

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

**Diseño de un sistema inalámbrico para asegurar el acceso a internet en la
I.E.**

10212, caserío Shita baja, Salas, Lambayeque

Para Optar por el Título Profesional de Ingeniero (a) Electrónico (a)

ELABORADA POR:

Bachiller: Maricielo Purihuaman Llonto

Bachiller: Anderson Smith Salazar Guevara

ASESOR: M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla

LAMBAYEQUE – PERÚ

2026

TESIS

**Diseño de un sistema inalámbrico para asegurar el acceso a internet en la
I.E.**

10212, caserío Shita baja, Salas, Lambayeque

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO (A)
ELECTRÓNICO (A)**

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:



**MG. ING. MARTÍN AUGUSTO NOMBERA LOSSIO
PRESIDENTE**



**MG. ING. JUAN CARLOS ÑÁÑEZ AGUILAR
SECRETARIO**



**MG. ING. THAUSO GAD PACHAMANGO BAUTISTA
VOCAL**

TESIS

**DISEÑO DE UN SISTEMA INALÁMBRICO PARA ASEGURAR EL
ACCESO A INTERNET EN LA I.E. 10212, CASERÍO SHITA BAJA,
SALAS, LAMBAYEQUE**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO (A) ELECTRÓNICO (A)**

AUTORES:



Bach. Maricielo Purihuaman Llonto



Bach. Anderson Smith Salazar Guevara

ASESOR:



M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria - Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCION DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 -2023-SUNEDU / CD



0107



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 066.-2026.-D/FACFyM

Siendo las 11:00 am del día viernes 14 de agosto del 2026, se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

"Diseño de un sistema inalámbrico para asegurar el acceso a internet en la I.E. 10212, caserio Shita baja, Salas, Lambayeque"

Designados por Resolución N° 1122 - 2025 D/FACFyM de fecha 25 de Noviembre de 2025

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

<u>Mg. Ing. Martín Augusto Nombrea Lossio</u>	Presidente
<u>Mg. Ing. Juan Carlos Navez Aguilar</u>	Secretario
<u>Mg. Ing. Thaiso Gad Pachamango Bautista</u>	Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) M. Sc. Ing. Hugo Javier Chidayo Padilla nombrado por Resolución N° 1122 - 2025 D/FACFyM de fecha 25 de Noviembre de 2025

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 589-2026 D/FACFyM de fecha 13 de agosto de 2026

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): Purihuaman Lonto Maricelo y Salazar Guevara Anderson Smith y tuvo una duración de 40 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de diecisiete (17) en la escala vigesimal, mención (Bueno).

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 12:05 pm se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Mg. Ing. Martín A. Nombrea Lossio
Presidente

Mg. Ing. Juan Carlos Navez Aguilar
Secretario

Mg. Ing. Thaiso Gad Pachamango Bautista
Vocal

M. Sc. Ing. Hugo Javier Chidayo Padilla
Asesor

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL ASESOR

M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla, usuario revisor del documento titulado:
“Diseño de un sistema inalámbrico para asegurar el acceso a internet en la I.E. 10212, caserío Shita baja, Salas, Lambayeque”

Cuyos autores son:

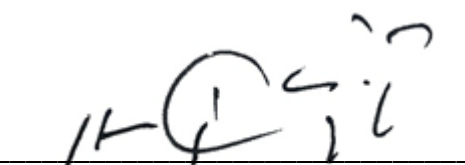
- Bach. Maricielo Purihuaman Llonto
- Bach. Anderson Smith Salazar Guevara

Identificado con Documento de Identidad 16703734; declaro que la evaluación realizada por el Programa Informático Turnitin, ha arrojado un porcentaje de similitud de 09 %, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 14 de julio del 2026



M.Sc. Hugo Javier Chiclayo Padilla
DNI N° 16703734

Diseño de un sistema inalámbrico para asegurar el acceso a internet en la I.E. 10212, caserío Shita baja, Salas, Lambayeque

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.unprg.edu.pe

Fuente de Internet

4%

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%

3

Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

Trabajo del estudiante

1%

4

repositorio.ucn.edu.ni

Fuente de Internet

1%

5

repositorio.unesum.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

6

Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola

Trabajo del estudiante

<1%

7

Lozada, Hugo Alfonso Rosas. "Redes Nacionales de Banda Ancha en el Perú : Escenarios al 2030", Pontificia Universidad Catolica del Peru (Peru), 2022

Publicación

<1%

8

Guerrero, Naylamp Martin Lopez. "Asignación de Espectro Radioeléctrico Para Redes Industriales", Pontificia Universidad Catolica del Peru (Peru), 2022

Publicación

<1%

Submitted to Universidad Continental

9	Trabajo del estudiante	<1 %
10	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.unprg.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1 %
12	www.repositorio.usac.edu.gt Fuente de Internet	<1 %
13	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to Universidad Andina del Cusco Trabajo del estudiante	<1 %
15	Submitted to Universitat Oberta de Catalunya Trabajo del estudiante	<1 %
16	repositorio.uam.es Fuente de Internet	<1 %
17	web.itslibertad.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
18	www.osiptel.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
19	Luis Alberto Núñez-Lira, Marco Aurelio Rosario Villarreal, Javier Francisco Javier Márquez Camarena, Janeth Bertha Mariño Arroyo et al. "Evaluation of a wireless Broadband Network for VoIP in Huaytará", Enfoque UTE, 2019 Publicación	<1 %
20	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
21	www.adslzone.net Fuente de Internet	<1 %

22

Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez

Trabajo del estudiante

<1 %


M.SC. ING. HUGO JAVIER CHICLAYO PADILLA
hchiclayo@unprg.edu.pe
DNI N° 16703734 – Móvil: 920583570
ASESOR

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 15 words
Excluir bibliografía	Activo		



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	Maricielo Purihuaman Llonto Anderson Smith Salazar Guevara
Título del ejercicio:	Quick Submit
Título de la entrega:	Diseño de un sistema inalámbrico para asegurar el acceso a in...
Nombre del archivo:	Informe_N_03_Maricielo_-_Anderson.docx
Tamaño del archivo:	4.03M
Total páginas:	83
Total de palabras:	13,218
Total de caracteres:	73,106
Fecha de entrega:	04-may-2026 08:18p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega:	2951668618

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

Diseño de un sistema inalámbrico para asegurar el acceso a internet en la I.E.
10212, caserío Shita baja, Salas, Lambayeque

Para Optar por el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

ELABORADA POR:

Bachiller: Maricielo Purihuaman Llonto

Bachiller: Anderson Smith Salazar Guevara

ASESOR: M.Sc. Ing. Hugo Javier Chiclayo Padilla

LAMBAYEQUE – PERÚ
2026



M.Sc. ING. HUGO JAVIER CHICLAYO PADILLA
hchiclayo@unp.edu.pe
DNI N° 36703734 - MAGIS: 520583570
ASESOR

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, porque sin su guía y fortaleza este logro no habría sido posible.

A mis amigos de universidad y a mis amigos de vida, gracias por las risas, el apoyo y por estar ahí cuando más lo necesité. Algunas veces las personas correctas simplemente llegan a tu vida, y ustedes fueron ese regalo.

A todos los que me tendieron la mano en los momentos difíciles, que con una palabra o un gesto me recordaron que no podía rendirme, este logro también les pertenece.

Maricielo Purihuaman Llonto

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, Jenny Llonto M. y Felipe Purihuaman R., por su amor incondicional, por cada sacrificio hecho en silencio y por enseñarme con su ejemplo que la constancia transforma los sueños en realidad.

*A mis tíos y tías, por su respaldo, sus consejos y por estar presentes en cada etapa de mi camino.
A la memoria de mi abuela, Manuela Musayon V., cuyo cariño y sabiduría siguen siendo mi guía
y a mi tía, Rosa Millan M. su recuerdo vive en mí y este logro también lleva su nombre.*

Maricielo Purihuaman Llonto

AGRADECIMIENTOS

A mi abuelo, quien, aunque ya no se encuentra físicamente a mi lado, vive eternamente en mi corazón. Su recuerdo ha sido una fuente de inspiración y fortaleza durante este proceso. Sé que estaría profundamente orgulloso y feliz de verme alcanzar esta meta que hoy se convierte en realidad. Sus consejos, sus deseos y los momentos compartidos permanecen como una luz que guía mi camino. Este logro también es para usted, como un homenaje lleno de amor y gratitud.

Anderson Smith Salazar Guevara

DEDICATORIA

Mi tesis va dedicada A mis queridos padres, Flavio Salazar Carrasco e Irene M. Guevara Quintana, por ser el pilar fundamental de mi vida y el motor que me impulsa a seguir adelante.

Gracias por su amor incondicional, por cada sacrificio silencioso y por el esfuerzo constante que realizaron para brindarme las oportunidades que hoy me permiten alcanzar este logro. Su apoyo, sus consejos y su confianza en mí han sido esenciales en cada paso de este camino.

Ustedes me enseñaron el valor de la responsabilidad, la perseverancia y la honestidad, principios que guiaron la culminación de esta etapa tan importante. Este logro no es solo mío, sino también de ustedes, porque sin su presencia y dedicación nada de esto habría sido posible.

