

**Sistema de Comunicación Rural con Antenas de Alta Ganancia, Radio Enlaces e
Integración de Voz Analógica sobre IP**

ANEXO 03

INFORME DE EJECUCION DEL PROYECTO

Elizabeth Jakelin Ayma Chacalla

Davsi Victoria Chacolla Flores

Elvis David Hinojosa Llica

Milagros Marillac Ordoñez Flores

Esthefany Villanueva Ramos

Instituto de Educación Superior José Carlos Mariátegui

Ing. Ronald Jose Jimenez Guevara

23 de Junio, 2025

Presentación

El presente proyecto aborda la problemática de la brecha de conectividad en zonas rurales y aisladas, un desafío significativo que limita el desarrollo social y económico de estas comunidades. La ausencia de infraestructura de comunicación básica, como telefonía e internet, restringe su acceso a información, educación, servicios de salud y oportunidades económicas. Esta situación se agrava en entornos de baja densidad poblacional, donde el alto costo operativo hace inviable la inversión por parte de los operadores de telecomunicaciones tradicionales.

En respuesta a esta necesidad, se propone el diseño y desarrollo de un prototipo de sistema de comunicación rural innovador. Este prototipo integra tecnologías de antenas de alta ganancia, radioenlaces y voz analógica sobre redes IP, buscando demostrar el potencial para establecer una conectividad robusta y sostenible. Si bien el desarrollo y las pruebas funcionales de este prototipo se llevaron a cabo en el Distrito de Samegua, Moquegua, Perú, una localidad con infraestructura existente, su diseño modular y adaptable lo concibe como un modelo con potencial de aplicación y escalabilidad en cualquier entorno rural y aislado desde el distrito hasta el país, especialmente donde las soluciones convencionales resulten económicamente inviables.

La viabilidad técnica y económica de esta propuesta se sustenta en su diseño y en los resultados de las pruebas del prototipo, que sugieren un impacto significativo en la reducción de la desigualdad digital.

Resumen

El proyecto “Sistema de Comunicación Rural mediante Tecnologías de Antenas de Alta Ganancia, Radio Enlaces e Integración de Voz Analógica sobre Redes IP” se centra en el diseño y desarrollo de un prototipo para abordar la brecha de conectividad en zonas rurales y aisladas. Si bien las pruebas de funcionalidad del prototipo se realizaron en el Distrito de Samegua, Moquegua, Perú, el sistema está propuesto como una solución escalable para entornos donde la comunicación tradicional es inviable por costos y baja densidad poblacional. Este informe describe el diseño y las pruebas que demuestran la viabilidad técnica y económica del prototipo, integrando radioenlaces y voz sobre IP para proporcionar acceso básico a comunicación. Los resultados sugieren el potencial del sistema para mejorar la calidad de vida y acceso a servicios esenciales en comunidades rurales, posicionándolo como un modelo aplicable tras una eventual implementación.

Índice General

Presentación.....	2
Resumen	2
Índice General.....	4
I. INFORMACIÓN GENERAL	6
1.1. Título del Proyecto.....	6
1.2. Categoría del Proyecto	6
1.3. Área/ Línea De Investigación/Innovación	6
1.3.1. Área:.....	6
1.3.2. Línea:	6
1.3.3. Programa de Estudios:.....	6
1.3.4. Equipo Innovador.....	6
II. DESCRIPCIÓN DE LA INNOVACIÓN.....	7
2.1. El Problema.....	7
2.2. Objetivos de la Innovación.....	8
2.2.1. Objetivo General:	8
2.2.2. Objetivos Específicos:	8
2.3. Justificación	9
2.4. Marco Referencial.....	10
2.4.1. Generalidades.....	10
2.4.2. Tecnologías de Comunicación Rural.....	11
2.4.3. Sistemas de comunicación rural innovadores	16

2.4.4.	Desarrollo sostenible y conectividad rural.....	18
2.4.5.	Energía solar para la conectividad rural	20
III.	EJECUCION DEL PROYECTO	23
3.1.	Actividades de Inicio.....	23
3.1.1.	Revisión y actualización del plan de trabajo y el cronograma del proyecto:	23
3.1.2.	Coordinación con los miembros del equipo:	25
3.1.3.	Identificación y asignación de recursos:.....	26
3.1.4.	Revisión de la documentación y los requisitos del proyecto:	26
3.2.	Metodología utilizada.....	26
3.2.1.	Enfoque Metodológico	27
3.2.2.	Métodos de Investigación.....	28
3.2.3.	Herramientas y Técnicas	28
3.3.	Actividades de Desarrollo de la innovación	29
3.3.1.	Diseño y construcción de la innovación	29
3.3.2.	Definición de los parámetros técnicos del sistema.	30
3.3.3.	Selección de los componentes del sistema:	33
3.3.4.	Construcción del Prototipo.....	37
3.3.5.	Componentes y Materiales Utilizados	48
3.3.6.	Determinación de Costos.....	54
3.3.7.	Pruebas Realizadas.....	60
3.3.8.	Impactos.....	67
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
	REFERENCIAS	69
	ANEXOS.....	71

I. INFORMACIÓN GENERAL

1.1. Título del Proyecto

Sistema de Comunicación Rural mediante Tecnologías de Antenas de Alta Ganancia, Radio Enlaces e Integración de Voz Analógica sobre Redes IP.

1.2. Categoría del Proyecto

Gestión Administrativa Institucional y Servicios de Salud

1.3. Área/ Línea De Investigación/Innovación

1.3.1. Área:

Procesos de Desarrollo Empresarial

1.3.2. Línea:

Sistemas de comunicación de datos

1.3.3. Programa de Estudios:

Arquitectura de Plataformas y Servicios de Tecnologías de Información

1.3.4. Equipo Innovador

Asesor : Ing. Ronald Jose Jimenez Guevara

Integrantes :
1. Ayna Checalla Elizabeth Jakelin
2. Chacolla Flores Daysi Victoria
3. Hinojosa Llica Elvis David
4. Ordoñez Flores Milagros Marillac
5. Esthefany Villanueva Ramos

II. DESCRIPCIÓN DE LA INNOVACIÓN

2.1. El Problema

La falta de conectividad a telefonía e internet en zonas rurales representa un gran desafío que limita el desarrollo de pequeñas comunidades. Esta brecha digital tiene un impacto profundo en diversos aspectos de la vida rural, afectando la educación, la salud y las oportunidades económicas.

La ausencia de conectividad limita el acceso a información, recursos y plataformas, dificulta la atención médica en zonas remotas, restringe el acceso a mercados más amplios y tecnologías, limita la participación ciudadana en los procesos de toma de decisiones y dificulta el acceso a información pública.

Las causas de esta problemática son diversas y se interconectan. Los altos costos de instalación de infraestructura en zonas dispersas, la baja densidad poblacional que dificulta la rentabilidad de las inversiones en telecomunicaciones, y las condiciones geográficas y climáticas adversas que complican la implementación de redes, son solo algunos de los obstáculos.

Para abordar la brecha de conectividad rural, se requieren soluciones integrales que aborden las causas profundas del problema. Algunas posibles soluciones incluyen invertir en la expansión de la infraestructura de telecomunicaciones en zonas rurales, fomentar la creación de redes comunitarias gestionadas por las propias comunidades, implementar programas de capacitación para mejorar las habilidades digitales, fomentar la colaboración entre el sector público y el privado, explorar el potencial de tecnologías emergentes y

desarrollar modelos de negocio que garanticen la sostenibilidad de las redes en zonas rurales a largo plazo.

Las soluciones deben estar centradas en las personas y sus necesidades, que la participación de las comunidades rurales sea activa en la definición e implementación de las soluciones para garantizar su éxito a largo plazo. La brecha de conectividad en zonas rurales es un desafío complejo que requiere una acción coordinada de gobiernos, empresas, organizaciones de la sociedad civil y comunidades locales. Al abordar este problema, no solo se mejora la calidad de vida de muchas personas, sino que se impulsa el desarrollo sostenible de las zonas rurales y se reduce la desigualdad digital.

2.2. Objetivos de la Innovación.

2.2.1. Objetivo General:

- Diseñar y desarrollar un sistema de comunicación rural innovador que integre tecnologías de antenas de alta ganancia, radioenlaces y voz analógica sobre redes IP, y presentarlo en el Distrito de Samegua, Provincia Mariscal Nieto, Región Moquegua, en el año 2025, como modelo para futuras implementaciones en áreas rurales.

2.2.2. Objetivos Específicos:

- Diseñar un sistema de comunicación rural que sea técnicamente viable y eficiente.
- Desarrollar un prototipo funcional del sistema que pueda ser utilizado como base para futuras implementaciones.

2.3. Justificación

El proyecto “Sistema de Comunicación Rural mediante Tecnologías de Antenas de Alta Ganancia, Radio Enlaces e Integración de Voz Analógica sobre Redes IP” se justifica por la necesidad de desarrollar soluciones innovadoras que permitan reducir la brecha de conectividad en zonas rurales alejadas. La falta de comunicación en estas áreas limita el acceso a servicios básicos, oportunidades económicas, educativas y de salud, afectando la calidad de vida de los habitantes.

Los altos costos de instalación de infraestructura en zonas dispersas, la baja densidad poblacional que dificulta la rentabilidad de las inversiones en telecomunicaciones, y las condiciones geográficas y climáticas adversas que complican la implementación de redes, hacen que la conectividad rural sea un gran desafío. Estos obstáculos impiden que las comunidades rurales accedan a servicios de comunicación básicos, lo que perpetúa la brecha de conectividad y limita su desarrollo económico y social.

Este proyecto busca desarrollar una solución técnica que sea técnicamente viable, económicamente sostenible y escalable en zonas rurales alejadas. Al diseñar y desarrollar este sistema, se busca sentar las bases para futuras implementaciones que mejoren la conectividad rural, contribuyan a reducir la brecha de conectividad y promuevan la inclusión social. Además, se busca fomentar el desarrollo económico y social en zonas rurales, mejorando la calidad de vida de los habitantes.

La justificación de este proyecto se basa en la necesidad de abordar la brecha digital en zonas rurales, la falta de soluciones técnicas innovadoras y sostenibles, y el potencial de impacto social y económico en las comunidades rurales. Este proyecto pretende ser un aporte hacia la mejora de la conectividad rural y el desarrollo sostenible de las zonas alejadas.

2.4. Marco Referencial

2.4.1. Generalidades

El presente proyecto se contextualiza en la necesidad urgente de abordar las disparidades en el acceso a la tecnología y la comunicación, particularmente en áreas geográficas desatendidas. Este marco referencial examina los conceptos de la brecha digital, la relevancia de la conectividad rural para el desarrollo sostenible, y las tecnologías de comunicación inalámbrica como alternativas para mitigar estas desigualdades, ofreciendo una base conceptual para la iniciativa propuesta.

Brecha digital en zonas rurales

La brecha digital, definida como la “desigualdad en el acceso, uso y apropiación de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC)” (Castells, 2007; DiMaggio, Hargittai, Neuman, & Robinson, 2004), persiste como un desafío global, acentuándose de manera crítica en las zonas rurales. Si bien los avances tecnológicos han masificado el acceso a dispositivos, la desigualdad actual se manifiesta no solo en la disponibilidad de infraestructura básica, sino también en el acceso a internet de banda ancha de calidad y en las habilidades digitales necesarias para su aprovechamiento efectivo (ITU, 2023; Banco Mundial, 2021).

Esta disparidad es multifactorial, impulsada principalmente por la limitada inversión en infraestructura en áreas de baja densidad poblacional y alto costo de despliegue, así como por la falta de asequibilidad de los servicios y la ausencia de políticas públicas integrales para el fomento de la alfabetización digital (CEPAL, 2022). En el contexto latinoamericano y, específicamente en Perú, la desconexión rural es alarmante: estudios recientes indican que un porcentaje significativo de hogares rurales carece de acceso a internet, en contraste con la alta penetración en entornos urbanos (OSIPTEL, 2023). Esta exclusión digital no solo restringe las oportunidades educativas, laborales y de acceso a servicios esenciales, sino que también

genera una “brecha de conocimiento” que margina a estas poblaciones de la economía digital y de la participación plena en la sociedad moderna (OECD, 2019).

Importancia de la conectividad rural para el desarrollo sostenible

La conectividad rural es reconocida internacionalmente como un catalizador indispensable para el desarrollo sostenible, alineándose directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2015). El acceso a internet en el ámbito rural trasciende la mera comunicación; facilita el acceso a la información para la toma de decisiones agrícolas, mejora las oportunidades educativas a través de plataformas en línea, fortalece la prestación de servicios de salud remotos (telesalud), e impulsa la diversificación económica mediante el acceso a mercados y nuevas oportunidades de negocio para pequeños productores y emprendedores (FAO, 2021; IICA, 2020).

La provisión de conectividad fomenta la inclusión social al reducir el aislamiento de las comunidades, permitiendo la participación cívica y el fortalecimiento de redes comunitarias (MTC, 2021). Organismos como el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) han subrayado la importancia estratégica de la conectividad rural en América Latina y el Caribe, especialmente para la seguridad alimentaria y nutricional, promoviendo el desarrollo de habilidades digitales en la población, incluyendo mujeres y jóvenes, como pilar para un futuro rural próspero (IICA, 2020).

2.4.2. Tecnologías de Comunicación Rural

El despliegue de soluciones de conectividad en entornos rurales presenta desafíos técnicos únicos, derivados de la dispersión geográfica, la compleja relieve y la limitada infraestructura existente. Para superar estas barreras, las tecnologías inalámbricas emergen como alternativas, permitiendo la extensión de los servicios de comunicación a bajo costo y con alta flexibilidad (ITU, 2023). Dentro de este espectro, las antenas de radioenlace y la

telefonía IP son componentes esenciales para establecer sistemas de comunicación robustos y eficientes.

Antenas de radioenlace

Las antenas de radioenlace son dispositivos fundamentales en los sistemas de comunicación inalámbrica que permiten la transmisión y recepción de señales de radio entre dos puntos fijos, constituyendo la base de los enlaces de microondas y otras redes de área amplia (Stutzman & Thiele, 2012). Su diseño optimizado facilita la concentración de la energía de la señal en una dirección específica, lo que es vital para alcanzar distancias considerables y asegurar la calidad del enlace en entornos rurales.

Tipos de antenas

Existen diversos tipos de antenas empleadas en radioenlaces, clasificadas por su patrón de radiación y aplicación. Las más comunes incluyen las antenas parabólicas (o de plato), que ofrecen una alta ganancia y un haz muy estrecho, ideales para enlaces punto a punto de larga distancia; las antenas de panel o de sector, que proporcionan cobertura en un ángulo determinado, útiles para enlaces punto a multipunto; y las antenas omnidireccionales, que irradian la señal en todas las direcciones, adecuadas para estaciones base con cobertura circular limitada (Stutzman & Thiele, 2012; Balanis, 2012). La elección del tipo de antena depende directamente de la topología de red deseada y las condiciones del terreno.

Características de las Antenas

- **Ganancia:** Es la medida de la capacidad de la antena para concentrar la energía de la señal en una dirección específica, expresada en decibelios (dBi o dBd). Una mayor ganancia implica un mayor alcance y una mejor calidad de señal (Balanis, 2012).
- **Ancho de Haz (Beamwidth):** Es el ángulo en el que la potencia radiada es al menos la mitad de la potencia máxima. Un haz más estrecho significa mayor direccionalidad y menor interferencia (Stutzman & Thiele, 2012).

- **Polarización:** Se refiere a la orientación del campo eléctrico de la onda electromagnética (vertical, horizontal, circular). La polarización debe ser la misma en las antenas transmisora y receptora para una comunicación óptima (Goldsmith, 2005).
- **Relación Adelante-Atrás (Front-to-Back Ratio):** Indica la capacidad de la antena para suprimir la radiación en la dirección opuesta, reduciendo la interferencia (Stutzman & Thiele, 2012).

