

De mi consideración.

Reciba un cordial saludo y mis mejores deseos de éxito en sus funciones.

El suscrito, en calidad de tutor del trabajo de titulación, certifica que el trabajo titulado: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA MESH ALIMENTADA CON ENERGÍA SOLAR PARA PROPORCIONAR ACCESO A INTERNET EN LA COMUNIDAD RURAL "NORMITA" DEL CANTON LA TRONCAL", desarrollado por el estudiante **Román Alberto Pino Carrillo**, con número de cédula 0302861927, ha sido guiado y revisado de manera periódica, cumpliendo con las normativas estatutarias establecidas por la Universidad Católica de Cuenca.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales consiguientes. Sin otro particular me suscribo de Usted.

Atentamente,



Ing. Marcos Orellana Parra. PhD  
TUTOR

**Declaratoria de Autoría y Responsabilidad**

**Roman Alberto Pino Carrillo** portador(a) de la cédula de ciudadanía N° **0302861927**. Declaro ser el autor de la obra: **“Diseño e implementación de una red inalámbrica mesh alimentada con energía solar para proporcionar acceso a internet en la comunidad rural “normita” del cantón la troncal”**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

La Troncal, **24 de octubre del 2025**



Roman Alberto Pino  
Carrillo



F: .....

**Roman Alberto Pino Carrillo**

**C.I. 0302861927**

## AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Católica de Cuenca, extensión La Troncal, y a su distinguido cuerpo docente de la carrera de Tecnologías de la Información. Su guía, paciencia y dedicación no solo me transmitieron valiosos conocimientos, sino que también formaron en mí el rigor y la pasión por mi profesión.

A mi familia, mi más profundo agradecimiento por ser mi ancla y mi inspiración; su apoyo incondicional en los momentos de mayor desafío y su confianza constante en mis capacidades fueron el motor que me impulsó a seguir adelante. A mis compañeros y amigos de carrera, con quienes compartí largas jornadas de estudio, proyectos y risas; el aprendizaje colaborativo y el compañerismo que forjamos hicieron este viaje académico mucho más enriquecedor y memorable.

Agradezco también a mi lugar de trabajo, que más que un empleo, fue la plataforma que me permitió soñar y construir este futuro; gracias a la oportunidad y estabilidad que me brindaron, hoy puedo culminar mi carrera profesional. Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, formaron parte de este proceso y contribuyeron a la culminación de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro primeramente a Dios, por ser la luz y la fortaleza que me guió en cada momento de duda y esfuerzo. A mi madre y mi tía, por su inmenso amor, su paciencia infinita y por ser el pilar fundamental sobre el que he construido mis sueños; sus sacrificios y su ejemplo de perseverancia son mi mayor inspiración.

A toda mi familia, en especial a mis hermanos, por acompañarme con su cariño durante toda esta etapa universitaria. De manera muy especial, dedico este trabajo a mi madre y a mi tía, por su apoyo incondicional, por comprender cada desafío y por ser el reflejo del amor y la dedicación que hicieron posible alcanzar esta meta, también a mi padre, aunque no se encuentre conmigo, sé que estaría orgulloso de mí.

A mi amada esposa, mi compañera incondicional, quien con su paciencia y apoyo incondicional fue crucial para la culminación de este trabajo, a mi pequeño hijo, recién llegado a este mundo, quien sin saberlo se convirtió en el motor y la inspiración para finalizar esta etapa.

Y finalmente, a mí mismo; a mi yo del pasado, por atreverse a empezar este camino lleno de desafíos, y al de hoy, por no rendirse nunca. Que este logro sea el recordatorio de que la perseverancia siempre transforma los sueños en realidad.

## RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo principal diseñar e implementar un prototipo funcional de red inalámbrica tipo Mesh con alimentación de energía solar, aplicada a la comunidad rural “Normita” del cantón La Troncal, bajo un enfoque de Investigación-Acción. El desarrollo del proyecto abarcó desde el diagnóstico de las necesidades de conectividad hasta la instalación y evaluación del sistema, siguiendo un ciclo de diagnóstico, planificación, acción y evaluación.

Se realizó un levantamiento de información en campo mediante encuestas, que confirmaron la existencia de una profunda brecha digital y una elevada valoración comunitaria hacia el acceso a internet. Con base a estos resultados iniciales, se diseñó una arquitectura de red con una troncal redundante (malla) y un sistema de energía híbrido (red eléctrica y solar), la cual fue implementada y probada en condiciones reales. Las pruebas técnicas evidenciaron la estabilidad, alta capacidad de transmisión y conmutación automática ante fallas. Además, la encuesta de satisfacción aplicada tras la implementación, dejó en evidencia una percepción positiva de los usuarios respecto a la utilidad y calidad del servicio.

Los resultados permiten concluir que el prototipo constituye una solución técnica, viable y socialmente pertinente, que contribuye a minimizar la brecha digital en entornos rurales, Asimismo sienta las bases para futuras expansiones y puede replicarse en comunidades con condiciones similares, aportando al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 4 y ODS 9), relacionados con educación de calidad, innovación e infraestructura sostenible.

**Palabras Clave:** Redes Mesh, energía solar, brecha digital, conectividad rural, alta disponibilidad.

## ABSTRACT

The main objective of this thesis is to design and implement a functional prototype of a mesh-type wireless network powered by solar energy, applied to the rural community of “Normita” in the La Troncal canton, using an Action Research approach. The development of the project encompassed all stages, from the diagnosis of connectivity needs to the installation and evaluation of the system, following a cycle of diagnosis, planning, action, and evaluation.

Field data were collected through surveys, which confirmed the presence of a significant digital divide and a high demand for Internet access within the community. Based on these initial findings, a network architecture was designed with a redundant backbone (mesh) and a hybrid power system (electric grid and solar). This system was implemented and tested in real-world conditions. The technical tests demonstrated stability, high transmission capacity, and automatic switching in case of failures. Moreover, the satisfaction survey conducted after implementation revealed a positive user perception regarding the usefulness and the service quality.

The results indicate that the prototype represents a technically feasible and socially relevant solution that helps reduce the digital divide in rural environments. Likewise, it establishes the foundation for future expansion and could be replicated in other communities with similar conditions, contributing to the achievement of Sustainable Development Goals (SDGs 4 and 9) related to quality education, innovation, and sustainable infrastructure.

Keywords: Mesh networks, solar energy, digital divide, rural connectivity, high availability.

## **INDICE DE CONTENIDO**

<b>CERTIFICACIÓN.....</b>	<b>i</b>
<b>DECLARACIÓN .....</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vi</b>
<b>INDICE DE CONTENIDO.....</b>	<b>vii</b>
<b>INDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>INDICE DE GRÁFICOS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I.....</b>	<b>3</b>
<b>1 Marco Referencial .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Planteamiento del Problema.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Formulación del Problema .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Antecedentes de la Investigación.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Justificación de la Investigación.....</b>	<b>4</b>
<b>1.5 Objetivos.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5.1 Objetivo General.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>5</b>
<b>1.6 Delimitaciones (Alcance).....</b>	<b>5</b>
<b>1.7 Limitaciones .....</b>	<b>5</b>
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>6</b>
<b>2 Marco Teórico .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Introducción en el Marco Teórico .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Redes Inalámbricas en Malla (WMN).....</b>	<b>7</b>
<b>2.3 Sistemas Fotovoltaicos en Telecomunicaciones.....</b>	<b>7</b>

2.4	Integración de WMN y Energía Renovable .....	8
2.5	Protocolos y Eficiencia Energética .....	9
2.6	Aplicaciones en Entornos Rurales .....	9
2.7	Marco Conceptual .....	10
<b>CAPITULO III.....</b>		<b>11</b>
3	Marco Metodológico.....	11
3.1	Enfoque de la Investigación .....	12
3.2	Nivel de la Investigación .....	12
3.3	Población y Muestra .....	13
3.4	Métodos de Investigación.....	13
3.5	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información .....	14
3.6	Tratamiento de la Información .....	15
<b>CAPITULO IV.....</b>		<b>16</b>
4	Diagnóstico de la Comunidad y Entorno del Proyecto .....	16
4.1	Análisis del Entorno Geográfico y Observación Directa .....	17
4.1.1	Descripción Geográfica de la Comunidad:.....	17
4.1.2	Identificación de Obstáculos y Características del Terreno: 17	
4.1.3	Resultados de la Encuesta de Necesidades de Conectividad. 17	
4.1.4	Confiabilidad y Validez del Instrumento .....	18
4.1.5	Acceso y Barreras Actuales al Servicio de Internet .....	19
4.1.6	Calidad y Costo de los Servicios Existentes.....	20
4.1.7	Necesidades y Percepción del Proyecto.....	21
4.1.8	Conclusión del Diagnóstico .....	23
4.2	Estudio de Factibilidad del Radioenlace Punto a Punto (PTP) 23	
4.2.1	Introducción y Objetivos del Estudio.....	23
4.2.2	Descripción Detallada de las Zonas de Emplazamiento.....	24
4.2.3	Análisis Topográfico y del Perfil de Elevación .....	27

<b>4.2.4</b>	<b>Análisis de Línea de Vista (Line of Sight - LoS) y Zona de Fresnel</b>	<b>27</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Línea de Vista Directa (LoS): .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2.6</b>	<b>Análisis Conceptual de la Zona de Fresnel: .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2.7</b>	<b>Análisis de Factibilidad del Enlace Secundario (Versión Optimizada)</b>	<b>30</b>
<b>4.2.8</b>	<b>Análisis de Ubicaciones y Distancia .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.9</b>	<b>Análisis del Terreno y Zona de Fresnel.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.10</b>	<b>Factibilidad y Rendimiento Esperado .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.11</b>	<b>Conclusión Final del Estudio de Factibilidad.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.12</b>	<b>Enlace Secundario (Vía el Amarillal - Comunidad Normita)</b>	<b>32</b>
<b>4.2.13</b>	<b>Definición Estratégica de las Zonas de Cobertura Piloto ...</b>	<b>33</b>
<b>4.2.14</b>	<b>Zona de Cobertura AP1: Sector Norte y Noroeste Cercano</b>	<b>33</b>
<b>4.2.15</b>	<b>Zona de Cobertura AP2: Sector Suroeste y Oeste Cercano</b>	<b>34</b>
<b>4.2.16</b>	<b>Selección Detallada y Justificación de Equipos de Red.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2.17</b>	<b>Equipamiento para el Enlace Troncal Punto a Punto (PTP)</b>	<b>36</b>
<b>4.2.18</b>	<b>Justificación Detallada de la Elección: .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2.19</b>	<b>Equipamiento para el Enlace Troncal Secundario (19.89 km)</b>	<b>40</b>
<b>4.2.20</b>	<b>Justificación Detallada de la Elección.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.21</b>	<b>Equipamiento para el Enlace Troncal Secundario (Receptor)</b>	<b>42</b>
<b>4.2.22</b>	<b>Justificación Detallada de la Elección.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.23</b>	<b>Antena: Ubiquiti RocketDish RD-5G30-LW.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.24</b>	<b>Justificación Detallada de la Elección: .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.25</b>	<b>Equipamiento para la Red de Acceso Punto a Multipunto (P2MP)</b>	<b>45</b>

4.2.26	Justificación Detallada de la Elección: .....	46
4.2.27	Diseño Sugerido para el Sistema Híbrido de Alimentación	47
4.2.28	Filosofía de Operación y Definición de Parámetros de Referencia	47
4.2.29	Cálculo Referencial de Componentes .....	48
4.2.30	Cálculo de Energía de Respaldo .....	48
4.2.31	Sugerencia para el Dimensionamiento del Banco de Baterías	48
4.2.32	Sugerencia para el Dimensionamiento del Panel Solar .....	48
4.2.33	Sistema Eléctrico y de Respaldo Instalado .....	49
4.2.34	Arquitectura del Sistema Híbrido .....	49
4.2.35	Módulo de Generación Fotovoltaica (Panel Solar).....	49
4.2.36	Módulo de Almacenamiento (Banco de Baterías).....	50
4.2.37	Módulos de Control y Conversión de Energía .....	51
4.2.38	Gestión de Red y Ruteo .....	53
4.2.39	Distribución de Energía AC .....	54
4.2.40	Infraestructura Vertical: La Torre Comunitaria .....	54
4.2.41	Características de la Estructura Instalada.....	54
4.2.42	Verificación y Preparación Técnica.....	54
4.2.43	Montaje del Enlace Troncal y Gabinete de Control .....	55
4.2.44	Montaje en la Comunidad Normita (Punto Remoto).....	55
4.2.45	Montaje en La Troncal (Punto de Acceso).....	55
4.2.46	Instalación del Gabinete de Control.....	55
4.2.47	Montaje de Equipos en el Gabinete .....	56
4.2.48	Tendido del Cableado Principal .....	56
4.2.49	Instalación de la Alimentación Eléctrica Principal.....	56
4.2.50	Alineación Fina y Verificación del Enlace PTP.....	56
4.2.51	Análisis de los Resultados .....	57

<b>4.2.52</b>	<b>Configuración de Parámetros del Enlace PTP.....</b>	<b>58</b>
<b>4.2.53</b>	<b>Instalación y Verificación del Enlace PTP Secundario.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2.54</b>	<b>Alineación Fina y Verificación del Enlace .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2.55</b>	<b>Análisis de los Resultados .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2.56</b>	<b>Configuración de Parámetros del Enlace .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2.57</b>	<b>Montaje de los Puntos de Acceso (P2MP).....</b>	<b>61</b>
<b>4.2.58</b>	<b>Configuración de los Puntos de Acceso (P2MP) .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.59</b>	<b>Configuración del AP1 (Sector Noroeste) .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.60</b>	<b>Configuración del AP2 (Sector Suroeste) .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.61</b>	<b>Configuración de Redes en el Router Principal.....</b>	<b>64</b>
<b>4.2.62</b>	<b>Instalación del Sistema Híbrido de Alimentación.....</b>	<b>66</b>
<b>4.2.63</b>	<b>Pruebas del Enlace Troncal (PTP) .....</b>	<b>67</b>
<b>4.2.64</b>	<b>Velocidad de Descarga (Download) para la Comunidad ....</b>	<b>68</b>
<b>4.2.65</b>	<b>Velocidad de Subida (Upload) desde la Comunidad.....</b>	<b>68</b>
<b>4.2.66</b>	<b>Prueba de Estabilidad (Latencia y Pérdida de Paquetes)...</b>	<b>69</b>
<b>4.2.67</b>	<b>Análisis de Resultados .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.68</b>	<b>Pruebas del Enlace Troncal Secundario (Vía el Amarillal) 71</b>	
<b>4.2.69</b>	<b>Prueba de Capacidad (Ancho de Banda).....</b>	<b>71</b>
<b>4.2.70</b>	<b>Velocidad de Descarga (Download) para la Comunidad ....</b>	<b>71</b>
<b>4.2.71</b>	<b>Velocidad de Subida (Upload) desde la Comunidad.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2.72</b>	<b>Prueba de Estabilidad (Latencia y Pérdida de Paquetes)...</b>	<b>72</b>
<b>4.2.73</b>	<b>Análisis de Resultados .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.74</b>	<b>Verificación de Cobertura y Señal de Clientes (P2MP) .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.75</b>	<b>Verificación en el Sector Noroeste (Conexión al AP1).....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.76</b>	<b>Verificación en el Sector Suroeste (Conexión al AP2) .....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.77</b>	<b>Pruebas de Servicio al Usuario Final.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.78</b>	<b>Prueba del Sistema de Energía Híbrido .....</b>	<b>78</b>

4.2.79	Procedimiento de la Prueba .....	78
4.2.80	Resultados Obtenidos .....	78
4.2.81	Prueba de la Topología de Malla en la Troncal.....	79
4.3	Resultados de la Encuesta de Satisfacción.....	79
Capítulo V	.....	82
5	Conclusiones.....	82
5.1	Sobre el Cumplimiento del Objetivo Principal.....	82
5.1.1	Conclusiones del Diagnóstico Social y Técnico .....	82
5.1.2	Conclusiones sobre la Arquitectura de Red y los Equipos....	83
5.1.3	Conclusiones sobre el Sistema de Energía Híbrido .....	84
5.1.4.	Encuesta de satisfacción posterior a la implementación .....	84
5.1.5.	Dificultades Presentadas Durante el Desarrollo .....	84
5.2.	Recomendaciones.....	85
5.2.4.	Recomendaciones Técnicas (Para el Prototipo Actual) .....	85
5.2.5.	Recomendaciones para Trabajo a Futuro .....	86
Bibliografía	.....	87

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Técnicas de recolección de información .....	14
Tabla 2.1 Parámetros de configuración del AP1 .....	62
Tabla 2.2 Parámetros de configuración del AP2 .....	64

## INDICE DE GRÁFICOS

Ilustración 1 Porcentaje de hogares con y sin acceso a internet.....	20
Ilustración 2 Principales barreras para no contratar un servicio de internet .....	20
Ilustración 3 Calificación de la calidad del servicio de internet por parte de los usuarios existentes,.....	21
Ilustración 4 Nivel del interés de la comunidad en el proyecto propuesto ..	22
Ilustración 5. Diseño de enlace PTP propuesto por el autor .....	24
Ilustración 6. Mapa satelital de La Troncal,.....	25
Ilustración 7 Imagen satelital de la comunidad Normita.....	26
Ilustración 8 Diseño de enlace PTP propuesto por el autor .....	27
Ilustración 9 Diseño del enlace PTP propuesto por el autor .....	28
Ilustración 10 Ilustración 3 Imagen satelital de la via el Amarillal .....	29
Ilustración 11 Diseño de enlace PTP propuesto por el autor .....	30
Ilustración 12 Diseño de cobertura del AP1 propuesto por el autor .....	33
Ilustración 13 Diseño de cobertura del AP2propuesto por el autor .....	34
Ilustración 14 Ficha técnica del radio airMAX Rocket Prism 5AC .....	37
Ilustración 15 Ficha técnica del radio airMAX Rocket Prism 5AC .....	38
Ilustración 16 Ficha técnica del radio airMAX Rocket Prism 5AC .....	40
Ilustración 17 Ficha técnica del Rocket 5AC Lite .....	41
Ilustración 18 Ficha técnica del PowerBeam 5AC,.....	43
Ilustración 19 Ficha técnica de la antena RocketDish RD-5G30-LW.....	45
Ilustración 20 Ficha técnica del AP airMAX Lite AP AC (LAP-120.....	46
Ilustración 21 Ficha técnica del AP airMAX Lite AP AC (LAP-120) .....	47
Ilustración 22 Ficha técnica del panel solar modelo.....	50
Ilustración 23 Ficha técnica del controlador de carga solar .....	52

<b>Ilustración 24 Ficha técnica del UPS .....</b>	<b>53</b>
<b>Ilustración 25 Panel de control del enlace PTP mostrando los resultados     finales de alineación y rendimiento.....</b>	<b>57</b>
<b>Ilustración 26 Parámetros de configuración inalámbrica del radio PTP. ...</b>	<b>58</b>
<b>Ilustración 27 Panel de control del enlace PTP secundario mostrando los     resultados finales.....</b>	<b>59</b>
<b>Ilustración 28 Parámetros de configuración inalámbrica del radio PTP     secundario. ....</b>	<b>61</b>
<b>Ilustración 29 Parámetros de configuración inalámbrica para el Punto de     Acceso 1 (AP1). ....</b>	<b>62</b>
<b>Ilustración 30 Parámetros de configuración inalámbrica para el Punto de     Acceso 2 (AP2). ....</b>	<b>63</b>
<b>Ilustración 31 Diagrama de la red.....</b>	<b>66</b>
<b>Ilustración 32 Panel solar instalado en la torre.....</b>	<b>67</b>
<b>Ilustración 33 Resultado de la prueba de velocidad de descarga para la     comunidad (TX en el AP).....</b>	<b>68</b>
<b>Ilustración 34 Resultado de la prueba de velocidad de subida desde la     comunidad (RX en el AP).....</b>	<b>69</b>
<b>Ilustración 35 Resultado de la prueba de ping.....</b>	<b>70</b>
<b>Ilustración 36 Resultado de la prueba de velocidad de descarga del enlace     secundario. ....</b>	<b>71</b>
<b>Ilustración 37 Resultado de la prueba de velocidad de subida del enlace     secundario. ....</b>	<b>72</b>
<b>Ilustración 38 Resultado de la prueba de ping del enlace secundario. ....</b>	<b>73</b>
<b>Ilustración 39 Resultados de la conexión del cliente piloto en el sector     noroeste (AP1).....</b>	<b>74</b>
<b>Ilustración 40 Resultados de la conexión del cliente piloto en el sector     suroeste (AP2). ....</b>	<b>75</b>
<b>Ilustración 41 Resultado de la prueba de velocidad para el plan de 10 Mbps     simétricos.....</b>	<b>77</b>
<b>Ilustración 42 Resultado de la prueba de velocidad del plan de 15 Mbps     Simetricos, .....</b>	<b>77</b>
<b>Ilustración 43 Encuesta de satisfacción. ....</b>	<b>80</b>
<b>Ilustración 44 Encuesta a los habitantes de la comunidad. ....</b>	<b>81</b>

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el acceso a internet se ha consolidado como un recurso fundamental para el desarrollo social, educativo y económico. Sin embargo, persiste una marcada brecha digital que aísla a las comunidades rurales, donde la infraestructura de telecomunicaciones y el suministro de energía son a menudo limitados o inexistentes. Esta situación genera una exclusión que afecta directamente a estudiantes, agricultores y familias, limitando su acceso a oportunidades. En Ecuador, esta diferencia es evidente: mientras el 73,6% de los hogares urbanos tiene internet, solo el 48,1% de los hogares rurales cuenta con este servicio.

En respuesta a esta problemática, la presente tesis propone el **Diseño e implementación de una red inalámbrica tipo Mesh alimentada con energía solar, para proporcionar acceso a internet en la comunidad rural “Normita” del cantón La Troncal**. Este prototipo es creado para establecer un modelo de conectividad funcional, resiliente y sostenible. Lo destacable del proyecto radica en que será una herramienta tecnológica para mejorar la inclusión digital, disponiendo de una conexión a internet confiable y de alta disponibilidad. Por tal motivo, se propone como objetivo general implementar un prototipo funcional que brinde acceso a internet en la comunidad, validando una solución técnica y socialmente adaptada a su realidad.

Para lograr el objetivo, se optó por la metodología de **Investigación-Acción**, la cual facilitó el trabajo al enmarcarlo en un ciclo de fases prácticas: diagnóstico, planificación, acción y evaluación. Se comenzó con un diagnóstico directo en la comunidad para entender sus necesidades reales. Con esta información, se diseñó e implementó un prototipo funcional, realizando pruebas técnicas para validar cada componente. De esta forma, fue posible asegurar que la solución no solo fuera técnicamente robusta, sino también socialmente pertinente y alineada con las expectativas de los usuarios.

En relación a la estructura del documento, este se organiza en cinco capítulos. En el **Capítulo I** se presenta la introducción al problema, los objetivos y el alcance del proyecto. El **Capítulo II** se centra en el marco teórico, abordando conceptos de redes inalámbricas, topologías Mesh y sistemas fotovoltaicos. El **Capítulo III** detalla la

metodología de Investigación-Acción utilizada. El **Capítulo IV** presenta el desarrollo completo del proyecto: el diagnóstico de la comunidad, el diseño, la implementación y las pruebas de rendimiento del sistema. Finalmente, en el **Capítulo V** se exponen las conclusiones y recomendaciones, destacando los hallazgos y proponiendo líneas de acción para la futura expansión del proyecto.

# **CAPITULO I**

## **1 Marco Referencial**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

A nivel mundial, el acceso a internet se considera hoy un derecho que permite el desarrollo social, educativo y económico. La falta de conectividad básica afecta a más del 30% de la población mundial, sobre todo en zonas rurales, además agudiza las desigualdades en la era digital. A pesar de los esfuerzos para la digitalización en América Latina, brechas estructurales hacia comunidades rurales persisten, pues la infraestructura de telecomunicaciones y el suministro de energía son limitados o inexistentes.

El problema que existe hoy en Ecuador resulta ser muy evidente. El 48,1% de los hogares rurales cuenta con este servicio, pero el 73,6% de los hogares urbanos tiene acceso a internet (INEC, 2024). Esta diferencia tecnológica imposibilita a tales pueblos participar equitativamente en el progreso, afectando de lleno a la educación, a la agricultura, así como a la salud.

En el cantón La Troncal, comunidades como el recinto “Normita” encaran limitaciones serias en conectividad y también en suministro eléctrico, de un modo muy específico, Una exclusión digital que afecta a los estudiantes, más aún a los agricultores y también a las familias la genera por la falta de soluciones sostenibles y adaptadas a su propia realidad territorial. Ante esta situación, para así poder reducir la brecha digital, se propone una solución tecnológica que sea descentralizada y a la vez autosustentable: una red inalámbrica tipo Mesh que es alimentada por energía solar, siendo apta para operar en zonas con cobertura escasa o nula.

### **1.2 Formulación del Problema**

De acuerdo con el planteamiento presentado, esta es la pregunta de investigación que guiará a este proyecto:

¿El diseño y la implementación de un prototipo funcional de red inalámbrica Mesh, que es alimentado con energía solar, puede dar una solución de conectividad que sea sostenible? Se busca mejorar el acceso hacia oportunidades educativas, sociales, además de económicas en la comunidad rural “Normita” del cantón La Troncal.

### **1.3 Antecedentes de la Investigación**

El presente proyecto se fundamenta en trabajos previos que han explorado tecnologías de redes inalámbricas para zonas rurales y complejas. Por ejemplo, investigaciones sobre redes LoRaMesh han demostrado mejoras significativas en la entrega de paquetes en nodos lejanos. Por su parte, otros estudios han evaluado el uso de redes mesh para reducir la brecha digital en comunidades rurales, destacando que la participación comunitaria en la planificación resultó en una mejor cobertura y rentabilidad. A nivel nacional, estudios en instituciones ecuatorianas han concluido que las redes MESH son una solución efectiva para resolver problemas de cobertura y velocidad en áreas extensas, validando su aplicabilidad en el contexto local. Estos antecedentes confirman la viabilidad y pertinencia de utilizar una red Mesh para abordar los desafíos de conectividad en el recinto "Normita".

### **1.4 Justificación de la Investigación**

Hoy en día estar conectado a Internet es necesario para el desarrollo educativo, social y económico de las comunidades. No obstante, muchas zonas rurales del Cantón La Troncal, tal como el recinto Normita, enfrentan limitaciones que impiden el acceso continuo a los servicios digitales, situación que se atribuye a la escasa cobertura de red, así como a las frecuentes interrupciones en el suministro de energía eléctrica, particularidades que agudizan la brecha digital, especialmente en estudiantes, emprendedores y agricultores que requieren acceso a herramientas tecnológicas y a información de primera mano.

Este trabajo propone una solución sostenible mediante la implementación de una red inalámbrica tipo Mesh, alimentada por un sistema fotovoltaico que garantiza autonomía energética y cobertura en zonas alejadas, particularidad que lo enmarca dentro del ámbito de Gobierno de Tecnologías de la Información. El propósito del proyecto es facilitar el acceso a Internet como un medio para mejorar la calidad de vida, fomentar la inclusión digital y promover oportunidades productivas y educativas [1]. Además, podrá ser replicable en otras comunidades que tengan características similares al recinto rural que participa en este estudio.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Implementar un prototipo funcional de red inalámbrica tipo Mesh alimentado mediante energía solar, para brindar acceso a internet en la comunidad rural Normita del cantón La Troncal.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Diseñar la infraestructura tecnológica del sistema, adaptada a un entorno rural con energía solar y las necesidades de conectividad de la comunidad.
- Instalar e implementar un prototipo funcional de red Mesh con alimentación fotovoltaica - respaldo energético, utilizando equipos adecuados para evaluar su operatividad.
- Evaluar el impacto social y técnico del sistema implementado, mediante encuestas a los usuarios y pruebas de conectividad.