Anderson Smith Salazar Guevara

ÍNDICE GENERAL

1	CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO	20
1.1	Antecedentes	20
1.1.1	Antecedentes Internacionales.....	20
1.1.2	Antecedentes Nacionales	21
1.2	Bases Teóricas.....	24
1.2.1	Definición y dimensiones de la Brecha Digital	24
1.2.2	Brecha digital de Acceso (Primer Nivel o Infraestructura)	24
1.2.3	Brecha digital de Uso (Segundo Nivel o Conocimiento).....	25
1.2.4	Brecha digital de Calidad de Uso (Tercer Nivel).....	25
1.2.5	Arquitecturas de redes para entornos rurales (topologías).....	26
1.2.6	Tecnologías Adaptadas a Zonas Rurales:	26
1.2.7	Tecnologías de Acceso de Área Amplia y Metropolitana	27
2	CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES	32
2.1	Tipo de investigación	32
2.2	Diseño de la investigación.....	32
2.3	Población, muestra	34
2.3.1	Población y muestra	34
2.3.2	Muestra	34
2.4	Técnicas, instrumentos, equipos y materiales	34
2.4.1	Técnicas	34
2.4.2	Instrumentos.....	35
2.4.3	Equipos y materiales	35

3.	CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
3.1	Resultados	39
3.1.1	Diseño del enlace punto a punto en banda 5.8 GHz (no licenciada)	39
3.1.2	Diseño del enlace de microondas en banda 11 GHz (licenciada)	58
3.1.3	Análisis comparativo de tecnologías y selección de la configuración óptima.....	69
3.1.4	Configuración óptima recomendada por tramo	71
3.2	Discusión.....	74
4	CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
4.1	Conclusiones	77
4.2	Recomendaciones.....	79
5	REFERENCIAS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación de las distintas tecnologías inalámbricas según su alcance	27
Figura 2 Procedimiento a seguir en la investigación	33
Figura 3 Vista topográfica del trayecto Motupe – Shita Baja y ubicación de los nodos del enlace segmentado	39
Figura 4 Parámetros de configuración del equipo Cambium Networks PTP670 para el tramo Motupe – Salas.....	40
Figura 5 Perfil topográfico del trayecto Motupe – Salas con análisis de línea de vista y zona de Fresnel.....	42
Figura 6 Infraestructura de fibra óptica disponible en el nodo Motupe - punto de origen del backhaul	42
Figura 7 Parámetros de configuración de la antena emisora en el nodo Motupe	43
Figura 8 Parámetros de configuración de la antena receptora en el nodo Salas	43
Figura 9 Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo Motupe	44
Figura 10 Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo Salas	44
Figura 11 Resumen global de parámetros de desempeño del tramo Motupe – Salas a 5.8 GHz	45
Figura 12 Análisis de modos de modulación y parámetros de desempeño por modo para el tramo Motupe – Salas.....	46
Figura 13 Parámetros de configuración del equipo Cambium Networks PTP670, tramo Salas – Shita Baja.....	47
Figura 14 Perfil topográfico del trayecto Salas – Shita Baja con análisis de línea de vista y zona de Fresnel.....	47

Figura 15 Parámetros de configuración de la antena emisora en el nodo Salas	48
Figura 16 Parámetros de configuración de la antena receptora en el nodo Ayuda Shita Baja	49
Figura 17 Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo Salas para el tramo Salas – Shita Baja.....	50
Figura 18 Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo Ayuda Shita Baja.....	50
Figura 19 Resumen global de parámetros de desempeño del tramo Salas – Ayuda Shita Baja a 5.8 GHz	51
Figura 20 Análisis de modos de modulación y parámetros de desempeño por modo para el tramo Salas – Ayuda Shita Baja.....	51
Figura 21 Vista del perfil topográfico del trayecto Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja con análisis de zona de Fresnel.....	52
Figura 22 Parámetros de configuración de la antena emisora en el nodo Ayuda Shita Baja para el tramo final.....	53
Figura 23 Parámetros de configuración de la antena receptora en el nodo I.E. Shita Baja	54
Figura 24 Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo Ayuda Shita Baja para el tramo final.....	55
Figura 25 Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo I.E. Shita Baja.....	55
Figura 26 Resumen global de parámetros de desempeño del tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja a 5.8 GHz.....	56
Figura 27 Análisis de modos de modulación y desempeño por modo hacia el nodo Ayuda Shita Baja	57
Figura 28 Análisis de modos de modulación y desempeño por modo hacia el nodo I.E. Shita Baja	57

Figura 29 Diagrama esquemático de la arquitectura completa del enlace Motupe – I.E. Shita Baja a 5.8 GHz	58
Figura 30 Parámetros de configuración del equipo Cambium Networks PTP11850C, Motupe – Salas a 11 GHz.....	59
Figura 31 Parámetros de configuración de la antena emisora del nodo Motupe para el enlace microondas a 11 GHz.....	60
Figura 32 Parámetros de configuración de la antena receptora del nodo Salas para el enlace microondas a 11 GHz.....	61
Figura 33 Indicadores de desempeño del enlace microondas en ambos sentidos para el tramo Motupe – Salas.....	61
Figura 34 Resumen global de parámetros de desempeño del tramo Motupe – Salas a 11 GHz .	62
Figura 35 Análisis de modos de modulación y parámetros de desempeño por modo en el tramo Motupe – Salas a 11 GHz	62
Figura 36 Configuración de antenas emisora y receptora para el tramo Salas – Ayuda Shita Baja a 11 GHz	63
Figura 37 Indicadores de desempeño del enlace microondas en ambos sentidos para el tramo Salas – Ayuda Shita Baja	64
Figura 38 Parámetros de desempeño del tramo Salas – Ayuda Shita Baja a 11 GHz.....	65
Figura 39 Análisis de modos de modulación y parámetros de desempeño por modo para el tramo Salas – Ayuda Shita Baja a 11 GHz.....	65
Figura 40 Configuración de antenas emisora y receptora para el tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja a 11 GHz.....	66

Figura 41 Indicadores de desempeño del enlace microondas en ambos sentidos, el tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja.....	67
Figura 42 Resumen global de parámetros de desempeño del tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja a 11 GHz.....	68
Figura 43 Parámetros de desempeño para el tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja a 11 GHz	68
Figura 44 Comparación de la capacidad IP promedio por tecnología para los tramos del enlace Motupe – I.E. Shita Baja.....	69
Figura 45 Comparación de la disponibilidad típica del enlace por tecnología.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Coordenadas geográficas de los nodos del enlace PtP – I.E. Shita Baja	40
Tabla 2 Comparativa de criterios técnicos y económicos entre tecnologías de enlace evaluadas	71
Tabla 3 Presupuesto estimado de implementación para el tramo Motupe – Salas (enlace microondas 11 GHz)	71
Tabla 4 Presupuesto estimado de implementación para el tramo Salas – Ayuda Shita Baja	72
Tabla 5 Presupuesto estimado de implementación para el tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja	73

RESUMEN

La presente investigación desarrolla el diseño de un sistema inalámbrico de radioenlaces punto a punto orientado a garantizar el acceso a internet en la Institución Educativa N.º 10212, caserío Shita Baja, distrito de Salas, región Lambayeque. Se evaluaron dos configuraciones tecnológicas: enlaces en la banda de 5.8 GHz no licenciada con equipos Cambium Networks PTP670, y enlaces de microondas en la banda licenciada de 11 GHz con equipos Cambium Networks PTP11850C. El sistema se articuló en tres tramos: Motupe–Salas (≈ 14.5 km), Salas–Ayuda Shita Baja (≈ 11 km) y Ayuda Shita Baja–I.E. Shita Baja (≈ 3.6 km). Los parámetros de desempeño se determinaron mediante simulación en el software Cambium LINKPlanner. Los resultados muestran que ambas tecnologías superan el requerimiento de 200 Mbps y alcanzan disponibilidad del 100 %, con throughputs agregados de hasta 449 Mbps en la banda de 5.8 GHz y hasta 2 824 Mbps en la banda de 11 GHz. Se seleccionó una arquitectura híbrida óptima — microondas 11 GHz en los tramos troncales y 5.8 GHz en el tramo de acceso final— con costo total estimado de S/. 172 500, confirmándose la hipótesis de investigación y contribuyendo al cierre de la brecha digital en zonas rurales altoandinas de Lambayeque.

Palabras clave: Sistema inalámbrico, radioenlace punto a punto, conectividad rural y brecha digital

ABSTRACT

This research develops the design of a point-to-point wireless radio link system aimed at ensuring internet access at Educational Institution N.º 10212, located in Shita Baja hamlet, Salas district, Lambayeque region, Peru. Two technological configurations were evaluated: unlicensed 5.8 GHz band links using Cambium Networks PTP670 equipment, and licensed 11 GHz microwave band links using Cambium Networks PTP11850C equipment. The system was structured in three segments: Motupe–Salas (approximately 14.5 km), Salas–Ayuda Shita Baja (approximately 11 km), and Ayuda Shita Baja–I.E. Shita Baja (approximately 3.6 km). Performance parameters were determined through simulation using Cambium LINKPlanner software. Results show that both technologies exceed the 200 Mbps capacity requirement with 100 % availability, achieving aggregate throughputs of up to 449 Mbps at 5.8 GHz and 2,824 Mbps at 11 GHz. An optimal hybrid architecture was selected —11 GHz microwave for backbone segments and 5.8 GHz for the final access segment— with an estimated total cost of S/. 172,500, confirming the research hypothesis and contributing to digital divide reduction in rural highland areas of Lambayeque.

Keywords: Wireless system, point-to-point radio link, rural connectivity and digital divide,

INTRODUCCIÓN

El acceso a internet en entornos rurales constituye uno de los desafíos más acuciantes para el desarrollo equitativo en el contexto contemporáneo. A nivel mundial, la brecha digital entre zonas urbanas y rurales persiste como una barrera estructural que limita la calidad educativa, las oportunidades económicas y la inclusión social de millones de personas. Iniciativas globales como el programa Giga, impulsado por las Naciones Unidas y UNICEF, buscan garantizar conectividad a todas las escuelas del planeta; sin embargo, vastas regiones de América Latina continúan al margen de la infraestructura digital. Según Ziegler et al. (2022), las áreas rurales enfrentan déficits estructurales en conectividad que incluyen ausencia de infraestructura de banda ancha, baja asequibilidad y escasez de dispositivos digitales, condiciones que se agravan en zonas de topografía accidentada.

En el Perú, la desigualdad en el acceso a internet entre zonas urbanas y rurales es particularmente pronunciada: según datos del Ministerio de Educación, el 49 % de la población urbana cuenta con acceso a internet, cifra que desciende al 11 % en áreas rurales (MINEDU, 2024). El Centro Nacional de Planeamiento Estratégico estima que cerca del 80 % de los ciudadanos carece de acceso constante a internet, y el 74 % no accede en absoluto (CEPLAN, 2024). La pandemia de COVID-19 evidenció la gravedad de esta brecha: en Lambayeque, más de 22 064 escolares no pudieron acceder a la educación remota durante el año 2020 (MINEDU, 2024), poniendo de manifiesto la fragilidad de los sistemas educativos rurales ante situaciones que demandan conectividad digital como condición básica de funcionamiento.