Ventajas de las Antenas

Las ventajas de utilizar antenas de radioenlace en la comunicación rural son significativas. Permiten establecer conexiones de alta velocidad y gran capacidad en zonas donde el despliegue de fibra óptica o cableado es prohibitivo (ITU, 2023). Su instalación es relativamente rápida en comparación con otras infraestructuras, y ofrecen una alta fiabilidad y seguridad cuando se diseñan adecuadamente. Además, facilitan la interconexión de redes locales con la red troncal o con otros puntos de acceso remotos, siendo escalables en función de las necesidades de ancho de banda (Goldsmith, 2005).

Aplicaciones de las Antenas

Las antenas de radioenlace tienen un amplio rango de aplicaciones en la conectividad rural, incluyendo:

- **Backhaul de Redes:** Conexión de torres de telefonía celular o puntos de acceso Wi-Fi comunitarios a la red principal.
- **Enlaces Punto a Punto:** Establecimiento de conexiones directas entre edificios, aldeas o centros de salud distantes.
- **Redes de Última Milla:** Provisión de conectividad directa a hogares y empresas en áreas rurales (ITU, 2023).
- **Monitoreo y Control:** Conexión de sensores y dispositivos IoT en aplicaciones agrícolas o ambientales remotas.

Telefonía IP (VoIP)

La Telefonía IP, también conocida como Voz sobre Protocolo de Internet (VoIP), es una tecnología que permite realizar llamadas de voz a través de una conexión a internet o una red basada en IP, en lugar de las líneas telefónicas analógicas tradicionales (SIP Forum, 2019; Kozierok, 2005). Esta tecnología ha revolucionado las comunicaciones, ofreciendo una alternativa flexible y a menudo más económica para la transmisión de voz.

Ventajas de la Telefonía IP:

Las principales ventajas de la telefonía IP, especialmente relevantes para entornos rurales, incluyen:

- **Reducción de Costos:** Las llamadas a través de internet suelen ser más económicas, especialmente para llamadas de larga distancia o internacionales, ya que utilizan la infraestructura de datos existente (Kozierok, 2005).
- **Integración de Servicios:** Permite la convergencia de voz, datos y video sobre una única red IP, simplificando la infraestructura y facilitando la implementación de servicios multimedia (SIP Forum, 2019).
- **Flexibilidad y Escalabilidad:** Es fácil añadir o quitar líneas y usuarios, y la red puede expandirse o contraerse según las necesidades, sin la limitación física de las líneas telefónicas tradicionales (Kozierok, 2005).
- **Portabilidad:** Los números de teléfono pueden asociarse a usuarios en lugar de ubicaciones físicas, permitiendo el acceso a servicios de voz desde cualquier lugar con conexión a internet.
- **Funcionalidades Avanzadas:** Acceso a características como buzón de voz a correo electrónico, desvío de llamadas avanzado, videoconferencia y mensajería unificada, que no son posibles o son costosas con la telefonía analógica (SIP Forum, 2019).

Componentes de la Telefonía IP

- **Clientes IP (Endpoints):** Pueden ser teléfonos IP (hardware), softphones (software en computadoras o móviles), o adaptadores de teléfono analógico (ATA) que permiten usar teléfonos analógicos existentes (Kozierok, 2005).
- **Servidor IP-PBX (Private Branch Exchange) o Centralita IP:** Es el cerebro del sistema, gestionando las llamadas, la señalización y las funcionalidades avanzadas. Puede ser un software o hardware específico.
- **Gateways VoIP:** Dispositivos que permiten la interconexión entre la red IP y la red telefónica pública conmutada (PSTN) o redes analógicas (SIP Forum, 2019).
- **Red IP:** La infraestructura de red subyacente (Internet, LAN, WAN) sobre la cual viajan los paquetes de voz.

Aplicaciones de la de la Telefonía IP

- **Comunicación Comunitaria:** Provisión de servicios telefónicos básicos a bajo costo para los residentes, conectándolos internamente y con el exterior (IICA, 2020), 2020).
- **Servicios de Emergencia:** Establecimiento de puntos de comunicación para emergencias en áreas remotas.
- **Telesalud:** Facilitación de consultas médicas y soporte remoto a través de llamadas de voz y video sobre IP.
- **Educación a Distancia:** Soporte de comunicación para plataformas de aprendizaje en línea.
- **Comunicación Empresarial y Gubernamental:** Conectividad para oficinas locales, centros de salud, escuelas y organismos gubernamentales en zonas rurales.

Integración de voz analógica sobre redes IP

La integración de voz analógica sobre redes IP es el proceso de convertir señales de voz analógicas (provenientes de teléfonos tradicionales o sistemas de audio heredados) en

paquetes de datos digitales para su transmisión a través de una red IP, y viceversa (Kozierok, 2005). Esto se logra mediante dispositivos llamados Adaptadores de Teléfono Analógico (ATA) o gateways VoIP. Un ATA se conecta a un teléfono analógico estándar y a la red IP, realizando la conversión de la señal. Los gateways, por su parte, manejan múltiples líneas analógicas y se utilizan para conectar centrales telefónicas heredadas a la red IP (SIP Forum, 2019).

Ventajas de la Integración de voz analógica sobre redes IP

Aprovechamiento de Infraestructura Existente: Permite a los usuarios seguir utilizando sus teléfonos analógicos tradicionales, evitando la necesidad de invertir en nuevos teléfonos IP que suelen ser más costosos (Kozierok, 2005).

Reducción de Costos: Al consolidar voz y datos en una única infraestructura IP, se minimizan los gastos de mantenimiento y operación de redes separadas (SIP Forum, 2019).

Flexibilidad de Conexión: Habilita la comunicación de voz desde ubicaciones remotas que solo disponen de una conexión IP, ampliando el alcance de los servicios telefónicos a áreas desatendidas.

2.4.3. Sistemas de comunicación rural innovadores

Para abordar eficazmente la brecha digital en entornos geográficos complejos y de baja densidad poblacional, es fundamental explorar y comprender la diversidad de sistemas de comunicación rural innovadores. Estos sistemas buscan ofrecer alternativas viables a las infraestructuras tradicionales, las cuales a menudo resultan costosas e ineficientes para las características específicas de las zonas rurales y aisladas (ITU, 2023).

Redes comunitarias

Las redes comunitarias representan un modelo de conectividad descentralizado y sostenible, donde la propia comunidad participa activamente en el diseño, despliegue, operación y mantenimiento de su infraestructura de telecomunicaciones (Internet Society -

ISOC, 2015; Naciones Unidas, 2018). Este enfoque contrasta con los modelos comerciales tradicionales, priorizando la accesibilidad y la asequibilidad del servicio. Las redes comunitarias suelen emplear tecnologías inalámbricas de bajo costo y software de código abierto, adaptándose a las condiciones locales y empoderando a los usuarios como gestores de su propia conectividad (Internet Society - ISOC, 2015). Su éxito se basa en la apropiación local de la tecnología y en la capacidad de generar beneficios socioeconómicos directos para la población, reduciendo la dependencia de proveedores externos (Naciones Unidas, 2018).

Tecnologías de acceso inalámbrico y satelitales

Las tecnologías de acceso inalámbrico son esenciales para la conectividad rural debido a su flexibilidad y menor costo de despliegue en comparación con la infraestructura cableada (ITU, 2023). Dentro de estas, se destacan:

Internet satelital: Proporciona conectividad a internet en las regiones más remotas, donde otras infraestructuras son inexistentes o inviables (Banco Mundial, 2021). Opera a través de satélites en órbita geoestacionaria o, más recientemente, en órbitas bajas (LEO), ofreciendo cobertura global. Aunque históricamente ha presentado desafíos como alta latencia y costos elevados, los avances tecnológicos están mejorando su rendimiento y reduciendo su costo, haciéndola una opción cada vez más viable para el acceso de banda ancha en áreas sin cobertura terrestre (OECD, 2019; Comisión de Banda Ancha para el Desarrollo Sostenible, 2021)

Redes de radio de alta frecuencia (HF): Las redes de radio HF, aunque de menor ancho de banda, son robustas y capaces de cubrir grandes distancias sin infraestructura intermedia, siendo útiles para comunicaciones de voz y datos básicos en situaciones de emergencia o en zonas extremadamente aisladas (Goldsmith, 2005). Su capacidad para la propagación a larga distancia, incluso en terrenos difíciles, las convierte en una opción valiosa para conectar puntos distantes con recursos limitados (Fink & Christiansen, 2014).

Otros sistemas innovadores

Redes de Malla Inalámbricas (Wireless Mesh Networks - WMN): Permiten que los nodos de red retransmitan datos entre sí, creando una red auto-organizada y auto-curable que puede extender la cobertura de manera flexible y resiliente (Akyildiz, Wang, & Wang, 2005). Son adecuadas para entornos donde el despliegue de cableado es inviable y donde se requiere redundancia.

TV White Spaces (TVWS): Utilizan las bandas de frecuencia no utilizadas en el espectro de la televisión digital para proporcionar conectividad de banda ancha de forma inalámbrica (Microsoft, 2017). Esta tecnología tiene la ventaja de ofrecer una buena propagación de la señal, ideal para terrenos rurales con obstáculos, y puede operar en bandas con mayor alcance que Wi-Fi tradicional.

Drones y Globos de Alta Altitud: Si bien aún en fase de investigación y despliegue limitado, estas plataformas pueden servir como estaciones base temporales o semi-permanentes, llevando conectividad a zonas de desastre o a áreas de muy difícil acceso (Google, 2017; Facebook, 2018). Su aplicación a gran escala aún enfrenta desafíos regulatorios y tecnológicos.

2.4.4. Desarrollo sostenible y conectividad rural

La conectividad rural es reconocida como un pilar para el desarrollo integral al actuar como un motor de inclusión y progreso. Facilita el acceso a información, servicios y mercados, lo cual es esencial para mejorar la calidad de vida y las oportunidades en áreas tradicionalmente marginadas (FAO, 2021; IICA, 2020). Al cerrar la brecha digital, se reduce la desigualdad y se empodera a las comunidades para participar activamente en la economía y la sociedad digital, contribuyendo a un desarrollo más equitativo y sostenible (MTC, 2021).

Aspectos Económicos: La conectividad de banda ancha en zonas rurales impulsa el desarrollo económico a través de diversas vías. Facilita el acceso a nuevos mercados para

productos agrícolas y artesanales, promueve el comercio electrónico y el desarrollo de pequeñas y medianas empresas (PYMES) locales (OECD, 2019). Además, permite la diversificación de actividades económicas, el acceso a servicios bancarios y financieros digitales, y la creación de oportunidades de empleo relacionadas con la economía digital, incluyendo el teletrabajo (Banco Mundial, 2021). La eficiencia productiva en sectores como la agricultura también mejora con la adopción de tecnologías inteligentes habilitadas por la conectividad.

Aspectos Sociales: A nivel social, la conectividad rural tiene un impacto transformador. Mejora significativamente el acceso a la educación, permitiendo el aprendizaje a distancia y el acceso a recursos educativos en línea, lo cual es vital para reducir la brecha de conocimiento (UNESCO, 2021)). Fortalece los servicios de salud mediante la telesalud y el monitoreo remoto, facilitando consultas médicas y acceso a especialistas para poblaciones alejadas (OMS, 2020). Además, fomenta la inclusión social, la participación cívica, el fortalecimiento de redes comunitarias y el acceso a información vital en situaciones de emergencia, mejorando la calidad de vida y el bienestar general (MTC, 2021).

Aspectos Ambientales: Si bien la conexión directa puede parecer menos obvia, la conectividad rural también contribuye a la sostenibilidad ambiental. Facilita la implementación de tecnologías para la gestión eficiente de recursos naturales y la agricultura inteligente, como el monitoreo de cultivos, el uso optimizado del agua y la gestión de la energía (FAO, 2021). Permite el monitoreo ambiental remoto y la difusión de información sobre prácticas sostenibles. Además, al impulsar el teletrabajo y reducir la necesidad de desplazamientos físicos, puede contribuir a la disminución de la huella de carbono en ciertas actividades económicas (PNUMA, 2020).

2.4.5. Energía solar para la conectividad rural

La provisión de energía es un desafío crítico en muchas zonas rurales, donde el acceso a la red eléctrica tradicional es limitado o inexistente. En este contexto, la energía solar emerge como una solución sostenible y eficiente para alimentar la infraestructura de comunicación rural, asegurando la autonomía y fiabilidad de los sistemas.

Definición de la energía solar

La energía solar es una fuente de energía renovable y limpia que proviene de la radiación electromagnética del sol (Solangi, Leh, Rahim, & Omar, 2011). Esta energía puede ser convertida en otras formas de energía útiles, principalmente electricidad (energía solar fotovoltaica). Es una de las fuentes de energía más abundantes y distribuidas en el planeta.

Tipos de sistemas solares

Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red (On-Grid): Estos sistemas generan electricidad que es inyectada directamente a la red eléctrica existente. Son comunes en áreas con acceso a la red y permiten vender el excedente de energía a la compañía eléctrica. No suelen tener baterías, dependiendo de la red para el respaldo (IRENA, 2020).

Sistemas Fotovoltaicos Aislados (Off-Grid): Estos sistemas operan de forma independiente de la red eléctrica y son ideales para zonas remotas sin acceso a ella. Incluyen baterías para almacenar la energía generada durante el día y suministrarla durante la noche o en días nublados (Solangi, Leh, Rahim, & Omar, 2011; IEA PVPS, 2022). Son los más relevantes para la conectividad rural aislada.

Componentes de un sistema solar

Un sistema solar fotovoltaico aislado típico consta de los siguientes componentes clave (IRENA, 2020; IEA PVPS, 2022):

Paneles Solares Fotovoltaicos (Módulos FV): Capturan la luz solar y la convierten en electricidad de corriente continua (CC).

Controlador de Carga Solar: Regula el flujo de electricidad de los paneles a las baterías, protegiéndolas de sobrecargas o descargas excesivas.

Baterías: Almacenan la energía generada para su uso cuando no hay sol (noche, días nublados).

Inversor: Convierte la corriente continua (CC) de los paneles y las baterías en corriente alterna (CA) utilizable por los equipos de comunicación.

Estructuras de Montaje: Soportes para fijar los paneles solares, optimizando su orientación e inclinación.

Cableado y Protecciones: Conexiones eléctricas y dispositivos de seguridad (fusibles, disyuntores).

Ventajas de la energía solar para la conectividad rural

La energía solar ofrece ventajas significativas para alimentar la infraestructura de comunicación en zonas rurales (IRENA, 2020):

Independencia Energética: Permite operar sistemas de comunicación en lugares sin acceso a la red eléctrica.

Reducción de Costos Operativos: Una vez instalados, los paneles solares tienen costos de combustible nulos y bajos costos de mantenimiento.

Sostenibilidad Ambiental: Es una fuente de energía limpia que no produce emisiones de gases de efecto invernadero durante su operación.

Fiabilidad: Los sistemas bien diseñados con almacenamiento de batería pueden proporcionar energía continua y estable.

Escalabilidad: Los sistemas pueden expandirse modularmente añadiendo más paneles y baterías según la demanda energética.

Desafíos de la energía solar

A pesar de sus ventajas, la implementación de energía solar en proyectos de conectividad rural presenta desafíos (IEA PVPS, 2022):

Costo Inicial: La inversión inicial para paneles, baterías y equipos es significativa, aunque con una rápida amortización.

Intermitencia: La generación de energía depende de la disponibilidad de luz solar, requiriendo sistemas de almacenamiento (baterías) o respaldo.

Mantenimiento: Requiere limpieza periódica de los paneles y monitoreo de las baterías.

Espacio: Necesita espacio adecuado para la instalación de los paneles, especialmente para sistemas de mayor capacidad.

Seguridad: Riesgo de robo de componentes en ubicaciones remotas, lo que exige medidas de seguridad adicionales.