## **1.6 Delimitaciones (Alcance)**

Este proyecto se desarrollará en el recinto "Normita", una comunidad rural del Cantón La Troncal. El alcance comprende las siguientes fases:

1. **Diseño:** Levantamiento de información técnica y geográfica, selección de equipos de comunicación, y dimensionamiento del sistema fotovoltaico.
2. **Implementación:** Instalación y prueba de un prototipo a pequeña escala en condiciones reales para evaluar su viabilidad técnica, funcional y social.
3. **Evaluación:** Medición de indicadores de rendimiento y realización de encuestas a los usuarios.

## **1.7 Limitaciones**

La realización de un prototipo reducido es el enfoque del proyecto con el fin de confirmar la solución. Por lo tanto, el trabajo no contempla la cobertura total del cantón La Troncal. No obstante, fijará las bases tanto sociales como técnicas para ampliaciones del sistema o réplicas futuras en comunidades similares.

## **CAPITULO II**

### **2 Marco Teórico**

#### **2.1 Introducción en el Marco Teórico**

Dentro de zonas rurales, si hablamos de las redes de comunicación, estas tienen problemas o podríamos considerar ciertos desafíos, esto se debe a la falta de infraestructura, también a que, al ser una parte rural, es limitado el acceso a energía, esto

se puede derivar en varios factores como puede ser los altos costos operativos. Si hablamos en este contexto, una solución que es sostenible son las redes inalámbricas en malla (WMN) las cuales son alimentadas por sistemas fotovoltaicos, estos son una solución escalable.

Es así que estas redes extienden la conectividad a comunidades que comúnmente estén excluidas o apartadas de lo que son los servicios digitales, con esto se crea una fomentación para el desarrollo social, educativo y también la parte económica para estas zonas. En cierto que en estudios recientes se realiza lo que es la viabilidad técnica y también económica de lo que son estas implementaciones, al igual que el impacto que tienen en lo social [2].

## **2.2 Redes Inalámbricas en Malla (WMN)**

Si hablamos de las WMN estas son arquitecturas de red que están compuestas por múltiples nodos, los cuales se encuentran interconectados, estos funcionan como enrutadores y clientes al mismo tiempo. Se les caracteriza a estas redes por su gran capacidad de auto reparación y también por su flexibilidad, la cual le permite adaptarse a entornos con constantes cambios.

Hay que reconocer que son especialmente útiles en diversas áreas, mas específicamente en áreas en las que el cableado tradicional es inviable o tiene un gran costo, tal es el caso de la zonas rurales o que son geográficamente de acceso complicado [3]. Al igual, la escalabilidad y facilidad que lleva su implementación las convierte en una alternativa ideal para el crecimiento de redes comunitarias [4].

Si hablamos de su estructura, permitiendo que cualquier nodo tenga la disponibilidad de transmitir y reenviar paquetes de datos, por lo cual incrementa la tolerancia a fallos. Esto se debe a esta propiedad, si llegase a fallar uno de los nodos o en el caso que se desconecte, el sistema puede redireccionar el tráfico de manera automática a través de rutas alternativas [4].

## **2.3 Sistemas Fotovoltaicos en Telecomunicaciones**

Podemos decir que la energía solar fotovoltaica a pasado a ser una de las alternativas más limpias y eficientes, para dar energía a equipos electrónicos en lugares remotos [5].

Si al integrar estas tecnologías, dentro de las redes de comunicación, reduciría considerablemente la dependencia de fuentes de energía convencionales que se tiene, garantizando de esta manera una operación continua, aún en condiciones que haya desconexión de la red eléctrica [5]. También, ayuda a los objetivos de sostenibilidad y mitigación que se tiene del cambio climático, esto al reducir las emisiones de carbono que son asociadas al uso que se tiene de combustibles fósiles [6].

Actualmente los modernos sistemas fotovoltaicos, incluyen baterías de respaldo lo que permite tener un almacenamiento de energía durante el día y poder usarla en la noche o incluso en días nublados. Gracias a esto se asegura que la red tenga una operatividad de 24/7, el cual este es un requisito indispensable para las telecomunicaciones rurales [7]. Se ha demostrado por diferentes estudios que la implementación de paneles solares en unión con las tecnologías de bajo consumo energético, pueden llegar a alargar la vida útil de los nodos, por varios años sin la intervención técnica [8].

#### **2.4 Integración de WMN y Energía Renovable**

La integración de redes WMN con la energía solar otorga una infraestructura robusta y que sea autosuficiente, esto es esencial para proyectos que sean de conectividad en zonas rurales [9].

Es así que esta unión plantea retos como lo es la gestión eficiente de energía, lograr la optimización del consumo de los nodos y también la selección de topologías que disminuyan las pérdidas de energía [10].

Es de esta manera que se han creado modelos de simulación, que dan paso a predicciones sobre el rendimiento de estas redes, bajo diferentes condiciones de irradiación solar y niveles de tráfico.

Cabe señalar que, dependiendo el tipo de batería, la orientación de los paneles solares y de la ubicación que se encuentren los nodos, son factores que deben tener en cuenta, de una manera cautelosa en lo que es la fase de diseño. Al igual, se han propuesto algoritmos de control de energía, que estos se ajustan dinámicamente al funcionamiento de los nodos para lograr equilibrar el consumo energético y mantener la conectividad [11].

## **2.5 Protocolos y Eficiencia Energética**

En este tipo de redes se utilizan protocolos de comunicación, lo cuales suelen ser diseñados para optimizar el uso de la energía. Tal es el caso de los protocolos como lo es la IEEE 802.11s, cuenta con adaptaciones de MAC y estrategias de enrutamiento, las cuales son energéticamente eficientes, lo que permite alargar la vida útil de los nodos y ayuda a mejorar el desempeño de la red [8].

El uso de tecnologías como lo son el uso de “wake-up radios” y los nodos dormidos, al igual estas son implementadas para disminuir el consumo de energía [12].

En trabajos similares, se han propuesto realizar modificaciones al protocolo Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV), para lograr disminuir la frecuencia de la actualización de rutas y con esto minimizar el número de redundantes transmisiones. Es de esta manera que los ajustes realizados dan lugar a una reducción de hasta el 30% en el consumo de energía total de la red, claro está sin afectar de manera significativa la latencia en los paquetes [13].

## **2.6 Aplicaciones en Entornos Rurales**

La implementación de las redes WMN alimentadas mediante energía solar, ya han sido puestas a prueba en diversos contextos rurales, a nivel mundial, obteniendo una mejora en el acceso a servicios como lo son la educación en línea, telemedicina y para la gestión comunitaria [14].

De esta manera se afirman por medio de estas experiencias, que la tecnología es viable y escalable para lograr abordar la brecha que se tiene digitalmente [15]. Tal es el caso que, en comunidades indígenas del Amazonas, la instalación de las redes solares-MESH han permitido poner sistemas de comunicación básicos que de cierta manera han mejorado la respuesta ante emergencias sanitarias [16].

De la misma manera, en zonas rurales del continente africano y asiático, proyectos similares han demostrado que estas tecnologías, pueden tener una integración con los servicios públicos como lo son la iluminación, seguridad y el monitoreo ambiental, de esta manera creando una infraestructura digital integral, que ayuda al desarrollo sostenible.

## 2.7 Marco Conceptual

- **Red Inalámbrica en Malla (WMN):** Es un sistema descentralizado en el cual los nodos no solo pueden enviar sino también reenviar datos, lo que aumenta la cobertura y la confiabilidad de la red. [3].
- **Energía Fotovoltaica:** Es la energía eléctrica generada a partir de la luz solar por medio de células solares, lo que es utilizada para alimentar dispositivos electrónicos de manera sostenible [5].
- **Comunidad Rural:** Se define como un grupo poblacional ubicado fuera de los centros urbanos, que cuenta con acceso limitado a servicios básicos y tecnología [16].
- **Sostenibilidad Energética:** Esta es la capacidad que tiene un sistema, para operar de forma continua, por medio de fuentes de energía renovables [17].
- **Inclusión Digital:** En sí estas son estrategias, las cuales se encargan de asegurar que todas las personas, cuenten con un acceso equitativo a la información y conectividad, todo esto independientemente de donde se encuentren ubicados geográficamente [15].
- **Protocolos de Bajo Consumo:** Los protocolos de bajo consumo son algoritmos y mecanismos de comunicación, estos son encargados de dar prioridad a la eficiencia energética en las redes inalámbricas, con esto se reduce el número de transmisiones que no son necesarias [12].
- **Topología de Red MESH:** La topología de la red MESH es una estructura de conexión entre nodos, esta permite tener múltiples rutas para lograr llegar a un mismo destino, de esta manera aumenta la redundancia y la confiabilidad del sistema [4].
- **Resiliencia de la Red:** La resiliencia de red es la capacidad que tiene la red, para que se mantenga su funcionamiento y el accionar ante fallas o desconexiones que se presenten en los nodos [6].

- **Almacenamiento de Energía:** El almacenamiento de energía son los sistemas de baterías, que más comúnmente son utilizados para conservar la energía captada por los paneles solares, con esto se garantiza la disponibilidad en todo momento que sea requerido y necesitado [7].

- **Gestión Inteligente de Energía:** La gestión inteligente de energía son en si los sistemas que optimizan de manera automática tanto el uso como el almacenamiento de energía, todo esto dependiendo cual sea la demanda y las condiciones ambientales que se tengan [11].

## **CAPITULO III**

### **3 Marco Metodológico**

Este capítulo puntualiza el grupo de métodos, técnicas y procesos que se usarán para lograr las metas del proyecto. La metodología está diseñada para garantizar un enfoque sistemático con rigurosidad en la evaluación, implementación y diseño de la red inalámbrica Mesh alimentada con energía solar en la comunidad “Normita”.

### 3.1 Enfoque de la Investigación

Se implementará una metodología de carácter investigativo, enmarcada dentro de un enfoque aplicado dado que busca resolver un problema específico mediante la aplicación práctica del conocimiento. En este caso específico, la implementación de una solución tecnológica funcional busca solucionar aquella falta de conectividad a internet en la comunidad rural “Normita”. El propósito es, aparte de generar conocimiento teórico, producir un prototipo. Este prototipo debe tener un impacto directo y positivo sobre la calidad de vida de los habitantes, contribuyendo a la reducción de la brecha digital en el Ecuador y en otras regiones con problemáticas similares [18].

### 3.2 Nivel de la Investigación

La investigación se desarrollará por varios niveles. Esto asegurará el entendimiento integral que hay del problema y de su solución:

- **Nivel Descriptivo:** En la fase inicial, se hará la descripción de las características geográficas y sociales de la comunidad “Normita”. También se va a describir la infraestructura de red que ya existe. Con el propósito de adaptar la tecnología a las necesidades reales del entorno, este diagnóstico es fundamental [19].
- **Nivel Explicativo:** El estudio tratará de explicar la manera en que una red Mesh que es alimentada por energía solar puede ser una solución sostenible y además viable. [20] Se analizará la relación causa-efecto entre la tecnología implementada y la mejora en la conectividad, considerando la escalabilidad inherente de las redes en malla [21].
- **Nivel Experimental:** Un carácter experimental adquiere la investigación al implementar más evaluar un prototipo funcional en condiciones reales. Para evaluar el rendimiento [22] con el fin de validar la efectividad, así como la resiliencia de la solución [23], se manipularán variables como la ubicación de los nodos, además de la configuración de equipos (por ejemplo, basados en ESP32 para IoT).

### 3.3 Población y Muestra

- **Población:** Todos los habitantes dentro del recinto “Normita” en el cantón La Troncal constituyen la población objeto de estudio. Debido a su entorno rural y escaso acceso a servicios tecnológicos, esta comunidad resulta un caso de estudio perfecto para evaluar el impacto de la inclusión digital.

- **Muestra:** Se trabajará con una muestra no probabilística por conveniencia, involucrando a un grupo de habitantes que participen voluntariamente en las pruebas del prototipo. Este enfoque participativo fomenta la corresponsabilidad y el sentido de pertenencia, claves para la sostenibilidad del proyecto [24].

### 3.4 Métodos de Investigación

Para el desarrollo del proyecto se combinarán los siguientes métodos de investigación:

- **Método de Investigación-Acción:** Este método es central, ya que el investigador interviene directamente en la comunidad para generar un cambio [25]. El ciclo de diagnóstico, planificación, acción y evaluación se alinea con las fases del proyecto.

- **Método Analítico-Sintético:** Se utilizará para descomponer el problema en partes manejables, como el cálculo de la demanda energética para los sistemas fotovoltaicos [26] y el diseño de la topología de red, para luego integrarlas en una solución funcional.

- **Método Deductivo:** Se partirá de los conceptos generales sobre redes Mesh, sus protocolos [27] y los desafíos de conectividad en instituciones [28], para aplicarlos al diseño e implementación específicos para la comunidad "Normita".

### 3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

Se emplearán diversas técnicas para recopilar datos cuantitativos y cualitativos, asegurando una evaluación robusta:

**Tabla 1.1 Técnicas de recolección de información**

Fase del Proyecto	Técnica	Instrumentos	Justificación Científica
<b>Diagnóstico</b>	Observación directa y Entrevistas	Fichas de campo y Guías de entrevista	Permiten comprender el contexto social y las necesidades de la comunidad, un paso clave para el éxito de redes comunitarias [25].
<b>Diseño</b>	Simulación de red y Revisión documental	Software de simulación (ej. NS-3) y Fichas técnicas	La simulación es vital para predecir el rendimiento y optimizar la configuración de la red antes del despliegue físico [21].
<b>Implementación</b>	Registro de instalación	Bitácora y registro fotográfico	Documentar el proceso de despliegue es crucial para la replicabilidad y el mantenimiento futuro del sistema [22].
<b>Evaluación</b>	Pruebas de rendimiento técnico y Encuestas	Software de medición de red y Cuestionarios	Es necesario medir indicadores técnicos como latencia y ancho de banda, y recoger datos de uso de

			CPU y memoria para detectar anomalías [29].
--	--	--	---

Para la fase de evaluación, y como complemento a las pruebas técnicas de rendimiento, se diseñó un instrumento específico para medir el nivel de satisfacción de los usuarios con el prototipo implementado. Este instrumento consistió en una encuesta estructurada con preguntas de selección múltiple, orientada a evaluar la percepción de la comunidad sobre la calidad del servicio en dimensiones clave como la velocidad, la estabilidad de la conexión, el impacto en actividades educativas y la satisfacción general.

Es importante destacar que, para asegurar la pertinencia y claridad de los instrumentos, los formularios que se aplican en el diagnóstico y en el nivel de satisfacción a los usuarios del sistema implementado, fueron sometidos a validación por expertos, con título de cuarto nivel, antes de su aplicación.

### 3.6 Tratamiento de la Información

La información recopilada será analizada de la siguiente manera:

1. **Análisis Cuantitativo:** El análisis cuantitativo del proyecto contemplará tanto la información obtenida a través de las encuestas como los datos técnicos de desempeño de la red. En una primera etapa, la encuesta diagnóstica permitirá establecer una línea base sobre el acceso, las barreras, la calidad del servicio y la percepción de la comunidad respecto a la conectividad. Posteriormente, tras la implementación del sistema, se aplicará una encuesta de satisfacción para evaluar la experiencia de los usuarios en cuanto a calidad, estabilidad y utilidad del servicio. Finalmente, se procesarán los indicadores técnicos de la red: latencia, cobertura, ancho de banda y estabilidad, con el fin de valorar la eficiencia del prototipo. La integración de estos análisis facilitará una visión integral, tanto social como técnica, que permitirá validar la pertinencia del proyecto y su capacidad para responder a las necesidades de la comunidad en actividades educativas, comunicacionales y productivas [30].

2. **Integración de Datos:** Esto permitirá obtener una evaluación integral sobre el proyecto. Con esto se podrán sacar conclusiones sobre si las redes

Mesh con energía solar son viables para fomentar un ahorro energético importante en los puntos de acceso [31] [32], como vía sostenible que disminuya la brecha digital en áreas rurales.

## **CAPITULO IV**

### **4 Diagnóstico de la Comunidad y Entorno del Proyecto**

Este apartado describe el estado actual de la comunidad "Recinto Normita", abordando tanto su contexto geográfico y físico como las necesidades y percepciones de sus habitantes respecto a la conectividad a internet. El objetivo es establecer una línea base que justifique la necesidad e idoneidad del proyecto propuesto.

#### **4.1 Análisis del Entorno Geográfico y Observación Directa**

Para comprender las particularidades de la implementación, se realizó una observación directa del entorno físico y geográfico de la comunidad.

##### ***4.1.1 Descripción Geográfica de la Comunidad:***

El "Recinto Normita" es una comunidad rural representativa de la región, con una población dispersa. La comunidad está conformada por **viviendas familiares dispersas, ubicadas a lo largo de caminos de segundo y tercer orden**, sin un núcleo urbano o edificaciones comunitarias centralizadas. El punto de encuentro social y económico gira en torno a las actividades diarias y los lazos familiares.

El paisaje económico de la zona está dominado por la actividad agrícola. Las áreas circundantes al recinto están dedicadas extensivamente al cultivo de productos como **caña de azúcar, banano y cacao**, actividades que constituyen la principal fuente de ingresos para sus habitantes.

##### ***4.1.2 Identificación de Obstáculos y Características del Terreno:***

El terreno presenta una topografía de **ondulaciones y colinas suaves**. Esta característica ha sido históricamente un factor que ha limitado la expansión de infraestructura de telecomunicaciones por cable hasta la zona.

Durante la observación directa en el área, se identificaron los principales obstáculos a nivel local que podrían afectar una distribución de señal inalámbrica: **árboles de considerable altura, estimados entre 10 y 15 metros**. Estos obstáculos naturales deberán ser considerados cuidadosamente durante el diseño de la red de distribución interna para asegurar que la señal pueda llegar de manera efectiva a cada uno de los hogares interesados.

##### ***4.1.3 Resultados de la Encuesta de Necesidades de Conectividad***

Con el fin de complementar la observación física y cuantificar la situación de conectividad en la comunidad rural *Normita*, se aplicó un cuestionario a los 11 jefes de hogar que conforman el total de la población. La aplicación del instrumento se realizó de manera intencional y censal, en modalidad presencial, garantizando la participación de la

totalidad de los hogares. Los datos fueron posteriormente digitalizados en un formulario electrónico para facilitar su análisis y visualización estadística.

La encuesta estuvo conformada por diez preguntas, orientadas a indagar aspectos de acceso, calidad, costo y necesidades relacionadas con el servicio de internet en la comunidad. Con este diagnóstico se buscó establecer una línea base objetiva, que sirviera como sustento para la pertinencia del proyecto de diseño e implementación de una red inalámbrica MESH con respaldo de energía solar.

#### ***4.1.4 Confiabilidad y Validez del Instrumento***

El cuestionario aplicado combinó ítems de escala Likert (1–5), preguntas dicotómicas y de opción múltiple, lo que permitió captar una visión amplia de la problemática de conectividad, aunque no fue diseñado originalmente como una escala psicométrica formal. Para efectos de análisis, los ítems fueron reorganizados en tres criterios principales:

- **Acceso y Barreras Actuales al Servicio de Internet:** Incluye preguntas relacionadas con la disponibilidad de conexión, los tipos de servicio utilizados y las principales dificultades para acceder al internet (precio, cobertura, dispositivos o habilidades).
- **Calidad y Costo de los Servicios Existentes:** Reúne los ítems asociados a la percepción de calidad, estabilidad, velocidad y relación costo–beneficio del servicio actual, aplicable únicamente a los hogares que cuentan con conexión.
- **Necesidades y Percepción del Proyecto:** Agrupa las preguntas sobre la importancia del internet para la educación, el trabajo y el bienestar familiar, así como el interés en la propuesta de implementación de una red comunitaria con respaldo de energía solar.

En términos de validez de contenido, el cuestionario fue revisado por el docente responsable de vinculación con la sociedad y especialista en telecomunicaciones, quien garantiza la pertinencia, claridad y coherencia de los ítems con los objetivos de la investigación.

En cuanto a la confiabilidad interna, se aplicó el coeficiente alfa de Cronbach en los criterios que contaban con tres o más ítems. El criterio (Necesidades y Percepción del Proyecto) alcanzó un valor de  $\alpha \geq 0,70$ , considerado aceptable y suficiente para respaldar su uso como índice confiable en el análisis. El criterio Calidad y Costo de los Servicios Existentes, al estar compuesto únicamente por dos ítems, no permite un cálculo robusto de alfa; en este caso se utilizaron estadísticos descriptivos para presentar los hallazgos. Finalmente, el criterio Acceso y Barreras Actuales al Servicio de Internet, al contener principalmente variables dicotómicas, se analizó a través de frecuencias y porcentajes, lo cual resulta adecuado para describir la magnitud de las limitaciones en la comunidad.

Se reconoce como limitación que la encuesta inicial no fue diseñada con criterios psicométricos exhaustivos, por lo que el análisis de confiabilidad se centró únicamente en el criterio 1.1.3. No obstante, el instrumento cumplió satisfactoriamente su propósito de establecer una línea base diagnóstica, cuyos resultados constituyen la justificación empírica para la implementación de la red inalámbrica MESH con respaldo de energía solar en la comunidad Normita.

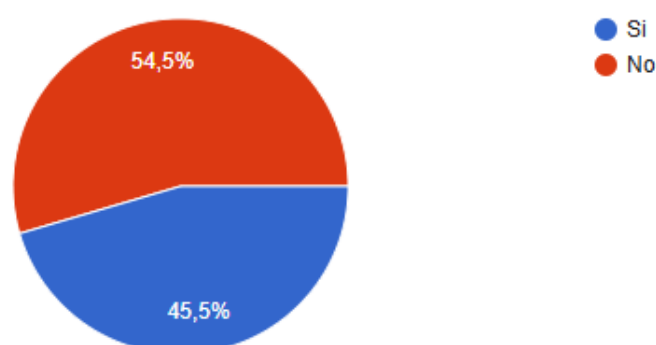
#### ***4.1.5 Acceso y Barreras Actuales al Servicio de Internet***

Se investigó primero el estado actual del acceso a internet. Los resultados revelaron una brecha digital significativa:

- Un 54.5% de las familias encuestadas (6 de 11) reportó no tener ningún tipo de acceso a internet en su hogar. El 45.5% restante (5 de 11) sí cuenta con algún tipo de conexión.

**Pregunta 1:** Actualmente, ¿cuenta con algún tipo de servicio de internet en su hogar?

11 respuestas



### Ilustración 1 Porcentaje de hogares con y sin acceso a internet

Fuente: Elaborado por el autor en Google Docs

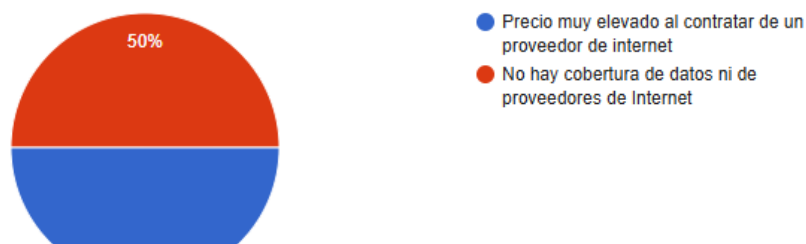
- A las 6 familias sin acceso, se les preguntó por la barrera principal. Las respuestas se dividieron equitativamente: un 50% indicó que la razón es la falta de cobertura de datos o de proveedores, y el otro 50% señaló el precio elevado como el principal impedimento.

 Copiar gráfico

--- Si la respuesta es NO, continuar con la siguiente pregunta: ---

**5. Barrera de Acceso:** ¿Cuál es la principal razón por la que no cuenta con internet en su hogar?

6 respuestas



### Ilustración 2 Principales barreras para no contratar un servicio de internet

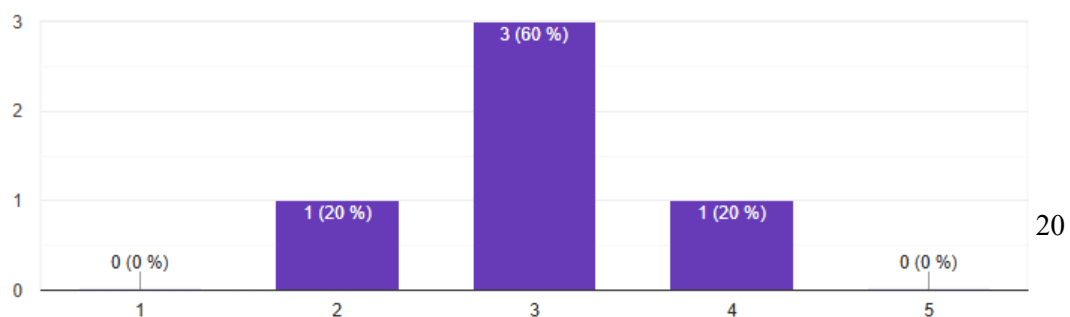
#### 4.1.6. Calidad y Costo de los Servicios Existentes

Fuente: Elaborado por el autor en Google Docs

**2. Calidad General (Escala 1-5):** En general, ¿cómo calificaría la **calidad** (velocidad y estabilidad) de su servicio de internet actual?

1 = Muy mala, 5 = Excelente)

5 respuestas



### **Ilustración 3 Calificación de la calidad del servicio de internet por parte de los usuarios existentes,**

**Fuente: Elaborado por el autor en Google Docs**

A las 5 familias que sí tienen internet (el 45.5% de la muestra), se les consultó sobre la calidad y el costo del servicio que utilizan:

- El 60% de este grupo accede a internet mediante un proveedor, mientras que el 40% lo hace a través de planes de datos de celular.
- Al calificar la calidad general de su conexión actual en una escala del 1 al 5, la mayoría (60%) la calificó con un 3 (regular), mientras que el 40% restante la calificó como deficiente (2 y 4). Ningún usuario calificó su conexión como "excelente" (5).
- Respecto a la relación costo-calidad, la percepción es negativa. El 100% de los usuarios con servicio lo calificó entre 2 y 3 en la escala, indicando que consideran que el servicio es caro para la calidad que reciben.

#### ***4.1.7 Necesidades y Percepción del Proyecto***

Finalmente, se realizaron preguntas a toda la muestra (los 11 encuestados) para medir la importancia del internet y el interés en la solución propuesta:

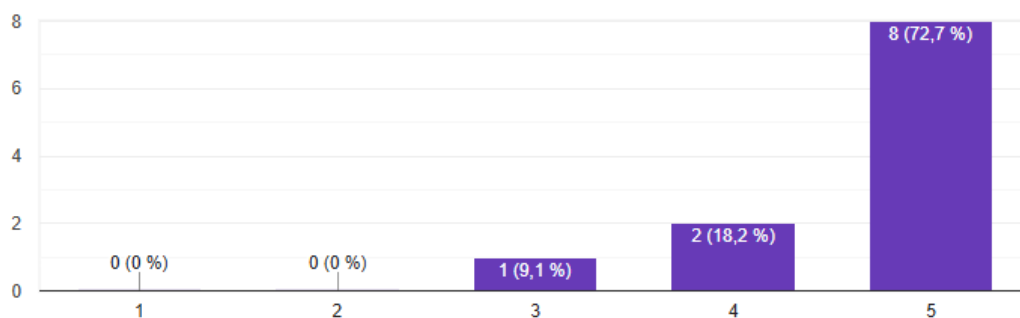
- **Importancia para la Educación:** El 90.9% (10 de 11 familias) calificó con la máxima puntuación (5 - Esencial) la importancia del internet para la educación de los niños.