La Institución Educativa N.º 10212 Divino Cristo de los Milagros, situada en el caserío Shita Baja, distrito de Salas, región Lambayeque, es un caso representativo de esta realidad. La institución carece de infraestructura de telecomunicaciones, no cuenta con acceso a la red dorsal de fibra óptica y enfrenta cobertura inestable de redes móviles convencionales. La topografía altoandina de la zona, con elevaciones entre 150 m y 1 350 m sobre el nivel del mar y distancias de hasta 29 km desde el punto de presencia de internet más cercano en Motupe, excluye soluciones convencionales de acceso y hace necesario el diseño de una arquitectura de radioenlaces adaptada a las condiciones reales del terreno (Alejo, 2024; Rodríguez, 2021).

Frente a esta problemática, la presente investigación desarrolla el diseño de un sistema inalámbrico de radioenlaces punto a punto (PTP) para garantizar el acceso a internet en la I.E. N.º 10212, evaluando de manera comparativa dos configuraciones tecnológicas: enlaces en la banda de 5.8 GHz no licenciada con equipos Cambium Networks PTP670, y enlaces de microondas en la banda licenciada de 11 GHz con equipos Cambium Networks PTP11850C. El análisis se realizó mediante simulación computacional en el software Cambium LINKPlanner, que incorpora modelos de propagación basados en estándares ITU y datos topográficos reales del área de estudio (Apaza & Ramos, 2022; Sotelo, 2021).

La hipótesis de investigación sostiene que el diseño de un sistema inalámbrico asegurará el acceso a internet en la I.E. N.º 10212. El objetivo general es diseñar un sistema de comunicación inalámbrica que garantice de manera eficiente el acceso a internet en dicha institución. Los objetivos específicos comprenden: (i) analizar la literatura científica sobre sistemas inalámbricos

en contextos rurales para identificar alternativas tecnológicas viables; (ii) analizar el desempeño de distintas configuraciones mediante herramientas de simulación; y (iii) seleccionar la configuración óptima con base en criterios de viabilidad técnica, cobertura, estabilidad y sostenibilidad operativa. El presente documento está organizado en cuatro capítulos: el Capítulo I expone el diseño teórico y los antecedentes; el Capítulo II describe el diseño metodológico; el Capítulo III presenta los resultados y la discusión; y el Capítulo IV formula las conclusiones y recomendaciones.

1 **CAPÍTULO I: DISEÑO TEÓRICO**

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes Internacionales

Montenegro (2021) planteó como objetivo de realizar el diseño técnico de una red GPON. La metodología empleada fue de enfoque mixto, exploratorio y descriptivo, utilizando métodos analítico-sintéticos, deductivo-inductivos y encuestas como instrumento clave, además de un análisis económico., la población de estudio fue la Parroquia Sinaí, dimensionando la red para una demanda potencial máxima de 75 clientes, los resultados técnicos confirmaron la viabilidad del diseño, con una atenuación de 22.525 dB, que se encuentra dentro del presupuesto óptico límite de 25 dB, concluyendo en la factibilidad del proyecto, tanto por el cumplimiento de los parámetros técnicos FTTH como por los beneficios económicos, sustentados en indicadores financieros positivos (VAN 5,684.26 y TIR 37%).

Chanchavac (2023) propuso como objetivo el de diseñar una red de transporte por fibra óptica para migrar la transmisión de tres radiobases del operador en cuestión de radioenlaces a enlaces ópticos, se fundamentó en la saturación de los enlaces microondas (con ocupaciones que superan el 80% en casos críticos) y la consecuente alta pérdida de paquetes, la metodología implementada fue de enfoque mixto con un diseño no experimental descriptivo, centrado en la población de radiobases del casco urbano, utilizando registros históricos de la ocupación de ancho de banda y entrevistas como instrumentos de recolección de datos, los principales resultados demostraron la necesidad de la migración para incrementar el ancho de banda a 1 Gbps y disminuir las pérdidas de paquetes a menos de 100 diarios, concluyendo en que el diseño propuesto es

factible y permitirá la mejora de los servicios móviles 2G, 3G y LTE, logrando la desaturación de la red de microondas y preparando la infraestructura para futuros servicios de telecomunicaciones.

Pincay (2021), propuso como objetivo general desarrollar un estudio de factibilidad para optimizar la comunicación institucional mediante el diseño de una red de fibra óptica, la metodología fue de enfoque mixto, utilizando métodos hipotético-inductivos, deductivos, estadísticos y bibliográficos, con instrumentos como encuestas y entrevistas aplicados a una muestra de 321 estudiantes de un universo de 2137, los principales resultados indicaron que el 74% de los encuestados perciben como ineficaz la velocidad de transmisión actual, y el 100% estuvo de acuerdo en que la tecnología de fibra óptica proporcionará mayor velocidad y seguridad. La conclusión principal confirmó la realización exitosa del diseño lógico de la red de comunicación por fibra óptica utilizando el programa Cisco Packet Tracer, validando la factibilidad y el potencial de mejora sustancial en la transmisión de datos.

1.1.2 Antecedentes Nacionales

Saénz & Navarro (2022) se planteó como objetivo general, el aplicar una solución inalámbrica terrestre para brindar servicios de acceso en Banda Ancha a la Provincia de San Ignacio, la metodología implementada incluyó un estudio de campo mediante encuestas informativas aplicadas a una muestra de 200 pobladores, complementado con el dimensionamiento y diseño de una red de comunicaciones basada en enlaces microondas Punto a Punto (PTP) y Punto a Multipunto (PMTP). Los resultados determinaron que más del 50% de la población percibía el servicio de Internet como deficiente, citando principalmente la baja velocidad, inestabilidad y el alto costo. Se concluyó que el proyecto propuesto, que utiliza tecnología inalámbrica adaptada a

la geografía local, es factible y rentable para satisfacer la demanda básica de servicios de telecomunicaciones en la región de Cajamarca.

Irigoin (2021), propuso como objetivo general el determinar cómo el diseño de una red de fibra óptica se relaciona con el servicio de datos en dicha institución, la metodología aplicada fue cuantitativa, de tipo básica y nivel correlacional, con un diseño no experimental transversal, utilizando una población de 109 personas con contrato vigente y una muestra de 85 unidades de observación. El instrumento de recolección de datos fue un cuestionario, con una escala Likert, los principales resultados indicaron que el 81% de los encuestados percibe la red de fibra óptica y el 69% el servicio de datos en un nivel alto, además de presentar el diseño de red desarrollado con equipos Cisco y simulado en Packet Tracer. En conclusión, se determinó que existe un grado de relación moderado y significativo entre el diseño de la red de fibra óptica y el servicio de datos ($\text{Rho de Spearman} = 0,591$), sustentando la propuesta para solucionar las limitaciones de conectividad de la institución educativa.

Gavidia (2023), planteó como objetivo el diseño de un sistema de red WiMAX conforme a la norma IEEE 802.16, orientado a optimizar las telecomunicaciones de la empresa en estudio. Empleando una metodología experimental con un diseño cuasi-experimental de carácter propositivo-explicativo, la investigación abarcó seis áreas de la organización y utilizó cuestionarios como instrumento de recolección de datos. Los resultados indican que la implementación del diseño propuesto incrementó notablemente la capacidad de ancho de banda, elevándola desde un rango de 34–85 Mbps hasta valores entre 398–662 Mbps, lo que supone una mejora superior al 80%. Se concluyó que el sistema WiMAX basado en la norma IEEE 802.16

optimizó de manera sustantiva las comunicaciones entre sedes, incrementando la velocidad y reduciendo los tiempos de respuesta.

.

.

1.2 Bases Teóricas

1.2.1 Definición y dimensiones de la Brecha Digital

La Brecha Digital se define como la desigualdad en el acceso, uso y apropiación de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC). Históricamente, este concepto se ha relacionado con la disparidad entre aquellos que pueden aprovechar las TIC y quienes quedan excluidos de sus beneficios. Constituye una forma de exclusión social que puede exponer a segmentos de la población a un riesgo de vulnerabilidad (Alejo, 2024).

La brecha digital es un problema complejo y multidimensional. Para su análisis integral, las fuentes identifican múltiples dimensiones que trascienden el mero acceso físico a la tecnología, tradicionalmente, se clasifican en tres niveles fundamentales, que incluyen el acceso, el uso y la calidad/apropiación (Estela & Jimenez, 2024).

1.2.2 Brecha digital de Acceso (Primer Nivel o Infraestructura)

La brecha de acceso se refiere a la disparidad en la posibilidad de acceder a las TIC. Esto implica factores tangibles como la infraestructura, la conectividad, la asequibilidad (costo) y el equipamiento tecnológico, en el entorno rural (Rodríguez, 2021), esta brecha se acentúa debido a:

- a. Falta de infraestructura: El despliegue de redes de banda ancha (como la fibra óptica) suele concentrarse en zonas urbanas rentables, descuidando las áreas periféricas y rurales. La falta de cobertura es un problema frecuente.
- b. Asequibilidad: A pesar de la disponibilidad de servicios, la población rural a menudo enfrenta restricciones financieras y bajos ingresos, lo que dificulta la capacidad de contratar servicios de internet.

- c. Equipamiento: Existe una baja disponibilidad de computadoras o laptops en los hogares rurales, lo que evidencia una brecha de acceso real a las TICs, ya que muchos dependen de teléfonos inteligentes, que son menos adecuados para propósitos educativos.

1.2.3 Brecha digital de Uso (Segundo Nivel o Conocimiento)

La brecha de uso se refiere a la capacidad de utilizar las TICs de manera efectiva una vez que se tiene acceso a ellas. Está intrínsecamente ligada a la posesión de competencias digitales (Ziegler et al., 2022), las barreras en este nivel incluyen:

- a. Falta de habilidades: La población rural puede carecer de las habilidades necesarias para el manejo de las TICs, por lo que la alfabetización digital es crucial.
- b. Motivación: La falta de interés, la limitada cultura digital, o las limitaciones culturales y lingüísticas (como la ausencia de contenido digital en idiomas indígenas) desmotivan la adopción y el uso efectivo.