III. EJECUCION DEL PROYECTO

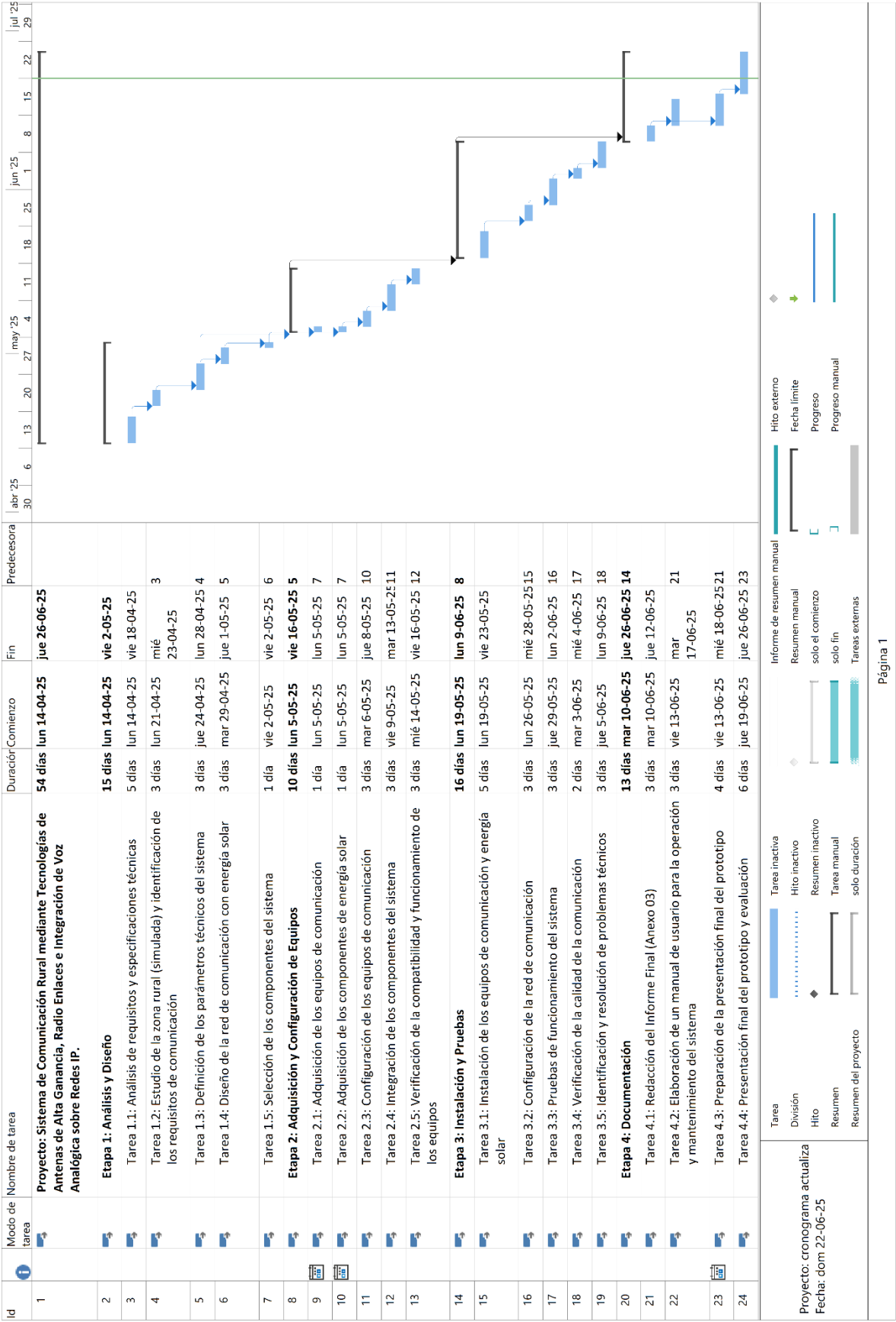
3.1. Actividades de Inicio.

Durante la fase de inicio del proyecto “Sistema de Comunicación Rural mediante Tecnologías de Antenas de Alta Ganancia, Radio Enlaces e Integración de Voz Analógica sobre Redes IP”, se llevaron a cabo una serie de actividades fundamentales para sentar las bases de su desarrollo y asegurar su correcta ejecución. Estas acciones iniciales fueron esenciales para la planificación y la alineación estratégica del equipo.

Una de las primeras actividades consistió en una revisión bibliográfica exhaustiva de la literatura actualizada relacionada con la temática de la iniciativa. Este proceso de investigación permitió establecer el Marco Referencial del proyecto, profundizando en los aspectos conceptuales y de conocimiento sobre la brecha digital en zonas rurales, la importancia de la conectividad para el desarrollo sostenible, las tecnologías de comunicación inalámbrica aplicables (como las antenas de radioenlace y la telefonía IP), y la relevancia de la energía solar como fuente de alimentación para estos sistemas en entornos remotos. Esta revisión fue esencial para fundamentar teóricamente la propuesta y guiar las decisiones de diseño.

3.1.1. Revisión y actualización del plan de trabajo y el cronograma del proyecto:

Una de las actividades iniciales fue la revisión y actualización exhaustiva del plan de trabajo y el cronograma del proyecto. Este proceso implicó el análisis detallado de la planificación original para adaptarla a las condiciones actuales y a los recursos disponibles. El cronograma ajustado, que abarcó una duración total de 54 días (del lunes 14 de abril al jueves 26 de junio de 2025), se estructuró de la siguiente manera:



Etapas 1: Análisis y Diseño (15 días): Incluyó tareas como el análisis de requisitos y especificaciones técnicas (5 días), el estudio de la zona rural simulada y la identificación de requisitos de comunicación (3 días), la definición de parámetros técnicos (3 días), el diseño de la red con energía solar (3 días) y la selección de componentes (1 día).

Etapas 2: Adquisición y Configuración de Equipos (10 días): Comprendió la adquisición de equipos de comunicación (1 día) y componentes de energía solar (1 día), la configuración de los equipos de comunicación (3 días), la integración de los componentes del sistema (3 días) y la verificación de compatibilidad (3 días).

Etapas 3: Instalación y Pruebas (16 días): Se enfocó en la instalación de equipos de comunicación y energía solar (5 días), la configuración de la red (3 días), las pruebas de funcionamiento (3 días), la verificación de la calidad de la comunicación (2 días) y la identificación y resolución de problemas técnicos (3 días).

Etapas 4: Documentación (13 días): Destinada a la redacción del Informe Final (3 días), la elaboración de un manual de usuario (3 días), la preparación de la presentación final (4 días) y la presentación del prototipo y evaluación (6 días). Esta revisión y actualización garantizó la viabilidad de los plazos y la secuencia lógica de las actividades para el cumplimiento eficaz de los objetivos del proyecto.

3.1.2. Coordinación con los miembros del equipo:

Esta actividad no solo implicó la asignación de roles y responsabilidades específicas, sino también el establecimiento de canales de comunicación efectivos y reuniones periódicas. El objetivo principal fue asegurar que cada integrante comprendiera la visión global del proyecto, los objetivos a corto y largo plazo, y el impacto de su contribución individual en el resultado final. Mediante esta coordinación, se buscó fomentar un ambiente de trabajo colaborativo, optimizar la toma de decisiones y garantizar que todos los esfuerzos estuvieran alineados hacia el cumplimiento exitoso de las metas del proyecto.

3.1.3. Identificación y asignación de recursos:

Para el desarrollo exitoso del proyecto, fue indispensable llevar a cabo una identificación minuciosa y la subsiguiente asignación estratégica de todos los recursos necesarios. Esta tarea abarcó no solo los recursos humanos (definiendo los perfiles y capacidades requeridas de cada miembro del equipo), sino también los recursos materiales y tecnológicos. Se especificaron detalladamente los equipos de comunicación (antenas, dispositivos VoIP), los componentes de energía solar (paneles, baterías, inversores), las herramientas para simulación y diseño, y cualquier otro material consumible. La correcta asignación de estos recursos, en tiempo y forma, fue determinante para evitar retrasos en las etapas de adquisición, configuración e instalación, asegurando que el equipo contara con todo lo indispensable para transformar el diseño conceptual en un prototipo funcional.

3.1.4. Revisión de la documentación y los requisitos del proyecto:

La fase de inicio culminó con una revisión exhaustiva de toda la documentación y los requisitos inherentes al proyecto. Este proceso implicó el análisis detallado de los documentos de alcance, las especificaciones técnicas iniciales, los criterios de desempeño esperados y cualquier normativa o estándar relevante aplicable a un sistema de comunicación rural. El propósito de esta revisión fue doble: por un lado, validar la coherencia y completitud de la información disponible, y por otro, asegurar que el equipo comprendiera plenamente las expectativas y limitaciones del proyecto. Esta meticulosa verificación garantizó que todas las actividades futuras estuvieran alineadas con los requisitos establecidos, minimizando el riesgo de desviaciones y asegurando que el resultado final cumpliría con las especificaciones y objetivos planteados inicialmente.

3.2. Metodología utilizada.

La metodología empleada en el presente proyecto de innovación se fundamentó en un enfoque sistemático y experimental, con el propósito central de diseñar, desarrollar e

implementar un prototipo funcional de un sistema de comunicación rural. Este sistema se concibe como una solución innovadora basada en tecnologías de antenas de alta ganancia, radioenlaces e integración de voz analógica sobre redes IP, buscando abordar eficazmente la brecha digital en zonas de difícil acceso.

3.2.1. Enfoque Metodológico

El enfoque metodológico adoptado para este proyecto fue el de Diseño y Desarrollo (D&D), una estrategia que se centra en la creación y perfeccionamiento de productos o sistemas. Este enfoque se articuló a través de las siguientes fases interconectadas:

Análisis de Requisitos y Especificaciones Técnicas

Inicialmente, se llevó a cabo un estudio exhaustivo para identificar las necesidades de comunicación de las comunidades rurales (en un entorno simulado o de estudio de caso), así como para definir los requisitos funcionales y no funcionales del sistema, incluyendo parámetros técnicos específicos para las antenas, los radioenlaces y la infraestructura VoIP.

Diseño del Sistema de Comunicación

Con base en los requisitos levantados, se procedió al diseño arquitectónico del sistema. Esto implicó la selección de las tecnologías más adecuadas (tipos de antenas, equipos de radioenlace, soluciones de telefonía IP), la definición de la topología de red y la planificación de la integración de componentes, incluyendo la fuente de energía solar.

Desarrollo y Construcción del Prototipo Funcional

Esta fase consistió en la implementación física del diseño. Se construyó un prototipo funcional del sistema de comunicación, considerando las especificaciones técnicas establecidas y las limitaciones inherentes al entorno rural (como la dispersión geográfica y la ausencia de infraestructura eléctrica) para preparar su futura experimentación.

Prueba del Prototipo

Una vez ensamblado, el prototipo fue sometido a una serie rigurosa de pruebas internas para verificar la funcionalidad de cada componente y subsistema de manera aislada, asegurando su correcto montaje y operación básica.

Evaluación y Validación del Sistema

Finalmente, se realizó una evaluación integral del rendimiento del prototipo en condiciones controladas, simulando escenarios rurales. Esta fase buscó validar que el sistema cumpliera con los requisitos técnicos y operativos definidos, y que sus funcionalidades se desempeñaran como se esperaba.

3.2.2. Métodos de Investigación

- **Experimentación:** se realizaron pruebas y experimentos con el prototipo.
- **Análisis de casos:** se analizaron casos de estudio de implementaciones similares.
- **Revisión bibliográfica:** se realizó una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre sistemas de comunicación rural y tecnologías relacionadas.

3.2.3. Herramientas y Técnicas

Técnicas de pruebas y validación

Las pruebas realizadas para evaluar el funcionamiento, rendimiento, estabilidad, seguridad y compatibilidad del sistema fueron exitosas. Se realizaron pruebas de funcionamiento para verificar que el sistema funcione correctamente y cumpla con los requisitos establecidos. Además, se realizaron pruebas de rendimiento para evaluar la velocidad de transmisión de datos y la calidad de la señal de voz.

Las pruebas de estabilidad también se realizaron para evaluar la capacidad del sistema para mantener su funcionamiento en diferentes condiciones. Asimismo, se realizaron pruebas de seguridad para evaluar la protección del sistema contra posibles amenazas.

Finalmente, se realizaron pruebas de compatibilidad para evaluar la capacidad del sistema para funcionar con diferentes dispositivos y sistemas operativos. En general, todas las pruebas demostraron que el sistema es estable, seguro, compatible y cumple con los requisitos establecidos, lo que garantiza su correcto funcionamiento en diferentes condiciones.

3.3. Actividades de Desarrollo de la innovación

3.3.1. Diseño y construcción de la innovación

El diseño y la subsiguiente construcción del prototipo de innovación se concibieron para ofrecer una solución robusta y autónoma a la problemática de la conectividad en zonas rurales remotas, caracterizadas por la ausencia de cobertura de telecomunicaciones tradicional y el limitado acceso a la red eléctrica. Este sistema de comunicación integra de manera estratégica tecnologías de antenas de alta ganancia, radioenlaces e integración de voz analógica sobre redes IP, estructurándose en una arquitectura de dos puntos interconectados: el Punto A y el Punto B.

El Punto A se concibe como la unidad de cabecera o “hub” del sistema, estratégicamente ubicado en una zona geográfica elevada, como picos o cerros, que, debido a su altitud y exposición, sí logran captar las señales de telefonía celular o internet provenientes de la antena más cercana (usualmente ubicada en la capital del distrito o en una zona con mayor infraestructura). Esta ubicación se considera de difícil acceso para la población. La función principal del Punto A es recibir y amplificar estas señales débiles mediante antenas de alta ganancia, y luego redistribuirlas hacia las áreas habitadas. Dada la inaccesibilidad de su ubicación, se diseñó para operar de manera completamente autónoma, incorporando un sistema de energía solar que garantiza su funcionamiento ininterrumpido sin depender de la red eléctrica convencional. Además, opera preferentemente en las frecuencias libres de 5 GHz para sus enlaces internos, buscando una mejor calidad de conexión y mayor ancho de banda en comparación con la banda de 2.4 GHz.

En contraste, el Punto B representa la unidad de distribución o “nodo de servicio” localizada directamente en las zonas habitadas de la comunidad rural, es decir, en los hogares, centros de salud, postas médicas o cualquier lugar donde las familias necesiten acceso inmediato a servicios de comunicación. Este punto se conecta con el Punto A mediante antenas de radioenlace de alta eficiencia, las cuales establecen una conexión inalámbrica estable para recibir la señal de internet y la telefonía IP que el Punto A ha captado y procesado. La integración de la tecnología de voz analógica sobre redes IP (VoIP) es fundamental aquí, ya que permite que los usuarios puedan realizar llamadas telefónicas utilizando sus dispositivos tradicionales, a través de la red digital IP.

La concepción de este sistema dual permite a los habitantes acceder a servicios de telefonía e internet directamente desde sus localidades, eliminando la necesidad de desplazarse por kilómetros y horas a la capital del distrito para comunicarse. Este escenario simulado refleja la realidad de muchas comunidades rurales con baja densidad poblacional en Perú, donde los anexos y caseríos carecen de cobertura de telecomunicaciones, a diferencia de sus capitales distritales. La capacidad de comunicación local se vuelve urgente, por ejemplo, en situaciones de emergencia médica, donde el acceso rápido a servicios de salud se ve gravemente obstaculizado por la falta de conectividad. Así, el diseño de este prototipo busca cerrar esta brecha digital, ofreciendo una solución de comunicación fiable, sostenible y adaptada a las complejidades del entorno rural.

3.3.2. Definición de los parámetros técnicos del sistema

La fase de diseño del sistema de comunicación rural involucró la meticulosa definición de parámetros técnicos clave, esenciales para asegurar la operatividad, el rendimiento y la fiabilidad del prototipo en el entorno simulado. Estos parámetros dictaron la configuración y la interconexión de los componentes, optimizando la transmisión de voz y datos en condiciones de conectividad limitada.

Parámetros de Captación de Señal Celular (Punto A):

En el Punto A, la antena de alta ganancia seleccionada está diseñada para operar con un amplio espectro de frecuencias móviles (4G LTE, 3G, 2G), garantizando la compatibilidad con diversas bandas utilizadas por las operadoras celulares (por ejemplo, bandas LTE de 700 MHz, 850 MHz, 900 MHz, 1700 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz). Esto asegura que el sistema pueda establecer una conexión con la infraestructura celular existente.