- **Prioridad Familiar:** De manera similar, el 100% de los encuestados calificó como una alta prioridad (4 o 5) tener un servicio fiable, con un 63.6% dándole la máxima prioridad (5).
- **Impacto de la Falta de Internet:** El 100% de la comunidad percibe que la falta de un buen internet tiene un impacto negativo en su vida diaria, con un 54.5% que lo califica como un impacto "muy negativo" (5).
- **Interés en el Proyecto:** El interés en el proyecto comunitario es abrumadoramente positivo. El 90.9% de los encuestados manifestó un alto interés (calificación de 4 o 5), con un 72.7% (8 de 11) declarándose "muy interesado" (5).

**10. Interés en el Proyecto (Escala 1-5):** Califique su nivel de **interés** en un nuevo proyecto de internet comunitario con respaldo de energía solar.  
(1 = Nada interesado, 5 = Muy interesado)

 Copiar gráfico

11 respuestas



#### **Ilustración 4 Nivel del interés de la comunidad en el proyecto propuesto**

**Fuente:** Elaborado por el autor en Google Docs

Los datos de la encuesta confirman una clara necesidad insatisfecha, Más de la mitad de la comunidad no tiene acceso, y quienes lo tienen reciben un servicio de calidad regular a un costo percibido como elevado. Existe una demanda unánime de un servicio fiable, principalmente para la educación, y un altísimo interés en la solución propuesta, lo que justifica plenamente la ejecución del proyecto.

#### **4.1.8 Conclusión del Diagnóstico**

El diagnóstico integral realizado en la comunidad "Normita" revela una convergencia de factores que justifican plenamente la ejecución del proyecto. Los hallazgos de la encuesta demuestran de manera contundente la existencia de una profunda brecha digital y una necesidad crítica insatisfecha. Con más de la mitad de los hogares sin ningún tipo de acceso a internet y con aquellos que sí lo tienen reportando una baja calidad a un costo percibido como elevado, el escenario actual es de precariedad digital. Esta carencia contrasta fuertemente con la alta valoración que la comunidad otorga al acceso a internet, considerándolo "esencial" para la educación y una alta prioridad familiar. El abrumador interés en la solución propuesta confirma que existe una demanda explícita y una alta disposición de la comunidad para adoptar el proyecto.

Paralelamente, el análisis geográfico y la observación directa del entorno confirman la viabilidad técnica de la solución propuesta. Si bien el terreno presenta desafíos topográficos como ondulaciones y obstáculos locales como vegetación de altura considerable, el estudio demuestra que estos son factores conocidos y superables a través de un diseño de red adecuado, como la implementación de una torre de la altura suficiente. No se identificaron impedimentos geográficos insalvables que pudieran poner en riesgo la viabilidad del proyecto.

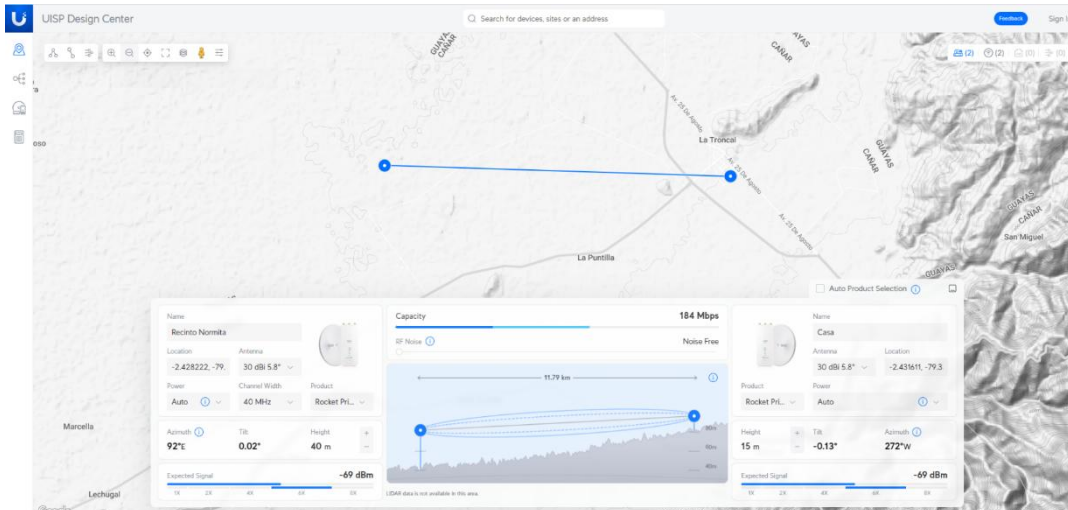
## **4.2 Estudio de Factibilidad del Radioenlace Punto a Punto (PTP)**

### **4.2.1 Introducción y Objetivos del Estudio**

El presente estudio tiene como objetivo principal determinar la viabilidad técnica y geográfica para la implementación de un radioenlace de microondas en la modalidad punto a punto (PTP). Este enlace está diseñado para conectar la zona urbana de La Troncal, que cuenta con acceso a la red troncal de internet, con la comunidad rural denominada "Recinto Normita", que actualmente carece de dicho servicio.

La finalidad es validar, mediante análisis geográfico, topográfico y de línea de vista, que la solución propuesta es físicamente posible. Se evalúa la trayectoria entre los dos puntos estratégicos, considerando las alturas de las estructuras de montaje (una torre y un tubo) y las características del terreno que los separa. El análisis se apoya en una

simulación actualizada que, bajo una configuración de canal de 40 MHz, proyecta una capacidad de **184 Mbps**, demostrando la viabilidad de un enlace de alta capacidad.



**Ilustración 5. Diseño de enlace PTP propuesto por el autor**

**Fuente: UISP Design Center**

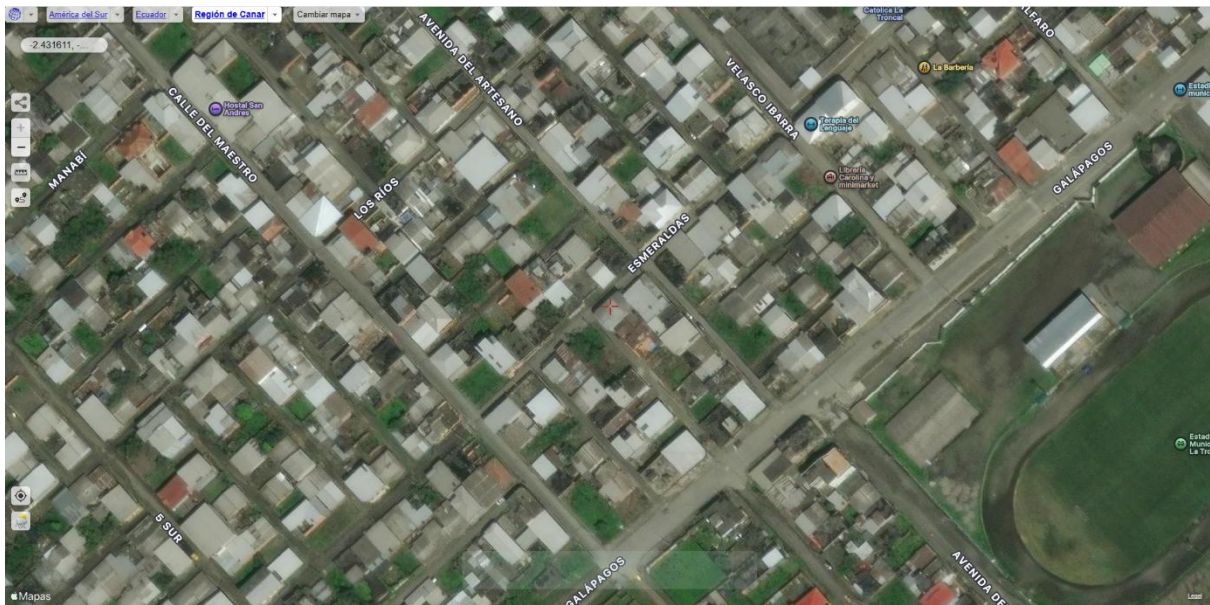
Este análisis es un pilar fundamental del proyecto, ya que un resultado positivo es prerequisite para proceder con la selección de equipos, la instalación y la puesta en marcha del sistema.

#### **4.2.2 Descripción Detallada de las Zonas de Emplazamiento**

La selección de los emplazamientos es un factor crítico que impacta directamente en la viabilidad del enlace. A continuación, se describen las características de cada punto.

##### **Punto A: Ubicación del Punto de Acceso (AP) en La Troncal**

- **Coordenadas Geográficas:** 2°25'53.8"S (Latitud), 79°20'23.3"W (Longitud).



**Ilustración 6. Mapa satelital de La Troncal,**

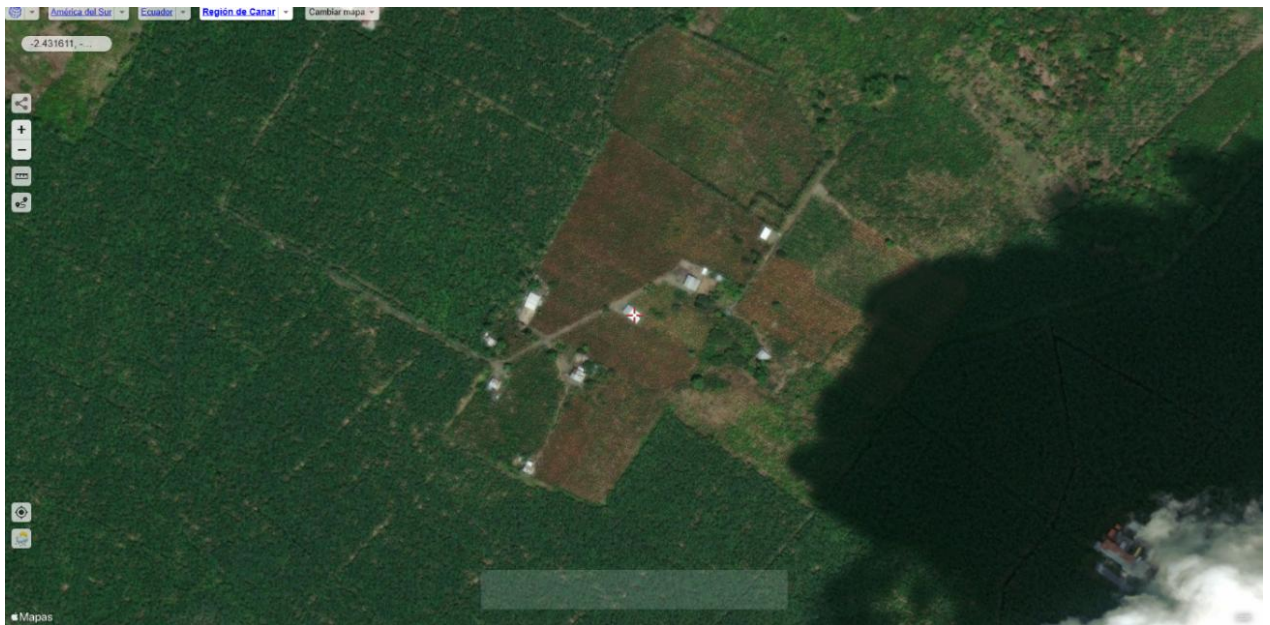
**Fuente:** Obtenido de Satellite map [33]

- **Descripción del Entorno:** Este punto se sitúa en la **zona urbana de La Troncal**. El entorno se caracteriza por una trama urbana definida, con presencia de edificaciones de baja y mediana altura, infraestructura vial pavimentada y acceso a todos los servicios básicos. Al ser el punto de partida del enlace, se asume que en esta localidad se encuentra el punto de acceso a la red de fibra óptica o al proveedor de internet principal.
- **Infraestructura de Montaje:** La antena transmisora será instalada en una edificación residencial de dos pisos. Para alcanzar la altura necesaria y asegurar el despeje de obstáculos cercanos (como otras viviendas o árboles), se utilizará un **tubo de acero galvanizado** anclado firmemente a la estructura del edificio. La altura final de la antena en este punto será de **15 metros** sobre el nivel del suelo.

Para los fines de este proyecto, este punto se considera el nodo de interconexión. El equipo PTP se conecta directamente a la infraestructura de red existente en la localidad, la cual provee la salida a internet. El diseño y detalle de dicha infraestructura interna (router del proveedor, switches, etc.) se encuentran fuera del alcance de esta tesis, cuyo foco es el diseño y la implementación del sistema de transporte y distribución de internet hacia la comunidad Normita.

## **Punto B: Ubicación de la Estación Remota - "Recinto Normita"**

- **Coordenadas Geográficas:** 2°25'41.6"S (Latitud), 79°26'44.7"W (Longitud).



**Ilustración 7 Imagen satelital de la comunidad Normita**

**Fuente:** Fuente: Obtenido de Satellite map [33]

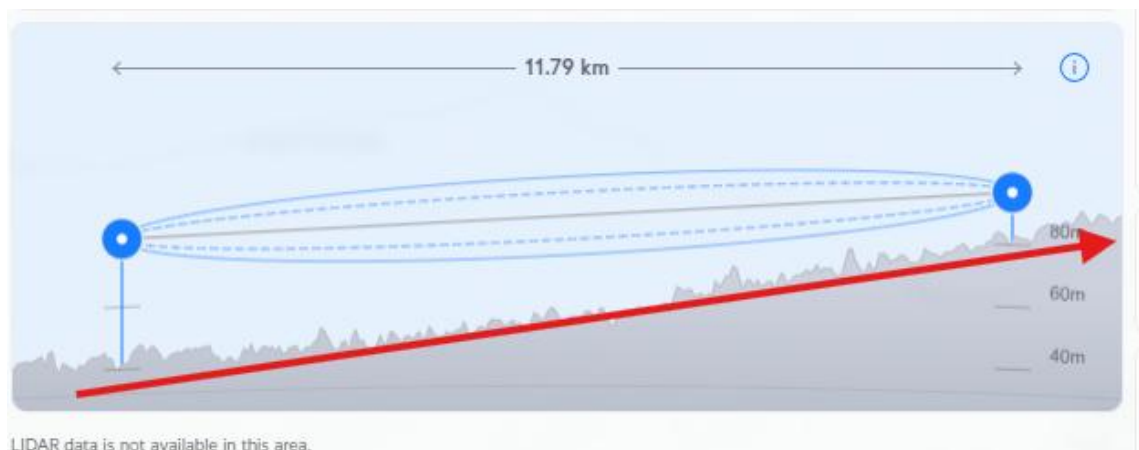
- **Descripción del Entorno:** Este emplazamiento se encuentra en una zona netamente rural, alejada del núcleo urbano. Se caracteriza por una baja densidad poblacional, terrenos dedicados a la agricultura y una topografía que presenta ondulaciones y pequeñas elevaciones.

- **Infraestructura de Montaje:** Para superar las irregularidades del terreno y la posible vegetación, en este punto se erigirá una **torre de 40 metros de altura**. Esta estructura proporcionará una posición dominante en el paisaje, garantizando una línea de vista sin compromisos hacia el Punto A en La Troncal.

#### 4.2.3 *Análisis Topográfico y del Perfil de Elevación*

El éxito de un radioenlace a través de **11.78 kilómetros** depende intrínsecamente de la orografía del terreno. El perfil de elevación topográfico, generado por el software de simulación, es la herramienta clave para este análisis.

**Perfil de Elevación del Terreno:** El gráfico del perfil confirma que el terreno entre La Troncal y el Recinto Normita no es plano. Se identifica claramente una elevación intermedia que se interpondría en la trayectoria de la señal si las antenas estuvieran a baja altura.



**Ilustración 8** Diseño de enlace PTP propuesto por el autor

**Fuente:** UIISP Design Center

Este "lomo" topográfico es el principal desafío natural que la ingeniería del enlace debe superar, y las alturas de montaje de 15 y 40 metros han sido diseñadas específicamente para sobrepasarlo con un amplio margen.

#### 4.2.4 *Análisis de Línea de Vista (Line of Sight - LoS) y Zona de Fresnel*

Este análisis valida que la comunicación por radiofrecuencia entre los dos puntos es posible y será de alta calidad.

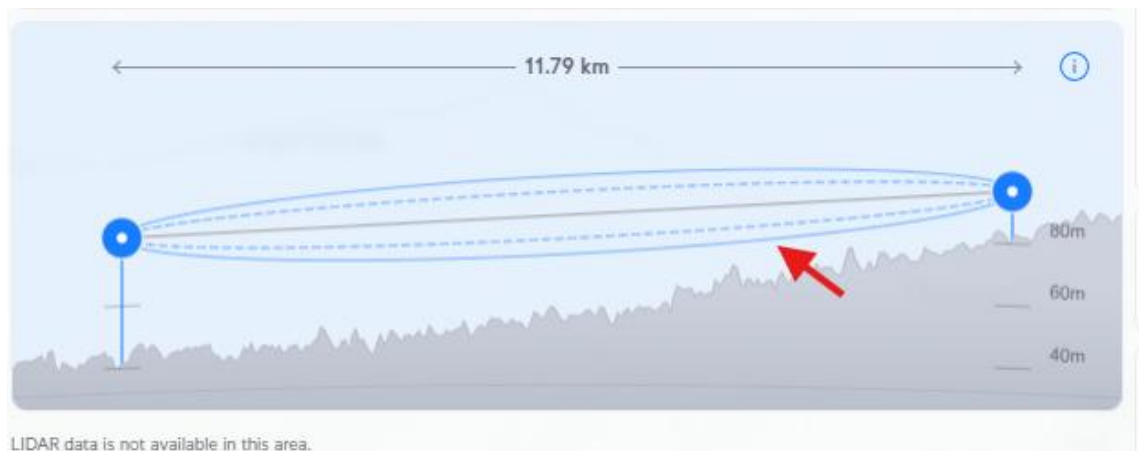
#### 4.2.5 Línea de Vista Directa (LoS):

La línea de vista (LoS) es la trayectoria recta e imaginaria entre las antenas. Como se aprecia en la línea azul de la simulación, gracias a las alturas de 15 m (en La Troncal) y 40 m (en el recinto), esta trayectoria se mantiene completamente despejada, pasando muy por encima de la elevación del terreno.

#### 4.2.6 Análisis Conceptual de la Zona de Fresnel:

La energía de las ondas de radio se propaga en un espacio tridimensional. La Zona de Fresnel describe esta región. Conceptualmente, puede imaginarse como un **elipsoide o una forma de balón de fútbol americano en el espacio**, con sus dos puntas en las antenas. La mayor parte de la energía de la señal de radio viaja dentro de este volumen.

Es de vital importancia que esta zona esté libre de obstáculos (terreno, árboles, edificaciones). Si un objeto penetra en esta zona, incluso sin bloquear la línea de vista directa, puede causar reflexiones, difracción o atenuación de la señal, degradando la calidad de la comunicación.



**Ilustración 9** Diseño del enlace PTP propuesto por el autor

**Fuente:** UISP Design Center

La simulación gráfica, basada en el perfil del terreno y las alturas de las antenas, **confirma que la Zona de Fresnel (el elipsoide dibujado) se encuentra completamente libre de obstrucciones**. El punto más bajo de este volumen pasa a una altura segura por encima del punto más alto del terreno. Esto asegura que la señal llegará al receptor de la forma más limpia y fuerte posible.

**Punto C: Nodo de Interconexión Secundario (Vía El Amarillal)**

Para conformar una topología de malla en el enlace troncal, se establece un segundo punto de interconexión que provee una ruta de datos alternativa hacia la torre de la comunidad.

- **Coordenadas Geográficas:** 2°28'29.6"S (Latitud), 79°16'23.9"W (Longitud).



**Ilustración 10 Ilustración 3 Imagen satelital de la via el Amarillal**

**Fuente:** Obtenido de Satellite map [33]

- **Descripción del Entorno:** Este punto se sitúa en el sector conocido como El Amarillal. Como se observa en la imagen, a diferencia del Punto A, este emplazamiento se encuentra en una **zona montañosa** de la Región de Cañar, lo que le otorga una elevación natural significativa.

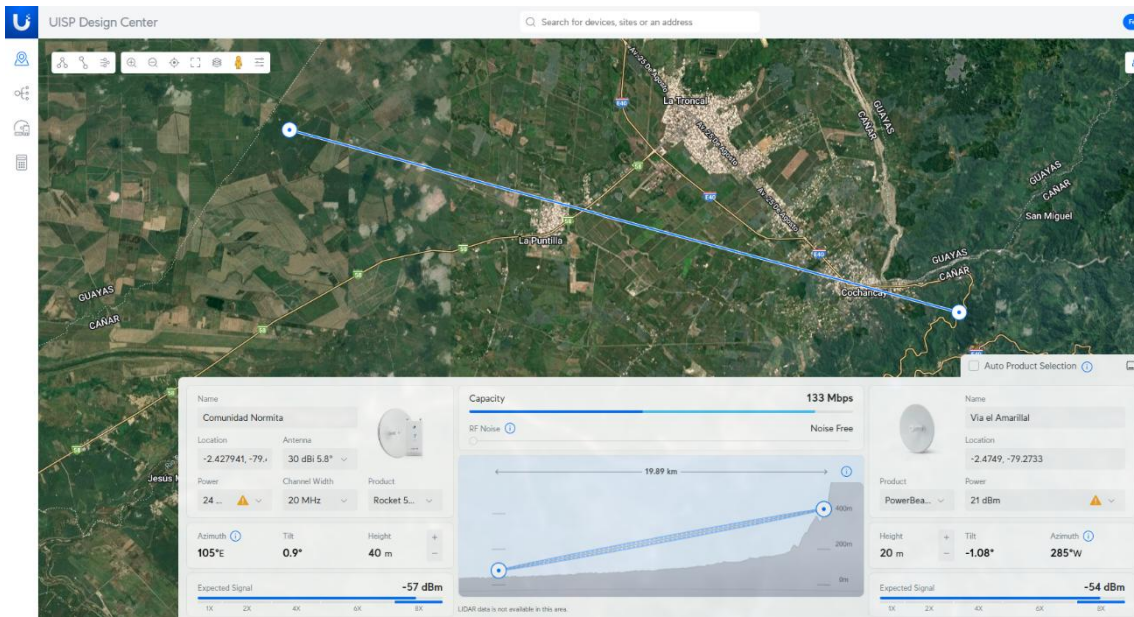
Esta posición elevada es estratégica, ya que proporciona una línea de vista inherentemente despejada hacia la torre de la comunidad, minimizando el riesgo de interferencia por obstáculos topográficos o vegetación.

- **Infraestructura de Montaje:** La antena transmisora se instalará sobre una edificación existente en el lugar, aprovechando su elevación natural. Para alcanzar la altura de diseño final de **20 metros** y asegurar un despeje óptimo, la instalación se complementará con un **tubo de acero** anclado a la estructura del edificio.

Para los fines de este proyecto, este punto se considera el nodo de interconexión. El equipo PTP se conecta directamente a la infraestructura de red existente en la localidad, la cual provee la salida a internet. El diseño y detalle de dicha infraestructura interna (router del proveedor, switches, etc.) se encuentran fuera del alcance de esta tesis, cuyo foco es el diseño y la implementación del sistema de transporte y distribución de internet hacia la comunidad Normita.

#### 4.2.7 *Análisis de Factibilidad del Enlace Secundario (Versión Optimizada)*

A continuación, se presenta el estudio de factibilidad actualizado para el segundo enlace Punto a Punto (PTP), que conecta la torre de la comunidad con el punto de interconexión en Vía el Amarillal



**Ilustración 11** Diseño de enlace PTP propuesto por el autor

Fuente: UISP Design Center

#### ***4.2.8 Análisis de Ubicaciones y Distancia***

El enlace se establece entre la torre en la

**Comunidad Normita** y el nodo en **Vía el Amarillal**, cubriendo una distancia de **19.89 km**. Las alturas de montaje configuradas son de

**40 metros** en la torre principal y de **20 metros** en el punto secundario.

#### ***4.2.9 Análisis del Terreno y Zona de Fresnel***

El perfil topográfico entre ambos puntos presenta elevaciones intermedias. Sin embargo, como se puede observar en la simulación, la Zona de Fresnel se mantiene **completamente despejada**. Las alturas de las antenas son suficientes para elevar la línea de la señal muy por encima de cualquier obstáculo en el terreno, garantizando una conexión limpia.

#### ***4.2.10 Factibilidad y Rendimiento Esperado***

Con los parámetros optimizados, la simulación muestra que el enlace es **altamente factible y robusto**.

- **Señal Esperada:** Se proyectan niveles de señal excelentes para esta distancia: **-57 dBm** en el lado de la comunidad y **-54 dBm** en el lado de Vía el Amarillal. Estos valores son muy superiores al umbral mínimo y aseguran una conexión de alta estabilidad.

- **Capacidad Esperada:** El estudio predice una capacidad de **133 Mbps**. Esta es una velocidad muy alta para un enlace de respaldo, lo que no solo garantiza el servicio completo para la comunidad en caso de un fallo del enlace principal, sino que también abre la posibilidad de realizar un balance de carga para mejorar el rendimiento general de la red.

#### ***4.2.11 Conclusión Final del Estudio de Factibilidad***

En virtud del análisis detallado y apoyado por la simulación actualizada, **se concluye que la implementación del radioenlace Punto a Punto entre La Troncal y el Recinto Normita es técnicamente viable y presenta condiciones óptimas para su operación.**

- **Factibilidad Geográfica:** Las ubicaciones seleccionadas son estratégicas. El Punto A en la zona urbana de La Troncal facilita el acceso a la red troncal, y el Punto B en el recinto permite una distribución efectiva en la zona rural.
- **Factibilidad de Infraestructura:** Las soluciones de montaje (tubo de 15 m y torre de 40 m) son adecuadas para los entornos y garantizan el despeje necesario.
- **Factibilidad Técnica del Enlace:** El análisis demuestra inequívocamente la existencia de una línea de vista directa y una **Zona de Fresnel completamente despejada**. Esta condición ideal es el factor más importante para predecir un enlace de alto rendimiento y se ve corroborada por la excelente señal esperada de **-69 dBm** que muestra la simulación.

#### 4.2.12 Enlace Secundario (Vía el Amarillal - Comunidad Normita)

Asimismo, el estudio de factibilidad para el segundo enlace PTP, diseñado para conformar la malla troncal, también concluye que su implementación es **altamente viable y robusta**.