1.2.4 Brecha digital de Calidad de Uso (Tercer Nivel)

Este nivel se enfoca en el aprovechamiento eficaz y significativo de las herramientas digitales. La brecha de calidad de uso se da cuando las personas, a pesar de tener acceso y ciertas habilidades, carecen de la capacidad para obtener información de alta calidad o aplicar las tecnologías para fines académicos, investigativos o de emprendimiento. La falta de una utilización efectiva de las TIC por parte de la población constituye un desafío adicional al de la sola disponibilidad de infraestructura, otras brechas relevantes en el ámbito rural incluyen la brecha digital Geográfica, marcada por las notorias divergencias en el acceso entre áreas urbanas y rurales debido a factores históricos y la topografía accidentada (Apaza & Ramos, 2022).

1.2.5 Arquitecturas de redes para entornos rurales (topologías)

La implementación de infraestructura de telecomunicaciones en comunidades rurales representa un desafío técnico y social, a menudo debido a la dispersión geográfica y las limitaciones de infraestructura, para abordar la brecha digital en el sector rural, se han desarrollado e implementado diversas arquitecturas y tecnologías:

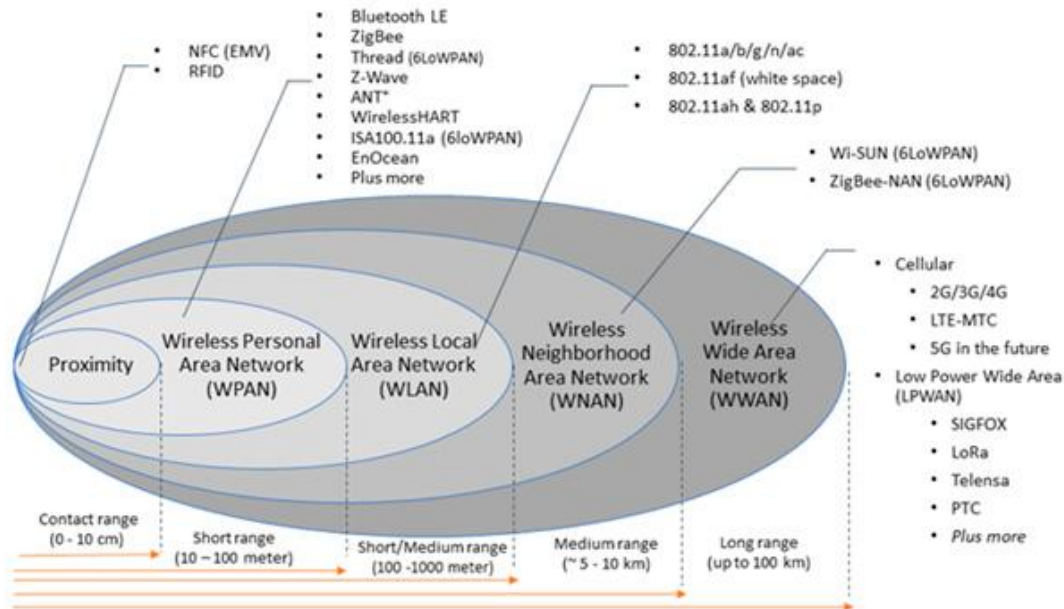
1.2.6 Tecnologías Adaptadas a Zonas Rurales:

Las redes de banda ancha como infraestructura permiten la transmisión de Internet a diferentes lugares, entre las tecnologías viables para el despliegue de redes en zonas rurales se encuentran la Passive Optical Network (PON), radios microondas punto a punto (PtP), radios microondas punto multipunto (PmP), enlaces aéreos ópticos (Free Space Optics - FSO), accesos satelitales, y accesos a través de las redes móviles 3G, 4G o 5G (Sotelo, 2021).

- En el ámbito peruano, se ejecutan programas como "todos conectados" que utilizan Internet satelital para conectar comunidades campesinas y plazas públicas en el sector rural.
- Tecnologías como WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) y LoRa (Long Range) han sido implementadas con éxito en contextos rurales.
- El uso de LTE en bandas bajas (como 700 MHz), combinado con soluciones inalámbricas fijas, puede ofrecer una cobertura extensa, efectivo para comunidades dispersas.
- Los Espacios en Blanco de TV (TVWS) utilizan frecuencias no ocupadas del espectro de televisión, ofreciendo amplia cobertura y costos operativos reducidos en entornos rurales.

Figura 1

Representación de las distintas tecnologías inalámbricas según su alcance



1.2.7 Tecnologías de Acceso de Área Amplia y Metropolitana

1.2.7.1 Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX - IEEE 802.16),

se define como una red de banda ancha inalámbrica de área metropolitana (WMAN) que certifica la conformidad con los estándares IEEE 802.16, habiendo sido concebida específicamente para la distribución de banda ancha a usuarios finales. Esta tecnología se caracteriza por operar en frecuencias superiores a 2.3 GHz y por dividir el canal de comunicación en pequeñas subportadoras. Su arquitectura se basa en una Estación Base (BS) y un Equipo de Cliente (CPE) (Tumbaco, 2023).

En términos de capacidad, WiMAX es capaz de alcanzar velocidades de hasta 75 Mbps y, en ciertos escenarios, la velocidad de datos puede llegar a 1 Gbps. En áreas abiertas, su cobertura

puede extenderse aproximadamente a 50 Km, e incluso hasta 80 kilómetros mediante el uso de antenas altamente direccionales y de alta ganancia. Existen dos variantes principales: WiMAX fijo (IEEE 802.16-2004), que emplea bandas licenciadas (2.5 GHz, 3.5 GHz) y sin licencia (5.8 GHz); y WiMAX móvil (IEEE 802.16e), que permite la conexión de equipos en movimiento (Noman et al., 2023).

WiMAX es considerada una tecnología óptima para conexiones punto a punto en zonas rurales y resulta una alternativa viable frente a las redes cableadas para el acceso residencial. Entre sus principales ventajas, destaca su capacidad para establecer conexiones sin necesidad de Línea de Vista (NLOS) y para alcanzar lugares geográficos inaccesibles para otras tecnologías. Además, ofrece una mayor Calidad de Servicio (QoS) que las redes Wi-Fi, garantizando la integración de servicios de voz y datos, y proporciona una alta eficiencia espectral de 5bps/Hz en bandas inferiores a 6 GHz de punto a multipunto. Sin embargo, su principal limitación radica en el alto costo inicial de implementación, a pesar de su factible sostenibilidad a largo plazo (Solorzano, 2025).

1.2.7.2 Redes Celulares (LTE/4G, NB-IoT, 5G/NR), las redes celulares se clasifican

como redes de área amplia inalámbrica (WWAN) (Rodríguez, 2021).

- a. ***LTE/4G (Long Term Evolution)***: Esta tecnología se basa en el protocolo IP, con soporte para IPV4 e IPV6, y utiliza tecnologías avanzadas como la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) y la entrada múltiple salida múltiple (MIMO) para potenciar su rendimiento. LTE proporciona acceso a Internet con baja latencia y alto ancho de banda. En Perú, el LTE se está generalizando en zonas rurales. Para lograr radios de cobertura

extensos (de 2 a 3 Km desde la estación base) en el sector rural, los operadores móviles utilizan comúnmente bandas de frecuencias bajas (como 700 MHz, 800 MHz o 900 MHz). Esta tecnología es considerada viable para la conectividad a Internet en zonas rurales, por ejemplo, para fines de telemedicina (Kousias et al., 2024).

- b. 5G (Quinta Generación) y NB-IoT:** La tecnología 5G, y el LTE avanzado, se distinguen por ofrecer alta velocidad y baja latencia, siendo adecuadas para entornos rurales. Para lograr una cobertura amplia, las redes 5G requieren de una mayor cantidad de infraestructura ubicada a distancias más cortas. La integración de tecnologías como el 5G y la Internet de las Cosas (IoT) es fundamental para optimizar la conectividad en zonas remotas. Los diseños de red privada basados en 5G pueden satisfacer cualquier necesidad de capacidad, cobertura y latencia. Es importante mencionar que la capacidad multiservicio del 4G y 5G soporta aplicaciones de baja velocidad como el NB-IoT (Internet de las Cosas de Banda Estrecha), y el estándar 5G puede soportar dispositivos IoT ilimitados (Sellan, 2022).

1.2.7.3 TV White Spaces (TVWS), los Espacios en Blanco de TV (TVWS) son una solución tecnológica que aprovecha las frecuencias no utilizadas en el espectro de televisión. Esta tecnología es altamente relevante en contextos rurales porque ofrece una cobertura amplia y costos operativos reducidos. El uso de la infraestructura existente de la televisión (digital o analógica), combinada con el retorno inalámbrico, se considera una solución viable y atractiva para proporcionar conexión a Internet en áreas rurales. El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) de Perú está trabajando en un primer escenario de banda compartida utilizando TVWS.

Investigaciones recientes sugieren que esta aplicación es efectiva en entornos rurales para reducir costos (Martinez, 2022).

1.2.7.4 Backhaul y Enlaces de Transporte, enlaces Microondas (PTP) y soluciones Satelitales (LEO, MEO, GEO) como Backhaul

a. Enlaces Microondas Punto a Punto (PTP): Estos enlaces, que utilizan ondas electromagnéticas en el rango de 1 GHz a 300 GHz, se emplean para interconectar sitios remotos y para el backhaul de estaciones base de telefonía móvil. Representan una alternativa más ágil y eficiente para transferir información en lugares de difícil acceso o con geografía accidentada, siendo a menudo menos costosos que el despliegue de redes de fibra de alta capacidad. Los enlaces PTP pueden alcanzar capacidades de hasta 300 Mbps con alta disponibilidad, y algunos operan en la banda de 5 GHz (de uso libre mundial) para soluciones de bajo costo y alta velocidad. Un diseño de red en la región de Huánuco, por ejemplo, propuso la implementación de una red de acceso microondas mediante enlaces "Punto – punto". La principal limitación de estos enlaces es la necesidad de mantener una Línea de Vista (LOS), ya que su desempeño se ve afectado por obstáculos como construcciones, árboles o vegetación (Zarkadas & Dimitrakopoulos, 2021).

b. Soluciones Satelitales: La comunicación satelital es esencial, ya que utiliza un repetidor radioeléctrico en el espacio y es una herramienta necesaria para llegar a zonas remotas y de difícil acceso. Estos sistemas complementan las redes terrestres y son una opción para establecer centros de conexión Wi-Fi rural. Los sistemas VSAT (Very Small Aperture Terminal) son un componente clave, utilizando antenas parabólicas pequeñas (generalmente

menos de 2.5 metros) para el intercambio de información PTP o PtMP, operando en bandas C, Ku y Ka (Monzón & Sánchez, 2024).