Durante las pruebas, la conexión establecida en el Punto A exhibió los siguientes parámetros que describen la calidad de la señal y la capacidad del enlace:

- **Nivel de Señal (RSRP - Reference Signal Received Power):** -101 dBm. Este valor indica la intensidad de la señal de radio recibida por la antena. Aunque muestra una señal débil, la capacidad de alta ganancia del equipo permite su uso.
- **Calidad de la Señal (RSRQ - Reference Signal Received Quality):** -12 dB. Este parámetro es fundamental, ya que evalúa la calidad de la señal considerando ruido e interferencia; un valor de “-12 dB (Bueno)” indica una señal suficientemente limpia y estable.
- **Banda y Frecuencia Central:** La conexión se estableció en la banda de 2600 MHz, con una frecuencia central de 2642.5 MHz, lo que es común para conexiones 4G de alta velocidad.
- **Ancho de Banda (LTE):** 15 MHz para descarga (DL) y 15 MHz para subida (UL). Este ancho de banda bidireccional es fundamental para soportar tráfico de voz IP y navegación web de forma eficiente.
- **Tecnología de Red Móvil:** LTE. Esto confirma el uso de la tecnología 4G, que optimiza la velocidad y eficiencia de la transmisión de datos.

Parámetros de Frecuencia y Potencia de los Radioenlaces (Punto A - Punto B):

Para la interconexión inalámbrica principal entre el Punto A y el Punto B, se definieron los siguientes parámetros operacionales para los radioenlaces:

- **Frecuencia Operacional:** La operación se estableció en la banda de 5 GHz (específicamente, 5185 MHz con un ancho de canal de 40 MHz). Esta banda es preferida para enlaces troncales por su menor saturación espectral y mayor capacidad de ancho de banda, lo que reduce la interferencia y mejora el rendimiento comparado con 2.4 GHz.
- **Potencia de Transmisión:** Se configuró una potencia de transmisión de 25 dBm. Este nivel de potencia, combinado con la ganancia de las antenas seleccionadas, asegura la fuerza de señal necesaria para establecer enlaces estables y de largo alcance.

Parámetros de Alcance del Radioenlace:

El sistema fue diseñado para proporcionar una conectividad robusta a grandes distancias. Los radioenlaces seleccionados son capaces de establecer conexiones inalámbricas fiables con un alcance efectivo de hasta 30 kilómetros en condiciones ideales de línea de vista directa (LOS). Esta capacidad de largo alcance es esencial para salvar las grandes distancias geográficas que suelen existir entre los puntos elevados de captación de señal y las comunidades rurales.

Parámetros de Conversión y Transmisión de Telefonía IP (VoIP):

La integración de la telefonía IP se basó en parámetros que permiten la conversión eficiente de voz analógica a digital y su transmisión a través de la red de datos.

- **Conversión de Voz:** Los dispositivos encargados (ATAs) realizan la digitalización de la señal de voz analógica proveniente de teléfonos convencionales, encapsulándola en paquetes IP para su transmisión por la red del radioenlace. Inversamente, reconvierten los paquetes de voz IP recibidos en señal analógica para los teléfonos.

- **Calidad de Servicio (QoS):** Se prioriza la configuración de la red para minimizar la latencia (retraso en la transmisión), el jitter (variación en el retardo de los paquetes) y la pérdida de paquetes. Estos parámetros son críticos para asegurar una calidad de voz inteligible y fluida, similar a la de una llamada telefónica tradicional.

Parámetros de Frecuencia del Access Point Local (Punto B):

Para la distribución de conectividad Wi-Fi a los dispositivos de los usuarios finales en el Punto B, el Access Point opera en la frecuencia de 2.4 GHz. Aunque con menor capacidad de ancho de banda que la de 5 GHz, esta banda ofrece una mayor penetración a través de obstáculos (paredes, mobiliario), siendo ideal para la cobertura dentro de hogares y establecimientos, además de garantizar la máxima compatibilidad con la vasta mayoría de dispositivos móviles y electrónicos.

3.3.3. Selección de los componentes del sistema:

La selección de cada componente del sistema fue el resultado de un análisis técnico detallado, buscando dispositivos que ofrecieran la mejor combinación de rendimiento, fiabilidad, durabilidad en entornos rurales y costo-efectividad. Los equipos elegidos forman la base física del prototipo y son esenciales para la implementación de su arquitectura de dos puntos autónomos.

Antena de Captación de Señal Celular (Punto A):

Se seleccionó la Antena/Módem 4G ELSYS EPRL15 Amplimax. Este equipo fue elegido por su alta ganancia integrada y su capacidad para operar como módem 4G/LTE todo en uno, lo que simplifica la instalación en el Punto A. Su robustez y diseño optimizado para captar señales débiles en áreas rurales lo hacen ideal como el “captador” principal de la conectividad de la operadora móvil más cercana.

Radioenlaces (Punto A y Punto B):

Para establecer el enlace inalámbrico principal y de alta capacidad entre el Punto A y el Punto B, se eligieron los radioenlaces UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23. Su selección se basó en su diseño ligero y compacto, su alta ganancia direccional (23 dBi) para enlaces de larga distancia, y su capacidad de operación en la banda de 5 GHz. Estos equipos ofrecen un rendimiento excepcional en entornos punto a punto, lo cual es vital para asegurar un “backbone” de datos fiable y de alto rendimiento entre los dos puntos estratégicos del sistema.

Equipos de Voz Analógica sobre Redes IP (VoIP - Puntos A y B):

Para la integración de la telefonía sobre la red IP, y permitir la comunicación de voz desde y hacia los teléfonos analógicos de los usuarios, se utilizaron los Adaptadores de Teléfono Analógico (ATA) Grandstream HT813 y Grandstream HT802. Estos dispositivos son esenciales para la conversión de señales y la gestión de llamadas VoIP en ambos puntos del sistema:

- **HT813 en el Punto A (Hub Principal):** El Grandstream HT813 fue seleccionado para ser el dispositivo de enlace de la telefonía en el Punto A. Este ATA es versátil, ya que cuenta con un puerto FXO (Foreign Exchange Office) y un puerto FXS (Foreign Exchange Subscriber). La función principal del puerto FXO es la de permitir la conexión a una línea telefónica analógica convencional (PSTN), que proviene del módem 4G (ELSYS). En este sistema, el HT813 actúa como la “puerta de enlace” para la voz IP. Si se recibe una llamada a través de la conexión 4G (ya sea voz sobre LTE – VoLTE), el HT813 es el encargado de gestionarla y enviarla a través de la red del radioenlace hacia el Punto B convertida en paquetes de voz IP. El puerto FXS podría ser utilizado para conectar un teléfono analógico de prueba o de uso local en el Punto A.
- **HT802 en el Punto B (Punto de Servicio Local):** El Grandstream HT802 fue implementado en el Punto B. Este ATA cuenta con dos puertos FXS. Un puerto FXS

permite conectar directamente un teléfono analógico estándar (el teléfono tradicional que usaría una familia en su hogar o en una posta de salud). Cuando un usuario descuelga el teléfono, el HT802 convierte la señal de voz analógica en paquetes de datos digitales (IP) y los envía a través de la red de radioenlaces hacia el Punto A y, desde allí, hacia su destino final (por ejemplo, la red celular a través del ELSYS si es una llamada externa). Inversamente, al recibir paquetes de voz IP desde el Punto A, el HT802 los reconvierte a señal de voz analógica para que el teléfono del usuario suene y se pueda establecer la conversación.

- **Compatibilidad y Fiabilidad:** Ambos equipos fueron elegidos por su fiabilidad comprobada en entornos de red, su capacidad para convertir señales de voz analógicas a digitales (y viceversa) de forma eficiente, y su compatibilidad con estándares de VoIP como SIP (Session Initiation Protocol). SIP es un protocolo de señalización que permite establecer, modificar y terminar sesiones de comunicación multimedia en tiempo real, incluyendo llamadas de voz, siendo el “lenguaje” que utilizan estos ATAs y otros dispositivos VoIP para gestionar el inicio y fin de una llamada. La elección de estos ATAs asegura una interfaz fluida entre los teléfonos analógicos existentes y la infraestructura de red IP del sistema.

Access Point para Distribución Local (Punto B):

Para proporcionar conectividad Wi-Fi a los usuarios finales dentro de las áreas habitadas del Punto B, se implementó el Router Ethernet Wireless TP-Link TL-WR850N configurado en modo Access Point. Este equipo fue seleccionado por su accesibilidad, facilidad de configuración y su amplia compatibilidad con la mayoría de los dispositivos Wi-Fi personales que operan en la banda de 2.4 GHz, asegurando una cobertura local efectiva y una interfaz amigable para los usuarios.

Componentes del Sistema de Energía Solar (Puntos A y B):

Dada la necesidad crítica de autonomía energética en las ubicaciones remotas, ambos puntos (A y B) del sistema de comunicación están equipados con un sistema fotovoltaico autónomo. Los componentes seleccionados, son los siguientes:

- **Controlador de Carga:** Se utilizó el modelo LDSOLAR SD2410C. Este regulador es fundamental para proteger y optimizar el proceso de carga de las baterías. Sus características incluyen una corriente máxima de 10A, compatibilidad con sistemas de 12V/24V (detección automática), puertos USB de 5V 1A para carga de dispositivos pequeños, y una capacidad máxima de entrada de potencia fotovoltaica de 150W para sistemas de 12V y 300W para sistemas de 24V.
- **Inversor:** El sistema incorpora un inversor de corriente SOLTRONIX de Onda Senoidal Modificada. Este dispositivo es responsable de transformar la corriente continua (DC) proveniente de las baterías en corriente alterna (AC) de 230V, necesaria para alimentar los equipos de telecomunicaciones. Ofrece una potencia continua de 300W y una capacidad de pico (surge) de 600W, lo que garantiza el suministro estable incluso en momentos de mayor demanda energética.
- **Paneles Solares:** Se seleccionaron paneles solares SUNSHIN de 40W. Estos paneles fotovoltaicos son los encargados de la generación de energía. Con una potencia nominal de 40 Watts, de celda monocristalina. Exhiben un voltaje de circuito abierto (Voc) aproximado de 20-22V y una corriente de cortocircuito (Isc) de 2.5-3A, con un voltaje de máxima potencia (Vmp) de 17-18V y una corriente de máxima potencia (Imp) de 2.2-2.4A. Son ideales para la carga de baterías en sistemas solares aislados (off-grid).
- **Batería:** Para el almacenamiento de la energía generada, se utilizó una batería VoltPower de 18 Ah. Esta batería de 12V (capacidad nominal de Amperios-hora) es para asegurar la autonomía del sistema durante la noche o en periodos de baja irradiancia solar. El tipo de

batería (sellada de plomo-ácido, AGM o GEL, preferentemente de ciclo profundo) es importante para su rendimiento y vida útil en aplicaciones solares.

3.3.4. Construcción del Prototipo

La fase de construcción del prototipo fue la materialización física del diseño conceptual y la selección de componentes previamente definidos. Este proceso implicó el ensamblaje y la interconexión de todos los equipos y sistemas para crear una unidad funcional capaz de demostrar la viabilidad y eficacia de la solución de comunicación en un entorno simulado de área rural.

Ilustración 1

Revisión de la documentación técnica y manuales de los equipos



La construcción se centró en la integración física de los dos nodos principales del sistema: el Punto A (Hub de Captación) y el Punto B (Punto de Servicio Local). Se procedió al montaje de los componentes seleccionados, asegurando su correcta disposición y protección para un funcionamiento óptimo.

En el Punto A, se instaló la antena/módem 4G ELSYS Amplimax, orientándola adecuadamente para la captación óptima de la señal celular disponible. Junto a esta, se montó una unidad del radioenlace UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23, encargada de establecer la conexión de alta capacidad con el Punto B.

Ilustración 2

Instalación del ELSYS Amplimax y UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23 (Punto A)



Adicionalmente, se integró el sistema de energía solar autónomo, incluyendo un panel fotovoltaico, el controlador de carga, el inversor y la batería, para alimentar de forma continua todos los equipos en esta ubicación remota.

En el Punto B, se ensambló la segunda unidad del radioenlace UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23 para recibir la señal del Punto A.

Ilustración 3

Montaje y Conexión de Componentes (Punto B)



Posteriormente, se integraron los equipos de voz analógica sobre redes IP (ATAs Grandstream HT813 en el Punto A y HT802 en el Punto B) para la conversión y gestión de las llamadas de voz, y el Access Point TP-Link TL-WR850N para la distribución local de Wi-Fi a los dispositivos de los usuarios. De manera similar al Punto A, el Punto B también se dotó de su propio sistema de energía solar para garantizar su autonomía.

Una vez finalizado el ensamblaje físico, se llevó a cabo una configuración inicial detallada de cada equipo y de la red en su conjunto. Esto incluyó la asignación de direcciones

IP, la definición de máscaras de subred, la configuración de rutas de gateway y la parametrización específica de los radioenlaces para establecer la conectividad punto a punto. Asimismo, se configuraron los servicios VoIP en los ATAs y el Access Point para la provisión de acceso a internet local.

Configuración Dispositivo ELSYS EPRL15 Amplimax Modem 4G

El ELSYS EPRL15 Amplimax Modem 4G fue configurado como el router principal de la red, actuando como el punto de entrada a Internet y gestionando la distribución de direcciones IP. Su configuración de red se estableció de la siguiente manera:

- **Dirección IP:** 192.168.1.1
- **Máscara de Red:** 255.255.255.0
- **Servidor DHCP:** Habilitado, con un rango de direcciones IP automáticas para clientes desde 192.168.1.100 hasta 192.168.1.200.

Ilustración 4

Configuración del Dispositivo ELSYS EPRL15 Amplimax Modem 4G

The screenshot displays the configuration interface for the ELSYS Amplimax Modem 4G. The top navigation bar includes the ELSYS logo, the 'ampli max' brand name, and several menu items: 'Estado del sistema', 'Configuración de conexión' (highlighted with a gear icon), 'Configuración general', 'Ajustes de llamada', 'Utilidades', and 'Acerca del dispositivo'. Below the navigation bar, a series of tabs are visible: 'Conexión Celular', 'Puerto Ethernet' (selected), 'DDNS', 'DMZ', 'QoS', 'Filtros', and 'Redireccionamiento de puertos'. The 'Puerto Ethernet' tab contains the following configuration fields:

- Dirección IP:** 192.168.1.1
- Máscara de red:** 255.255.255.0
- DHCP:** Servidor (selected from a dropdown)
- Rango para cliente DHCP:** 192.168.1.100 to 192.168.1.200, with a 'Ver clientes' button.
- Tiempo de concesión de DHCP:** 480 (1 ~ 10080 minutos)
- DHCP Estático:** Configuración DHCP Estático (button)
- Nombre del dominio:** Red
- 802.1d Spanning Tree:** Deshabilitado (dropdown)
- Clonación Dirección MAC:** 000000000000

At the bottom left of the configuration area is a button labeled 'Aplicar cambios'.

Para asegurar la estabilidad y el correcto funcionamiento de los componentes críticos del sistema, como los Adaptadores de Teléfono Analógico (ATAs), las antenas del radioenlace (UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23) y el Access Point (TP-Link WR850N), se les asignaron direcciones IP fijas. Otros dispositivos que se conectaran a la red, como celulares o computadoras, obtendrían su dirección IP de forma automática a través del servidor DHCP del Amplimax.

Configuración Dispositivo Grandstream HT813

El Adaptador de Teléfono Analógico (ATA) Grandstream HT813 (Modelo de Producto: HT813) fue configurado como un componente central para la integración de la telefonía analógica en la red VoIP del sistema. Se le asignó una dirección IP fija dentro del segmento de red, siendo esta la 192.168.1.2. Esta dirección estática no solo asegura su propia conectividad, sino que, fue establecida como el Servidor SIP Primario para la configuración del Grandstream HT802. Esto permite la registración del HT802 y la comunicación VoIP entre los diferentes puntos de la red.

Como parte de la verificación operativa y configuración, se confirmó que los puertos del HT813 estaban en estado funcional: el puerto FXS (para conexión de teléfono analógico) en estado 'On Hook' (colgado) y el puerto FXO (para línea PSTN) en 'Idle' (inactivo). Esto garantizó que el HT813 estaba listo para recibir y procesar las conexiones SIP de otros dispositivos y gestionar las llamadas, actuando como un punto de interconexión para el servicio de voz en el prototipo.