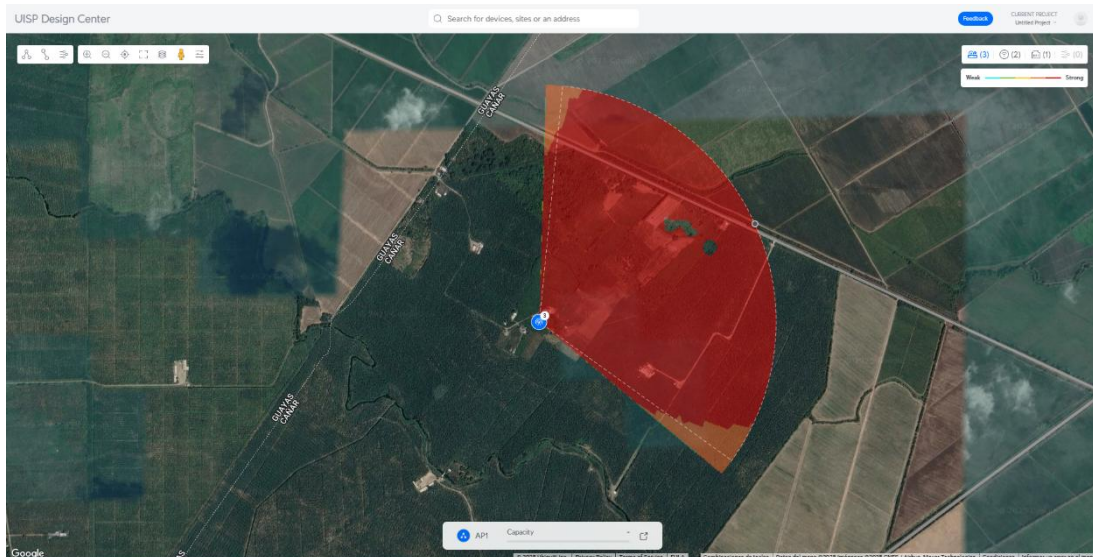
- **Factibilidad Geográfica:** La ubicación seleccionada en la Vía el Amarillal es estratégica, ya que su elevación natural en una zona montañosa facilita enormemente la obtención de una línea de vista clara hacia la comunidad.
- **Factibilidad de Infraestructura:** Las alturas de montaje (20 m en Vía el Amarillal y 40 m en la torre de la comunidad) son suficientes para garantizar que la Zona de Fresnel se mantenga completamente despejada a lo largo de los 19.89 km de distancia.
- **Factibilidad Técnica del Enlace:** La simulación optimizada confirma una conexión de alta calidad, con niveles de señal excelentes (-54 a -57 dBm) y una capacidad de **133 Mbps**, lo cual es ideal para un enlace de estas características.

En conjunto, los estudios de ambos enlaces PTP confirman que la arquitectura de la troncal de internet para la comunidad, basada en una topología de malla con dos puntos de interconexión, es técnicamente sólida y factible.

#### ***4.2.13 Definición Estratégica de las Zonas de Cobertura Piloto***

Las simulaciones de cobertura actualizadas definen con mayor precisión las áreas objetivo para la fase piloto, tomando en cuenta la geolocalización de las viviendas identificadas y la orografía del terreno. La estrategia sigue siendo la de establecer un núcleo de usuarios cercanos para la validación inicial, con una clara visión de expansión futura condicionada por la elección del equipamiento cliente.

#### ***4.2.14 Zona de Cobertura AP1: Sector Norte y Noroeste Cercano***



**Ilustración 12 Diseño de cobertura del AP1 propuesto por el autor**

**Fuente: UISP Design Center**

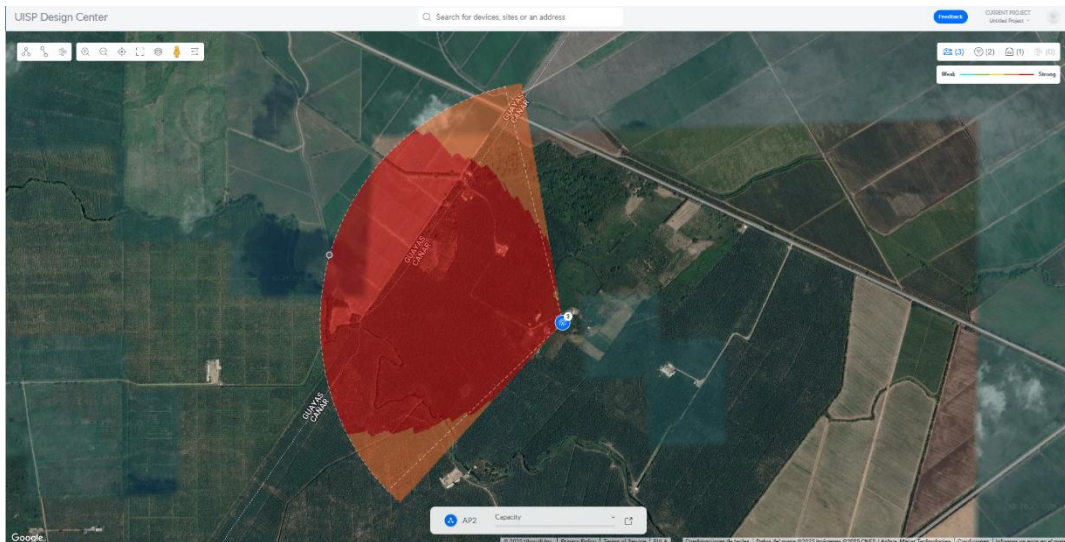
El primer Punto de Acceso (AP1) se orienta para cubrir un sector que incluye las viviendas más próximas ubicadas hacia el norte y noroeste de la torre central.

- **Descripción Detallada de la Zona Piloto:** La simulación muestra que el área de señal óptima (rojo intenso) del AP1 abarca directamente un grupo de viviendas que se encuentran a corta distancia de la torre, extendiéndose principalmente hacia el cuadrante noroccidental. Estas casas representan el núcleo

inicial de usuarios piloto. La proximidad garantiza una señal robusta y permitirá evaluar el rendimiento del sistema en condiciones ideales. Además, se observa una extensión de la señal aceptable (naranja) que alcanza algunas viviendas ligeramente más alejadas en la misma dirección.

- **Potencial de Expansión y Condicionamiento por Equipo:** La expansión lógica desde esta zona piloto apunta hacia las viviendas que se encuentran dentro de la zona naranja proyectada. La conexión exitosa de estos hogares dependerá de la implementación de CPEs con una ganancia adecuada para compensar la atenuación de la señal por la distancia y los posibles obstáculos menores (vegetación baja). Para las viviendas que se encuentren más allá de la zona naranja visible en esta simulación, la viabilidad técnica deberá ser evaluada individualmente, considerando la realización de estudios de línea de vista y la posible necesidad de CPEs de ganancia superior o incluso la reorientación futura de los APs en la torre si la demanda lo justifica.

#### ***4.2.15 Zona de Cobertura AP2: Sector Suroeste y Oeste Cercano***



**Ilustración 13** Diseño de cobertura del AP2propuesto por el autor

**Fuente:** UISP Design Center

El segundo Punto de Acceso (AP2) se orienta para dar cobertura a las viviendas situadas principalmente hacia el suroeste y oeste inmediato de la ubicación de la torre.

- **Descripción Detallada de la Zona Piloto:** La simulación para el AP2 indica un área de cobertura fuerte (rojo) que abarca un conjunto de residencias ubicadas en la dirección suroeste. Similar al AP1, estas viviendas cercanas servirán como el grupo piloto inicial, asegurando una buena experiencia de usuario. También se proyecta una zona de cobertura aceptable (naranja) que se extiende hacia el oeste, alcanzando algunas viviendas un poco más distantes.

- **Potencial de Expansión y Condicionamiento por Equipo:** La expansión de la cobertura desde el AP2 se dirigiría naturalmente hacia las viviendas que se encuentran dentro de la zona naranja. Al igual que con el AP1, la conexión de estos hogares dependerá de la utilización de CPEs apropiados. Aquellas viviendas que se encuentren en el límite o fuera de la zona naranja actual requerirán un análisis más detallado. Es posible que se necesiten CPEs de mayor sensibilidad o, en casos particulares, la evaluación de soluciones alternativas como la instalación de repetidores en fases futuras si la dispersión de las viviendas lo amerita y la densidad de usuarios lo justifica económicamente.

Las simulaciones actualizadas proporcionan una guía visual clara de las zonas de cobertura piloto iniciales para ambos APs. Estas zonas se centran estratégicamente en las viviendas más cercanas para asegurar un inicio exitoso del proyecto. El crecimiento futuro hacia las viviendas más alejadas es una parte contemplada del plan, y su implementación se realizará de manera progresiva, basándose en el rendimiento observado en el piloto y en la selección del equipamiento cliente más adecuado para cada situación geográfica específica dentro del Recinto Normita.

#### ***4.2.16 Selección Detallada y Justificación de Equipos de Red***

La selección de los equipos de hardware es una de las decisiones más críticas en el diseño de una red inalámbrica, ya que determina directamente el rendimiento, la fiabilidad, la escalabilidad y el costo total del proyecto. La estrategia de selección para esta red comunitaria se ha centrado en la creación de un ecosistema tecnológico cohesivo, utilizando equipos de un mismo fabricante (Ubiquiti Inc.) siempre que ha sido posible.

Esta aproximación no solo garantiza la compatibilidad entre los componentes, sino que también simplifica la gestión, el monitoreo y la futura expansión de la red.

La justificación de cada equipo se basa en un análisis de sus fichas técnicas, contrastado con los requerimientos específicos de cada subsistema de la red: el enlace troncal Punto a Punto (PTP) y la red de acceso Punto a Multipunto (P2MP).

#### 4.2.17 Equipamiento para el Enlace Troncal Punto a Punto (PTP)

El enlace PTP es la columna vertebral de todo el proyecto. Su función es transportar el ancho de banda desde el punto de interconexión en La Troncal hasta la torre central en el Recinto Normita, a una distancia de 11.78 km. Este enlace debe ser extraordinariamente robusto, estable y de alta capacidad. Por estas razones, la elección de los equipos ha sido rigurosa.

#### Radio Transceptor: Ubiquiti Rocket Prism 5AC Gen2

El radio es el "motor" del enlace. Para esta función crítica, se ha seleccionado el **Rocket Prism 5AC Gen2**.

Ficha técnica:

### Specifications

RP-5AC-Gen2	
Dimensions	88 x 40 x 230 mm (3.47 x 1.58 x 9.06")
Weight	400 g (14.11 oz)
Networking Interface	(1) 10/100/1000 Ethernet Port
RF Connectors	(2) RP-SMA (Waterproof), (1) GPS* (Waterproof)
LEDs	(4) Signal Strength, GPS*, LAN, Power
Enclosure	Die-Cast Aluminum with White Powder Coating
Max. Power Consumption	9.5W
Power Supply	24V, 1A Gigabit PoE Adapter (Included)
Power Method	Passive PoE (Pairs 4, 5+; 7, 8 Return)
Processor Specs	Atheros MIPS 74Kc
Memory	128 MB DDR2 SDRAM
Supported Voltage Range	18-26VDC
Signal Strength LEDs	Software-Adjustable to Correspond to Custom RSSI Levels
Channel Sizes	PtP Mode
	PtMP Mode
	10/20/30/40/50/60/80 MHz
	10/20/30/40 MHz
ESD/EMP Protection	± 24 kV Contact / Air for Ethernet
Operating Temperature	-40 to 80° C (-40 to 176° F)
Operating Humidity	5 to 95% Noncondensing
RoHS Compliance	Yes
Shock and Vibration	ETSI300-019-1.4
Modes	Access Point, Station
Services	Web Server, SNMP, SSH Server, Telnet, Ping Watchdog, DHCP, NAT, Bridging, Routing
Utilities	airMagic, airView, Antenna Alignment Tool, Discovery Utility, Site Survey, Ping, Traceroute, Speed Test
Distance Adjustment	Dynamic Ack and Ackless Mode
Power Adjustment	Software Adjustable UI or CLI
Security	WPA2 AES Only
QoS	Supports Packet Level Classification WMM and User Customer Level: High/Medium/Low
Statistical Reporting	Up Time, Packet Errors, Data Rates, Wireless Distance, Ethernet Link Rate
Other	Remote Reset Support, Software Enabled/Disabled, VLAN Support, 256QAM, GPS*, TX Filter
Ubiquiti Specific Features	30/50/60 MHz Channels, airMAX ac Mode, Traffic Shaping with Burst Support, Discovery Protocol, Frequency Band Offset, Ackless Mode
Certifications	CE, FCC, IC

\* GPS sync support available in airOS firmware v8.3.0 and newer.

DATASHEET

**rocket prism 5AC GEN2**

Operating Frequency (MHz)				
Worldwide	5150 - 5875			
USA	U-NII-1: 5150 - 5250	U-NII-2A: 5250 - 5350 MHz	U-NII-2C: 5470 - 5725 MHz	U-NII-3: 5725 - 5850

Management Radio (MHz)	
Worldwide	2412 - 2472
USA	2412 - 2462

RP-5AC-Gen2 Output Power: 28 dBm							
TX Power Specifications				RX Power Specifications			
Modulation	Data Rate	Avg. TX	Tolerance	Modulation	Data Rate	Sensitivity	Tolerance
airMAX ac	1x BPSK (1/2)	28 dBm	± 2 dB	airMAX ac	1x BPSK (1/2)	-96 dBm	± 2 dB
	2x QPSK (1/2)	28 dBm	± 2 dB		2x QPSK (1/2)	-95 dBm	± 2 dB
	2x QPSK (3/4)	28 dBm	± 2 dB		2x QPSK (3/4)	-92 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (1/2)	28 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (1/2)	-90 dBm	± 2 dB
	4x 16QAM (3/4)	28 dBm	± 2 dB		4x 16QAM (3/4)	-86 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (2/3)	28 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (2/3)	-83 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (3/4)	27 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (3/4)	-77 dBm	± 2 dB
	6x 64QAM (5/6)	26 dBm	± 2 dB		6x 64QAM (5/6)	-74 dBm	± 2 dB

**Ilustración 14** Ficha técnica del radio airMAX Rocket Prism 5AC

Fuente: Obtenido de Ubiquiti inc. [34]

#### 4.2.18 Justificación Detallada de la Elección:

##### 1. Tecnología airPrism para Mitigación de Interferencia:

La principal razón para seleccionar el modelo "Prism" es su tecnología de filtrado activo de radiofrecuencia. En un espectro cada vez más saturado, la capacidad de aislar el canal de operación del ruido adyacente es fundamental. La tecnología airPrism analiza el espectro en tiempo real y aplica un filtrado que elimina la energía de radiofrecuencia no deseada. Para un enlace de casi 12 km, donde la señal recibida es débil por naturaleza, proteger esa señal del ruido es la diferencia entre un enlace estable y uno intermitente.

## Technology



To enhance airMAX ac performance, Ubiquiti Networks introduces our patented airPrism technology, which is featured on the Rocket Prism 5AC Gen 2, model RP-5AC-Gen2.

### Improves SNR

High data rates require a high Signal-to-Noise Ratio (SNR), which is challenging to achieve, especially in noisy, high-density areas.

Integrated into Ubiquiti's custom silicon, airPrism technology creates a high SNR by isolating signals within the operating channel and rejecting interference using specialized circuitry, the High-Selectivity Receiver (HSR).

### Removes Interference

Depending on the product model and operating mode, available channel widths may include 10, 20, 30, 40, 50, 60, and/or 80 MHz.

Theoretically APs operate on different channels; however, because of the wider channel bandwidths, there can be overlap in spectrum usage.

airPrism technology removes up to an additional 30+ dB of adjacent channel interference through the active filtering design, so an airMAX ac AP with airPrism technology can provide significantly greater performance than a typical AP.

### Facilitates AP Co-Location

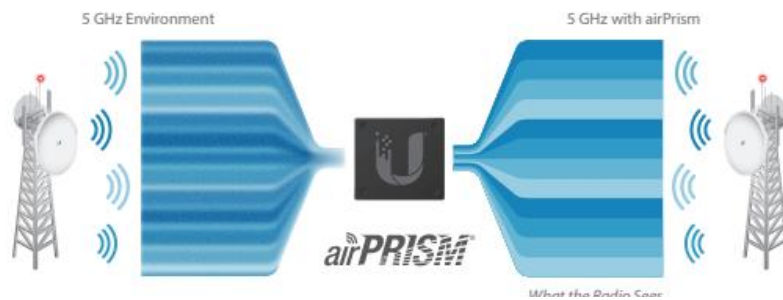
Co-location is vital in many scenarios. For example, a WISP may have limited tower space, so it must co-locate all APs within that allotted footprint. Shielding and other means can lessen interference but may be impractical.

By deploying airMAX ac APs with airPrism technology, you can co-locate APs and enhance the overall performance of your wireless network.

Number of APs	Channel Width
4	80 MHz*
8	40 MHz
16	20 MHz

\* 80 MHz only

### Active Radio Frequency Filtering



### Improved Latency and Noise Immunity

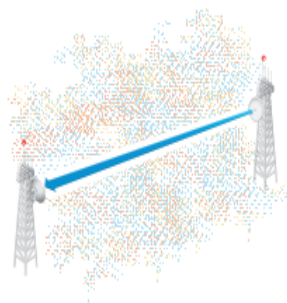


Ilustración 15 Ficha técnica del radio airMAX Rocket Prism 5AC

Fuente: Obtenido de Ubiquiti inc. [34]

2. **Alto Rendimiento (Throughput):** Con la capacidad de alcanzar más de 500 Mbps, este radio asegura que el enlace troncal no se convierta en un cuello de botella a medida que la red comunitaria crezca. Esta capacidad permite ofrecer planes de internet de alta velocidad a decenas de usuarios simultáneamente sin degradar el servicio.

3. **Robustez y Durabilidad:** La carcasa de aluminio fundido del Rocket Prism está diseñada para soportar las condiciones climáticas más adversas. Esta construcción de grado industrial es indispensable para un equipo que estará instalado a 40 metros de altura y cuyo funcionamiento continuo es vital para toda la comunidad.

4. **Gestión y Monitoreo Avanzados:** El radio opera con el sistema operativo airOS 8, que ofrece herramientas avanzadas para el análisis del espectro, alineación de la antena y monitoreo de rendimiento en tiempo real.

#### Advanced RF Analytics

airMAX ac devices feature a multi-radio architecture to power a revolutionary RF analytics engine.

An independent processor on the PCBA powers a second, dedicated radio, which persistently analyzes the full 5 GHz spectrum and every received symbol to provide you with the most advanced RF analytics in the industry.

Data from the spectrum analysis and RF performance monitoring is displayed on the Main tab and airView Spectrum Analyzer.

#### Real-Time Reporting

airOS 8 displays the following RF information:

- Persistent RF Error Vector Magnitude (EVM) constellation diagrams
- Signal, Noise, and Interference (SNI) diagrams
- Carrier to Interference-plus-Noise Ratio (CINR) histograms

#### Multi-Radio Architecture



#### Constellation Diagrams



DATA SHEET

AC GEN2

## **Ilustración 16 Ficha técnica del radio airMAX Rocket Prism 5AC**

**Fuente:** Obtenido de Ubiquiti inc. [34]

### ***4.2.19 Equipamiento para el Enlace Troncal Secundario (19.89 km)***

Este enlace de larga distancia requiere una combinación de equipos que garantice una conexión estable y con capacidad suficiente. La selección fue asimétrica, utilizando un radio modular en la torre principal y un equipo integrado en el punto remoto.

**Ubiquiti Rocket 5AC Lite (Modelo: R5AC-Lite).**

Ficha técnica:

Rocket5ac Lite	
Dimensiones	162 x 84 x 37 mm (6,4 x 3,3 x 1,5")
Peso	250 g (8,82 oz)
Interfaz de red	(1) puerto Ethernet 10/100/1000
Conectores de radiofrecuencia	(2) RP-SMA (impermeable)
Luces LED	Alimentación, LAN, (4) intensidad de la señal
Material	Exterior de plástico estabilizado UV
Consumo máximo de energía	8,5W
Fuente de alimentación	Adaptador Gigabit PoE de 24 V, 0,5 A (incluido)
Método de alimentación	PoE pasivo (pares 4, 5+ para la ida y 7, 8 para el retorno)
Temperatura de funcionamiento	De -40 a 80° C (de -40° F a 176° F)
Humedad de funcionamiento	5 a 95 % sin condensación
Protección ESD/EMP	± 24kV contacto / Aire para Ethernet
Impactos y vibraciones	ETSI300-019-1.4
Certificaciones	CE, FCC, IC

Frecuencia operativa (MHz)		
En todo el mundo		5150 - 5875
EE. UU. / CA	U-NII-1	5150 - 5250
	U-NII-2A	5250 - 5350
	U-NII-2C	5470 - 5725
	U-NII-3	5725 - 5850

**Ilustración 17 Ficha técnica del Rocket 5AC Lite**

**Fuente:** Obtenido de Ubiquiti inc. [35]

#### ***4.2.20 Justificación Detallada de la Elección***

La selección del Rocket 5AC Lite se basa en su excelente balance entre rendimiento, fiabilidad y costo, ideal para un proyecto comunitario.

- **Alto Rendimiento (Throughput):** Con una capacidad de procesamiento de datos superior a los **450+ Mbps**, este radio asegura que el enlace troncal no se convierta en un cuello de botella. Esta capacidad es más que

suficiente para distribuir planes de internet de alta velocidad a los usuarios de la fase piloto y permite un amplio margen para el crecimiento futuro de la red.

- **Tecnología airMAX ac:** El equipo opera con el protocolo propietario de Ubiquiti, airMAX ac. A diferencia del Wi-Fi estándar, airMAX ac utiliza un mecanismo TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo) que asigna "ranuras" de tiempo para la transmisión y recepción de datos. En un enlace Punto a Punto, esto elimina las colisiones de datos y reduce la latencia, resultando en una conexión mucho más estable y eficiente.

- **Diseño Robusto para Exteriores:** La carcasa del Rocket 5AC Lite está construida con plástico estabilizado resistente a los rayos UV, lo que garantiza su durabilidad a largo plazo en instalaciones a la intemperie, como la que se requiere en la torre de 40 metros y en el punto de acceso.

- **Gestión y Monitoreo con airOS®:** El radio es gestionado por el sistema operativo **airOS®**, el cual proporciona una interfaz web intuitiva para la configuración y el monitoreo. Incluye herramientas esenciales para la implementación, como un analizador de espectro (airView) para seleccionar la frecuencia más limpia, y herramientas de alineación de antena para optimizar la fuerza de la señal.

#### ***4.2.21 Equipamiento para el Enlace Troncal Secundario (Receptor)***

Para el extremo receptor del enlace PTP secundario (ubicado en Vía el Amarillal), se ha seleccionado el **Ubiquiti PowerBeam 5AC Gen2**. Este equipo se caracteriza por su diseño "todo en uno", que integra la radio y la antena de alta ganancia en una sola unidad compacta y eficiente.

Ficha técnica:

## Especificaciones

PBE-5AC-Gen2	
Dimensiones	420 x 420 x 230 mm (16,54 x 16,54 x 9,06")
Peso	2,22 kg (4,89 lb)
Ganancia	25 dBi
Interfaz de red	(1) puerto Ethernet 10/100/1000
Procesador	MIPS 74Kc
Características del material	
Bocina de alimentación	Exterior de plástico estabilizado UV
Reflector parabólico	Pintura electroestática SPCC
Consumo máximo de energía	8,5W
Potencia de transmisión máxima	24 dBm
Fuente de alimentación	Adaptador Gigabit PoE de 24 V, 0,5 A (incluido)
Método de alimentación	PoE pasivo (pares 4, 5+ para la ida y 7, 8 para el retorno)
Rango de tensión admitido	De 20 a 26 V CC
Carga de viento	380 N y 200 km/h (85,4 lbf y 125 mph)
Resistencia al viento	200 km/h (125 mph)
Montaje	Montaje en poste (kit incluido)
Temperatura de funcionamiento	De -40 a 70° C (de -40° F a 158° F)
Humedad de funcionamiento	5 a 95 % sin condensación
Impactos y vibraciones	ETSI300-019-1.4
Certificaciones	CE, FCC, IC

**Ilustración 18** Ficha técnica del PowerBeam 5AC,

Fuente: Obtenido de Ubiquiti inc. [36]

### 4.2.22 Justificación Detallada de la Elección

- **Diseño Integrado con Tecnología InnerFeed:** A diferencia de una solución de radio y antena separadas, el PowerBeam integra la radio directamente en el alimentador de la antena. Esta tecnología, denominada "InnerFeed", elimina

la necesidad de cables coaxiales (pigtailes), reduciendo las pérdidas de señal y creando un sistema más eficiente y con menos puntos de fallo.

- **Alto Rendimiento y Ganancia Direccional:** El equipo es capaz de alcanzar un rendimiento superior a los **450+ Mbps** y cuenta con una antena tipo plato de alta ganancia (ej. 25 dBi). Esta ganancia es fundamental para capturar una señal estable a lo largo de los casi 20 km de distancia del enlace. Su haz de señal estrecho mejora el aislamiento del ruido, rechazando interferencias de otras fuentes.

- **Protocolo airMAX ac:** Al igual que el resto de los equipos de la red, opera con el protocolo **airMAX ac**. Esto asegura una comunicación eficiente, de baja latencia y alta estabilidad para el enlace, siendo totalmente compatible con el radio del otro extremo.

#### 4.2.23 Antena: Ubiquiti RocketDish RD-5G30-LW

Acoplada al radio Rocket Prism y al Rocket, la antena es la encargada de enfocar y dirigir la energía de radiofrecuencia. Se ha seleccionado la **RocketDish RD-5G30**.

Ficha técnica:

RocketDish RD-5G30-LW	
Dimensiones	650 x 650 x 386 mm (25,6 x 25,6 x 15,2")
Peso	7,4 kg (16,31 lb) (soporte incluido)
Frecuencia	5,1 - 5,9 GHz
Ganancia	30 dBi
VSWR máx.	1,6:1
Resistencia al viento	200 km/h (125 mph)
Carga de viento	790 N a 200 km/h (178 lbf a 125 mph)
Polarización	Lineal doble
Relación lóbulo delantero/trasero	30 dB
Especificación ETSI	EN 302 326 DN2
Montaje	Montaje en poste universal, soporte Rocket y cables RF impermeables incluidos

### **Ilustración 19 Ficha técnica de la antena RocketDish RD-5G30-LW**

**Fuente: Obtenido de Ubiquiti inc. [37]**

#### ***4.2.24 Justificación Detallada de la Elección:***

1. **Alta Ganancia (30 dBi):** La ganancia es la medida de la capacidad de una antena para dirigir la energía. Para un enlace de larga distancia, una alta ganancia es obligatoria. Los 30 dBi de esta antena actúan como un potente megáfono, amplificando la señal emitida y "escuchando" con gran sensibilidad la débil señal que llega desde el otro extremo.

2. **Directividad y Aislamiento del Ruido:** El ancho del haz extremadamente estrecho (5.8°) es un complemento perfecto para la tecnología airPrism. Significa que la antena es muy selectiva, enfocando su energía en una dirección precisa y rechazando las señales de interferencia que provienen de los lados. Esta combinación crea un enlace excepcionalmente limpio y resistente al ruido.

#### ***4.2.25 Equipamiento para la Red de Acceso Punto a Multipunto (P2MP)***

Este subsistema distribuye la conexión desde la torre central a los hogares. El equipo seleccionado debe ofrecer una buena cobertura, capacidad para múltiples usuarios y un costo accesible.

##### **Punto de Acceso (AP): Ubiquiti LiteAP AC (LAP-120)**

Para la fase piloto, donde se necesita cubrir áreas amplias de manera eficiente, se ha seleccionado el **LiteAP AC**.