1.2.7.5 Redes Wi-Fi para Acceso Final (802.11 variants), Wi-Fi (Wireless Fidelity), basado en los estándares IEEE 802.11, es la principal tecnología de implementación para proporcionar conectividad inalámbrica en áreas residenciales y comerciales.

Las redes Wi-Fi pueden configurarse en modo Ad-Hoc (comunicación directa PTP entre dispositivos) o en modo Infraestructura (dispositivos se comunican a través de un Punto de Acceso o AP). Esta solución es más económica que las redes cableadas, es rápida y fácil de instalar, y elimina la necesidad de cableado. Opera típicamente en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz; la banda de 5 GHz ofrece la ventaja de tener menos ruido e interferencias (James et al., 2022).

Aunque es ideal para uso en interiores con un alcance de hasta cientos de metros, la velocidad de transferencia de datos es limitada en comparación con las redes cableadas y es sensible a las interferencias causadas por fenómenos meteorológicos o por otros dispositivos inalámbricos que operan en la misma frecuencia. Un ejemplo de su uso práctico es la arquitectura 802.11n, la cual ha sido implementada en redes Cliente-Servidor para actualizar bases de datos en centros de salud (Yacine & Boufeldja, 2024).

2 CAPÍTULO II: MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, cuantitativa y no experimental. Es aplicada porque busca resolver un problema práctico concreto: diseñar un sistema de comunicación inalámbrica que garantice el acceso a internet en la Institución Educativa N.º 10212, caserío Shita Baja, distrito de Salas, región Lambayeque, una zona rural con severas limitaciones de conectividad. Es cuantitativa porque las variables de interés se miden numéricamente mediante métricas técnicas establecidas como capacidad IP promedio (Mbps), disponibilidad del enlace (%), margen de ganancia del sistema (dB), pérdida total de trayecto (dB) y margen de desvanecimiento (dB). Es no experimental porque no se manipulan variables en campo, sino que se evalúan configuraciones tecnológicas mediante simulación computacional en condiciones controladas.

El alcance es descriptivo-comparativo, ya que no solo se caracterizan los parámetros de desempeño de cada configuración tecnológica evaluada, sino que se comparan sistemáticamente sus resultados para determinar cuál ofrece el mejor rendimiento bajo las condiciones específicas del entorno rural de estudio. La investigación busca responder qué arquitectura de red inalámbrica resulta técnicamente óptima para asegurar la conectividad en la institución educativa, considerando criterios de capacidad, disponibilidad, confiabilidad y costo.

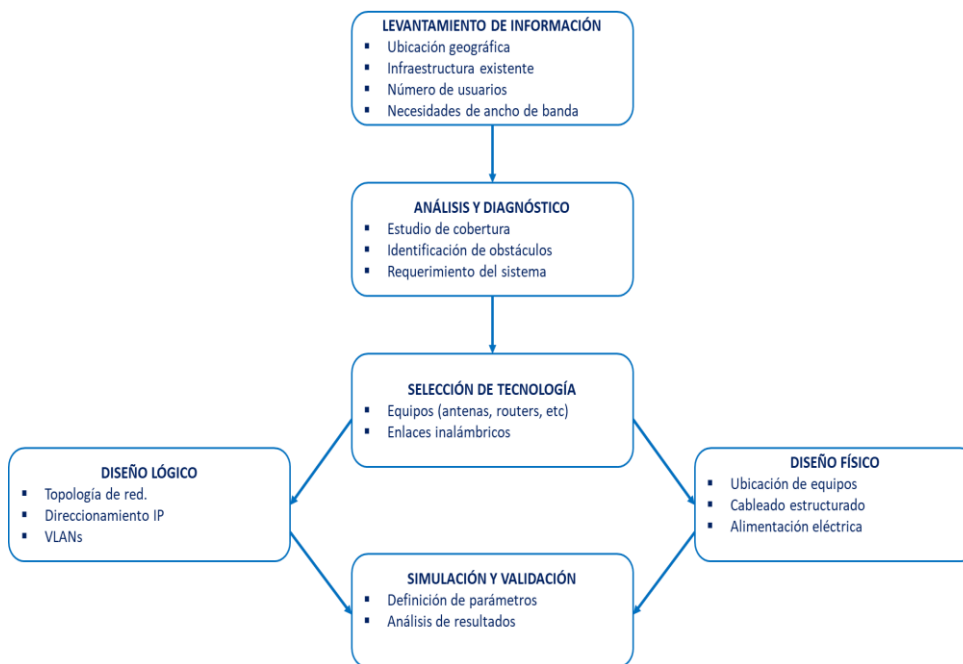
2.2 Diseño de la investigación

El diseño es no experimental con simulación controlada. Se construyó un entorno de modelamiento que reproduce las condiciones topográficas, de propagación y de infraestructura

representativas del trayecto Motupe–Salas–Shita Baja–I.E. 10212, mediante el software de planificación de radioenlaces Cambium LINKPlanner. Este enfoque permite evaluar el comportamiento de los enlaces bajo parámetros reales de terreno, distancia, altitud y condiciones atmosféricas, garantizando reproducibilidad y comparabilidad de resultados sin requerir despliegue físico de equipos.

Figura 2

Procedimiento a seguir en la investigación



2.3 Población, muestra

2.3.1 Población y muestra

La población del estudio está constituida por el conjunto de configuraciones tecnológicas de sistemas de comunicación inalámbrica aplicables al diseño de enlaces de transporte y acceso a internet en instituciones educativas ubicadas en zonas rurales con características geográficas, topográficas y de infraestructura similares a las del caserío Shita Baja, distrito de Salas, región Lambayeque.

2.3.2 Muestra

La muestra fue seleccionada de manera no probabilística e intencional, atendiendo a criterios de pertinencia técnica, disponibilidad de equipamiento en el mercado peruano y adecuación a las condiciones del escenario de estudio.

2.4 Técnicas, instrumentos, equipos y materiales

2.4.1 Técnicas

- **Análisis documental**, utilizado para la revisión, selección y sistematización de información proveniente de libros, tesis, artículos científicos, normas técnicas, reportes institucionales y documentación especializada relacionada con redes de comunicación, conectividad y tecnologías de telecomunicaciones.

- **Simulación técnica**, aplicada para modelar, analizar y evaluar el comportamiento del sistema propuesto mediante el uso de software especializado, con la finalidad de estimar

parámetros de desempeño, cobertura, capacidad, factibilidad técnica y condiciones operativas del diseño planteado.

2.4.2 Instrumentos

- ***Fichas bibliográficas***, empleadas para registrar de manera ordenada los datos de identificación de las fuentes consultadas, tales como autor, año, título, procedencia y aporte al estudio.
- ***Fichas de contenido***, utilizadas para extraer, organizar, resumir y analizar información relevante sobre conceptos teóricos, antecedentes, criterios técnicos, parámetros de diseño y resultados reportados en investigaciones previas.
- ***Registros de datos técnicos de simulación***, empleados para consignar los valores de entrada, parámetros de configuración y resultados obtenidos durante el proceso de modelamiento y simulación del diseño propuesto.

2.4.3 Equipos y materiales

- ***Laptop o computadora personal con procesador de alta velocidad***, necesaria para la búsqueda de información, procesamiento de datos, redacción del informe de investigación y ejecución de simuladores especializados.

- ***Software de simulación especializado***, utilizado para el modelamiento y evaluación del sistema de comunicaciones propuesto, de acuerdo con los requerimientos técnicos del estudio.

- ***Acceso a bases de datos académicas y repositorios digitales***, para la consulta de tesis, artículos científicos, normas y documentos técnicos relacionados con la temática investigada.

- ***Conexión a Internet***, necesaria para la revisión bibliográfica, descarga de documentos científicos y acceso a plataformas y herramientas digitales.

3. CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Institución Educativa N.º 10212 Divino Cristo de los Milagros, emplazada en el caserío Shita Baja del distrito de Salas, región Lambayeque, constituye un caso representativo de las limitaciones estructurales que enfrentan los centros educativos rurales del Perú con respecto al acceso a servicios de conectividad, aun cuando la institución dispone de personal docente calificado e instalaciones de educación básica regular, la ausencia de infraestructura de telecomunicaciones limita de manera significativa el acceso a herramientas digitales, plataformas educativas y recursos en línea, generando así una brecha tecnológica sustancial respecto a las instituciones urbanas (Apaza & Ramos, 2022).

Hemos identificado que, uno de los principales problemas es la baja disponibilidad y calidad del servicio de internet, representado por cobertura inestable, ancho de banda insuficiente y alta dependencia de soluciones no concebidas para entornos rurales, como las redes móviles celulares convencionales, limitaciones que impactan directamente sobre la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje, contenidos digitales educativos (Rodríguez, 2021).

Ante a esta realidad, el presente capítulo desarrolla un análisis comparativo de diferentes arquitecturas de sistemas inalámbricos, evaluando su desempeño bajo condiciones representativas del entorno rural de Lambayeque. Se consideraron factores críticos como la topografía irregular del terreno, la presencia de vegetación, las distancias de enlace y las condiciones climáticas de la región, los cuales inciden directamente sobre la propagación de las señales radioeléctricas (Sotelo,

2021). Los parámetros evaluados son cobertura, capacidad de transmisión (throughput) y disponibilidad del sistema, en concordancia con el segundo objetivo específico de la investigación.

El análisis abarcó dos escenarios tecnológicos principales de radioenlaces punto a punto: (i) enlaces en la banda de 5.8 GHz no licenciada con equipos Cambium Networks PTP670, y (ii) enlaces de microondas en la banda licenciada de 11 GHz con equipos Cambium Networks PTP11850C. Para el segmento de distribución local en la institución educativa se contempló una red Wi-Fi como acceso final. Ambas configuraciones fueron modeladas mediante el software de planificación de radioenlaces Cambium LINKPlanner, reproduciendo de manera fidedigna las condiciones topográficas reales del área de estudio.