Ilustración 5

Configuración Dispositivo Grandstream HT813

Grandstream Device Configuration																
STATUS	BASIC SETTINGS	ADVANCED SETTINGS	FXS PORT	FXO PORT												
MAC Address: WAN -- EC:74:D7:41:C3:29 LAN -- EC:74:D7:41:C3:28 (Device MAC)																
WAN IPv4 Address: 192.168.1.2																
WAN IPv6 Address:																
Product Model: HT813																
Serial Number: 34704UD1EE																
Hardware Version: V1.1E Part Number -- 9610006311E																
Software Version: <table border="1"> <tr> <td>Boot</td> <td>1.0.17.1</td> </tr> <tr> <td>Core</td> <td>1.0.17.1</td> </tr> <tr> <td>Base</td> <td>1.0.17.3</td> </tr> <tr> <td>Prog</td> <td>1.0.17.3</td> </tr> <tr> <td>CPE</td> <td>1.0.4.60</td> </tr> </table>					Boot	1.0.17.1	Core	1.0.17.1	Base	1.0.17.3	Prog	1.0.17.3	CPE	1.0.4.60		
Boot	1.0.17.1															
Core	1.0.17.1															
Base	1.0.17.3															
Prog	1.0.17.3															
CPE	1.0.4.60															
Software Status: Running Mem: 21684																
System Up Time: 11:28:58 up 33 min																
PPPoE Link Up: Disabled																
NAT: Unknown NAT																
Certificate Type: RSA+SHA256																
Port Status: <table border="1"> <tr> <td>Port</td> <td>Hook</td> <td>User ID</td> <td>Registration</td> </tr> <tr> <td>FXS</td> <td>On Hook</td> <td></td> <td>Not Registered</td> </tr> <tr> <td>FXO</td> <td>Idle</td> <td>200</td> <td>Not Registered</td> </tr> </table>					Port	Hook	User ID	Registration	FXS	On Hook		Not Registered	FXO	Idle	200	Not Registered
Port	Hook	User ID	Registration													
FXS	On Hook		Not Registered													
FXO	Idle	200	Not Registered													
Port Options: <table border="1"> <tr> <td>Port</td> <td>DND</td> <td>Forward</td> <td>Busy Forward</td> <td>Delayed Forward</td> </tr> <tr> <td>FXS</td> <td>No</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					Port	DND	Forward	Busy Forward	Delayed Forward	FXS	No					
Port	DND	Forward	Busy Forward	Delayed Forward												
FXS	No															
Provision: Not running. Last status : Downloading file from url.																
Core Dump: Clean																

All Rights Reserved Grandstream Networks, Inc. 2006-2024

Configuración Dispositivo Grandstream HT802

El Grandstream HT802 es otro Adaptador de Teléfono Analógico (ATA) fundamental para extender los servicios de telefonía VoIP a los dispositivos analógicos en la red. Para asegurar su operatividad y visibilidad dentro de la infraestructura, se le asignó una dirección IP fija específica, siendo esta la 192.168.1.5, lo que lo diferencia de la asignación dinámica de otros dispositivos y asegura su estabilidad.

Para permitir la comunicación VoIP con el resto de la red, especialmente con el HT813, se configuró una cuenta SIP en el HT802. La cuenta se activó con el ID Usuario SIP: 200 y ID Autenticación: 200. El Servidor SIP Primario se configuró a la dirección IP del Grandstream

HT813 (192.168.1.2), utilizando el transporte UDP. Esta configuración permite al HT802 registrarse con el HT813 (que actúa como un registro SIP o puerta de enlace) para enrutar las llamadas de voz.

Se aseguró que los puertos FXS (diseñados para la conexión de teléfonos analógicos) mostraran “Conectado” para FXS 1, asociado al ID de usuario SIP 200, y también “Conectado” para FXS 2. Esto confirmó que ambos puertos estaban funcionalmente listos para integrar los teléfonos analógicos al sistema de Voz sobre IP. La conectividad de red del dispositivo también se confirmó con el “Estado del cable de red” indicando Up 100Mbps Full.

Ilustración 6

Configuración Dispositivo Grandstream HT802

Configuración Dispositivo Grandstream							
ESTADO AJUSTES BÁSICOS AJUSTES AVANZADOS PUERTO FXS 1 PUERTO FXS 2							
Dirección MAC: C0:74:AD:F2:41:C2							
Dirección IPv4: 192.168.1.5							
Dirección IPv6:							
Dirección VPN IPv4:							
Dirección VPN IPv6:							
Modelo de Producto: HT802							
Número Serial: 207GHR3P80F241C2							
Versión Hardware: V2.1A Número de parte -- 9610003721A							
Versión Software:							
Boot 1.0.43.2							
Core 1.0.43.5							
Base 1.0.43.10							
Prog 1.0.43.11							
CPE 1.0.4.33							
Estado de Software: Ejecutándose Memoria: 21756							
Tiempo de Sistema: 11:26:56 up 38 min							
Carga de la CPU: 35%							
Estado del cable de red: Up 100Mbps Full							
PPPoE Link Up: Deshabilitado							
NAT: NAT Desconocido							
Generación de certificados individuales: GEN 2 (SHA-384 + ECDSA)							
Estado de Puertos:							
Puerto	Hook	ID Usuario	Registro				
FXS 1	Conectado	200	No Registrado				
FXS 2	Conectado		No Registrado				
Opciones de Puertos:							
Puerto	DND	Desvío	Desvío Ocupado	Desvío con retardo	CID	Llamada en Espera	SRTP
FXS 1	No				Sí	Sí	No
FXS 2	No				Sí	Sí	No

Ilustración 7

Configuración de la Cuenta SIP del Grandstream HT802

Configuración Dispositivo Grandstream	
ESTADO AJUSTES BÁSICOS AJUSTES AVANZADOS PUERTO FXS 1 PUERTO FXS 2	
Activar Cuenta:	☐ No ☒ Si
Servidor SIP Primario:	192.168.1.2 (ej, sip.mycompany.com, o dirección IP)
Servidor SIP Respaldo:	(Opcional, se usa cuando el servidor primario no responde)
Preferir Servidor SIP Primario:	☒ No ☐ Si (Si - se registra en el Servidor Primario si caduca el registro del Servidor de Respaldo)
Proxy de Salida:	(ej, proxy.myprovider.com, o dirección IP)
Proxy de Salida de Respaldo:	(ej, proxy.myprovider.com, o dirección IP)
Preferir Proxy de Salida Primario:	☒ No ☐ Si (Si - se registrará a través del Proxy de Salida Primario si el registro expira)
Desde Dominio:	(Opcional, nombre de dominio real, anulará el encabezado from)
Permitir la opción DHCP 120 (cambiar el servidor SIP):	☒ No ☐ Si
Transporte SIP:	☒ UDP ☐ TCP ☐ TLS (por defecto es UDP)
Esquema de URI de SIP al usar TLS:	☐ sip ☒ sips
Utilice Puerto Efímero Actual en Contacto con TCP/TLS:	☒ No ☐ Si
NAT Traversal:	☒ No ☐ Keep-Alive ☐ STUN ☐ UPnP ☐ VPN
ID Usuario SIP:	200 (la parte del usuario de una dirección SIP)
ID Autenticación:	200 (puede ser idéntico o diferente al ID de usuario SIP)
Autenticar contraseña:	(deliberadamente no se muestra por seguridad)
Nombre:	200 (Opcional, ej, John Doe)
Modo DNS:	☒ A Record ☐ SRV ☐ NAPTR/SRV ☐ Utilice IP configurada
Usar IP Registrada en DNS SRV:	☒ No ☐ Si
Modo de DNS SRV Failover:	Por defecto
Temporizador de Failback:	60 (en minutos. Por defecto 60 minutos, max 45 días)
Registrarse antes DNS SRV Failover:	☒ No ☐ Si

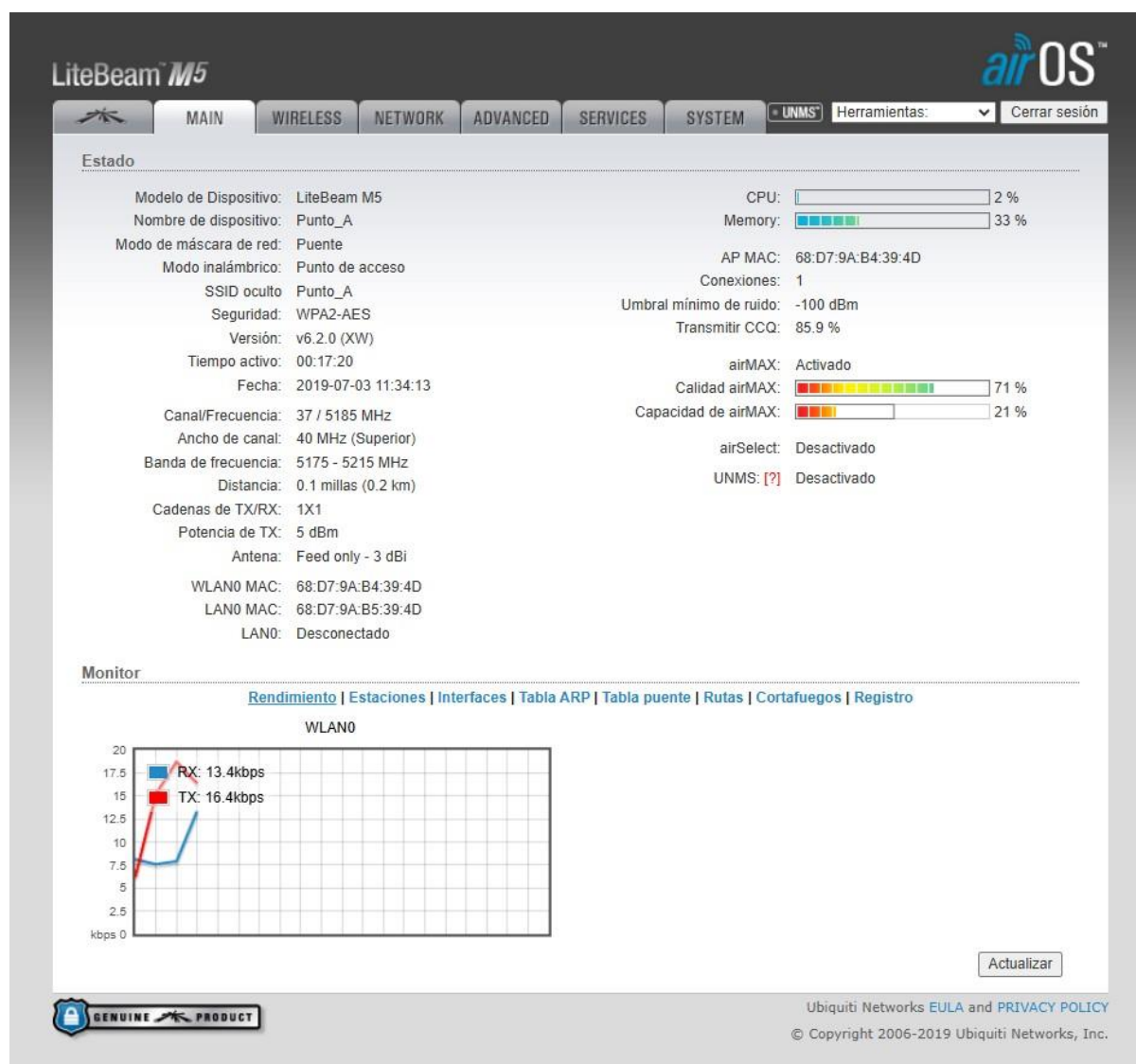
Configuración del Radioenlace UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23 (Punto A)

El dispositivo UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23, ubicado en el Punto A, fue configurado para establecer la base del radioenlace inalámbrico. Se le asignó el Nombre de Dispositivo: Punto_A y se estableció su Modo de Red: como Puente (Bridge). Su Modo Inalámbrico se configuró como Punto de Acceso, lo que le permite emitir la señal para que el Punto B se conecte. Para su gestión y operación dentro de la red, se le asignó una dirección IP fija: 192.168.1.3.

Esta configuración inicial garantiza que el Punto A transmita la señal de red de manera segura y eficiente, formando el segmento principal del backbone inalámbrico del sistema.

Ilustración 8

Configuración del Radioenlace UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23 (Punto A)



Configuración del Radioenlace UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23 (Punto B)

El dispositivo UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23 en el Punto B fue configurado para operar como la estación receptora (Modo Inalámbrico: Estación) del radioenlace, conectándose

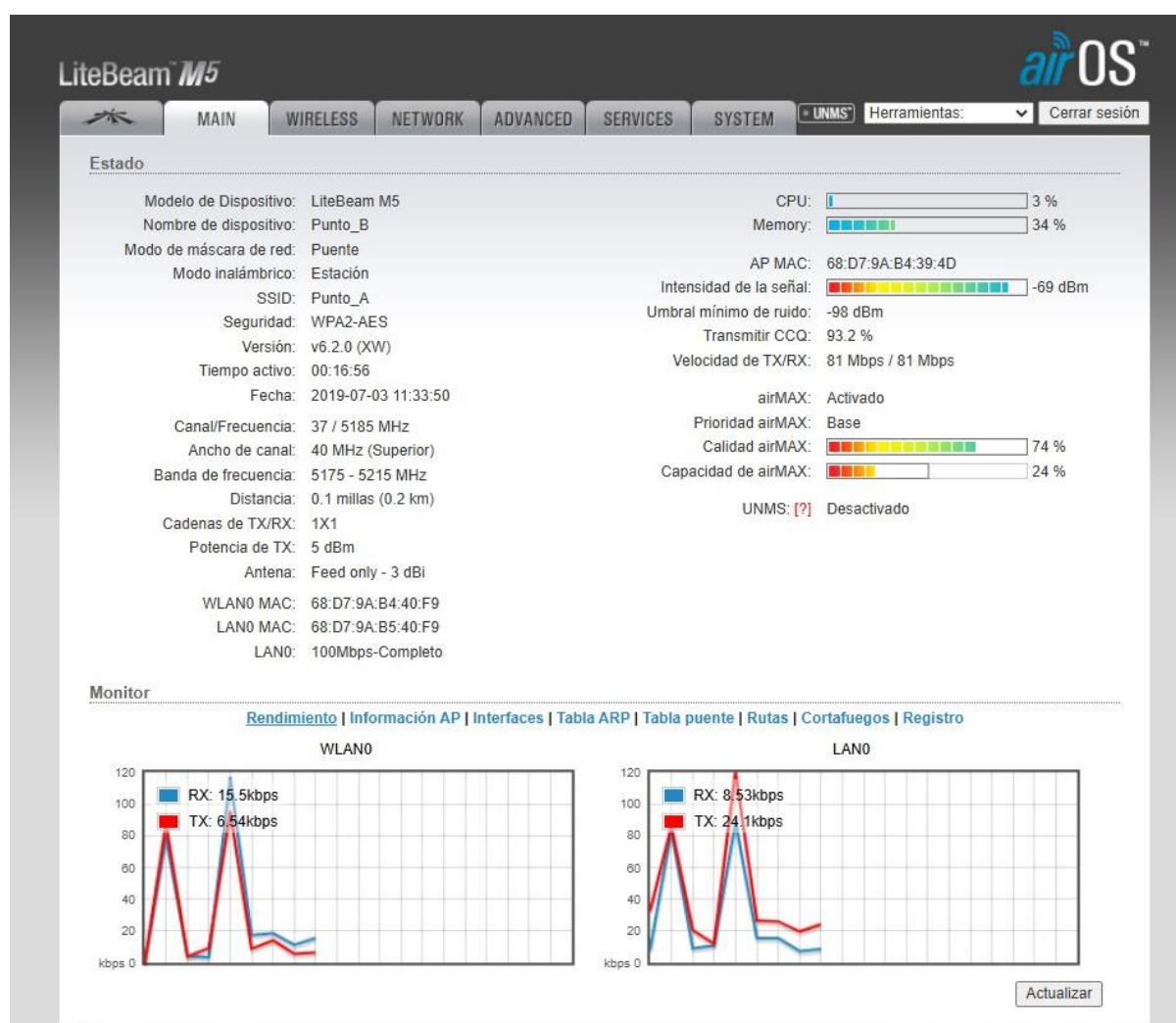
directamente al Punto A. Se le asignó el Nombre de Dispositivo: Punto_B. Para su integración en la red, se le asignó una dirección IP fija: 192.168.1.4.