Ficha técnica:

## LiteAP<sup>ac</sup>

LAP-120	
Dimensions (Mount Not Included)	452.3 x 78.7 x 54.4 mm (17.81 x 3.10 x 2.14")
Weight (No Mount)	420 g (14.82 oz)
Mounting Kit	Pole Mounting Kit (Included)
Networking Interface	(1) 10/100/1000 Ethernet Port
Memory	64 MB
Max. Power Consumption	7W
Max. TX Power	25 dBm
Antenna Gain	16 dBi
Power Supply	24V, 0.5A Gigabit PoE Adapter (Included)
Power Method	Passive PoE (Pairs 4, 5+; 7, 8 Return)
Processor Specs	Atheros MIPS 74Kc, 533 MHz
Shock and Vibration	ETSI300-019-1.4
ETSI Specification	EN 302 326 DN2
ESD/EMP Protection	± 24 kV Contact / Air
RoHS Compliance	Yes
Operating Temperature	-40 to 70° C (-40 to 158° F)
Operating Humidity	5 to 95% Noncondensing
Certifications	FCC, IC, CE

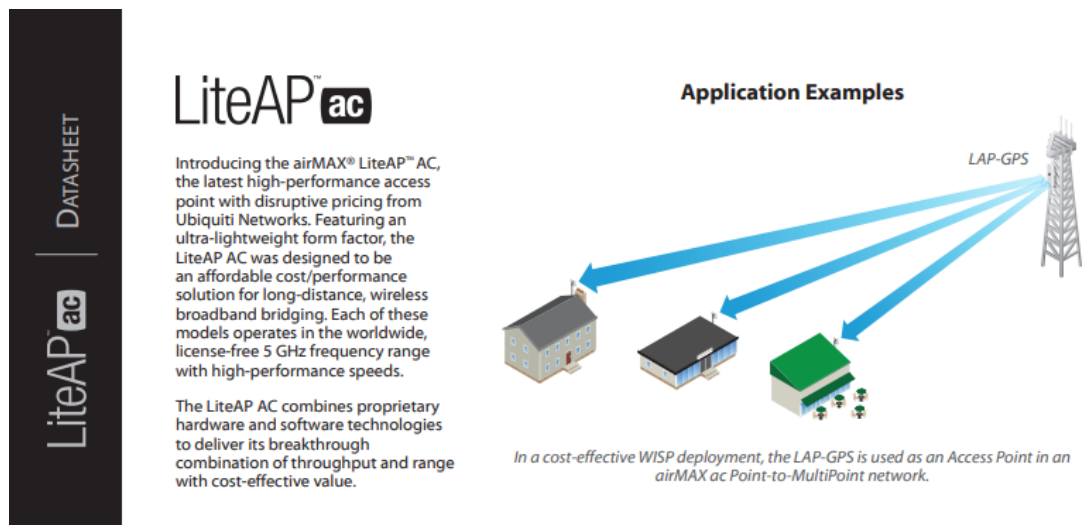
**Ilustración 20** Ficha técnica del AP airMAX Lite AP AC (LAP-120)

Fuente: Obtenido de Ubiquiti Inc. [38]

#### 4.2.26 Justificación Detallada de la Elección:

- Diseño Integrado y Costo-Eficiencia:** El LiteAP AC integra la radio y la antena sectorial en una sola unidad compacta. Este diseño reduce el costo total y simplifica la instalación en la torre. Para un proyecto comunitario donde el presupuesto es un factor clave, esta eficiencia es una ventaja primordial.
- Cobertura Sectorial de 120°:** La antena incorporada permite que un solo dispositivo dé cobertura a un área muy amplia. El uso de dos de estos dispositivos, orientados en direcciones diferentes, permite cubrir un arco total de 240° alrededor de la torre, alcanzando eficientemente las dos zonas piloto seleccionadas.
- Protocolo airMAX ac para Gestión de Múltiples Usuarios:** A diferencia del Wi-Fi estándar, el protocolo propietario airMAX ac utiliza un mecanismo de Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA). Este sistema asigna "ranuras" de tiempo a cada cliente para transmitir y recibir datos,

eliminando colisiones y reduciendo la latencia, lo que asegura que el rendimiento de la red se mantenga estable incluso cuando se conectan decenas de hogares.



**Ilustración 21 Ficha técnica del AP airMAX Lite AP AC (LAP-120)**

**Fuente: Obtenido de Ubiquiti Inc. [38]**

#### ***4.2.27 Diseño Sugerido para el Sistema Híbrido de Alimentación***

Una vez seleccionados los equipos de telecomunicaciones, se procede con la propuesta de diseño y el cálculo referencial para el sistema de alimentación híbrido (red eléctrica y paneles solares) que garantizará su funcionamiento continuo.

#### ***4.2.28 Filosofía de Operación y Definición de Parámetros de Referencia***

El diseño se basa en una arquitectura híbrida donde la red eléctrica es la fuente primaria y el sistema solar actúa como respaldo de energía durante un corte de suministro.

Para poder realizar los cálculos, es necesario establecer un tiempo de autonomía de referencia. Se debe destacar que la duración final del respaldo energético es una decisión estratégica que deberá tomar el patrocinador del proyecto, balanceando el costo de la inversión con el nivel de fiabilidad deseado.

Para los fines de este estudio, y como base para la siguiente propuesta de ingeniería, se tomará un tiempo de autonomía de referencia de 7 horas. Todos los cálculos y componentes sugeridos a continuación se basan en este valor.

#### ***4.2.29 Cálculo Referencial de Componentes***

A continuación, se presentan los cálculos que sustentan la sugerencia de componentes para un sistema capaz de proveer 7 horas de respaldo a los equipos de la torre.

- **Potencia de Consumo de la Torre (Potencia de Diseño): 30 W**

#### ***4.2.30 Cálculo de Energía de Respaldo***

Se determina la energía que las baterías deberían suministrar para cumplir con el tiempo de referencia.

$$\text{Energía Respaldo} = 30\text{W} \times 7\text{h} = 210 \text{ Wh}$$

#### ***4.2.31 Sugerencia para el Dimensionamiento del Banco de Baterías***

El cálculo sugiere un banco de baterías que pueda almacenar de forma segura la energía de respaldo, considerando una profundidad de descarga (DoD) del 50%.

- $\text{CapacidadTotalSugerida(Wh)} = 210 \text{ Wh} \div 0.50 = 420 \text{ Wh}$

Para un sistema de 24V, esto se traduce en una capacidad de:

- $\text{CapacidadSugerida(Ah)} = 420 \text{ Wh} \div 24\text{V} = 17.5 \text{ Ah}$

Basado en este cálculo, se **sugiere un banco de baterías de 24V y 20Ah**, que se puede configurar con dos baterías de 12V y 20Ah en serie.

#### ***4.2.32 Sugerencia para el Dimensionamiento del Panel Solar***

El análisis indica la necesidad de un panel capaz de reponer los 210 Wh de energía consumidos tras un corte.

- $\text{PotenciaPanelSugerida(Wp)} = \frac{210 \text{ Wh}}{4.0 \text{ HSP} \times 0.75} = 70 \text{ Wp}$

Para garantizar una recarga eficiente, se **sugiere la selección de un panel solar de 100 Wp**, que ofrece un margen adecuado sobre el mínimo calculado.

#### ***4.2.33 Sistema Eléctrico y de Respaldo Instalado***

Esta sección describe los componentes del sistema de alimentación eléctrica y de respaldo de energía para la torre central. La arquitectura es de tipo híbrido, utilizando la red eléctrica como fuente principal y un sistema fotovoltaico como respaldo. La selección de estos componentes se ajustó al presupuesto inicial definido por el patrocinador del proyecto. Como se observa en las imágenes, todos los equipos están instalados dentro de un gabinete tipo rack.

#### ***4.2.34 Arquitectura del Sistema Híbrido***

El sistema opera de dos maneras para asegurar la continuidad del servicio:

- **Modo Normal:** Con la red eléctrica activa, el SAI/UPS alimenta los equipos de telecomunicaciones y a la vez mantiene cargado el banco de baterías. El panel solar apoya esta carga, reduciendo el consumo eléctrico.
- **Modo Respaldo:** Si la red eléctrica falla, el SAI/UPS conmuta instantáneamente para que la energía del banco de baterías alimente a los equipos, evitando cualquier interrupción en el servicio.

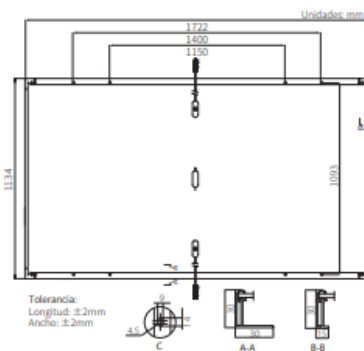
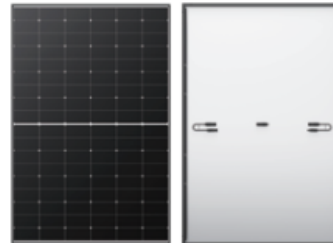
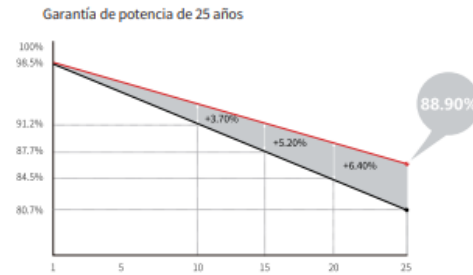
#### ***4.2.35 Módulo de Generación Fotovoltaica (Panel Solar)***

Para la generación de energía solar se utiliza un panel monocristalino modelo LR5-54HTH-435M

Ficha técnica:

<b>22.3%</b> MÁXIMA EFICIENCIA DEL MÓDULO	<b>0~3%</b> TOLERANCIA DE POTENCIA	<b>&lt;1.5%</b> DEGRADACIÓN DE POTENCIA DEL PRIMER AÑO	<b>0.40%</b> DEGRADACIÓN DE POTENCIA DEL AÑO 2 AL 25
---	--	--	--

### Valor agregado



### Datos mecánicos

Distribución de las celdas	108 (6 × 18)
Caja de conexiones	IP68, tres diodos
Cableado	4mm <sup>2</sup> , ±1200mm la longitud puede personalizarse
Vidrio	Vidrio templado recubierto de 3.2mm
Marco	Marco de aleación de aluminio anodizado
Peso	20.8kg
Dimensión	1722 × 1134 × 30mm
Embalaje	36piezas por palet / 216piezas por 20' GP / 936piezas por 40' HC

### Datos eléctricos

Código de producto	STC : AM1.5 1000W/m <sup>2</sup> 25°C		NOCT : AM1.5 800W/m <sup>2</sup> 20°C 1m/s		Incertidumbre de pruebas Pmax: ±3%							
	LR5-54HTH-415M	LR5-54HTH-420M	LR5-54HTH-425M	LR5-54HTH-430M	LR5-54HTH-435M	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	
Condiciones de ensayo	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Potencia máxima (Pmax/W)	415	310	420	314	425	318	430	321	435	325		
Voltaje en circuito abierto (Voc/V)	38.53	36.18	38.73	36.36	38.93	36.55	39.13	36.74	39.33	36.93		
Corriente de cortocircuito (Isc/A)	13.92	11.24	14.00	11.31	14.07	11.36	14.15	11.43	14.22	11.49		
Voltaje a potencia máxima (Vmp/V)	32.24	29.42	32.44	29.60	32.64	29.78	32.84	29.97	33.04	30.15		
Corriente a potencia máxima (Imp/A)	12.88	10.54	12.95	10.60	13.03	10.67	13.10	10.72	13.17	10.78		
Eficiencia del módulo (%)	21.3		21.5		21.8		22.0		22.3			

### Ilustración 22 Ficha técnica del panel solar modelo

Fuente: Obtenido de Longi [39]

- Características:** La potencia de 435W permite una recarga muy rápida de las baterías después de un corte de luz. Al ser de tecnología monocristalina, tiene una buena eficiencia, incluso en días con luz solar menos intensa. Su voltaje de operación (~33V) es compatible con la carga de un sistema de 12V a través de un controlador MPPT.

#### 4.2.36 Módulo de Almacenamiento (Banco de Baterías)

El almacenamiento de la energía de respaldo se realiza con un banco de **baterías**.

- **Configuración:** El banco está compuesto por cuatro baterías de 12V y 9Ah conectadas en paralelo. Esto da como resultado un sistema con un voltaje de operación de **12V** y una capacidad total sumada de **36Ah**.
- **Autonomía:** Con esta capacidad, el banco de baterías puede proveer una autonomía de respaldo de aproximadamente **7.2 horas** para la carga de los equipos de la torre.
- **Recomendación a Futuro:** Dado que la capacidad del banco de baterías se ajustó al presupuesto inicial, se recomienda enfáticamente para una futura etapa del proyecto invertir en baterías de mayor capacidad (más Ah). Esto incrementaría las horas de respaldo, haciendo la red más robusta ante fallos eléctricos de mayor duración.

#### ***4.2.37 Módulos de Control y Conversión de Energía***

Estos dispositivos gestionan el flujo de la energía a través de todo el sistema.

- **Controlador de Carga Solar (Modelo MCR3024):** Para la gestión de la energía solar se emplea un controlador de carga modelo **MCR3024**. Este equipo tiene una capacidad de 30A y utiliza tecnología MPPT (Seguimiento del Punto de Máxima Potencia) para maximizar la cantidad de energía que se extrae del panel solar y se transfiere a las baterías. Su capacidad de 30A ofrece un amplio margen de seguridad para la corriente que genera el panel.

Model	MCR1024	MCR2024	MCR3024	MCR3048	MCR4048	MCR5048	MCR6048	
MPPT Efficiency	> 99%							
System Voltage	12V/24V(Auto)			12V/24V/48V(Auto)				
Dimension (WxDxH mm)	193x103x65		162x150x78		200x168x94			
Net Weight(kg)	0.75		1.30		1.80			
<b>INPUT</b>								
Max. PV Input Voltage	55VDC		100VDC		170VDC			
MPPT Operating Voltage Range	12V	18VDC-50VDC		18VDC-95VDC		18VDC-150VDC		
	24V	34VDC-50VDC		34VDC-95VDC		34VDC-150VDC		
	48V	-		-		65VDC-150VDC		
Low Voltage Protection	12V	16VDC		-		16VDC		
	24V	30VDC		-		30VDC		
	48V	-		-		60VDC		
High-voltage Protection	55VDC		100VDC		170VDC			
PV Rated Input Power	12V	150W	280W	428W	428W	570W	713W	855W
	24V	300W	560W	856W	856W	1140W	1426W	1710W
	48V	-		-		1712W	2280W	2852W
<b>DC LOAD OUTPUT</b>								
Load Voltage	Same as battery voltage							
Load Current	10A (20A optional)			20A				
Load Control Mode	ON/OFF, PV voltage control, time control, PV + time control							
<b>CHARGE</b>								
Battery Type	Sealed Lead Acid, Gel, Flooded, Lithium-ion, User-defined							
Charging Mode	MPPT (Maximum Power Point Tracking)							
Charging Current	10A	20A	30A	30A	40A	50A	60A	
Charging Method	Three-stage: CC (Constant current) - CV (Constant voltage) - CF (Float charge)							
Temperature compensation	-3mV/°C/2V (Default)							
Float Charging Voltage (Lead Acid Default)	12V	13.8VDC (Settable)		-		13.8VDC (Settable)		
	24V	27.6VDC (Settable)		-		27.6VDC (Settable)		
	48V	-		-		55.2VDC (Settable)		
Boost Charging Voltage (Lead Acid Default)	12V	14.5VDC (Settable)		-		14.5VDC (Settable)		
	24V	29.0VDC (Settable)		-		29.0VDC (Settable)		
	48V	-		-		58.0VDC (Settable)		
<b>SYSTEM</b>								
Protection Function	Input low/over voltage, input/output polarity reverse connection, short circuit, over temperature, battery shedding etc.							
Display	Touch LCD + LED							
Cooling method	Forced Air Cooling							
Standby power	< 2W							
Communication	RS485							
<b>ENVIRONMENT</b>								
Relative Humidity	0 ~ 90% RH (non-condensing)							
Altitude	< 3000m							
Operating Temperature	-20°C~+40°C							
Storage Temperature	-40°C~+75°C							
Protection Level	IP21							

### Ilustración 23 Ficha técnica del controlador de carga solar

Fuente: Obtenido de Prostar [40]

- Sistema de Alimentación Ininterrumpida (Modelo AB-BNINV-1000):** La gestión de la red eléctrica y la función de respaldo están a cargo de un SAI/UPS modelo **AB-BNINV-1000**. Este equipo de 1000VA / 500W es de tipo "línea interactiva", lo que le permite estabilizar pequeñas variaciones de voltaje de la red sin usar las baterías. Su función es doble: actuar como cargador de baterías desde la red eléctrica y conmutar a la energía de las baterías de forma instantánea cuando la red falla. Su capacidad de 500W es muy superior a la carga

de 30W de los equipos, lo que asegura que el dispositivo trabaje sin esfuerzo y provea energía auxiliar si se necesita para mantenimiento.

MODELO		AB-NBINV-1000
Descripción		Inverter cargador con transferencia automática
Capacidad	VA / Watts	1000VA/500W
Entrada	Voltaje AC	110/120 VCA o 220/230/240/ VCA
	Rango de voltaje AC	Modo UPS 90~140 VCA / modo inductor 70~145 VCA
		Modo UPS 175~260 VCA / modo Inductor 140~270 VAC
Frecuencia	50/60 Hz (detección automática)	
Entrada de batería	Voltaje DC	12 VCD
	Rango de Voltaje DC	10.5 ~ 15 VCD
	Corriente DC sin carga	<0.6A (12.5 V)
	Alarma batería baja	10.5 V
	Protección bajo voltaje	10 V
	Tipos de batería	Litio o VRLA (detección automática)
Salida	Voltaje	120 o 220 VCA
	Frecuencia	50/60 Hz (igual al de entrada)
	Forma de onda	Igual que la entrada con CA, PWM con batería
	Cargador USB tipo A	5V 3.0A (2 und.)
	Tomacorrientes	4 Nema 5-15R o 2 Euro /4 Arg / 2 Universal / etc.
	Tiempo de respuesta	Modo UPS 10 ms / Modo inductor 20 ms
Características	Protecciones	Sobrecarga de entrada y salida, bajo voltaje de alimentación, polaridad inversa, alarma audible y control inteligente
	Pantalla LCD	Estado del UPS/inductor, voltaje de entrada o salida, frecuencia, voltaje y nivel de la batería, nivel de carga, cargador
	Eficiencia	90% en modo CA / 85% en modo de batería
	Cable de alimentación	Removible C13 1.5 mt a nema 5/15P o Euro o Arg o Universal, etc
Ambientales	Temperatura	0° C ~ 40° C
	Humedad	20% ~ 90% (sin condensar)
	Ruido	< 40dB (1 mtr)
Físicas	Material de la Caja	Metal
	Dimensiones AnxLxAlt	138 x 245 x 66.5 mm

**Ilustración 24 Ficha técnica del UPS**

Fuente: Obtenido de Ablrex [41]

#### 4.2.38 Gestión de Red y Ruteo

Para la administración central de la red se utilizará un router **MikroTik L009UiGS-RM**. Este equipo se encargará de gestionar el tráfico de internet y distribuir la conexión hacia los Puntos de Acceso (APs).

#### ***4.2.39 Distribución de Energía AC***

Para la alimentación eléctrica de los equipos dentro del gabinete se instalará una regleta para rack, modelo **Nexxt Solutions AW220NXT95**, la cual proveerá las tomas de corriente necesarias de forma organizada.

#### ***4.2.40 Infraestructura Vertical: La Torre Comunitaria***

El punto de partida para la implementación técnica del proyecto fue la infraestructura vertical provista por la comunidad. La obra civil para la cimentación, así como el ensamblaje y levantamiento de la **torre de 40 metros, fueron actividades gestionadas y ejecutadas en su totalidad por los miembros de la comunidad**, lo que representa su contribución fundamental al proyecto.

Mi labor comenzó una vez la torre estuvo erigida, procediendo a realizar la verificación técnica y la preparación de la misma para el montaje de los equipos.

#### ***4.2.41 Características de la Estructura Instalada***

Es una estructura de **celosía venteada de sección triangular**. Está construida en acero galvanizado para asegurar su resistencia a la intemperie a largo plazo. Su estabilidad se basa en un conjunto de cables de acero (vientos) que la anclan a bases de hormigón en el suelo.

La **altura de 40 metros** es la característica más importante de esta infraestructura. Fue un parámetro de diseño clave, ya que esta elevación es la que permite que las antenas superen la altura de la vegetación local y otras posibles obstrucciones, garantizando la línea de vista que se validó como viable en el estudio de factibilidad.

#### ***4.2.42 Verificación y Preparación Técnica***

Antes de proceder con el montaje de cualquier equipo, realicé los siguientes pasos de verificación y adecuación sobre la estructura provista por la comunidad:

- **Inspección Visual:** Se realizó una inspección de la torre para verificar su correcta verticalidad y la tensión adecuada de los vientos de acero.
- **Instalación del Sistema de Puesta a Tierra:** Se procedió con la instalación de un sistema de puesta a tierra, conectando la base metálica de la torre a una varilla de cobre (Copperweld) enterrada. Este es un paso de seguridad

indispensable para proteger los equipos electrónicos de futuras descargas atmosféricas.

- **Identificación de Puntos de Montaje:** Se planificaron las ubicaciones exactas en la estructura donde se montarían la antena PTP, los dos APs sectoriales y el panel solar, para optimizar su orientación y separación.

#### ***4.2.43 Montaje del Enlace Troncal y Gabinete de Control***

Una vez que la torre comunitaria fue verificada y preparada, la segunda etapa de la implementación consistió en el montaje de los equipos que forman el núcleo de la red y su centro de control.

#### ***4.2.44 Montaje en la Comunidad Normita (Punto Remoto)***

En la torre de 40 metros de la comunidad, se instaló una antena Ubiquiti RocketDish acoplada con su radio Rocket Prism 5AC Gen2. El conjunto fue montado en la parte más alta de la estructura para asegurar una línea de vista sin obstrucciones. Utilizando las coordenadas geográficas del punto de acceso, se realizó el alineamiento de la antena en dirección a la zona de La Troncal.

#### ***4.2.45 Montaje en La Troncal (Punto de Acceso)***

Paralelamente, se realizó la instalación del otro extremo del enlace. Sobre la edificación de dos pisos en la zona urbana de La Troncal, se fijó un tubo de acero galvanizado para alcanzar la altura de diseño de 15 metros.

En esta estructura se montó el segundo conjunto de antena RocketDish con su respectivo radio Rocket Prism 5AC Gen2. La antena fue alineada utilizando las coordenadas de la torre en la comunidad Normita para asegurar que ambos equipos apuntaran directamente el uno al otro.

#### ***4.2.46 Instalación del Gabinete de Control***

En la base de la torre se fijó el gabinete metálico tipo rack. Este gabinete es el contenedor seguro y protegido de la intemperie que albergará todos los componentes electrónicos sensibles del sistema.

#### ***4.2.47 Montaje de Equipos en el Gabinete***

Con el gabinete ya asegurado, se procedió a instalar y organizar los siguientes equipos en su interior:

- El router **MikroTik L009UiGS-RM**, que actuará como el gestor central de la red.
- La regleta de alimentación **Nexxt Solutions AW220NXT95** para la distribución organizada de la energía eléctrica.
- El Sistema de Alimentación Ininterrumpida (**SAI/UPS**) **AB-BNINV-1000**.
- El controlador de carga solar **MCR3024**.
- El **banco de baterías** del sistema de respaldo, ubicado en la base del gabinete.

#### ***4.2.48 Tendido del Cableado Principal***

Finalmente, se realizó el tendido del **cable de red Ethernet Cat 6 para exteriores** desde la antena RocketDish en la cima de la torre hasta el gabinete en la base. El cable fue asegurado a la estructura de la torre en intervalos regulares para protegerlo de la tensión y el movimiento causado por el viento.

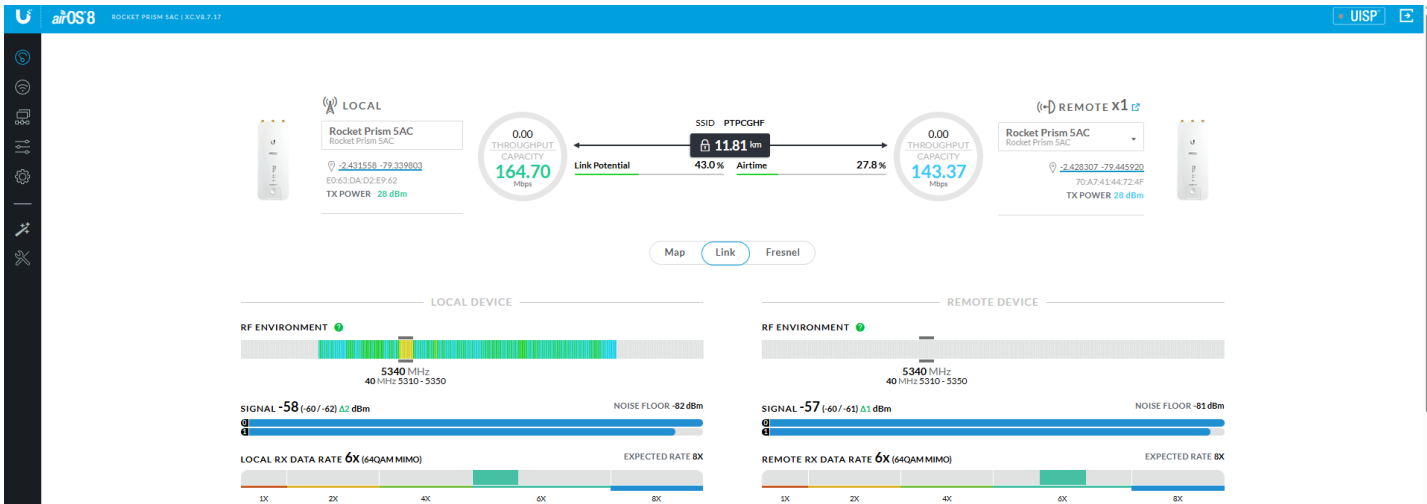
#### ***4.2.49 Instalación de la Alimentación Eléctrica Principal***

Para proveer la energía primaria al sistema, se realizó la instalación de una acometida eléctrica desde una vivienda cercana perteneciente a un miembro de la comunidad. Se tendió un cableado para exteriores desde la vivienda hasta el gabinete de control y se instalaron las protecciones eléctricas correspondientes para garantizar la seguridad de la conexión.

#### ***4.2.50 Alineación Fina y Verificación del Enlace PTP***

Una vez instalados los equipos en ambos extremos, se procedió a encenderlos para realizar la **alineación** y verificar el rendimiento real del enlace troncal. Este proceso consiste en realizar micro ajustes en la orientación de ambas antenas utilizando la interfaz de software de los radios, con el objetivo de maximizar la señal recibida.

Tras completar el alineamiento, el enlace quedó establecido con los siguientes parámetros de operación y rendimiento, como se muestra en la captura de pantalla del panel de control del equipo.



**Ilustración 25** Panel de control del enlace PTP mostrando los resultados finales de alineación y rendimiento.

Fuente: Software de Ubiquiti Inc.

#### 4.2.51 Análisis de los Resultados

El rendimiento obtenido por el enlace es óptimo y cumple con las expectativas del diseño.