De acuerdo con lineamientos del Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones (OSIPTEL) y recomendaciones internacionales sobre conectividad educativa, el requerimiento de ancho de banda por usuario en instituciones educativas oscila entre 2 Mbps y 10 Mbps, dependiendo del tipo de uso. Considerando un escenario de concurrencia parcial de estudiantes y docentes, un enlace de hasta 200 Mbps permite cubrir de manera eficiente la demanda actual y proyectada, manteniendo niveles aceptables de calidad de servicio (QoS) y experiencia de usuario (QoE).

Los resultados obtenidos permitirán comparar objetivamente el desempeño de cada alternativa tecnológica, identificar sus ventajas y limitaciones técnicas, y fundamentar la selección de la configuración óptima para la I.E. N.º 10212, en respuesta al tercer objetivo específico de la investigación.

3.1 Resultados

3.1.1 Diseño del enlace punto a punto en banda 5.8 GHz (no licenciada)

En la primera configuración evaluada se emplearon equipos Cambium Networks PTP670, diseñados para radioenlaces punto a punto de media y larga distancia en la banda de 5.8 GHz. Esta banda, de uso libre a nivel mundial, ofrece un balance adecuado entre alcance, capacidad y disponibilidad de espectro, constituyendo una alternativa de bajo costo para el transporte inalámbrico en zonas rurales, dado que el trayecto directo entre Motupe y Shita Baja no es técnicamente viable por la presencia de elevaciones topográficas que obstaculizan la línea de vista y afectan la zona de Fresnel, se diseñó una solución de enlace segmentado en tres tramos: Motupe – Salas, Salas – Ayuda Shita Baja y Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja. Este enfoque permite distribuir el trayecto total en distancias manejables donde es posible garantizar condiciones adecuadas de línea de vista (LOS) y despeje de la primera zona de Fresnel en cada tramo.

Figura 3

Vista topográfica del trayecto Motupe – Shita Baja y ubicación de los nodos del enlace segmentado



Nota. Obtenida de Google Earth.

La Fig. 03, ilustra la distribución geográfica de los nodos del sistema. La Tabla 1 detalla las coordenadas geográficas de cada punto del enlace, determinadas a partir del análisis topográfico del terreno.

Tabla 1

Coordenadas geográficas de los nodos del enlace PtP – I.E. Shita Baja

Nodo	Latitud	Longitud
Motupe	06.16270° S	079.69422° W
Salas	06.28035° S	079.63422° W
Shita Baja	06.24447° S	079.53990° W
I.E. Shita Baja	06.22408° S	079.51447° W

Nota. Datos obtenidos mediante análisis topográfico en Google Earth

Tramo Motupe – Salas

El primer tramo del enlace opera en la banda de 5.8 GHz con equipos Cambium Networks PTP670. La configuración de parámetros de radiofrecuencia y modulación se estableció según las condiciones topográficas del perfil de trayecto y los requisitos de capacidad del sistema. Se definió la región *Perú (preliminary)*, como marco normativo de referencia, ajustando los cálculos de potencia, EIRP y uso de espectro a las restricciones de la normativa local vigente.

Figura 4

Parámetros de configuración del equipo Cambium Networks PTP670 para el tramo Motupe – Salas

Region and Equipment Selection

Band

Product

Regulation

Precise Network Timing

5.8 GHz

PTP670

Peru (preliminary)

Disabled

PTP670 Configuration

Bandwidth

E1/T1

Optimization

Sync

Symmetry

Dual Payload

Highest Mod Mode

Lowest Ethernet Mode

Master

45 MHz

None

IP

Disabled

Symmetric

Enabled

256QAM 0.81

256QAM 0.81 Sngl

Motupe

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner.

En la Fig. 4, muestra el ancho de canal establecido en de 45 MHz, permitiendo maximizar la capacidad de transmisión, el modo de modulación más alto se estableció en 256QAM con tasa de codificación 0.81, reflejando un diseño orientado a la máxima eficiencia espectral, viable únicamente cuando se dispone de una relación señal-ruido elevada, la simetría del enlace garantiza la misma capacidad de transmisión en ambos sentidos, adecuada para un backbone en que el tráfico ascendente y descendente son comparables. La función Dual Payload se habilitó con el fin de aprovechar ambos flujos de transmisión e incrementar la eficiencia y capacidad agregada del enlace. El nodo Motupe fue designado como extremo maestro.

La Fig. 5 presenta el perfil de trayecto del tramo Motupe – Salas, con una distancia aproximada de 14.5 km. Se muestra una pendiente marcada descendente desde el nodo Motupe (≈ 280 m s.n.m.) hacia Salas (≈ 160 m s.n.m.), en el trayecto se observa terreno irregular con colinas y pequeñas elevaciones intermedias. Las líneas azules delimitan la primera zona de Fresnel; en la mayor parte del recorrido el terreno se mantiene por debajo de esta zona, garantizando un despeje superior al mínimo recomendado del 60 %, con lo que se asegura la estabilidad del enlace y minimiza pérdidas por difracción (Zarkadas & Dimitrakopoulos, 2021)

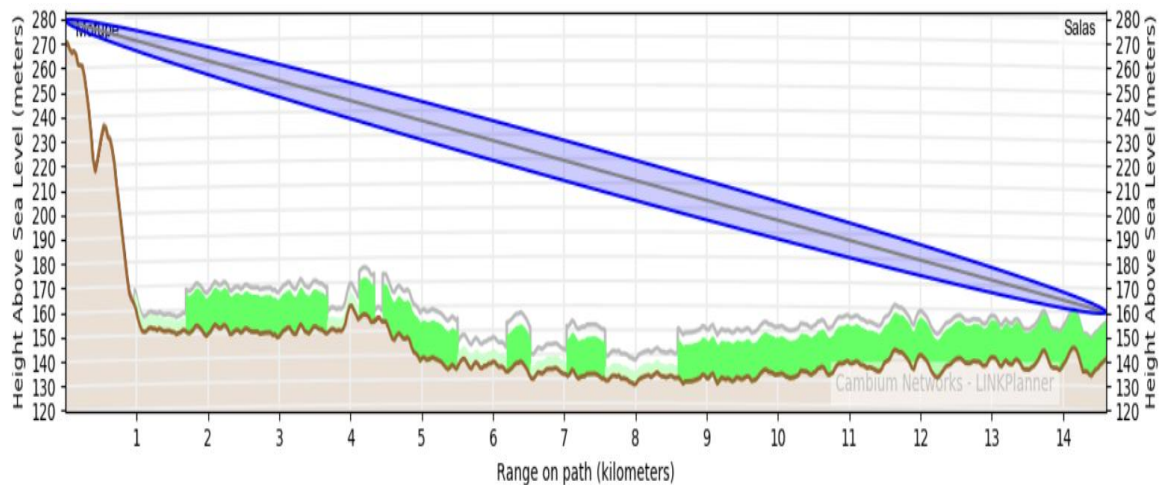
La Fig. 06, muestra la infraestructura de fibra óptica disponible en el nodo Motupe, la cual provee la conexión de backhaul de origen para el sistema inalámbrico diseñado, en la Figura 07, se muestra la configuración del sitio Motupe. Se seleccionó una antena parabólica de 6 pies, modelo Cambium Networks N050067D019, con ganancia de 38.3 dBi, instalada a una altura de 10 metros. Se habilitó la diversidad espacial con separación de 5 metros entre antenas para mitigar

los efectos del desvanecimiento por multitrayectoria. La pérdida por cable se estableció en 1.0 dB.

La EIRP máxima calculada es de 58.3 dBm, con potencia máxima del transmisor de 21.0 dBm, dentro de los límites operativos del equipo y la normativa vigente.

Figura 5

Perfil topográfico del trayecto Motupe – Salas con análisis de línea de vista y zona de Fresnel



Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

Figura 6

Infraestructura de fibra óptica disponible en el nodo Motupe - punto de origen del backhaul



Figura 7

Parámetros de configuración de la antena emisora en el nodo

The screenshot shows the 'Motupe' configuration window in the Cambium LINKPlanner software. The antenna model is 'Cambium Networks 6ft Parabolic N050067D019 (38.3dBi)'. The antenna height is set to 10.0 meters, with a note that the maximum height at the site is 30.0 m. Spatial Diversity is enabled (checked). Diversity Spacing is set to 5.0 meters, and Reflection Mitigation is disabled. Cable Loss is set to 1.0 dB, with a 'Calculate' button next to it. The Maximum EIRP is 58.3 dBm and the Maximum Power is 21.0 dBm, both with 'User limit' checkboxes. There is an 'Interference' checkbox and a 'MAC Address' input field at the bottom.

Motupe		
Cambium Networks 6ft Parabolic N050067D019 (38.3dBi)		
Antenna Height :	10.0 meters	(Max height at site is 30.0 m)
Spatial Diversity :	☒	
Diversity Spacing :	5.0 meters	☐ Reflection Mitigation
Cable Loss :	1.0 dB	☐ Calculate
Maximum EIRP :	58.3 dBm	☐ User limit
Maximum Power :	21.0 dBm	☐ User limit
☐ Interference :		
MAC Address :		

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner.

La Figura 08, presenta la configuración del sitio Salas, utilizándose la misma antena parabólica N050067D019 con 38.3 dBi de ganancia, instalada a 19 metros de altura para garantizar la línea de vista directa y el despeje adecuado de la primera zona de Fresnel, la diversidad espacial se habilitó con separación de 5 metros. La EIRP máxima es de 58.3 dBm con potencia máxima de 21.0 dBm.

Figura 8

Parámetros de configuración de la antena receptora en el nodo Salas

The screenshot shows the 'Salas' configuration window in the Cambium LINKPlanner software. The antenna model is 'Cambium Networks 6ft Parabolic N050067D019 (38.3dBi)'. The antenna height is set to 19.0 meters, with a note that the maximum height at the site is 25.0 m. Spatial Diversity is enabled (checked). Diversity Spacing is set to 5.0 meters, and Reflection Mitigation is disabled. Cable Loss is set to 1.0 dB, with a 'Calculate' button next to it. The Maximum EIRP is 58.3 dBm and the Maximum Power is 21.0 dBm, both with 'User limit' checkboxes. There is an 'Interference' checkbox and a 'MAC Address' input field at the bottom.