Su configuración inalámbrica se parametrizó para coincidir con el Punto A, asegurando el establecimiento exitoso del enlace:

Una vez establecido el enlace, se observaron excelentes métricas de conexión, como una Intensidad de la señal de -69 dBm y una Calidad airMAX del 74%, lo que confirma un rendimiento robusto y estable para la transmisión de datos desde el Punto A.

Ilustración 9

Configuración del Radioenlace UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23 (Punto B)



Configuración del Access Point (TP-Link TL-WR850N)

El Access Point TP-Link TL-WR850N fue configurado para operar exclusivamente como un punto de acceso inalámbrico en el Punto B, permitiendo la conexión de dispositivos finales (celulares, laptops, etc.) a la red. Se le asignó una dirección IP fija: 192.168.1.6, lo que garantiza su estabilidad y fácil gestión dentro de la red local.

El Access Point no fue configurado para distribuir direcciones IP mediante DHCP. Esta función quedó centralizada en el Amplimax, asegurando que todos los dispositivos que se conectaran a la red (ya sea por cable o Wi-Fi a través de este AP) recibieran sus direcciones IP del servidor DHCP principal del sistema.

Ilustración 10

Configuración del Access Point (TP-Link TL-WR850N)



Esta etapa de construcción y configuración culminó con un prototipo funcional y físicamente robusto, listo para ser sometido a las pruebas exhaustivas que verificarían su rendimiento, estabilidad y la capacidad de cumplir con los objetivos del proyecto en un escenario de uso real simulado.

Ilustración 11

Prototipo funcional Punto B



3.3.5. Componentes y Materiales Utilizados

Esta sección detalla los componentes y materiales específicos utilizados en la construcción del prototipo, organizados según si son comunes a ambos puntos del sistema o si son exclusivos de cada ubicación.

Componentes Específicos del Sistema Punto A (Hub de Captación)

Este punto aloja los equipos encargados de la captación de la señal móvil y el enlace primario de voz sobre IP.

Tabla 1

Antena de alta ganancia (ELSYS EPRL15 Amplimax Modem 4G)

Imagen	Especificaciones Técnicas
	Tensión de Alimentación: 12 a 24VDC. Bandas de Frecuencia Soportadas: - 2G (850/900/1800/1900 MHz) - 3G (850/900/1900/2100 MHz) - 4G (LTE: 700/850/900/1700/1800/1900/2100/2600 MHz).
	Tasa de Transmisión de Datos (Máx): - LTE R9 (DL/UL): 70Mbps Max (DL) / 50Mbps Max (UL). - HSPA R6 (DL/UL): 21Mbps Max (DL) / 5.76Mbps Max (UL). - UMTS R99 (DL/UL): 384Kbps Max (DL) / 384Kbps Max (UL). - EDGE (DL/UL): 236.8Kbps Max (DL) / 236.8Kbps Max (UL). - GPRS (DL/UL): 85.6Kbps Max (DL) / 85.6Kbps Max (UL). Temperatura de Operación: -10°C ~ 60°C. Puerto Ethernet: Conector RJ45, IEEE 802.3 - Ethernet 10/100Mbps. Longitud Máxima del Cable RJ45: - Con Fuente original 24 VDC / 0,75A: 100 metros. - Con Fuente o Batería 12 VDC / 1,5 A: 15 metros. Puerto Telefónico: Conector RJ11 Longitud Máxima del Cable Telefónico RJ11 y Extensiones: 100 metros. Antena Direccional Principal (Ganancia): - 700 a 960 MHz: 6 dBi. - 1700 a 1910 MHz: 7,9 dBi. - 1920 a 2700 MHz: 10 dBi (1920 MHz), 10 dBi (2310 MHz) y 8 dBi (2700 MHz)..

Función Principal: Captación y procesamiento de señales 4G/3G/2G de operadoras móviles, y su conversión a una señal Ethernet. Integra las funciones de antena, módem y router.

Tabla 2

Equipo de voz analógica sobre redes IP (Grandstream HT813)

Imagen	Especificaciones Técnicas
	Tipo de Equipo: Adaptador de Teléfono Analógico (ATA) Híbrido. Puertos: 1 puerto FXS, 1 puerto FXO. Perfiles SIP: Soporta 2 perfiles SIP a través de 1 puerto FXS y 1 puerto FXO. Puertos de Red: Doble puerto LAN y WAN de 100Mbps. Conferencias: Soporta conferencias de voz de 3 vías por puerto. Aprovisionamiento: Opciones de aprovisionamiento automatizado y seguro usando TR-069. Seguridad: Fuerte cifrado AES con certificado de seguridad por unidad. Función: Gateway FXO para integración con líneas PSTN o recepción de troncales SIP, y puerto FXS para conexión de teléfono analógico local.
Función Principal: Convertir la señal telefónica del módem ELSYS Amplimax en paquetes de voz IP.	

Tabla 3

Switch de red de 5 puertos (TP-LINK TL-SF1005D)

Imagen	Especificaciones Técnicas
	Tipo: Switch no gestionado. Interfaz: 5 puertos RJ45 a 10/100 Mbps, con Negociación automática y MDI/MDIX automático. Fuente: 5.0VDC / 0.6A. Dimensiones (W x D x H): 103.5 x 70 x 22 mm. Consumo de Potencia Máximo: 1.87W. Método de Transmisión: Store and Forward. Certificaciones: FCC, CE, RoHS. Temperatura de Funcionamiento: 0°C~40°C (32°F~104°F). Humedad de Funcionamiento: 10%~90% sin condensación.
Función Principal: Proporcionar conectividad cableada para equipos Ethernet.	

Componentes Específicos del Sistema Punto B (Punto de Servicio Local)

Este punto está diseñado para la distribución local de los servicios de comunicación a los usuarios finales.

Tabla 4

Equipo de voz analógica sobre redes IP (Grandstream HT802)

Imagen	Especificaciones Técnicas
	Tipo de Equipo: Adaptador de Teléfono Analógico (ATA) de 2 puertos. Puertos: 2 puertos FXS. Perfiles SIP: Soporta 2 perfiles SIP a través de 2 puertos FXS y un único puerto de red 10/100Mbps. Seguridad: Tecnología de cifrado TLS y SRTP para proteger llamadas y cuentas. Identificador de Llamadas: Soporta una amplia gama de formatos de identificador de llamadas. Provisionamiento: Utilizable con la serie UCM de IP PBXs de Grandstream para aprovisionamiento simplificado.

Función Principal: Convertir la señal de voz IP recibida en señal analógica y viceversa.

Tabla 5

Access Point (Router Ethernet Wireless TP-Link TL-WR850N)

Imagen	Especificaciones Técnicas
	Interfaces: 4 puertos LAN 10/100Mbps, 1 puerto WAN 10/100Mbps. Fuente: 9VDC / 0.6A. Estándares Inalámbricos: IEEE 802.11n, IEEE 802.11g, IEEE 802.11b. Frecuencia: 2.4-2.4835 GHz. Seguridad Inalámbrica: 64/128-bit WEP, WPA / WPA2, WPA-PSK / WPA2-PSK. Seguridad de Cortafuegos: DoS, Firewall SPI, Filtro de Dirección IP/Filtro de Dirección MAC/Filtro de Dominio, Enlace de Dirección IP y MAC. Protocolos: Soporte IPv4 e IPv6. Certificación: CE, RoHS.

Función Principal: Operar como un punto de acceso inalámbrico para los usuarios finales.

Tabla 6

Terminal Telefónico Analógico Genérico

Imagen	Especificaciones Técnicas
	Tipo de Equipo: Dispositivo de usuario final telefónico analógico. Interfaz: Puerto RJ11 para la conexión a la línea telefónica. Funcionalidad: Marcación por tonos (DTMF) Alimentación: Se alimenta de la línea telefónica (no requiere alimentación externa) Características Típicas: timbre, funciones básicas de llamadas (descolgar, colgar).
Función Principal: <i>Dispositivo de usuario final para realizar y recibir llamadas.</i>	

Componentes Comunes (Punto A y Punto B)

Los siguientes componentes, con sus respectivas especificaciones técnicas, se emplearon de manera idéntica en ambos nodos del sistema (Punto A y Punto B) para asegurar la uniformidad en el rendimiento y la autonomía energética:

Tabla 7

Radioenlace (UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23)

Imagen	Especificaciones Técnicas
	Procesador: Atheros MIPS 74Kc, 533MHz. Memoria: 64 MB. Interfaz de red: 1 puerto Ethernet 10/100. Antena: 23 dBi, con tecnología InnerFeed. Potencia de transmisión: 25 dBm (25dBm). Rango de frecuencia: 5 GHz (5150-5875 MHz). Modos de operación: Punto a punto (PtP) y punto a multipunto (PtMP). Seguridad: WPA2 con cifrado AES. Fuente de alimentación: PoE 24V, 0.2A. Temperatura de operación: -40 a 70°C. Dimensiones: 362 x 267 x 184 mm. Peso: 750 g. Rendimiento: Hasta 100+ Mbps. Alcance máximo: 30+ km Resistencia al viento: 200 km/h. Protección ESD/EMP: ± 24 kV contacto/aire.
Función Principal: <i>Establecer el enlace inalámbrico entre el Punto A y el Punto B.</i>	

Tabla 8

Panel Solar (SUNSHIN 40W)

Imagen	Especificaciones Técnicas
	Potencia Nominal: 40 Watts. Tipo de Celda: Monocristalino Voltaje de Circuito Abierto (Voc): Aprox. 20-22V (para un panel de 12V). Corriente de Cortocircuito (Isc): Aprox. 2.5-3A. Voltaje de Máxima Potencia (Vmp): Aprox. 17-18V. Corriente de Máxima Potencia (Imp): Aprox. 2.2-2.4A.

Función Principal: Carga de baterías en sistemas solares off-grid.

Tabla 9

Regulador de Carga (LDSOLAR SD2410C)

Imagen	Especificaciones Técnicas
	Modelo: SD2410C (Serie Sky Dream). Tecnología: PWM (Pulse Width Modulation). Corriente Nominal de Carga/Descarga: 10A. Voltaje del Sistema: 12V/24V DC (Identificación automática). Máximo Voltaje de Entrada PV: 55V. Autoconsumo: <10mA. Salida USB: 5V 1A Tipos de Batería Soportados: Sellada (predeterminado), Gel, Inundada, Litio (LiFePO4, Li(NiCoMn)O2). Carga en 3 Etapas: Bulk (carga masiva), Boost (carga de refuerzo), Float (flotación). Compensación de Temperatura: Sí. Protecciones: Sobrecarga, sobredescarga, sobrecorriente de carga, cortocircuito, conexión inversa, sobrecalentamiento del controlador, sobretensión PV. Grado de Protección: IP32.

Función Principal: Proteger las baterías de sobrecargas y descargas excesivas.

Tabla 10

Inversor (SOLTRONIX)

Imagen	Especificaciones Técnicas
	Tipo de Onda: Onda Senoidal Modificada. Voltaje de Entrada (Continua): 10-16 VCC. Potencia Nominal: 300W. Potencia Pico (2S): 600W. Voltaje de Salida (Alterna): 230 VAC. Frecuencia: 60 Hz. Consumo Sin Carga: <0.21A. Alarma por Batería Baja: 10.8 V $\pm$ 0.5V. Corte por Batería Baja: 10.0 V $\pm$ 0.5V. Corte por Batería Alta: 16.0 V $\pm$ 0.5V. Eficiencia: >88%. Dimensiones: 120 x 105 x 52 mm. Peso: 0.65 Kg.

Función Principal: Conversión de corriente continua (DC) a corriente alterna (AC).

Tabla 11

Batería (VoltPower 18Ah)

Imagen	Especificaciones Técnicas
	Modelo: 6FM18. Voltaje Nominal: 12 Volt. Capacidad Nominal: 18 Ah. Tipo de Batería: Sellada de plomo-ácido (Sealed Lead-Acid Battery). Voltaje uso en Ciclo: 14.50-14.90V. Voltaje uso en Standby: 13.60-13.80V. Corriente Máxima de Carga: 6.0A. Certificaciones: CE, ISO.

Función Principal: Almacenamiento de energía para asegurar autonomía del sistema.

3.3.6. Determinación de Costos

Según el planteamiento, el desarrollo del proyecto consideraba un equipo multidisciplinario y materiales que a continuación, se describen:

Tabla 12*Recursos Humanos*

Cargo	Funciones Principales	Horas Requeridas
Estudiante con conocimientos en Tecnologías de la Información (TI)	Responsable del diseño y configuración del sistema de comunicación	48
Estudiante con conocimientos en Redes de Comunicación	Responsable de la instalación de los equipos de comunicación	52
Estudiante con conocimientos en Energía Solar	Responsable de la selección y configuración de los componentes de energía solar	47
Estudiante con conocimientos en Análisis de Sistemas	Responsable de la integración y pruebas del sistema	53
Estudiante con conocimientos en Documentación Técnica	Responsable de la creación de documentación técnica y manual de usuario	42
Docente Asesor	Encargado de la revisión, asesoría y supervisión de la ejecución del proyecto	12

Tabla 13*Recursos Materiales*

Categoría	Descripción	Cantidad	Aplicación
Equipos de Comunicación	ELSYS EPRL15 Amplimax Modem 4G	1 unidad	Punto A (Acceso celular)
	Grandstream HT813 Adaptador de Teléfono Analógico (ATA) Híbrido	1 unidad	Punto A (Conversión de voz Amplimax a IP, y FXS local)
	Grandstream HT802 Adaptador de Teléfono Analógico (ATA)	1 unidad	Punto B (Conversión de IP a voz analógica)
	UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23 Radioenlace (CPE)	2 unidades	Uno en Punto A, uno en Punto B (Comunicación inalámbrica de larga distancia)
	TP-LINK TL-SF1005D Switch Ethernet 10/100 Mbps	1 unidad	Punto A (Distribución de red cableada)
	TP-Link TL-WR850N Router/Access Point Inalámbrico N 300 Mbps	1 unidad	Punto B (Provisión de Wi-Fi local)
	Terminal Telefónico Analógico (Genérico con puerto RJ11, sin altavoz)	1 unidad	Punto B (Teléfono de usuario final)

Componentes de Energía Solar	Panel Solar Monocristalino/Policristalino SUNSHIN 40W	2 unidades	Uno para Punto A, uno para Punto B (Generación de energía)
	Batería de Plomo-Ácido Sellada VoltPower 12V 18Ah	2 unidades	Uno para Punto A, uno para Punto B (Almacenamiento de energía)
	Regulador de Carga PWM LDSOLAR SD2410C 12V/24V 10A	2 unidades	Uno para Punto A, uno para Punto B (Control de carga de batería)
	Inversor de Onda Senoidal Modificada SOLTRONIX 300W	2 unidades	Uno para Punto A, uno para Punto B (Conversión de DC a AC para equipos que lo requieran)
Cableado y Conectividad	Cable UTP Cat. 5e	5m	Conexiones de red Ethernet a 10/100 Mbps.
	Cable UTP Cat. 6 (para redes Ethernet)	15m	Conexiones de red Ethernet a 10/100 Mbps (Mayor robustez).
	Cable eléctrico Tipo TW/THW/THHN Calibre 14 AWG (para CC y CA)	12m	Cableado de paneles solares, baterías e inversores (circuitos DC y AC).
	Conectores RJ45 (Cat. 5e/6)	35 unidades	Terminación de cables de red Ethernet.
	Botas/Protectores para conectores RJ45	35 unidades	Protección y estética para los conectores de red.
	Conectores RJ11 (para cable telefónico)	10 unidades	Terminación de cables telefónicos (conexión de Terminal Telefónico, Amplimax a ATAs).
	Cable Telefónico (4 hilos)	3 metros	Conexiones cortas para dispositivos telefónicos analógicos (Amplimax-HT813 y HT802-Teléfono).
	Terminales de para cables eléctricos (varios calibres)	25 unidades	Conexiones seguras en bornes de baterías, reguladores e inversores.
	Tubos Termoencogibles (varios diámetros)	1 kit variado	Aislamiento y protección de uniones en cableado eléctrico.
	Cinta Aislante Eléctrica (PVC)	1 rollo	Aislamiento de conexiones eléctricas y