- **Nivel de Señal:** Un valor de **-57 dBm** a una distancia de casi 12 km es excelente. Indica que la alineación de las antenas es precisa y que la línea de vista es completamente clara, tal como se predijo en el estudio de factibilidad.
- **Capacidad y Rendimiento:** La capacidad total del enlace supera los **150 Mbps**, lo cual provee un ancho de banda más que suficiente para las necesidades actuales de la comunidad piloto y deja un amplio margen para futuras expansiones y la adición de más usuarios a la red.
- **Calidad de la Conexión:** El bajo nivel de ruido (**-82 dBm**) y la alta tasa de modulación (**64QAM**) confirman que la frecuencia seleccionada está libre de interferencias, lo que se traduce en una conexión muy estable. La latencia de **0 ms** es ideal para aplicaciones en tiempo real como videollamadas.

#### 4.2.52 Configuración de Parámetros del Enlace PTP

Tras el montaje y la alineación de los equipos, se procedió a la configuración lógica de los radios para establecer el enlace. La siguiente imagen muestra los parámetros de configuración aplicados en el radio que funciona como Punto de Acceso.

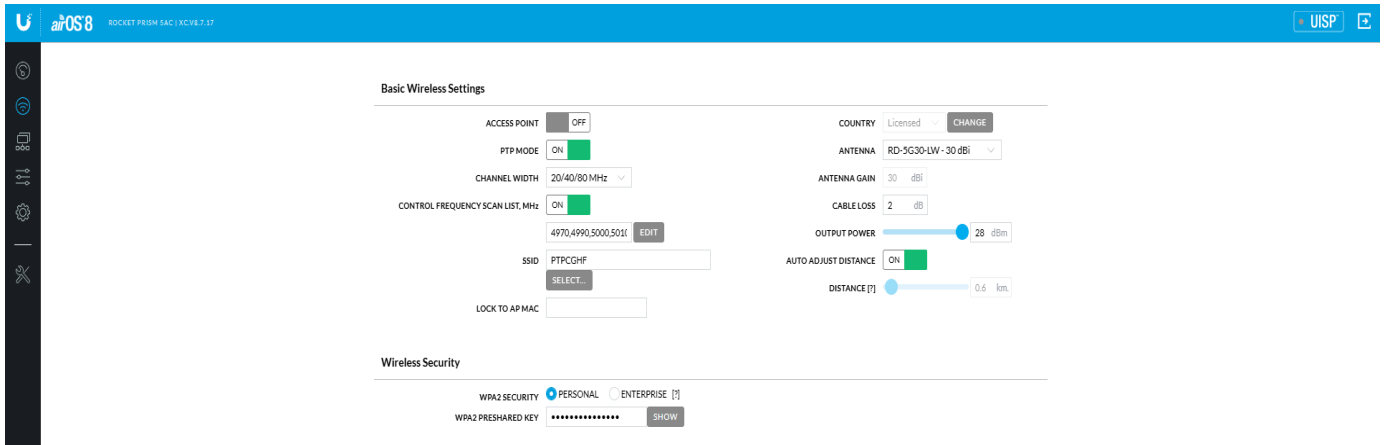


Ilustración 26 Parámetros de configuración inalámbrica del radio PTP.

Fuente: Software de Ubiquiti Inc.

- **Operación:** Se activó el modo **Punto de Acceso (Access Point)** y el **Modo PTP**, asegurando que el radio solo establezca conexión con un único equipo Estación.

- **Parámetros de Radiofrecuencia (RF):** Se estableció un **Ancho de Canal de 40 MHz** para obtener un balance óptimo entre capacidad de transmisión y estabilidad.

Se seleccionó una **Frecuencia Central de 5320 MHz**, un canal en la banda de 5 GHz que se determinó como libre de interferencias durante la instalación.

- **Configuración de Antena y Potencia:**

Se seleccionó en el software el modelo de antena correspondiente, **RD-5G30-LW**, con una **ganancia de 30 dBi**.

La **Potencia de Salida** se configuró en **28 dBm**, el máximo valor para asegurar una señal robusta a los 11.81 km de distancia.

- **Identificación y Seguridad de la Red:**

Se asignó el **SSID "PTPCGHF"** para identificar el enlace troncal.

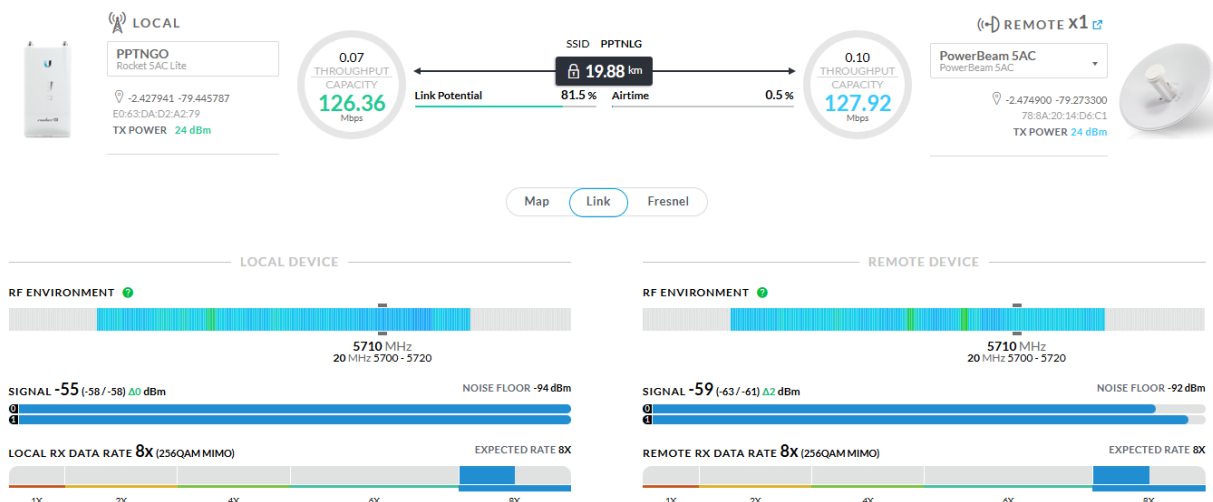
Se activó la seguridad **WPA2 PERSONAL** con una clave precompartida robusta para encriptar todo el tráfico que pasa a través del enlace.

#### 4.2.53 *Instalación y Verificación del Enlace PTP Secundario*

Para completar la arquitectura de la malla troncal, se procedió con la instalación, configuración y verificación del segundo enlace Punto a Punto (PTP).

#### 4.2.54 *Alineación Fina y Verificación del Enlace*

Una vez instalados los equipos en la torre de la comunidad y en el punto de Vía el Amarillal, se encendieron para realizar la alineación fina. Este proceso consistió en realizar microajustes en la orientación de ambas antenas utilizando su interfaz de software hasta obtener la máxima calidad de señal posible. El enlace quedó establecido con los siguientes parámetros:



**Ilustración 27** Panel de control del enlace PTP secundario mostrando los resultados finales.

Fuente: Software de Ubiquiti Inc.

#### 4.2.55 Análisis de los Resultados

El rendimiento obtenido por el enlace de respaldo es excelente y cumple con los objetivos de diseño para una conexión de alta fiabilidad.

- **Nivel de Señal:** Se logró un nivel de señal de **-56 dBm** en el extremo local y **-59 dBm** en el extremo remoto. Estos valores son muy fuertes para una distancia de **19.88 km**, lo que indica una línea de vista clara y una alineación precisa.
- **Balance de Cadenas:** El balance de cadenas es excelente en ambos extremos (**-59/-59 dBm** y **-61/-61 dBm**). La diferencia de 0 dBm entre cadenas es un indicador de una instalación de alta calidad, libre de obstrucciones parciales, lo que permite el máximo rendimiento de la tecnología MIMO.
- **Capacidad y Rendimiento:** La capacidad total del enlace es de **255.84 Mbps** (126.36 Mbps + 129.48 Mbps), un ancho de banda muy robusto para un enlace secundario.
- **Calidad de la Conexión:** El bajo nivel de ruido (**-94 dBm** y **-92 dBm**) y la alta tasa de modulación (**8X, 256QAM**) confirman que la frecuencia seleccionada está libre de interferencias, lo que se traduce en una conexión muy estable.

#### 4.2.56 Configuración de Parámetros del Enlace

La siguiente imagen muestra los parámetros de configuración aplicados en el radio que funciona como Punto de Acceso para este enlace.

The image shows a configuration interface for a wireless radio. It is divided into two main sections: 'Basic Wireless Settings' and 'Wireless Security'.

**Basic Wireless Settings:**

- ACCESS POINT:** ON (toggle)
- PTP MODE:** ON (toggle)
- CHANNEL WIDTH:** 20 MHz (dropdown)
- FRAME DURATION [?]:** Flexible (legacy) (dropdown)
- CONTROL FREQUENCY LIST, MHz:** ON (toggle), 4950,5050,5060,5100 (input field with EDIT button)
- CENTER FREQUENCY, MHz:** 5710 (dropdown)
- CONTROL FREQUENCY, MHz:** 5710 (dropdown)
- SSID:** PPTNLG (input field)
- COUNTRY:** Licensed (dropdown with CHANGE button)
- ANTENNA:** RD-5G-30 - 30 dBi (dropdown)
- ANTENNA GAIN:** 30 dBi (input field)
- CABLE LOSS:** 0 dB (input field)
- OUTPUT POWER:** 24 dBm (slider)
- AUTO ADJUST DISTANCE:** ON (toggle)
- DISTANCE [?]:** 0.6 km (slider)

**Wireless Security:**

- WPA2 SECURITY:** PERSONAL (radio selected), ENTERPRISE [?]
- WPA2 PRESHARED KEY:** [masked] (input field with SHOW button)
- WIRELESS NETWORK PROTECTION [?]:** OFF (toggle)
- MAC ACL:** OFF (toggle)

**Ilustración 28 Parámetros de configuración inalámbrica del radio PTP secundario.**

**Fuente: Software de Ubiquiti Inc.**

- **Operación:** Se activó el modo **Punto de Acceso** y el **Modo PTP**, asegurando una conexión exclusiva con el equipo remoto.
- **Parámetros de Radiofrecuencia (RF):** Se estableció un **Ancho de Canal de 20 MHz** y se seleccionó una **Frecuencia Central de 5710 MHz** para no interferir con el primer enlace PTP.
- **Configuración de Antena y Potencia:** Se seleccionó la antena correspondiente (**RD-5G-30**) y se configuró la **Potencia de Salida en 24 dBm**.
- **Identificación y Seguridad:** Se asignó el **SSID "PPTNLG"** y se activó la seguridad **WPA2 PERSONAL** con una clave precompartida robusta.

#### ***4.2.57 Montaje de los Puntos de Acceso (P2MP)***

Una vez instalado el enlace troncal, el siguiente paso fue el montaje de los equipos de distribución, es decir, los Puntos de Acceso (APs) que proveerán la señal de internet directamente a los hogares de la comunidad.

Para esta fase, se instalaron los dos Puntos de Acceso **Ubiquiti LiteAP AC** en la torre de la comunidad a una altura de **35 metros**.

La elección de esta altura se basa principalmente en un criterio de **separación de antenas**. Al instalar los APs 5 metros por debajo de la antena PTP principal (ubicada a 40 metros), se logra una separación vertical que es fundamental para minimizar la interferencia de radiofrecuencia entre el potente radio del enlace troncal y los radios que sirven a los clientes. Esta práctica asegura que ambos sistemas puedan operar de manera limpia y eficiente.

Cada AP fue orientado según el plan de cobertura definido en el diseño (sección 4.2.14 y 4.2.15): un AP apuntando hacia el sector **noroeste** y el otro hacia el sector

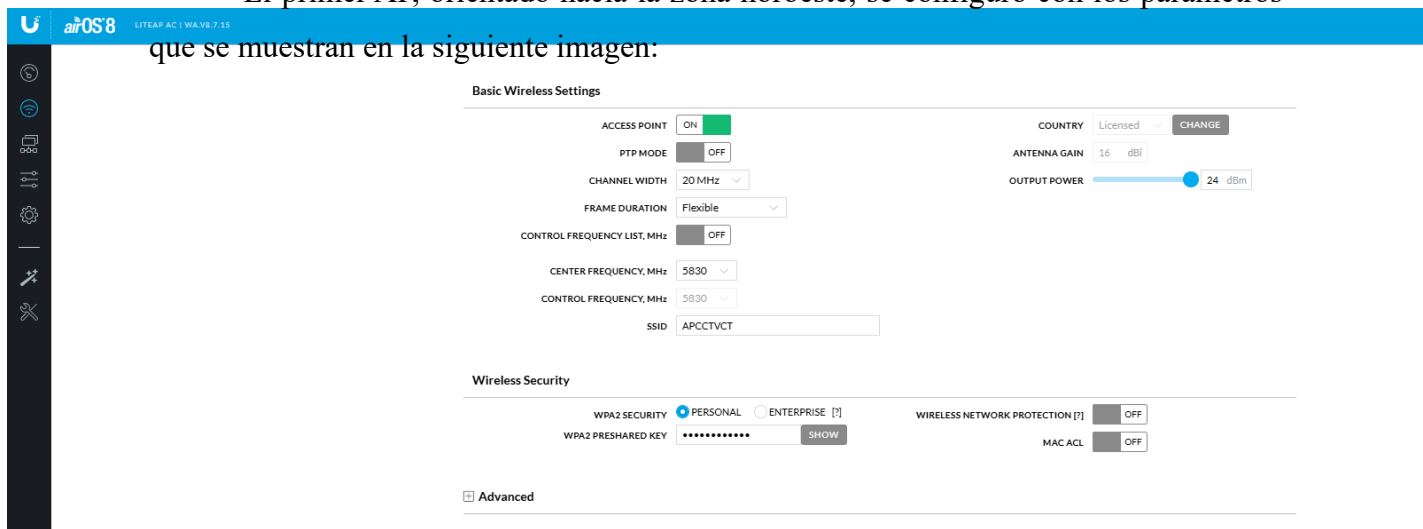
**suroeste.** Finalmente, se realizó el tendido de sus respectivos cables de red Ethernet Cat 6 desde los 35 metros de altura hasta el gabinete de control en la base.

#### 4.2.58 Configuración de los Puntos de Acceso (P2MP)

Una vez montados los equipos en la torre, se procede a la configuración lógica de cada Punto de Acceso. El objetivo es crear las redes inalámbricas que darán cobertura a las zonas piloto de la comunidad.

#### 4.2.59 Configuración del API (Sector Noroeste)

El primer AP, orientado hacia la zona noroeste, se configuró con los parámetros que se muestran en la siguiente imagen:



**Ilustración 29** Parámetros de configuración inalámbrica para el Punto de Acceso 1 (API).

**Fuente:** Software de Ubiquiti Inc.

Los parámetros clave establecidos son:

**Tabla 2.1** Parámetros de configuración del API

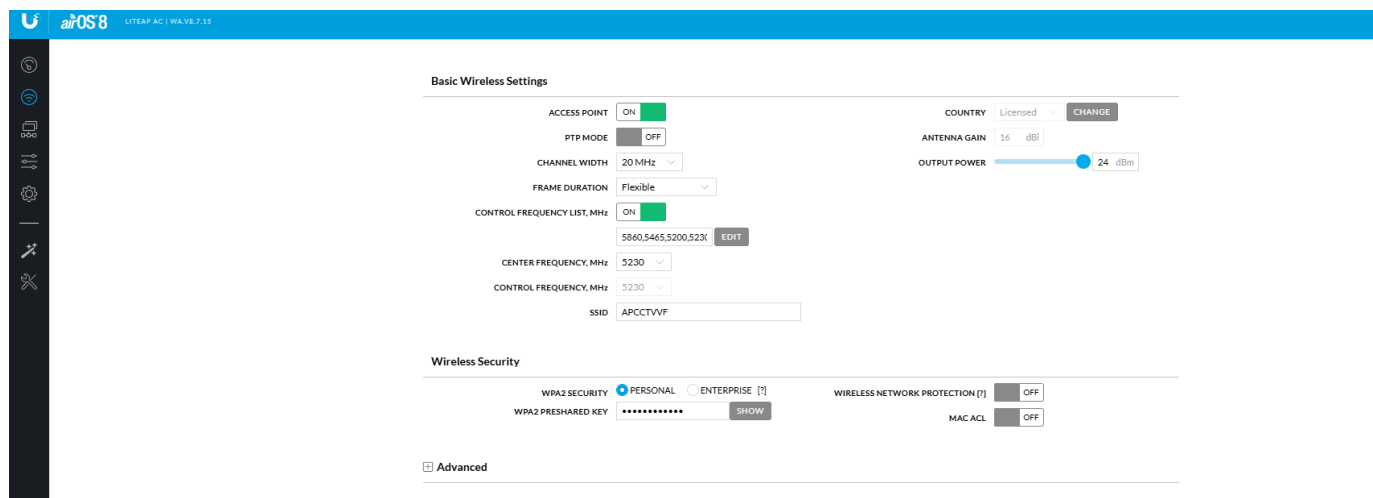
Parámetro	Valor Configurado
<b>Modo de Operación</b>	Punto de Acceso (Access Point), Modo PTP: OFF
<b>Ancho de Canal</b>	20 MHz
<b>Frecuencia Central</b>	5830 MHz

<b>SSID (Nombre de Red)</b>	APCCTVCT
<b>Ganancia de Antena</b>	16 dBi
<b>Potencia de Salida</b>	24 dBm
<b>Seguridad</b>	WPA2 PERSONAL con clave precompartida

Estos ajustes configuran al equipo como un Punto de Acceso para múltiples clientes (Modo PTP: OFF). Se utiliza un canal de **20 MHz** para una mayor estabilidad y resistencia a la interferencia, y una potencia de salida alta de **24 dBm** para maximizar el alcance de la cobertura en el sector designado. La red está protegida con el estándar de encriptación **WPA2**.

#### 4.2.60 Configuración del AP2 (Sector Suroeste)

El segundo Punto de Acceso, orientado hacia la zona suroeste, se configuró con los parámetros que se muestran en la siguiente imagen, destacando una frecuencia de operación distinta a la del AP1 para evitar interferencias.



**Ilustración 30** Parámetros de configuración inalámbrica para el Punto de Acceso 2 (AP2).

**Fuente:** Software de Ubiquiti Inc.

Los parámetros clave establecidos son:

**Tabla 2.2 Parámetros de configuración del AP2**

Parámetro	Valor Configurado
<b>Modo de Operación</b>	Punto de Acceso (Modo PTP: OFF)
<b>Ancho de Canal</b>	20 MHz
<b>Frecuencia Central</b>	5230 MHz
<b>SSID</b>	APCCTVF
<b>Potencia de Salida</b>	24 dBm
<b>Seguridad</b>	WPA2 PERSONAL

La configuración del AP2 mantiene la consistencia con el AP1 en cuanto a ancho de canal (20 MHz) y potencia (24 dBm). La diferencia fundamental es la selección de una **Frecuencia Central de 5230 MHz**, un canal alejado del utilizado por el primer AP. Esta separación es una práctica crucial para evitar la auto-interferencia entre los equipos de la misma torre, asegurando un rendimiento estable para ambos sectores de cobertura.

#### ***4.2.61 Configuración de Redes en el Router Principal***

La configuración de las redes en el router **MikroTik** se realizó de la siguiente manera para alinearla con el diagrama de red y la estrategia de gestión.

##### **1. Configuración de la Red LAN (Red Comunitaria):**

- Se creó una interfaz "Puente" (Bridge) para unificar las conexiones hacia los Puntos de Acceso en una sola red local.
- A esta interfaz se le asignó la dirección IP **192.168.200.1/24**, estableciéndola como la puerta de enlace (gateway) para toda la red de la comunidad.

##### **2. Configuración de la Red WAN (Conexión Troncal):**

A la interfaz de red WAN se le asignó la dirección IP estática **10.10.20.2/29**. Esta red se utiliza exclusivamente para la comunicación con el enlace troncal, cuyos radios operan en las direcciones IP 10.10.20.3 (extremo de La Troncal) y 10.10.20.4 (extremo de la Comunidad) y para el enlace B se asignó

la WAN 10.10.40.1/29, y los radios operan en las direcciones IP 10.10.40.3 (extremo del Amarillal) y 10.10.40.4 (extremo de la Comunidad)

### 3. **Gestión de Direcciones IP para Clientes:**

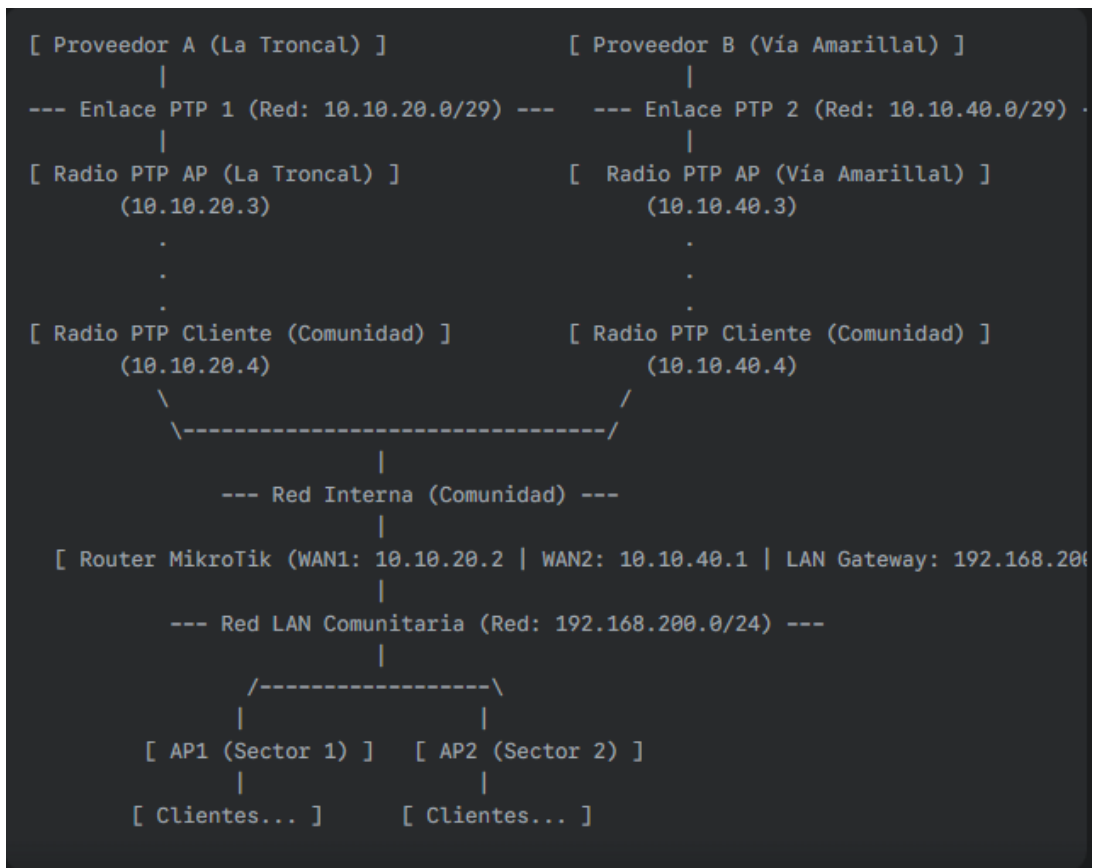
- Para la asignación de direcciones a los usuarios, se optó por un método de **direccionamiento IP estático**. A cada cliente se le asigna y registra manualmente una dirección IP única del rango 192.168.200.0/24. Se eligió este método para la fase piloto para tener un control preciso de cada dispositivo conectado.

### 4. **Configuración de NAT (Enmascaramiento):**

- Se creó una regla de NAT (Masquerade) para la interfaz WAN. Esta regla permite que todos los dispositivos de la red comunitaria, con sus IPs estáticas del rango 192.168.200.x, puedan compartir la conexión a internet provista por el enlace troncal.

### 5. **Configuración de la Malla Troncal**

- Para activar la funcionalidad de la malla en la troncal, se configuró una regla de conmutación por error en el router MikroTik. Se crearon dos rutas de salida a internet: a la ruta del enlace principal (La Troncal) se le asignó una distancia de 1, y a la del enlace secundario (Vía el Amarillal) una distancia de 2. Con esto, se implementó una verificación de estado que monitorea la conectividad del enlace principal. Si esta verificación falla, el router desactiva la ruta principal y el tráfico conmuta automáticamente a la ruta secundaria.



**Ilustración 31 Diagrama de la red.**

**Fuente:** Elaborado por el autor.

#### ***4.2.62 Instalación del Sistema Híbrido de Alimentación***

La etapa final de la implementación física consistió en el montaje e interconexión de todos los componentes que conforman el sistema de energía híbrido. Este sistema es el encargado de alimentar de forma continua a todos los equipos de telecomunicaciones en la torre.

El proceso se realizó de la siguiente manera:

1. **Instalación del Módulo de Generación:** Se montó el **panel solar de 435 Wp** en la estructura de la torre. Posteriormente, se tendió el cableado fotovoltaico desde el panel hasta el gabinete de control ubicado en la base.



Ilustración 32 Panel solar instalado en la torre

Fuente: Elaborado por el autor.

2. **Instalación de Componentes en Gabinete:** Dentro del gabinete de equipos se instalaron y organizaron los componentes de control y almacenamiento de energía:

- El **controlador de carga solar (MCR3024)**.
- El **banco de baterías**, compuesto por cuatro baterías de 12V y 9Ah conectadas en paralelo.
- El **Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI/UPS), modelo Ablerex AB-BNINV-1000**.

3. **Interconexión Final:** Se realizaron todas las conexiones eléctricas para dejar el sistema operativo: se conectó el panel solar al controlador de carga, el controlador al banco de baterías, y las baterías al SAI/UPS. Finalmente, la acometida de energía eléctrica principal se conectó a la entrada del SAI/UPS, el cual a su vez alimenta a todos los equipos de red.

#### ***4.2.63 Pruebas del Enlace Troncal (PTP)***

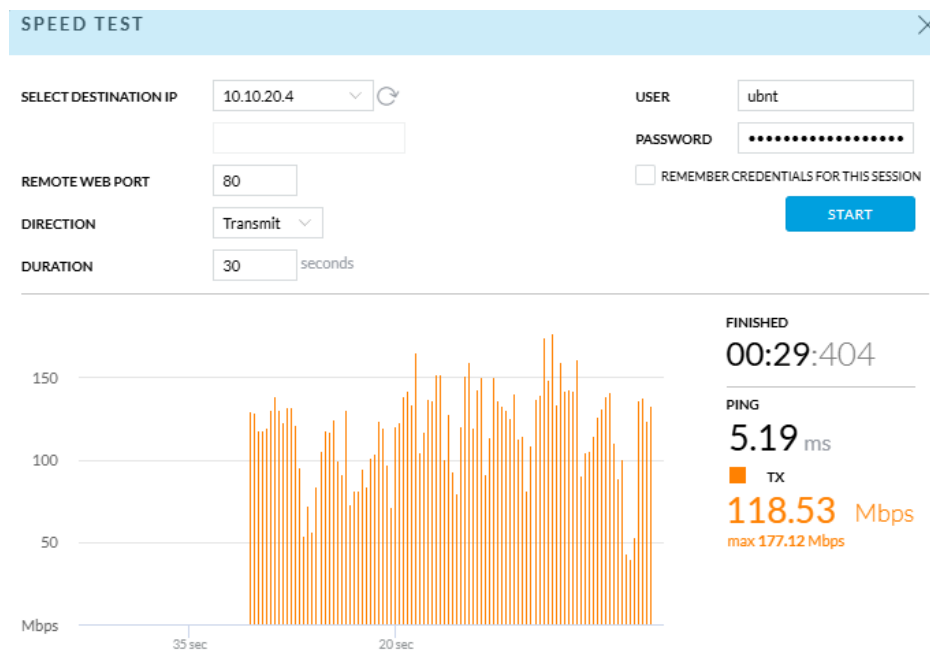
Para verificar el rendimiento real del enlace troncal, se realizaron pruebas de capacidad y estabilidad utilizando las herramientas integradas en los radios. Las pruebas se iniciaron desde el radio AP ubicado en La Troncal.