Salas		
Cambium Networks 6ft Parabolic N050067D019 (38.3dBi)		
Antenna Height :	19.0 meters	(Max height at site is 25.0 m)
Spatial Diversity :	☒	
Diversity Spacing :	5.0 meters	☐ Reflection Mitigation
Cable Loss :	1.0 dB	☐ Calculate
Maximum EIRP :	58.3 dBm	☐ User limit
Maximum Power :	21.0 dBm	☐ User limit
☐ Interference :		
MAC Address :		

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

Figura 9

Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo Motupe

Performance to Motupe	
Predicted Receive Power :	-36 dBm ± 5 dB
Mean IP Predicted :	220.20 Mbps
Mean IP Required :	200.0 Mbps
% of Required IP :	110 %
Min IP Required :	100.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

Nota. Obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Figura 09, presenta los principales indicadores de desempeño estimados para el sentido Salas → Motupe. La potencia de recepción predicha es de $-36 \text{ dBm} \pm 5 \text{ dB}$, dentro del rango óptimo de operación, la capacidad IP promedio predicha (Mean IP Predicted) alcanza los 220.20 Mbps, superando el requerimiento de 200.0 Mbps y representando un cumplimiento del 110 %. La disponibilidad IP predicha es del 100.00 %, superando el requisito mínimo del 99.99 %, lo que ratifica que el enlace cumple con criterios de alta confiabilidad propios de enlaces de transporte.

Figura 10

Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo Salas

Performance to Salas	
Predicted Receive Power :	-36 dBm ± 5 dB
Mean IP Predicted :	220.20 Mbps
Mean IP Required :	200.0 Mbps
% of Required IP :	110 %
Min IP Required :	100.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

Nota. Obtenida del software Cambium LINKPlanner.

La Figura 10, presenta los indicadores de rendimiento en el sentido Motupe → Salas. Los resultados son prácticamente simétricos respecto al sentido opuesto: potencia de recepción predicha $-36 \text{ dBm} \pm 5 \text{ dB}$, capacidad IP promedio predicha 220.20 Mbps (110 % del requerimiento) y disponibilidad IP predicha del 100.00 %. Este comportamiento simétrico confirma el diseño balanceado del enlace.

Figura 11

Resumen global de parámetros de desempeño del tramo Motupe – Salas a 5.8 GHz

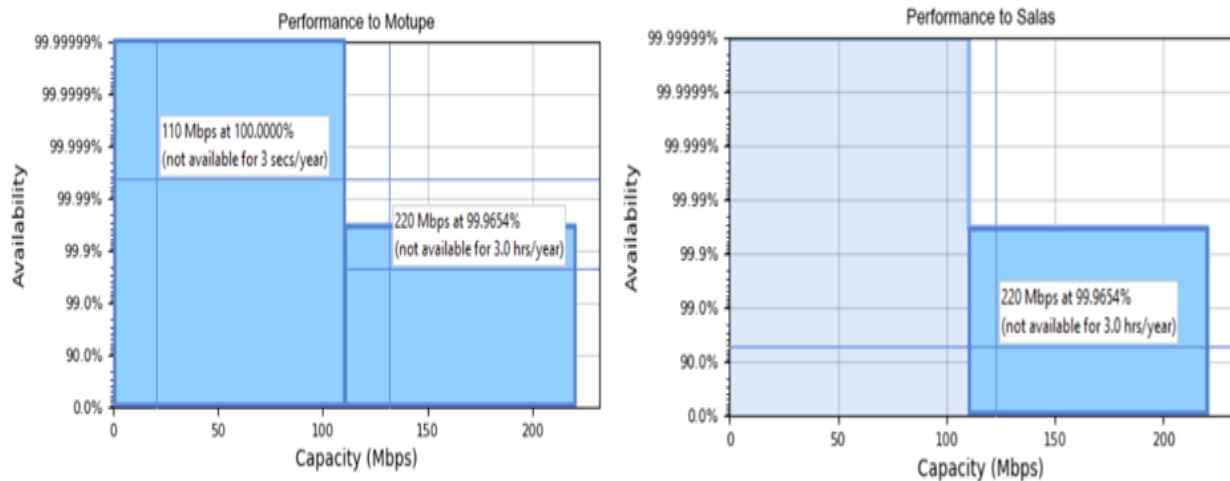
Link Summary	
Aggregate IP Throughput : 440.39 Mbps	
Lowest Mode Availability : 100.0000 %	
System Gain Margin :	52.75 dB
Free Space Path Loss :	131.01 dB
Gaseous Absorption Loss :	0.15 dB
Excess Path Loss :	0.00 dB
Total Path Loss :	131.16 dB

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner.

La Fig. 11, brinda los indicadores generales del tramo, el throughput IP agregado (Aggregate IP Throughput) alcanza 440.39 Mbps, la disponibilidad del modo más bajo de operación (Lowest Mode Availability) es del 100.00 %, el margen de ganancia del sistema (System Gain Margin) es de 52.75 dB, lo que ratifica que el enlace dispone de una reserva significativa frente a pérdidas adicionales, interferencias y desvanecimientos, la pérdida en espacio libre (Free Space Path Loss) es de 131.01 dB, la pérdida por absorción gaseosa es mínima (0.15 dB) y no se registran pérdidas excesivas de trayecto (0.00 dB), la pérdida total del trayecto asciende a 131.16 dB.

Figura 12

Análisis de modos de modulación y parámetros de desempeño por modo para el tramo Motupe – Salas



Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Fig. 12, define el comportamiento del enlace por cada modo de modulación disponible, desde 256QAM hasta BPSK, en 256QAM Dual el enlace alcanza una capacidad agregada de aproximadamente 440.47 Mbps, el margen de desvanecimiento (Fade Margin) en 256QAM es de 24–28 dB, incrementándose progresivamente hasta superar los 45–52 dB en los modos BPSK, la disponibilidad de modo en configuraciones de alta capacidad es cercana al 99.98 %, alcanzando el 100 % en los modos más robustos, el indicador Receive Time in Mode confirma que el enlace operará predominantemente en los modos de mayor capacidad, validando la calidad del diseño.

Tramo Salas – Shita Baja

El segundo tramo del enlace conecta el nodo Salas con el nodo intermedio Shita Baja, con una distancia aproximada de 11 km, el equipo empleado es el Cambium Networks PTP670 configurado en la banda de 5.8 GHz, con un ancho de canal de 45 MHz, el modo de modulación

más alto se estableció en 256QAM (Code Rate 0.81) y el nodo Salas fue designado como extremo maestro.

Figura 13

Parámetros de configuración del equipo Cambium Networks PTP670, tramo Salas – Shita Baja

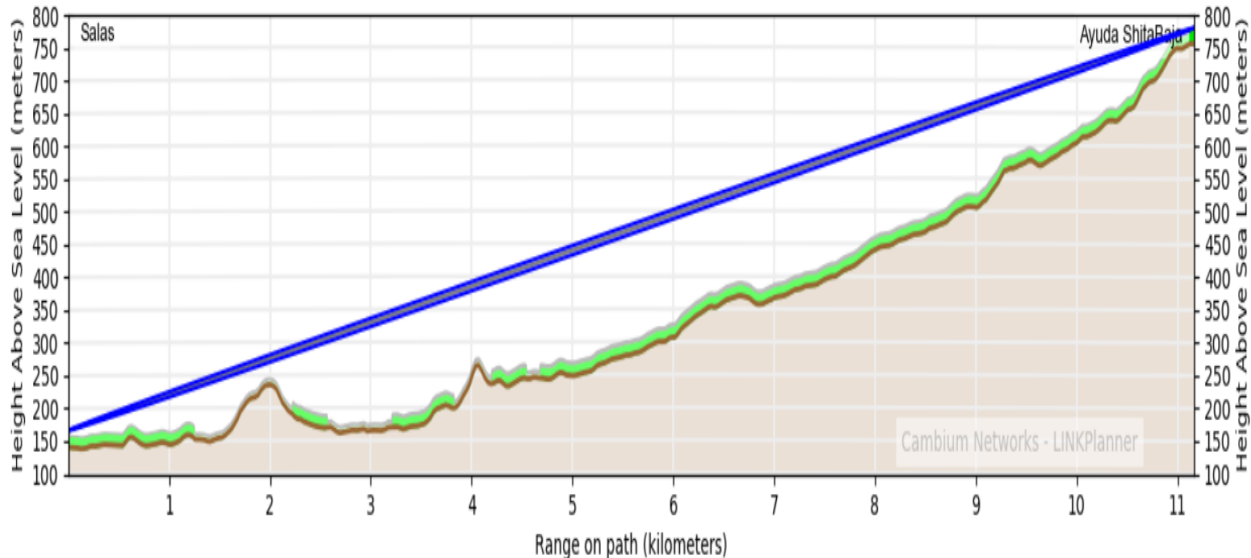
Region and Equipment Selection			
Band	Product	Regulation	Precise Network Timing
5.8 GHz	PTP670	Peru (preliminary)	Disabled

PTP670 Configuration								
Bandwidth	E1/T1	Optimization	Sync	Symmetry	Dual Payload	Highest Mod Mode	Lowest Ethernet Mode	Master
45 MHz	None	IP	Disabled	Symmetric	Enabled	256QAM 0.81	256QAM 0.81 Sngl	Salas

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner.

Figura 14

Perfil topográfico del trayecto Salas – Shita Baja con análisis de línea de vista y zona de Fresnel



Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Fig. 14, presenta el perfil de trayecto del tramo Salas – Ayuda Shita Baja. El relieve muestra un ascenso progresivo desde el nodo Salas (≈ 150 m s.n.m.) hasta Ayuda Shita Baja ($\approx$

780 m s.n.m.), la línea de vista directa (LOS) se mantiene completamente por encima del perfil topográfico durante todo el trayecto, mostrando la ausencia de obstrucciones directas, en la primera zona de Fresnel se observa, que permanece mayormente despejada; aunque el terreno presenta elevaciones intermedias, ninguna de ellas invade de forma crítica dicha zona.