	Bridas/Cinchos Plásticos (varios tamaños)	1 paquete (100 und.)	protección general de cableado. Organización, fijación y enrutamiento de cables.
Fijación y Estructura	Soportes/Mástiles para Antenas (para Radioenlace y Amplimax)	2 unidades	Fijación de antenas de comunicación en alturas adecuadas.
	Soportes/Estructuras de Montaje para Paneles Solares	2 unidades	Fijación de paneles solares con orientación óptima.
	Gabinetes/Cajas de Protección	2 unidades	Protección de equipos electrónicos y conexiones eléctricas en exteriores (uno por cada punto).
	Tornillos, tuercas, arandelas (varios tipos y tamaños)	1 kit surtido	Montaje y fijación general de componentes.
Herramientas de Instalación	Juego de Destornilladores (plano, Phillips, estrella, etc.)	1 juego	Ensamblaje y ajuste de componentes.
	Juego de Alicates (universal, de punta fina, de corte diagonal)	1 juego	Manipulación, corte y pelado de cables.
	Llave Ajustable / Juego de Llaves Fijas y de Tubo	1 juego	Ajuste de tornillos y tuercas en estructuras y equipos.
	Cinta Métrica	1 unidad	Medición de distancias y dimensiones para la instalación.
	Multímetro Digital	1 unidad	Verificación de voltajes, corrientes y continuidad eléctrica.
	Tester de Cable de Red (RJ45, RJ11)	1 unidad	Verificación de correcto crimpado de cables de red y telefónicos.
	Taladro Inalámbrico (con baterías y cargador)	1 unidad	Realización de perforaciones para fijación.
	Juego de Brocas (para metal, madera y concreto)	1 juego	Perforación en diferentes tipos de materiales.
	Nivel de Burbuja	1 unidad	Asegurar la horizontalidad o verticalidad en la instalación de equipos y estructuras.
	Crimpadora RJ45/RJ11	1 unidad	Herramienta esencial para la correcta terminación de cables

	Tijeras de electricista/corta cables	1 unidad	UTP y telefónicos con sus conectores. Corte preciso de cables eléctricos.
	Soldador de estaño y estaño	1 unidad	Para uniones eléctricas finas o reparaciones específicas.
Software y Documentación	Software de Configuración de Equipos de Comunicación	Incluido en equipos	Permite la configuración, monitoreo y mantenimiento de los dispositivos de comunicación (routers, ATAs, CPEs).
	Manuales de Usuario y Guías de Instalación	Incluido en equipos	Documentación técnica esencial para la correcta implementación y operación del sistema.

Tabla 14*Costos de los componentes del prototipo*

Categoría	Descripción	Cant.	U.M.	P. Unit. (S/.)	Subtotal (S/.)
Equipos de Comunicación	ELSYS EPRL15 Amplimax	1	unidad	565	565
	Modem 4G				
	Grandstream HT813	1	unidad	323	323
	Adaptador de Teléfono Analógico (ATA) Híbrido				
	Grandstream HT802	1	unidad	209	209
	Adaptador de Teléfono Analógico (ATA)				
	UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23 Radioenlace (CPE)	2	unidades	205	410
	TP-LINK TL-SF1005D	1	unidad	34.5	34.5
	Switch Ethernet 10/100 Mbps				
	TP-Link TL-WR850N	1	unidad	70	70
	Router/Access Point Inalámbrico N 300 Mbps				
	Terminal Telefónico Analógico (Genérico con puerto RJ11, sin altavoz)	1	unidad	20	20

Componentes de Energía Solar	Panel Solar Monocrystalino/Policristalino SUNSHIN 40W	2	unidades	110	220
	Batería de Plomo-Ácido Sellada VoltPower 12V 18Ah	2	unidades	135	270
	Regulador de Carga PWM LDSOLAR SD2410C 12V/24V 10A	2	unidades	50	100
	Inversor de Onda Senoidal Modificada SOLTRONIX 300W	2	unidades	120	240
Cableado y Conectividad	Cable UTP Cat. 5e	5	metros	0.5	2.5
	Cable UTP Cat. 6 (para redes Ethernet)	15	metros	1	15
	Cable eléctrico Tipo TW/THW/THHN Calibre 14 AWG (para CC y CA)	12	metros	2.5	30
	Conectores RJ45 (Cat. 5e/6)	35	unidades	0.5	17.5
	Botas/Protectores para conectores RJ45	35	unidades	0.3	10.5
	Conectores RJ11 (para cable telefónico)	10	unidades	1	10
	Cable Telefónico (4 hilos)	3	metros	0.5	1.5
	Terminales de para cables eléctricos (varios calibres)	25	unidades	0.3	7.5
	Tubos Termoencogibles (varios diámetros)	1	kit variado	5	5
	Cinta Aislante Eléctrica (PVC)	1	rollo	2.5	2.5
	Bridas/Cinchos Plásticos (varios tamaños)	1	paquete (100 und.)	8	8
Fijación y Estructura	Soportes/Mástiles para Antenas (para Radioenlace y Amplimax)	2	unidades	50	100
	Soportes/Estructuras de Montaje para Paneles Solares	2	unidades	60	120
	Gabinetes/Cajas de Protección	2	unidades	80	160
	Tornillos, tuercas, arandelas (varios tipos y tamaños)	1	kit surtido	7.5	7.5
Herramientas de Instalación	Juego de Destornilladores (plano, Phillips, estrella, etc.)	1	juego		
	Juego de Alicates (universal, de punta fina, de corte diagonal)	1	juego		

	Llave Ajustable / Juego de Llaves Fijas y de Tubo	1	juego
	Cinta Métrica	1	unidad
	Multímetro Digital	1	unidad
	Tester de Cable de Red (RJ45, RJ11)	1	unidad
	Taladro Inalámbrico (con baterías y cargador)	1	unidad
	Juego de Brocas (para metal, madera y concreto)	1	juego
	Nivel de Burbuja	1	unidad
	Crimpadora RJ45/RJ11	1	unidad
	Tijeras de electricista/corta cables	1	unidad
	Soldador de estaño y estaño	1	unidad
Software y Documentación	Software de Configuración de Equipos de Comunicación	N/A	N/A
	Manuales de Usuario y Guías de Instalación	N/A	N/A
			Total Materiales S/ 2,959.00
			Contingencias (10% del Total) S/ 295.90
			COSTO TOTAL S/ 3,254.90

Financiamiento

El proyecto fue financiado íntegramente con recursos propios, lo que nos permitió mantener un control absoluto sobre su desarrollo y ejecución. Esta autonomía financiera nos otorgó la flexibilidad necesaria para adaptar el proyecto a las cambiantes condiciones del mercado y aprovechar las oportunidades. Al no estar sujetos a las restricciones impuestas por terceros, logramos tomar decisiones estratégicas de manera ágil y eficiente, garantizando así el éxito del proyecto.

3.3.7. Pruebas Realizadas

Para evaluar la efectividad y funcionalidad del prototipo de sistema de comunicación rural, se ejecutaron una serie de pruebas divididas en fases: pruebas preliminares en un entorno controlado y pruebas finales en el escenario real de despliegue.

Pruebas Preliminares en Entorno Controlado

Antes del despliegue en campo, se realizaron pruebas de funcionamiento de los componentes en un entorno de laboratorio o ubicación con acceso a servicios básicos. Estas pruebas permitieron validar la operatividad individual y la interconexión básica de los equipos:

Verificación de la Antena ELSYS Amplimax (Voz e Internet): Verificación de la Antena ELSYS Amplimax (Voz e Internet): Se realizó una prueba de conexión directa de un teléfono analógico al puerto RJ11 de la antena ELSYS EPRL15 Amplimax Modem 4G en una zona con cobertura celular. Se comprobó la capacidad de la antena para captar y conectarse a diversas señales de operadoras. Durante las pruebas, se registraron y analizaron los parámetros de señal recibida para diferentes conexiones activas:

Conexión Movistar: Se observó una conexión 4G con un Nivel de Señal del 71% (clasificado como “Bom”), con VoLTE habilitado. Para otras conexiones Movistar, se registró una conexión 3G con un Nivel de Señal (RSRP) de -93 dBm y una Calidad de Señal (Ec/Io) de -9 dB ('Buena'); y una conexión 4G LTE con un Nivel de Señal (RSRP) de -112 dBm y una Calidad de Señal (RSRQ) de -13 dB ('Razonable'). Esto evidenció la recepción efectiva de la señal celular por el equipo en diferentes tecnologías y operadoras.

Conexión Claro: Para una conexión 4G, se registró un Nivel de Señal del 94% y una Calidad de Señal (RSRQ) de -7 dB, ambas clasificadas como 'Excelente'. Esto evidenció la recepción efectiva de la señal celular por el equipo en diferentes tecnologías y operadoras. Además, la función de búsqueda ciega del Amplimax demostró la visibilidad de señales de múltiples operadoras (Entel, Claro, Movistar, Bitel) con porcentajes de calidad variados para 4G y 3G en el área de prueba. Se comprobó que el Amplimax habilitó llamadas telefónicas directamente a través de su puerto analógico. Adicionalmente, se verificó el acceso a internet conectando un Access Point (AP) al puerto Ethernet del Amplimax. Posteriormente, se conectó

un dispositivo móvil (celular) vía Wi-Fi a la señal emitida por este AP, confirmando la provisión de servicio de datos desde el Amplimax a través de su puerto cableado.

Además, la función de búsqueda ciega del Amplimax demostró la visibilidad de señales de múltiples operadoras (Entel, Claro, Movistar, Bitel) con porcentajes de calidad variados para 4G y 3G en el área de prueba.

Ilustración 12

Resultados de búsqueda ciega del Amplimax

Operadora	4G	3G	2G
Entel	99% ●	99% ●	- Sem sinal -
Movistar	99% ●	- Sem sinal -	99% ●
Claro	96% ●	87% ●	90% ●
Bitel	- Sem sinal -	86% ●	- Sem sinal -

Leyenda

- - Excelente
- - Bueno
- - Razonable
- - Débil

Se comprobó que el Amplimax habilitó llamadas telefónicas directamente a través de su puerto analógico. Adicionalmente, se verificó el acceso a internet conectando un Access Point (AP) al puerto Ethernet del Amplimax. Posteriormente, se conectó un dispositivo móvil (celular) vía Wi-Fi a la señal emitida por este AP, confirmando la provisión de servicio de datos desde el Amplimax a través de su puerto cableado.

Conectividad de Voz IP (ATAs): Se estableció una conexión directa entre los Adaptadores de Teléfono Analógico (Grandstream HT813 y HT802) utilizando un cable Ethernet. Se verificó exitosamente la comunicación de voz sobre IP (VoIP) entre ambos ATAs,

confirmando su capacidad para transportar llamadas en una red IP. Esto también sentó las bases para su funcionamiento a través de una conexión Wi-Fi/inalámbrica posterior.

Funcionamiento del Sistema de Energía Fotovoltaica: Se comprobó que cada sistema de energía solar (Paneles, Baterías, Reguladores e Inversores) operara correctamente, entregando la energía DC y AC necesaria para alimentar los equipos de comunicación y red. Se verificó la capacidad de carga, descarga y la conversión de energía.

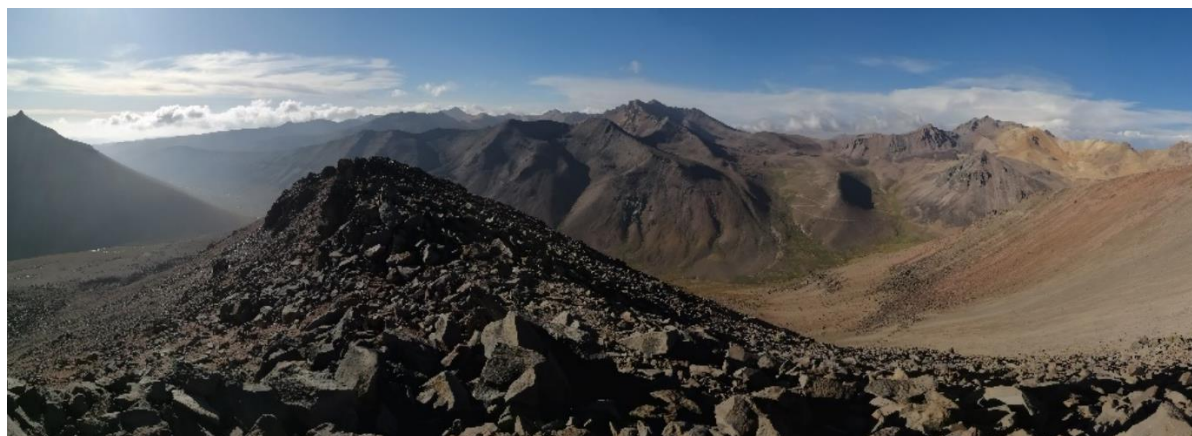
Pruebas de Campo en entorno real Localidad Rural (Asana, Torata)

Una vez que se verificó la funcionalidad básica de los componentes y se ensambló el prototipo completo (Punto A y Punto B), el sistema se trasladó y se instaló en la Localidad de Asana, Distrito de Torata, Provincia Mariscal Nieto. Esta ubicación fue seleccionada específicamente por su carencia total de señal telefónica de operadoras móviles, representando un desafío real para la solución propuesta.

Las Pruebas iniciaron con el Punto A (Emisor) que fue instalado en un cerro con coordenadas -17.056675, -70.479912, un punto elevado a 5.166,61 m.s.n.m. que permitía optimizar la captación de señal.

Ilustración 13

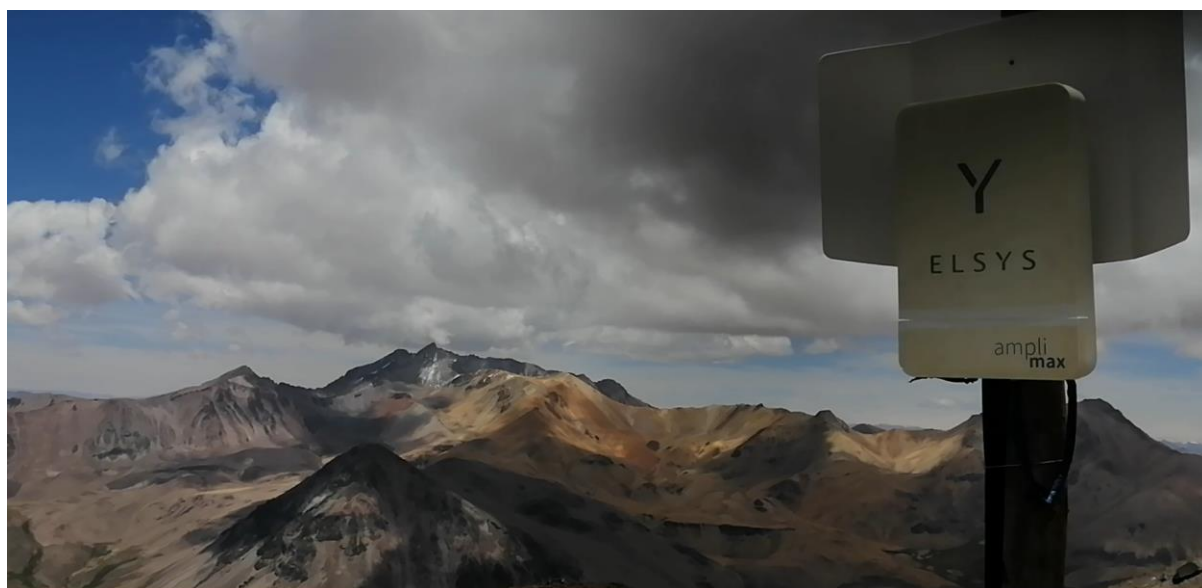
Lugar de instalación del Punto A (Emisor) para pruebas en entorno real.