## Prueba de Capacidad (Ancho de Banda)

Se ejecutó una prueba de velocidad para medir el rendimiento máximo sostenido del enlace en ambas direcciones.

### 4.2.64 Velocidad de Descarga (Download) para la Comunidad

Esta velocidad corresponde a la capacidad de transmisión (TX) del radio AP. La prueba arrojó un rendimiento promedio de **118.53 Mbps**.

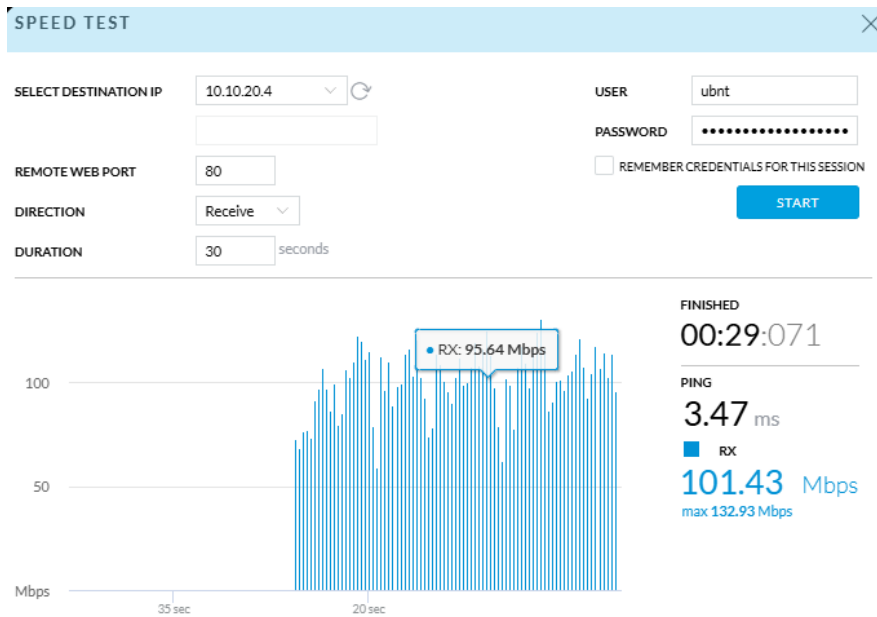


**Ilustración 33** Resultado de la prueba de velocidad de descarga para la comunidad (TX en el AP).

Fuente: Software de Ubiquiti Inc.

### 4.2.65 Velocidad de Subida (Upload) desde la Comunidad

Esta velocidad corresponde a la capacidad de recepción (RX) del radio AP. La prueba registró un rendimiento promedio de **101.43 Mbps**.

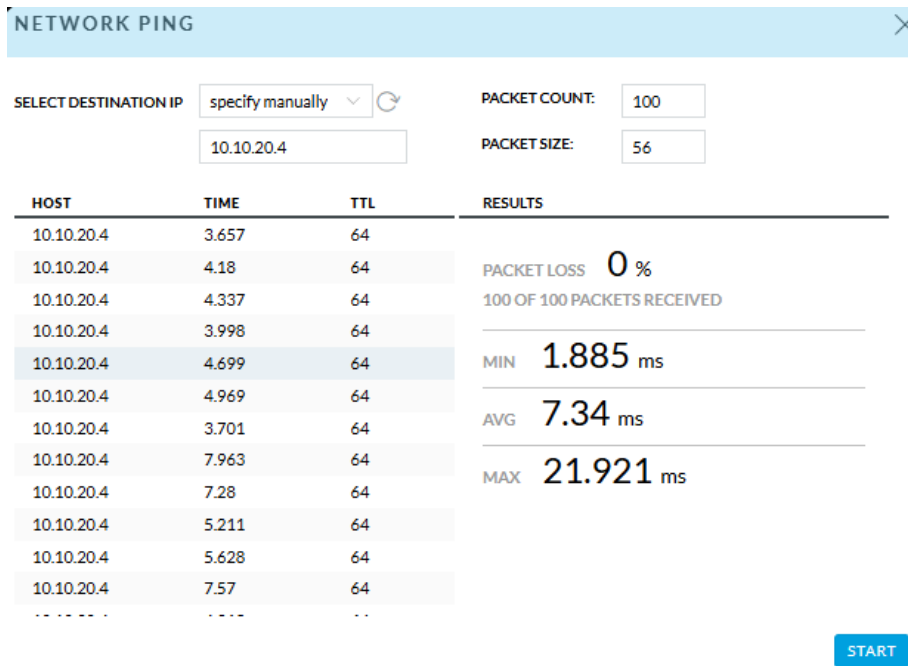


**Ilustración 34 Resultado de la prueba de velocidad de subida desde la comunidad (RX en el AP).**

**Fuente: Software de Ubiquiti Inc.**

#### ***4.2.66 Prueba de Estabilidad (Latencia y Pérdida de Paquetes)***

Se realizó una prueba de ping enviando 100 paquetes de datos desde el AP en La Troncal hacia el radio remoto en la comunidad para medir los tiempos de respuesta.



**Ilustración 35 Resultado de la prueba de ping.**

**Fuente:** Software de Ubiquiti Inc.

Los resultados fueron los siguientes:

- **Pérdida de Paquetes: 0%.**
- **Latencia Promedio: 7.34 ms.**

#### 4.2.67 *Análisis de Resultados*

- **Capacidad:** El rendimiento real medido (118.53 Mbps de descarga y 101.43 Mbps de subida) es excelente y demuestra que el enlace troncal tiene la capacidad suficiente para proveer internet de alta velocidad a decenas de usuarios simultáneamente.
- **Estabilidad:** El resultado de **0% de pérdida de paquetes** confirma que el enlace es extremadamente estable y fiable.
- **Latencia:** Una latencia promedio de **~7 ms** es muy baja para un enlace inalámbrico de esta distancia, lo que lo hace ideal para aplicaciones en tiempo real como videollamadas, clases en línea o juegos.

#### 4.2.68 Pruebas del Enlace Troncal Secundario (Vía el Amarillal)

Se realizaron pruebas de capacidad y estabilidad en el segundo enlace PTP para verificar su rendimiento real. Las pruebas se iniciaron desde el radio AP ubicado en Vía el Amarillal.

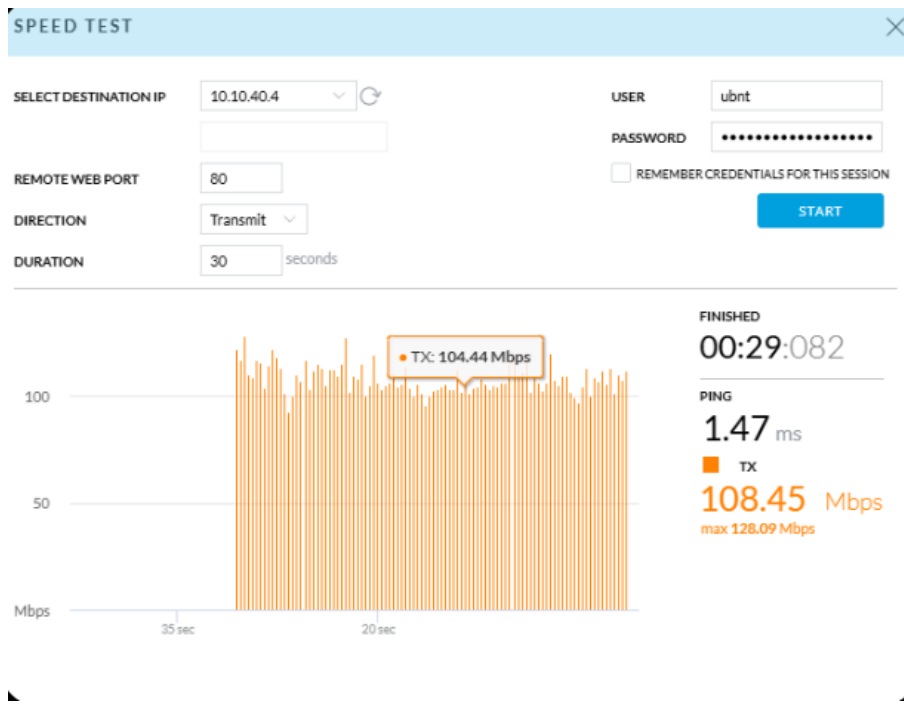
#### 4.2.69 Prueba de Capacidad (Ancho de Banda)

Se ejecutó una prueba de velocidad para medir el rendimiento máximo sostenido del enlace.

#### 4.2.70 Velocidad de Descarga (Download) para la Comunidad

Esta velocidad corresponde a la capacidad de transmisión (TX) del radio AP secundario. La prueba arrojó un rendimiento promedio de

**108.45 Mbps.**

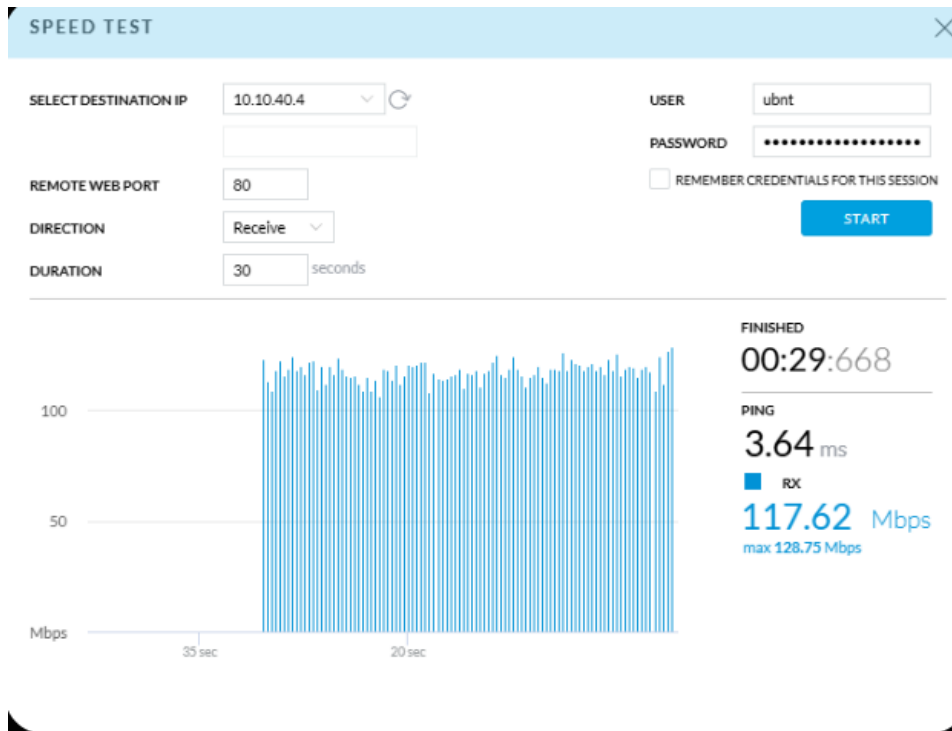


**Ilustración 36 Resultado de la prueba de velocidad de descarga del enlace secundario.**

**Fuente:** Fuente: Software de Ubiquiti Inc.

#### 4.2.71 Velocidad de Subida (Upload) desde la Comunidad

Esta velocidad corresponde a la capacidad de recepción (RX) del radio AP secundario. La prueba registró un rendimiento promedio de **117.62 Mbps.**

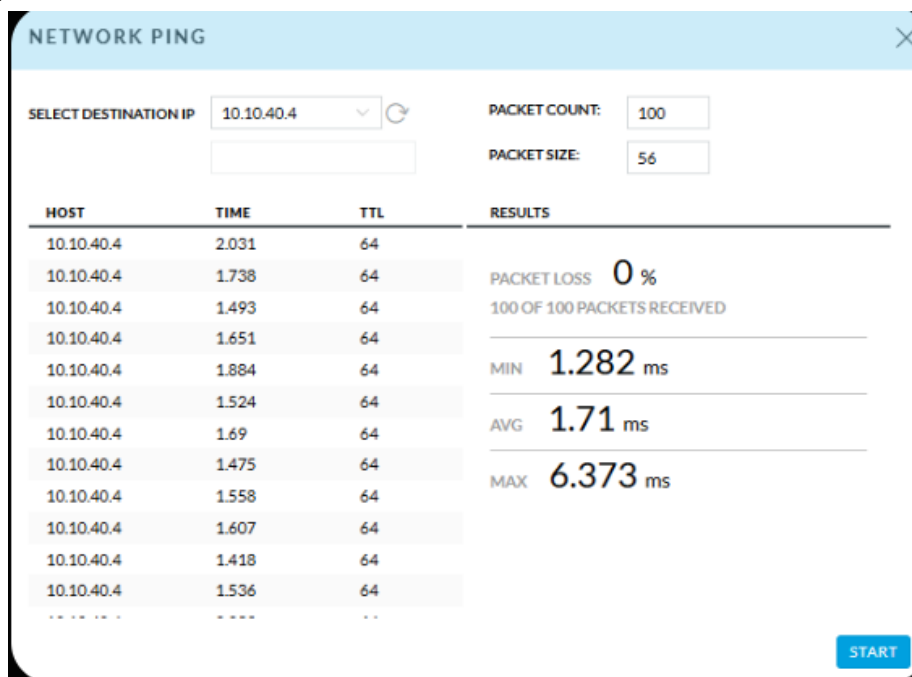


**Ilustración 37** Resultado de la prueba de velocidad de subida del enlace secundario.

Fuente: Software de Ubiquiti Inc.

#### 4.2.72 Prueba de Estabilidad (Latencia y Pérdida de Paquetes)

Se realizó una prueba de ping enviando 100 paquetes para medir los tiempos de respuesta.



### **Ilustración 38 Resultado de la prueba de ping del enlace secundario.**

**Fuente: Software de Ubiquiti Inc.**

Los resultados fueron los siguientes:

- **Pérdida de Paquetes: 0%.**
- **Latencia Promedio: 1.71 ms.**

#### ***4.2.73 Análisis de Resultados***

- **Capacidad:** El rendimiento real medido (108.45 Mbps de descarga y 117.62 Mbps de subida) es muy alto y confirma que el enlace secundario tiene capacidad más que suficiente para soportar toda la carga de la red comunitaria.
- **Estabilidad:** El resultado de **0% de pérdida de paquetes** demuestra una conexión extremadamente estable y libre de errores.
- **Latencia:** Una latencia promedio de solo **1.71 ms** es excepcionalmente baja, lo que indica una conexión muy rápida y responsiva, ideal para todo tipo de aplicaciones en tiempo real.

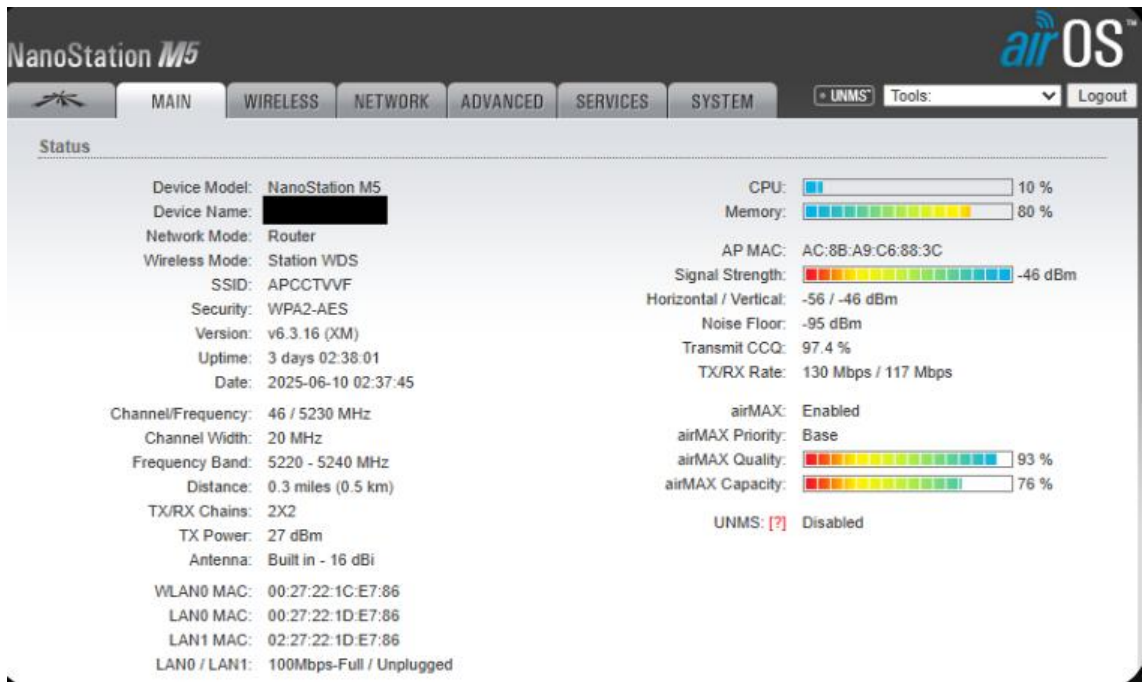
#### ***4.2.74 Verificación de Cobertura y Señal de Clientes (P2MP)***

**Objetivo:** Comparar la cobertura real de los APs con las simulaciones del diseño, midiendo el nivel de señal real (en dBm) en ubicaciones piloto.

**Técnica:** Se visitó una vivienda en cada uno de los dos sectores de cobertura (noroeste y suroeste). En cada ubicación, se instaló un equipo cliente (CPE) y se procedió a alinear la antena hacia la torre central para registrar los parámetros de la conexión.

#### ***4.2.75 Verificación en el Sector Noroeste (Conexión al AP1)***

Se instaló un CPE modelo **NanoStation M5** en una vivienda piloto ubicada a **0.5 km** de la torre, dentro de la zona de cobertura del AP1.



**Ilustración 39 Resultados de la conexión del cliente piloto en el sector noroeste (AP1).**

**Fuente:** Software de Ubiquiti Inc.

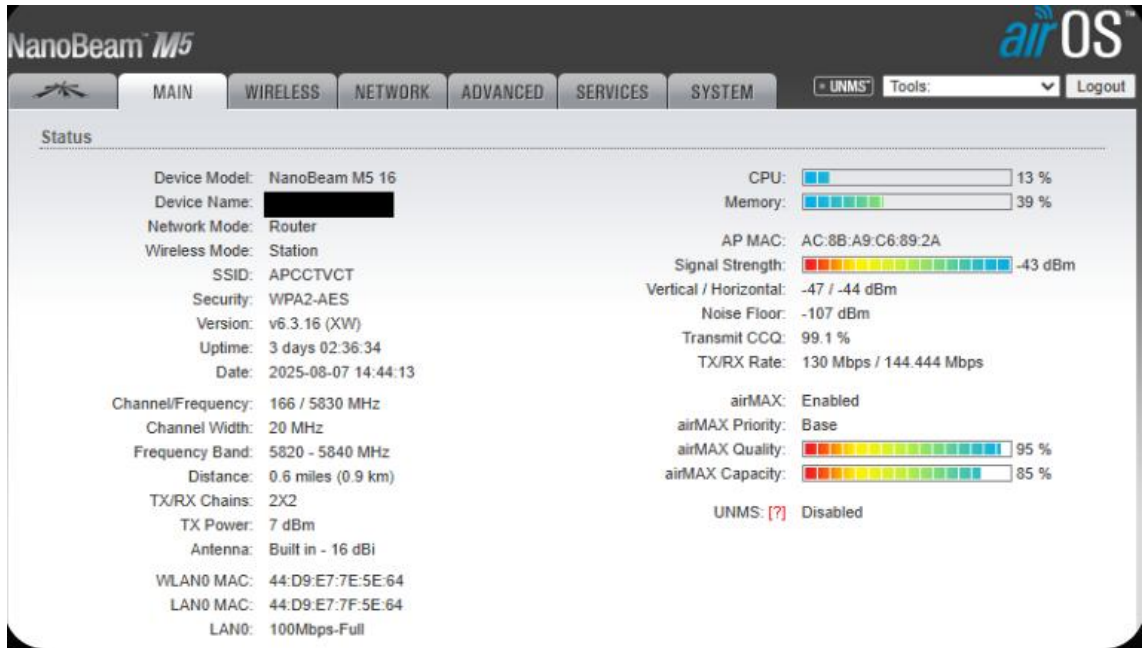
Los resultados de la conexión fueron los siguientes:

- **Nivel de Señal:** -46 dBm
- **Balance de Cadenas (Vertical / Horizontal):** -56 / -46 dBm
- **Nivel de Ruido:** -95 dBm
- **Calidad / Capacidad airMAX:** 93% / 76%

**Análisis del punto:** La señal de **-46 dBm** es excelente y confirma una cobertura muy robusta. Sin embargo, se observa un desbalance de 10 dB entre las cadenas (-56 / -46 dBm), lo que sugiere una obstrucción menor en la línea de vista o un alineamiento fino que podría optimizarse. A pesar de esto, la calidad general de la conexión (93%) es muy alta.

#### **4.2.76 Verificación en el Sector Suroeste (Conexión al AP2)**

Se instaló un CPE modelo **NanoBeam M5 16** en una segunda vivienda piloto ubicada a **0.9 km** de la torre, dentro de la zona de cobertura del AP2.



**Ilustración 40 Resultados de la conexión del cliente piloto en el sector suroeste (AP2).**

**Fuente:** Software de Ubiquiti Inc.

Los resultados de la conexión fueron los siguientes:

- **Nivel de Señal:** -43 dBm
- **Balance de Cadenas (Vertical / Horizontal):** -47 / -44 dBm
- **Nivel de Ruido:** -107 dBm
- **Calidad / Capacidad airMAX:** 95% / 85%

**Análisis del punto:** La señal de **-43 dBm** es extremadamente fuerte, superando las expectativas del diseño. El balance de cadenas, con solo 3 dB de diferencia, es excelente y, junto al bajísimo nivel de ruido (-107 dBm), indica una conexión de altísima calidad con una línea de vista perfecta.

#### **4.2.77 Pruebas de Servicio al Usuario Final**

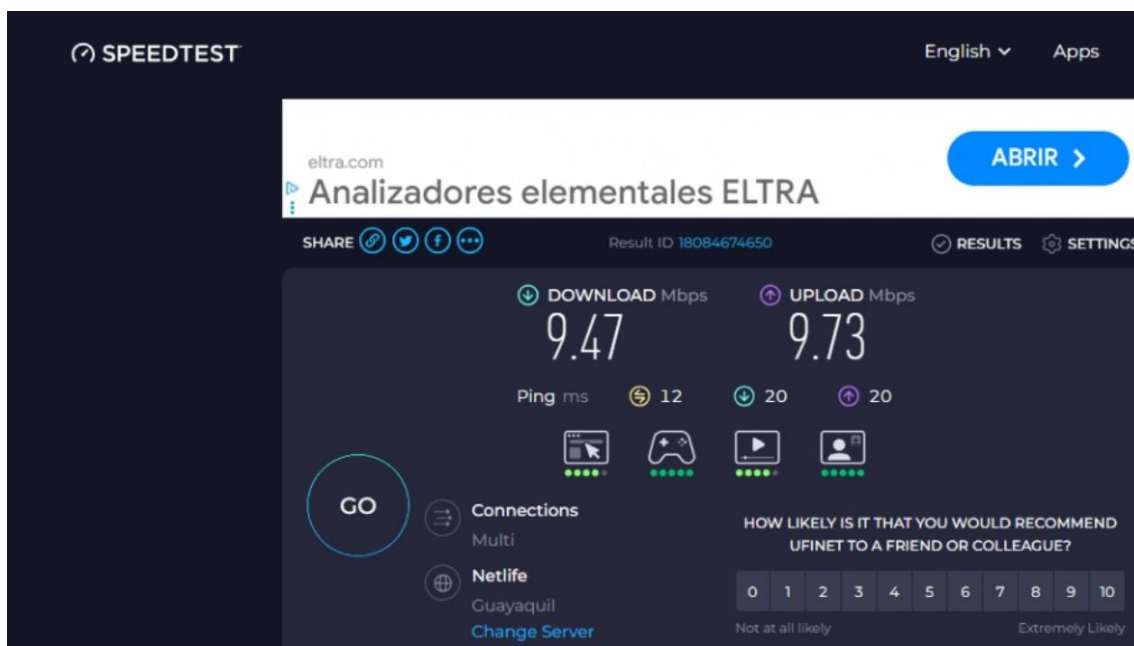
**Objetivo:** Validar que los planes de internet simétricos configurados en el router MikroTik se entregan correctamente a los usuarios finales.

**Técnica:** Se conectó un ordenador portátil directamente al equipo cliente (CPE) en cada una de las dos viviendas piloto y se realizaron pruebas de velocidad para medir el rendimiento real de descarga y subida.

### **Prueba en el Sector Noroeste (Plan 10 Mbps Simétrico)**

En la vivienda conectada al AP1, donde se había configurado un límite de 10 Mbps simétricos, los resultados promedio de las pruebas fueron:

- **Velocidad de Descarga:** 9.47 Mbps
- **Velocidad de Subida:** 9.73 Mbps
- **Latencia (Ping):** 12 ms



**Ilustración 41 Resultado de la prueba de velocidad para el plan de 10 Mbps simétricos**

**Fuente: Speedtest by Ookla**

**Prueba en el Sector Suroeste (Plan 15 Mbps Simétrico)**

En la vivienda conectada al AP2, donde se había configurado un límite de 15 Mbps simétricos, los resultados promedio fueron:

- **Velocidad de Descarga:** 13.76 Mbps
- **Velocidad de Subida:** 14.48 Mbps



**Ilustración 42 Resultado de la prueba de velocidad del plan de 15 Mbps Simetricos,**

**Fuente: SPEEDTEST by Ookla**

## **Análisis de Resultados**

Los resultados validan el correcto funcionamiento del control de ancho de banda. Las velocidades de descarga y subida medidas en ambas ubicaciones son muy próximas entre sí y cercanas a los límites configurados, confirmando la capacidad del sistema para entregar **planes de servicio simétricos**. Esta es una característica de alto valor para aplicaciones como las videollamadas o la subida de contenido, que son de interés para la comunidad. Se concluye que el modelo de gestión de red es viable y funcional.

### ***4.2.78 Prueba del Sistema de Energía Híbrido***

**Objetivo:** Confirmar que el sistema de respaldo de energía funciona como se esperaba, garantizando la continuidad del servicio de internet durante un corte del suministro eléctrico.

### ***4.2.79 Procedimiento de la Prueba***

Para validar el sistema, se siguió un procedimiento en tres pasos:

1. **Simulación de Corte:** Se procedió a simular un corte de energía total desconectando la acometida de la red eléctrica principal que alimenta el SAI/UPS en el gabinete.
2. **Verificación de Continuidad:** Inmediatamente después del corte, se monitoreó el estado de todos los equipos de telecomunicaciones (radio PTP, APs y router MikroTik) para confirmar que seguían encendidos y operando sin ninguna interrupción.
3. **Monitoreo de Parámetros:** Durante la prueba, se observaron los datos en las pantallas del controlador de carga solar y del SAI/UPS para medir el estado del banco de baterías y la entrada de carga del panel solar.