Las pruebas realizadas en este punto incluyeron captación de Señal Celular mediante la antena ELSYS Amplimax que se orientó para buscar señales de operadoras. Se confirmó que logró captar diversas señales, y específicamente, el chip Movistar disponible fue aceptado exitosamente por la antena.

Ilustración 14

Orientación de la antena ELSYS Amplimax para buscar señales de operadoras.



Se verificó que la antena Amplimax proporcionara señal telefónica analógica funcional a través de su puerto RJ11, confirmando la disponibilidad del servicio de voz desde el origen celular. Se estableció y confirmó la conexión del radioenlace UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23 con el Punto B, asegurando la transmisión de la señal de red hacia el punto receptor. Se corroboró que el sistema de energía solar en el Punto A alimentara de forma continua y estable todos los equipos de comunicación y red instalados.

Posteriormente iniciaron las Pruebas en el Punto B (Receptor) instalado en uno de los domicilios seleccionados en la localidad de Asana. Tras la instalación, se procedió a evaluar los servicios finales:

El radioenlace UBIQUITI LiteBeam LBE-M5-23 en el Punto B recibió exitosamente la señal de red enviada desde el Punto A.

Se conectó el Terminal Telefónico Analógico Genérico al Adaptador de Teléfono Analógico Grandstream HT802. Se realizaron y recibieron llamadas de prueba entre el teléfono del Punto B y la red telefónica externa (a través del Punto A). Todas las pruebas de llamada telefónica se concretaron de manera exitosa, confirmando la transmisión de voz sobre IP.

El Access Point TP-Link TL-WR850N distribuyó la señal de internet vía Wi-Fi dentro del domicilio. Se conectaron dispositivos móviles a esta red, y se comprobó exitosamente el acceso a internet y la navegación web. Las pruebas de velocidad realizadas con herramientas como Fast.com registraron una velocidad de descarga de 1.8 Mbps y una velocidad de carga de 2.1 Mbps en el Punto B.

Ilustración 15

Pruebas de velocidad realizada con Fast.com en el Punto B.



De manera similar al Punto A, se verificó que el sistema de energía solar en el Punto B alimentara adecuadamente todos los equipos de comunicación y red del lado receptor.

Conclusión de las Pruebas

Las pruebas realizadas en la Localidad de Azana confirmaron la viabilidad y efectividad del prototipo diseñado. El sistema demostró ser capaz de captar una señal celular en una zona remota, transmitirla vía radioenlace y proporcionar exitosamente servicios de llamada telefónica e internet a los usuarios finales en el punto de recepción, todo ello sustentado por un sistema de energía fotovoltaica autónomo.

3.3.8. Impactos

La propuesta de sistema de comunicación rural, gracias a su diseño adaptable, está proyectada para generar un impacto significativo en el desarrollo y la mejora de la calidad de vida de cualquier comunidad rural u organización que busque soluciones de conectividad en áreas con limitado o nulo acceso a servicios de telecomunicaciones.

Impacto Social y en la Calidad de Vida:

La disponibilidad de telefonía e internet permitirá a las comunidades acceder a información vital, recursos educativos y ***servicios de salud*** a distancia, mejorando su bienestar general.

Se facilitará el acceso a ***servicios de emergencia y seguridad***, lo que contribuirá directamente a la protección y tranquilidad de los habitantes.

La conectividad rural promoverá una mayor ***inclusión social***, integrando a estas zonas en la sociedad digital y mitigando el aislamiento.

El acceso a la conectividad impulsará el desarrollo educativo a través de plataformas de aprendizaje en línea y facilitará la telemedicina, optimizando la atención sanitaria.

Impacto Económico:

La implementación del sistema generará nuevas oportunidades de empleo directas e indirectas, estimulando el crecimiento económico en las zonas rurales.

El acceso a servicios de comunicación básicos permitirá a las comunidades rurales conectarse con mercados más amplios, adoptar nuevas tecnologías y mejorar la eficiencia de sus actividades productivas, incrementando así su competitividad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. Se logró diseñar y desarrollar un sistema de comunicación rural innovador que integra tecnologías de antenas de alta ganancia, radioenlaces y voz analógica sobre redes IP, el cual puede ser utilizado como modelo para futuras implementaciones en áreas rurales.
2. El sistema de comunicación rural diseñado es técnicamente viable y eficiente, lo que permitirá mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales.
3. Se desarrolló un prototipo funcional del sistema que puede ser utilizado como base para futuras implementaciones, lo que permitirá evaluar y mejorar el sistema en función de las necesidades de las comunidades rurales.

Recomendaciones:

1. Se recomienda implementar el sistema de comunicación rural en diferentes áreas rurales del país, adaptándolo a las necesidades específicas de cada región.
2. Se recomienda realizar estudios de impacto para evaluar el efecto del sistema de comunicación rural en la calidad de vida de las comunidades rurales y en la economía local.
3. Se recomienda establecer alianzas con empresas y organizaciones de la sociedad civil para apoyar la implementación y el mantenimiento del sistema de comunicación rural en áreas rurales.

REFERENCIAS

- Akyildiz, I., Wang, X., & Wang, W. (2005). Redes de malla inalámbricas: Un estudio. *Redes informáticas*, 445-487.
- Balanis, C. A. (2012). *Teoría de antenas: análisis y diseño* (4th ed. ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Banco Mundial. (2021). *Informe sobre el desarrollo mundial 2021: Datos para una vida mejor*. Washington, D.C.: Banco Mundial.
- Castells, M. (2007). Comunicación, poder y contrapoder en la sociedad en red. *Revista Internacional de Comunicación*, 238-266.
- CEPAL. (2022). *La brecha digital en América Latina y el Caribe: Desafíos y oportunidades*. Santiago: Naciones Unidas.
- Comisión de Banda Ancha para el Desarrollo Sostenible. (2021). *El Estado de la Banda Ancha 2021: Banda ancha como base para una recuperación sostenible*. ITU & UNESCO.
- DiMaggio, P., Hargittai, E., Neuman, W., & Robinson, J. (2004). Implicaciones sociales de Internet. *Revista anual de sociología*, 307-336.
- Facebook. (2018). *Sistemas de estaciones de plataforma a gran altitud (HAPS): facilitadores clave para la conectividad de banda ancha*. Facebook.
- FAO. (2021). *Transformación digital rural: evidencia y estrategias desde América Latina y el Caribe*. Roma: FAO.
- Fink, D. G., & Christiansen, D. (2014). *Manual del ingeniero electrónico* (Quinta ed.). Nueva York, NY: McGraw-Hill Education.
- Goldsmith, A. (2005). *Comunicaciones inalámbricas*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Google. (2017). *X, a Google [X] company*. Obtenido de Proyecto Loon: Internet desde la estratosfera: <https://x.company/projects/loon/>
- IEA PVPS. (2022). *Tendencias en aplicaciones fotovoltaicas*. Programa de Sistemas de Energía Fotovoltaica de la Agencia Internacional de Energía - IEA PVPS.

- IICA. (2020). *Conectividad rural en América Latina y el Caribe: Un camino hacia la inclusión social y el desarrollo productivo*. San José: IICA.
- Internet Society - ISOC. (2015). *Redes comunitarias: Construyendo Internet juntos*. Internet Society.
- IRENA. (2020). *Costos de generación de energía renovable en 2019*. Agencia Internacional de Energías Renovables - IRENA.
- ITU. (2023). *Medición del desarrollo digital: datos y cifras*. Ginebra: ITU.
- Kozierok, R. (2005). *La guía TCP/IP: una referencia completa e ilustrada sobre protocolos de Internet*. San Francisco, CA: No Starch Press.
- Microsoft. (2017). *Iniciativa Airband de Microsoft: cerrando la brecha de banda ancha rural*. Microsoft.
- MTC. (2021). *Plan Nacional de Banda Ancha y Conectividad para el Desarrollo Social del Perú*. Lima: MTC.
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Nueva York: Naciones Unidas.
- Naciones Unidas. (2018). *Conectando a los desconectados: El papel de las redes comunitarias y otros enfoques innovadores*. Naciones Unidas.
- OECD. (2019). *Reducir la brecha digital entre zonas rurales y urbanas*. París: OECD Publishing.
- OMS. (2020). *Directriz de la OMS: Recomendaciones sobre intervenciones digitales para el fortalecimiento de los sistemas de salud*. Organización Mundial de la Salud - OMS.
- OSIPTEL. (2023). *Reporte Estadístico del Mercado de Telecomunicaciones en el Perú*. Lima: OSIPTEL.
- PNUMA. (2020). *Informe sobre la Brecha de Emisiones 2020*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente - PNUMA.
- SIP Forum. (2019). *SIP Forum*. Obtenido de <https://www.ietf.org/rfc/rfc3261.txt>
- Solangi, K. H., Leh, C., Rahim, N. A., & Omar, A. (2011). Una revisión de la energía solar para la electrificación rural en Malasia. *Reseñas de energía renovable y sostenible*, 3338-3351.
- Stutzman, W., & Thiele, G. (2012). *Teoría y diseño de antenas* (3rd ed. ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- UNESCO. (2021). *La educación en un mundo post-COVID: Lecciones de la respuesta educativa a la pandemia*. UNESCO.

ANEXOS

Pruebas y Validación de Casos de Uso en Entorno Real

CU01

Realizar llamada telefónica desde zona rural	
Descripción	El usuario rural utiliza un teléfono analógico conectado al sistema para realizar una llamada, aprovechando la conversión de señal analógica a digital (VoIP) y su transmisión por radioenlace
Actores	Usuario rural Adaptador VoIP
Requerimiento Funcional Asociado	-
Casos de Uso Asociados	-
Prioridad	Alta
Precondiciones	El sistema debe estar encendido y alimentado por energía solar. El adaptador VoIP debe estar configurado correctamente. El radioenlace debe estar operativo.
Post condiciones	La llamada se realiza exitosamente. El sistema registra la actividad de la llamada
Criterios de Aceptación	El usuario puede establecer comunicación con el destinatario. La calidad de la llamada es clara y sin interrupciones. El sistema registra la duración y destino de la llamada.
Documentos Anexos	Informe de pruebas de llamadas

Flujo básico		
Paso	Actor	Descripción
1	Actor 1	El usuario levanta el teléfono analógico Marca el número deseado
2	Actor 2	El adaptador convierte la señal analógica en digital La señal se transmite por el radioenlace. El sistema enruta la llamada a través de la red IP La llamada se conecta con el destinatario

CU02

Acceder a internet desde un dispositivo local	
Descripción	El usuario rural accede a internet mediante un dispositivo conectado al Access Point del sistema, que transmite la señal a través de radioenlace y red IP
Actores	Usuario rural Access Point
Requerimiento Funcional Asociado	-
Casos de Uso Asociados	CU01 - Realizar llamada telefónica desde zona rural
Prioridad	
Precondiciones	El Access Point TP-Link WR850N debe estar encendido.
Post condiciones	El usuario accede a internet exitosamente. El sistema mantiene la conexión estable durante la sesión
Criterios de Aceptación	El usuario puede navegar por internet sin interrupciones. La velocidad de conexión es suficiente para tareas básicas (mínimo 1 Mbps). El sistema mantiene la conexión durante al menos 30 minutos continuos
Documentos Anexos	-

Flujo básico

Flujo básico		
Paso	Actor	Descripción
1	Actor 1	Enciende su dispositivo y se conecta al Access Point vía Wi-Fi
2	Actor 2	El Access Point enruta la señal al radioenlace El radioenlace transmite la señal al punto de acceso a internet El usuario obtiene acceso a internet y puede navegar

Excepciones	
1	En el caso de que no haya energía solar suficiente, El sistema deberá suspender la operación y mostrar alerta de energía
2	En el caso de que no haya señal IP disponible, El sistema deberá mostrar error de red y cancelar la llamada

Excepciones

Excepciones	
1	En el caso de que el radioenlace esté fuera de servicio, El sistema deberá mostrar error de conexión y denegar el acceso
2	En el caso de que el Access Point no esté configurado correctamente, El sistema no permitirá la conexión y deberá mostrar error de red local

CU03

Monitorear funcionamiento del sistema	
Descripción	El técnico de mantenimiento accede al sistema para verificar su estado operativo, revisar parámetros técnicos y realizar ajustes si es necesario, asegurando el funcionamiento continuo del sistema de comunicación rural
Actores	Técnico de mantenimiento Sistema de comunicación rural
Requerimiento Funcional Asociado	-
Casos de Uso Asociados	CU01 - Realizar llamada telefónica desde zona rural CU02 - Acceder a internet desde zona rural
Prioridad	Alta
Precondiciones	El sistema debe estar encendido. El técnico debe tener acceso físico o remoto al sistema. Las credenciales de acceso deben estar disponibles.
Post condiciones	El sistema queda verificado y ajustado si es necesario. Se genera un registro de mantenimiento.
Criterios de Aceptación	El técnico puede acceder a los dispositivos del sistema. Se pueden visualizar y modificar parámetros técnicos. Se genera un informe de estado del sistema.
Documentos Anexos	-

Flujo básico

Flujo básico			
Paso	Actor	Descripción	
1	Actor 1	Accede al sistema mediante interfaz web o física	
2	Actor 2	Muestra panel de estado y parámetros técnicos	
3	Actor 1	Revisa estado de energía, conectividad, señal y dispositivos	
4	Actor 2	Aplica cambios y guarda registro de mantenimiento	
Excepciones			
1	En el caso de que un componente esté fuera de servicio,El sistema deberá mostrar alerta y sugerir revisión técnica		

CU04

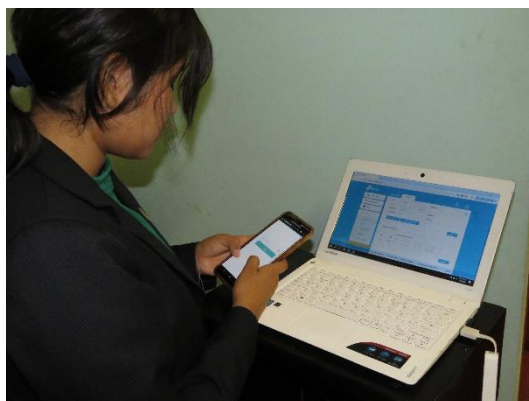
Recibir llamada telefónica en zona rural	
Descripción	El usuario rural recibe una llamada telefónica a través de un teléfono analógico conectado al sistema. La señal de voz digital (VoIP) es convertida a analógica mediante el adaptador Grandstream HT802 y entregada al terminal telefónico
Actores	Usuario rural Adaptador Grandstream HT802
Requerimiento Funcional Asociado	-
Casos de Uso Asociados	CU01
Prioridad	Alta
Precondiciones	El sistema debe estar encendido y conectado. El adaptador HT802 debe estar configurado correctamente. El radioenlace debe estar operativo y enlazado con la red IP
Post condiciones	La llamada es recibida con buena calidad de voz. El sistema registra la actividad de la llamada.
Criterios de Aceptación	El teléfono suena al recibir una llamada. El usuario puede contestar y mantener una conversación clara. La llamada se registra en el sistema.
Documentos Anexos	-

Flujo básico		
Paso	Actor	Descripción
1	Actor 1	Recibe una llamada entrante desde la red IP El adaptador HT802 convierte la señal digital en analógica
2	Actor 2	El teléfono analógico suena Contesta la llamada y establece la comunicación
Excepciones		
1	No hay energía solar suficiente, El sistema suspende la operación y muestra alerta de energía	
2	El adaptador HT802 no está configurado correctamente, El sistema no puede entregar la llamada y muestra error de dispositivo	

Galería fotográfica – Construcción y Pruebas Preliminares en Entorno Controlado



Configuración de equipos



Prueba de acceso a configuración vía celular



Revisión de manuales de uso



Fijación de antenas de comunicación



Crimpado de cables de red y telefónicos



Verificación de Crimpado



Instalación de componentes en gabinetes



Ajustes de antenas de comunicación



Instalación de equipos de energía solar



Prueba de prototipo con energía solar

Galería fotográfica – Pruebas en Entorno Real



Orientación de la Antena



Desplazamientos en búsqueda de señal



Acceso a Puntos elevados



Chip utilizado en la prueba



Tránsito hacia el domicilio de prueba



Domicilio de prueba