### ***4.2.80 Resultados Obtenidos***

Los resultados de la prueba fueron los siguientes:

- **Transición de Energía:** La conmutación de la red eléctrica al banco de baterías fue **instantánea y transparente**. No se registró ningún reinicio o interrupción en los equipos de red, los cuales continuaron funcionando de manera normal.

- **Operación con Baterías:** El sistema se mantuvo 100% operativo alimentado exclusivamente por el banco de baterías. Se registró una corriente de descarga estable, consistente con el consumo de diseño de los equipos (aproximadamente 30W).

- **Recarga Solar:** Durante la prueba, se verificó que el panel solar continuaba generando energía y aportando carga a las baterías a través del controlador MPPT, demostrando que el sistema solar extiende activamente la autonomía del respaldo incluso durante un apagón diurno.

#### ***4.2.81 Prueba de la Topología de Malla en la Troncal***

Para validar el funcionamiento del sistema de malla en la conexión principal, se realizó una prueba controlada con el objetivo de confirmar que el router conmuta exitosamente al enlace secundario ante un fallo del principal, demostrando la resiliencia de la red.

El procedimiento comenzó verificando que todo el tráfico de la red estuviera fluyendo a través del enlace PTP principal. A continuación, se simuló una falla total de este enlace desconectando la alimentación eléctrica de su radio. Simultáneamente, se monitoreó la conexión desde un ordenador en el sitio de la torre mediante una prueba de ping continua hacia un servidor externo para observar el impacto en tiempo real.

Los resultados obtenidos fueron **exitosos**. El router detectó la caída del enlace principal y conmutó todo el tráfico de la red hacia el segundo enlace que conforma la malla, de manera automática y rápida. Durante este proceso, se registró una interrupción mínima y breve en la conectividad, tras la cual el servicio se restableció por completo sin necesidad de intervención manual.

Este resultado demuestra que la configuración de la malla en la troncal es completamente funcional y valida esta arquitectura como una solución efectiva para aumentar drásticamente la fiabilidad del servicio de internet para la comunidad.

### **4.3 Resultados de la Encuesta de Satisfacción**

La validez del cuestionario de satisfacción no se evaluó mediante consistencia interna, debido a que las preguntas se formularon para medir dimensiones específicas y no constituyen una escala homogénea. En su lugar, el instrumento fue sometido a una

validación de contenido realizada por un experto con grado de Doctor en Ciencias Sociales, mención Gerencia, quien verificó la pertinencia, claridad y coherencia de cada ítem en relación con los objetivos de la investigación. Este procedimiento permitió garantizar que la encuesta de satisfacción cumpliera con los criterios metodológicos necesarios para recoger información confiable sobre la percepción de la comunidad respecto al nuevo servicio de internet.

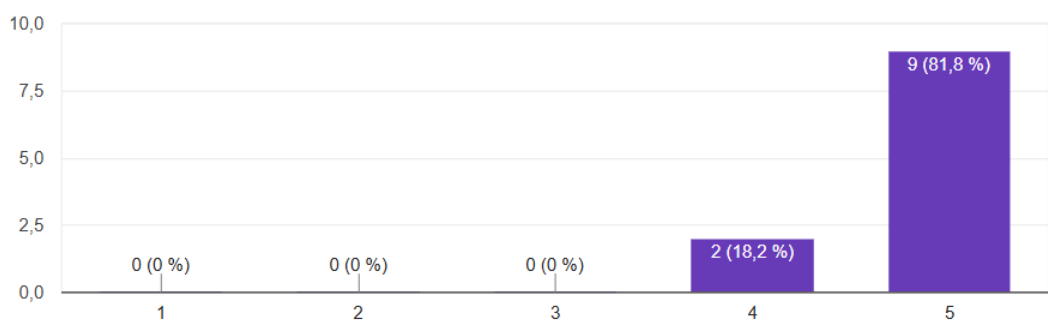
Posteriormente, y como complemento a la validación técnica del prototipo, la encuesta fue **aplicada a los jefes de hogar participantes en la fase piloto**, con el fin de cuantificar la percepción de los usuarios y valorar el grado de cumplimiento del objetivo general desde la perspectiva de la comunidad beneficiaria.

#### Pregunta 1: Satisfacción General

 Copiar gráfico

En una escala de 1 (Muy insatisfecho) a 5 (Muy satisfecho), ¿cuál es su nivel de satisfacción general con el nuevo servicio de internet?

11 respuestas



**Ilustración 43 Encuesta de satisfacción.**

**Fuente: Elaborado por el autor en Google Docs**

Los resultados de la encuesta demuestran una aprobación **unánime** por parte de la comunidad. El **100% de los usuarios participantes expresaron un nivel de satisfacción positivo** con el servicio de internet implementado. La distribución de estas respuestas es notable: la gran mayoría, correspondiente al **81.8% (9 de 11 usuarios)**, reportó el máximo nivel de satisfacción posible (**5 - Muy satisfecho**), mientras que el

18.2% restante (2 de 11 usuarios) también lo calificó favorablemente como "Satisfecho" (puntuación 4).

Es fundamental destacar que no se registraron respuestas neutrales o negativas (0%). Este resultado de **aprobación unánime**, donde la gran mayoría de los usuarios otorga la calificación perfecta, confirma de manera irrefutable el cumplimiento del objetivo general. Demuestra que la solución no solo es técnicamente viable, sino que ha generado un impacto social altamente positivo, superando las expectativas de los beneficiarios.

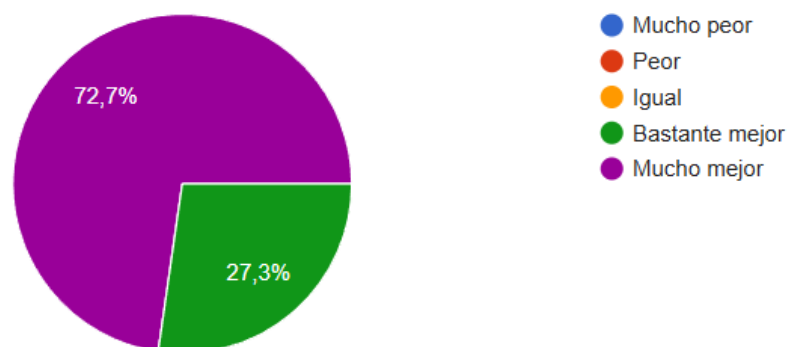
Un indicador clave para la validación del prototipo es la percepción de mejora por parte de los usuarios finales al comparar el nuevo servicio con su situación previa. Los datos recopilados en la encuesta son concluyentes a este respecto.

---

#### Pregunta 4: Comparación con la Situación Anterior

En comparación con el servicio de internet que tenía antes (o la falta de él), ¿cómo describiría la nueva conexión?

11 respuestas



**Ilustración 44 Encuesta a los habitantes de la comunidad.**

**Fuente:** Elaborado por el autor en Google Docs

La totalidad de los encuestados (100%) considera que la nueva conexión es una mejora. Esta percepción se distribuye entre las dos calificaciones más altas: un notable **72.7%** de los participantes la describe como "**Mucho mejor**", mientras que el **27.3%** restante la califica como "**Bastante mejor**".

Este resultado unánime es de particular importancia, ya que valida que el proyecto ha cumplido uno de sus propósitos fundamentales: atender y superar eficazmente las condiciones de conectividad deficientes o inexistentes que fueron documentadas en la fase de diagnóstico. La ausencia total de respuestas neutrales o negativas (0%) refuerza la conclusión de que la solución implementada no representa una mejora marginal, sino un avance transformador en el acceso a la información para la comunidad, contribuyendo directamente a la reducción de la brecha digital en la zona.

## **Capítulo V**

### **5 Conclusiones**

Las conclusiones que se presentan a continuación se derivan del diagnóstico social inicial, de la implementación técnica del prototipo de red inalámbrica MESH con respaldo de energía híbrida y de la encuesta de satisfacción aplicada posterior a la puesta en marcha. Estas permiten valorar el cumplimiento de los objetivos de la investigación, así como extraer lecciones relevantes para futuras aplicaciones.

#### **5.1 Sobre el Cumplimiento del Objetivo Principal**

Se concluye de manera afirmativa que se ha cumplido exitosamente el objetivo de “diseñar e implementar un prototipo funcional de red inalámbrica para proveer acceso a internet”. El sistema implementado demostró ser viable técnicamente y funcional en un entorno real. Además, proveyó una conexión estable, así como alta velocidad. Una solución robusta y adaptada por completo a las particularidades de una comunidad rural resultó ser de la integración de tecnologías de radioenlace, gestión de red y energía híbrida, estableciendo así las bases para un modelo de conectividad sostenible.

##### ***5.1.1 Conclusiones del Diagnóstico Social y Técnico***

El diagnóstico inicial permitió revelar la existencia de una brecha digital profunda en la comunidad: los datos revelaron que más de la mitad de los hogares carece de

cualquier tipo de acceso a internet, y quienes contaban con el servicio lo perciben como deficiente y caro. Así mismo, se constató una demanda social explícita y una alta valoración del servicio, un alto porcentaje de las familias consideran el internet como "esencial" para la educación y las tres cuartas partes manifiestan estar "muy interesado" en el proyecto. Esta convergencia entre una necesidad crítica insatisfecha y una alta receptividad comunitaria fue el principal factor que justificó la pertinencia del proyecto. Desde el punto de vista geográfico, se concluyó que, si bien el entorno presenta desafíos como ondulaciones del terreno y vegetación de altura considerable, estos no representan impedimentos insalvables. El análisis de viabilidad demostró que una planificación adecuada, principalmente la instalación de una torre de 40 metros de altura, era suficiente para superar estos obstáculos y garantizar una línea de vista clara.

### ***5.1.2 Conclusiones sobre la Arquitectura de Red y los Equipos***

La arquitectura de red, basada en una topología de malla en la troncal y una red de acceso Punto a Multipunto, demostró ser una solución de alta fiabilidad. La implementación de dos enlaces PTP independientes para la conexión principal de internet se confirmó como un mecanismo eficaz de resiliencia. La prueba de conmutación, confirmó la gestión automática y rápida del fallo de un enlace a través del router MikroTik. Así pues, se mantiene la continuidad del servicio para la comunidad. Por tanto, esta arquitectura redundante troncal es una solución idónea para proyectos en busca de un servicio de alta disponibilidad. La selección de equipos resultó ser adecuada. Los radios Rocket Prism 5AC Gen2 y Rocket 5AC Lite junto con las antenas RocketDish de 30 dBi demostraron un rendimiento óptimo en los enlaces PTP. Se lograron unas señales excelentes (ej. -57 dBm a casi 12 km) así como capacidades de ancho de banda reales que fueron superiores a 100 Mbps simétricos. Por su parte, los Puntos de Acceso LiteAP AC confirmaron su capacidad para proveer una señal fuerte en las zonas piloto (-43 y -46 dBm), validando las simulaciones de cobertura. La gestión de la red a través del router

MikroTik L009UiGS-RM se demostró efectiva para administrar los planes de velocidad de los usuarios, entregando los anchos de banda simétricos configurados de manera precisa.

### **5.1.3 Conclusiones sobre el Sistema de Energía Híbrido**

Se concluye que el sistema de alimentación híbrido es una solución indispensable y altamente funcional para el contexto del proyecto. La prueba de respaldo energético, verificó que la transición de la red eléctrica al banco de baterías es instantánea y transparente, evitando cualquier reinicio o interrupción en los equipos de telecomunicaciones. Se constató que el banco de baterías de 12V y 36Ah es capaz de sostener la carga de diseño de la torre (aproximadamente 30W), y que el panel solar de 435 Wp contribuye activamente a la recarga del sistema. Este diseño garantiza la continuidad del servicio ante los frecuentes cortes del suministro eléctrico en la zona, un factor clave para la fiabilidad de la red.

### **5.1.4. Encuesta de satisfacción posterior a la implementación**

La encuesta aplicada tras la puesta en marcha del sistema permitió valorar la percepción de los usuarios finales. Los resultados mostraron una aceptación unánime y un alto nivel de satisfacción, especialmente en lo referente a la estabilidad y utilidad del servicio, confirmando que el prototipo no solo resolvió una necesidad crítica, sino que también fue valorado positivamente por la comunidad. Esto valida el impacto social del proyecto y complementa la evidencia técnica obtenida en las pruebas de rendimiento.

### **5.1.5. Dificultades Presentadas Durante el Desarrollo**

Si bien el proyecto cumplió exitosamente con sus objetivos, la ejecución de un proyecto de esta naturaleza en un entorno real no estuvo exenta de desafíos. Superar estas dificultades constituyó una parte fundamental del aprendizaje y la validación del prototipo.

Durante la **fase de implementación física**, se presentaron desafíos logísticos inherentes al trabajo en una zona rural. El transporte de la estructura de la torre, los paneles solares y los equipos delicados a través de caminos de segundo orden requirió una planificación cuidadosa. Asimismo, las condiciones climáticas variables, propias de la región, impusieron ventanas de trabajo limitadas para las tareas en altura, como el montaje de las antenas.

En el ámbito técnico, una dificultad considerable realmente representó la alineación de los enlaces Punto a Punto, sobre todo el secundario de casi 20 km. Exigió

múltiples ajustes finos así como también el uso intensivo de las herramientas de software de los radios para lograr una alineación precisa a tal distancia. El desafío más notable fue el

Las cadenas de señal del CPE se desbalancean por 10 dB en el sector noroeste. La conexión se mantuvo funcional debido a la fuerte señal general, pero este desbalance es evidencia de una obstrucción parcial menor en la línea de vista. Esto impide al equipo alcanzar su máxima capacidad teórica además demuestra la sensibilidad de las señales de alta frecuencia a los obstáculos más pequeños.

Finalmente, se identificaron desafíos de optimización, como que el panel solar instalado no tenía una orientación ideal, pues apuntaba al noroeste en vez de al norte geográfico. Esta orientación reduce su eficiencia en captación, si bien el sistema de energía es funcional. Al ser solventadas, estas dificultades destacan la planificación precisa y la adaptación in situ, siendo lecciones aprendidas valiosas para futuras expansiones del proyecto.

## **5.2. Recomendaciones**

### **5.2.4. Recomendaciones Técnicas (Para el Prototipo Actual)**

- **Optimizar Alineación del Cliente AP1:** Para optimizar la Alineación del Cliente AP1, se recomienda corregir, a fin de mejorarla, el desbalance de 10 dB detectado en sus cadenas de señal (-56 / -46 dBm). El enlace es funcional; sin embargo, corregir este desbalance podría aumentar su estabilidad. Su capacidad máxima también se podría ver incrementada bajo adversas condiciones climáticas.
- **Incrementar la Capacidad del Sistema de Energía:** El sistema de energía de respaldo actual fue funcional en la fase piloto con cerca de 7.2 horas de autonomía, con un panel y banco de baterías limitado. Se recomienda enfáticamente la ampliación para el sistema de energía, con el fin de robustecer la red. Esto permitirá asegurar de manera eficaz su operación durante eventos de cortes eléctricos que sean prolongados (superiores a 8 horas). Esta mejora se puede obtener de dos maneras conjuntamente:

- **Añadir Paneles Solares Adicionales:** Instalar más paneles en paralelo aumentaría la capacidad de generación total (Wp). Esto permitiría una recarga mucho más rápida del banco de baterías y mejoraría significativamente el rendimiento en días de baja radiación solar, asegurando que las baterías alcancen su carga completa con mayor regularidad.

- **Ampliar el Banco de Baterías:** Incrementar la capacidad de almacenamiento (Ah) del banco, ya sea añadiendo más baterías en paralelo o sustituyéndolas por unas de mayor capacidad. Esto extendería directamente las horas de autonomía, preparando a la red para ser un servicio de misión crítica que pueda operar de forma ininterrumpida durante 24 horas o más sin suministro de la red eléctrica.

#### ***5.2.5. Recomendaciones para Trabajo a Futuro***

- **Expansión de la Cobertura:** Habiendo validado el prototipo, el siguiente paso natural es expandir el servicio al resto de las familias interesadas en la comunidad. Esto implicaría la instalación de nuevos equipos cliente (CPEs) en los hogares y, de ser necesario, la adición de nuevos Puntos de Acceso (APs) en la torre para cubrir áreas geográficas que no quedaron dentro de las zonas piloto iniciales.

- **Desarrollo de un Modelo de Gestión Sostenible:** Se recomienda trabajar en conjunto con la comunidad para desarrollar un modelo de gestión y sostenibilidad para la red. Esto incluye la definición de tarifas de servicio justas que permitan cubrir los costos operativos (como el pago a los proveedores de internet y el mantenimiento), así como la capacitación de miembros locales para realizar tareas de soporte técnico básico. Esto asegurará la apropiación del proyecto por parte de la comunidad y su viabilidad a largo plazo.

- **Implementar Servicios de Valor Agregado:** Una vez la red esté consolidada, se puede explorar la implementación de servidores locales para ofrecer servicios de valor agregado a la comunidad, como almacenamiento de contenido educativo (para reducir el consumo de internet) o sistemas de telefonía sobre IP (VoIP).

## Bibliografía

- [1] «Energía solar en zonas rurales: Impacto social y económico,» ESASL, 2023. [En línea]. Available: <https://esasl.com/energia-solar-en-zonas-rurales-impacto-social-y-economico/>. [Último acceso: 16 05 2025].
- [2] D. C. & J.-R. E. F. Decimavilla-Alarcón, «Optimización de redes inalámbricas rurales mediante aprendizaje automático: Mejora de la conectividad en áreas remotas.,» *Revista Mexicana De Investigación E Intervención Educativa*, vol. 4, nº 2, pp. 99-100, 2025.
- [3] Y. S. Benitez, «Symbiotic Connectivity: Optimizing Rural Digital Infrastructure with Solar-Powered Mesh Networks Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms,» *arXiv preprint arXiv:2407.11986*, 2024.
- [4] S. Quishpe, M. Padilla y M. Ruiz, «Despliegue óptimo de redes inalámbricas para medición inteligente,» *Revista Técnica energía*, vol. 16, nº 1, pp. 106-113, 2019.
- [5] E. Gabriel y B. Levy, «El futuro solar de la conectividad rural,» Andina Link, 2025. [En línea]. Available: <https://andinalink.com/el-futuro-solar-de-la-conectividad-rural/>. [Último acceso: 16 05 2025].
- [6] D. Lamas German, «Las sombras de la energía solar fotovoltaica,» *Revista Perspectivas Metodológicas*, vol. 20, nº 24, 2020.
- [7] M. Rodríguez Gámez, A. Vázquez Pérez, A. Velez Quiroz y W. Saltos Arauz, «Mejora de la calidad de la energía con sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales,» *Revista Científica*, vol. 33, nº 3, pp. 265-274, 2018.
- [8] C. E. Acosta y Gil-Castiñeira-Gil, «Revisión de requisitos, protocolos y desafíos,» *MASKAY*, vol. 11, nº 1, pp. 13-21, 2021.
- [9] S. Hao, Y. Hong y Y. He, «An Energy-Efficient Routing Algorithm Based on Greedy Strategy for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks,» *Sensors*, vol. 22, nº 4, p. 1645, 2022.

- [10] T. Behera, U. Samal, S. Mohapatra, M. Khan, B. Appasani, N. Bizon y P. Thounthong, «Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: Architectures, Strategies, and Performance,» *Electronics*, vol. 11, n° 15, p. 2282, 2022.
- [11] M. Zamboti, K. Tenório, F. Toscano, C. Cunha y A. Cesar, «Metodología de Reacondicionamiento de Edificios Hospitalarios,» *Revista Técnica "energía"*, vol. 21, n° 2, pp. 69-80, 2025.
- [12] C. Carrasco y S. Alberto, «Estudio de consumo energético para algoritmos de recolección de datos en redes de sensores inalámbricos bajo el protocolo Lorawan,» 2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181783>. [Último acceso: 10 05 2025].
- [13] J. Castro, P. Soto, R. Reategui y T. Castillo, «Partición de una Red Eléctrica de Distribución Aplicando Algoritmos de Agrupamiento K-means y DBSCAN,» *Revista Técnica "energía"*, vol. 20, n° 1, pp. 73-81, 2023.
- [14] J. Garcia, «Contribuciones Al Ahorro De Energía En Puntos De Acceso Wifi,» *accedacris*, 2020. [En línea]. Available: <https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/76594>. [Último acceso: 10 05 2025].
- [15] J. Flores-Cueto, R. Hernández y R. Garay-Argandoña, «Tecnologías de información: Acceso a internet y brecha digital en Perú,» *Revista venezolana de gerencia*, vol. 25, n° 90, pp. 504-527, 2020.
- [16] D. d. u. r. d. t. i. p. l. c. d. Wasakentsa, «Córdova, J,» 04 2024. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27634>. [Último acceso: 16 05 2025].
- [17] A. Cuenca, O. C, S. I y M. H, «Metodología de Diseño de Sistemas Aislados de Energía Solar Fotovoltaica para Áreas Rurales en Ecuador,» *Revista Técnica "energía"*, vol. 20, n° 1, pp. 43-51, 2023.
- [18] R. M. H. R. G.-A. J. J Flores-Cueto, «Tecnologías de información: Acceso a internet y brecha digital en Perú,» *Revista venezolana de gerencia*, vol. 25, n° 90, pp. 504-527, 202.

- [19] X. Z. a. Z. L. Y. Chai, «The future of wireless mesh network in next-generation communication: a perspective overview,» *Evolving Systems*, vol. 15, pp. 1635-1648, 2024.
- [20] J. G. a. R. Castañeda, Artist, "*Conectividad a Internet para el progreso rural.*", *Tesis doctoral, Corporación Universitaria Minuto de Dios-UNIMINUTO*. [Art]. repositorio digital, 2023.
- [21] X. A. N. Udugampola y B. L. a. A. Seneviratne, «Scalability Analysis of Linear LoRa Mesh Networks,» de *2024 32nd International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*, Krakow, 2024.
- [22] M. B. B. V. C. C. E. M. M. Y. O. O. a. R. L. G. C. A. Aquino, «Using IoT Mesh Networks to Extend Wireless Coverage in Industrial Environments,» de *Proceedings of the 12th Latin-American Symposium on Dependable and Secure Computing*, 2023.
- [23] Y. H. P. S. a. L. L. W. Qi, «Optical wireless link enhanced wireless mesh networks with bottleneck connections,» de *Advanced Fiber Laser Conference*, Changsha, 2024.
- [24] N. G. e. al, «Evaluating the Potential of Mesh Networks in Enhancing Rural Connectivity based on Internet of Thing,» *Journal of Intelligent Systems & Internet of Things*, vol. 12, n° 2, p. 178, 2024.
- [25] N. L. S. A. A. L. a. M. A. J. K. M. Salleh, «The Impact of Sustainable Development Goals on Local and Community Networks and Opportunities,» *Journal of Technical Education and Training*, vol. 16, n° 2, pp. 293-303, 2024.
- [26] A. U. R. e. al, «A solar-powered multi-functional portable charging device (SPMFPCD) with internet-of-things (IoT)-based real-time monitoring—An innovative scheme towards energy access and management,» *Green Technologies and Sustainability*, vol. 3, n° 1, p. 100134, 2025.
- [27] J. E. a. F. Gil-Castiñeira, «Revisión de requisitos, protocolos y desafíos en LWSN,» *Maskay*, vol. 11, n° 1, pp. 13-21, 2021.
- [28] C. C.-M. M. V. V. M. a. P. S. O. R. Jurado-Calero, «MESH network as an alternative model of connectivity in higher education institutions, case study Luis

- Vargas Torres de Esmeraldas Technical University,» *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, vol. 3, nº 2, pp. 125-135, 2022.
- [29] L. C.-A. a. G. Iuhasz, «Dataset for anomaly detection in a production wireless mesh community network,» *Data in brief*, vol. 49, p. 109342, 2023.
- [30] D. L. a. H. Delgado, Artist, “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RED MESH PARA MEJORAR LA CONECTIVIDAD INALAMBRICA EN LA UNIDAD EDUCATIVA FISCAL “GALILEO GALILEI” MANTA”, *Tesis de titulacion, Universidad Estatal del sur de Manabí, Manabí*. [Art]. repositorio digital, 2023.
- [31] H. H. S. e. al, «A novel solution for energy-saving and lifetime-maximizing of LoRa wireless mesh networks,» *Journal of Information and Telecommunication*, vol. 8, nº 1, pp. 1-17, 2024.
- [32] J. Garcia, Artist, *Contribuciones al ahorro de energía en puntos de acceso Wifi [Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria]*. [Art]. Repositorio digital, 2020.
- [33] Satellite map, «Satellite map,» [En línea]. Available: [https://satellites.pro/mapa\\_de\\_Ecuador](https://satellites.pro/mapa_de_Ecuador). [Último acceso: 05 08 2025].
- [34] Ubiquiti inc., «Unifi,» 7 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://ui.com/download/software/r5ac-prism>. [Último acceso: 6 agosto 2025].
- [35] Ubiquiti Inc., «Unifi,» [En línea]. Available: [https://dl.ubnt.com/qsg/R5AC-Lite/R5AC-Lite\\_ES.html](https://dl.ubnt.com/qsg/R5AC-Lite/R5AC-Lite_ES.html). [Último acceso: 12 Agosto 2025].
- [36] Ubiquiti Inc., «Unifi,» [En línea]. Available: [https://dl.ubnt.com/qsg/PBE-5AC-Gen2/PBE-5AC-Gen2\\_ES.html](https://dl.ubnt.com/qsg/PBE-5AC-Gen2/PBE-5AC-Gen2_ES.html). [Último acceso: 12 Agosto 2025].
- [37] Ubiquiti Inc., «Unifi,» [En línea]. Available: [https://dl.ubnt.com/qsg/RD-5G30-LW/RD-5G30-LW\\_ES.html](https://dl.ubnt.com/qsg/RD-5G30-LW/RD-5G30-LW_ES.html). [Último acceso: 06 agosto 2025].
- [38] Ubiquiti Inc., «Unifi,» 19 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://ui.com/download/software/lap-120>. [Último acceso: 6 Agosto 2025].

- [39] Longi, «Longi,» [En línea]. Available: [https://static.longi.com/Hi\\_MO\\_6\\_Explorer\\_LR\\_5\\_54\\_HTH\\_415\\_435\\_M\\_30\\_30\\_and\\_15\\_DG\\_V17\\_ES\\_4983e2ddfe.pdf](https://static.longi.com/Hi_MO_6_Explorer_LR_5_54_HTH_415_435_M_30_30_and_15_DG_V17_ES_4983e2ddfe.pdf). [Último acceso: 06 Agosto 2025].
- [40] Prostar, «prostarsolar,» [En línea]. Available: <https://www.prostarsolar.net/product-details/mcr3024-pv-100v-input-30-amp-mppt-solar-charge-controller-12v-24v>. [Último acceso: 6 Agosto 2025].
- [41] AblereX Experts in Power Conversion, «ablereXlatam,» [En línea]. Available: <https://www.ablereXlatam.com/inverter-charger-1000va?lang=es>. [Último acceso: 6 Agosto 2025].



## **AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

**Roman Alberto Pino Carrillo** portador(a) de la cédula de ciudadanía N° **0302861927**. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del proyecto de titulación **“diseño e implementación de una red inalámbrica mesh alimentada con energía solar para proporcionar acceso a internet en la comunidad rural “normita” del cantón La Troncal”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de éste proyecto de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

La Troncal, **24 de octubre del 2025**



Roman Alberto Pino  
Carrillo



F: .....

**Roman Alberto Pino Carrillo**

**C.I. 0302861927**