Figura 15

Parámetros de configuración de la antena emisora en el nodo Salas

Salas

Cambium Networks 6ft Parabolic N050067D019 (38.3dBi)

Antenna Height : 25.0 meters (Max height at site is 25.0 m)

Spatial Diversity : ☒

Diversity Spacing : 5.0 meters ☐ Reflection Mitigation

Cable Loss : 1.0 dB ☐ Calculate

Maximum EIRP : 56.3 dBm ☐ User limit

Maximum Power : 19.0 dBm ☐ User limit

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

En la Figura 15, se muestra la configuración del sitio Salas. La antena parabólica N050067D019 de 6 pies (ganancia: 38.3 dBi) fue instalada a 25 metros de altura, correspondiente a la altura máxima permitida en el sitio. La diversidad espacial se habilitó con separación de 5 metros entre antenas. La pérdida por cable es de 1.0 dB. La EIRP máxima es de 56.3 dBm con potencia máxima de 19.0 dBm.

La Figura 16, presenta la configuración del sitio Shita Baja. De forma simétrica al nodo Salas, se utilizó la misma antena parabólica N050067D019 de 6 pies con 38.3 dBi de ganancia, instalada a 25.0 metros de altura sobre una estructura con altura máxima permitida de 30.0 metros.

La diversidad espacial se habilitó con separación de 5.0 metros. La EIRP máxima es de 56.3 dBm con potencia máxima de 19.0 dBm.

Figura 16

Parámetros de configuración de la antena receptora en el nodo Ayuda Shita Baja

Ayuda Shita Baja

Cambium Networks 6ft Parabolic N050067D019 (38.3dBi)

Antenna Height : 25.0 meters (Max height at site is 30.0 m)

Spatial Diversity : ☒

Diversity Spacing : 5.0 meters ☐ Reflection Mitigation

Cable Loss : 1.0 dB ☐ Calculate

Maximum EIRP : 56.3 dBm ☐ User limit

Maximum Power : 19.0 dBm ☐ User limit

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner.

La Figura 17, muestra los indicadores de rendimiento en el sentido Ayuda Shita Baja → Salas, la potencia de recepción predicha es de $-35 \text{ dBm} \pm 5 \text{ dB}$, la capacidad IP promedio predicha es de 221.43 Mbps, superando el requerimiento de 220.0 Mbps (101 % de cumplimiento), la disponibilidad IP predicha es del 100.00 %.

La Figura 18, presenta los indicadores de rendimiento en el sentido Salas → Ayuda Shita Baja, los resultados son prácticamente simétricos: potencia de recepción predicha $-35 \text{ dBm} \pm 5 \text{ dB}$, capacidad IP promedio predicha 221.43 Mbps (101 % del requerimiento de 220 Mbps) y

disponibilidad IP predicha del 100.00 %, estos resultados ratifican que el enlace cumple holgadamente con la demanda de tráfico planificada.

Figura 17

Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo Salas para el tramo Salas – Shita Baja

Performance to Salas	
Predicted Receive Power :	-35 dBm ± 5 dB
Mean IP Predicted :	221.43 Mbps
Mean IP Required :	220.0 Mbps
% of Required IP :	101 %
Min IP Required :	100.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

Figura 18

Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo Ayuda Shita Baja

Performance to Ayuda ShitaBaja	
Predicted Receive Power :	-35 dBm ± 5 dB
Mean IP Predicted :	221.43 Mbps
Mean IP Required :	220.0 Mbps
% of Required IP :	101 %
Min IP Required :	100.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

Figura 19

Resumen global de parámetros de desempeño del tramo Salas – Ayuda Shita Baja a 5.8 GHz

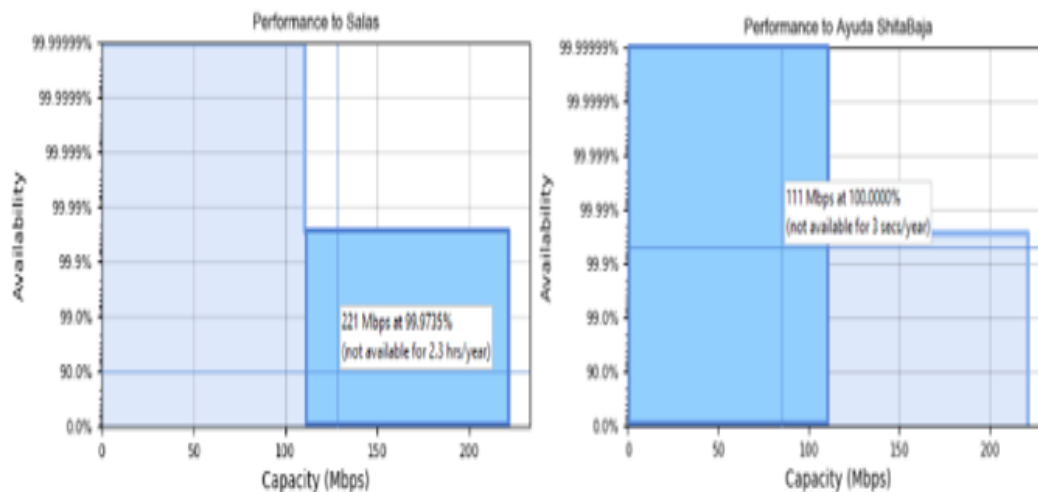


Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Fig. 19, ratifica los indicadores generales del tramo, el throughput IP agregado logra 442.87 Mbps, la disponibilidad del modo más bajo es del 100.00 %, el margen de ganancia del sistema asciende a 53.13 dB, la pérdida total del trayecto es de 128.79 dB, corroborando que el enlace presenta excelentes condiciones de propagación.

Figura 20

Análisis de modos de modulación y parámetros de desempeño por modo para el tramo Salas – Ayuda Shita Baja



Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

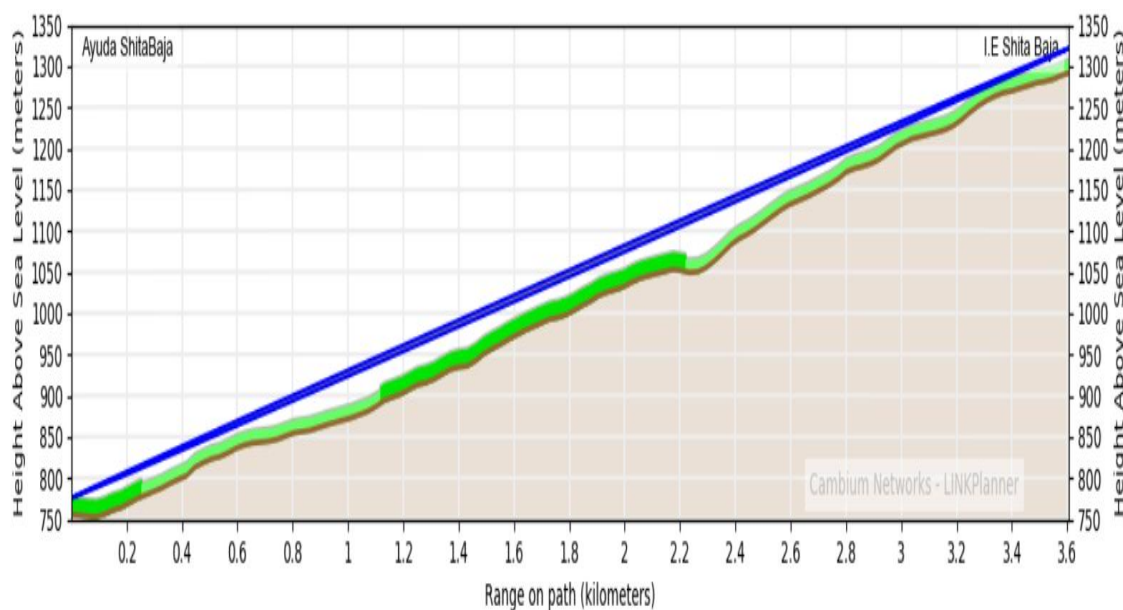
La Fig. 20, detalla el comportamiento del enlace Salas – Ayuda Shita Baja para cada modo de modulación, en 256QAM Dual se alcanza una capacidad agregada próxima a 443 Mbps, el margen de desvanecimiento aumenta desde ~25 dB en 256QAM hasta superar los 50 dB en BPSK, siendo la disponibilidad de modo de alta capacidad es cercana al 99.97 %, alcanzando el 100 % en los modos más robustos, Receive Time in Mode reafirma que el enlace operará predominantemente en los modos de mayor eficiencia.

Tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja

El tercer y último tramo del enlace en banda 5.8 GHz cubre una distancia aproximada de 3.6 km entre el nodo Ayuda Shita Baja y la I.E. Shita Baja, la corta distancia y el perfil topográfico ascendente ayudan a un alto margen del sistema, admitiendo prever un enlace confiable con buena estabilidad y operación en modulaciones elevadas.

Figura 21

Vista del perfil topográfico del trayecto Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja con análisis de zona de Fresnel



Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Figura 19, muestra el perfil de trayecto del tramo final, la línea de vista directa entre las antenas se mantiene completamente por encima del perfil topográfico durante todo el recorrido, las altitudes oscilan entre 750 m y 1,350 m s.n.m., evidenciando que el enlace se sitúa en una zona de alta altitud con condiciones geográficas favorables para la propagación, la primera zona de Fresnel permanece adecuadamente despejada a lo largo del trayecto.

Figura 22

Parámetros de configuración de la antena emisora en el nodo Ayuda Shita Baja para el tramo final

Ayuda ShitaBaja		
Cambium Networks 6ft Parabolic N050067D019 (38.3dBi)		
Antenna Height :	20.0 meters	(Max height at site is 30.0 m)
Spatial Diversity :	☒	
Diversity Spacing :	5.0 meters	☐ Reflection Mitigation
Cable Loss :	1.0 dB	☐ Calculate
Maximum EIRP :	46.3 dBm	☐ User limit
Maximum Power :	9.0 dBm	☐ User limit

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Fig. 22, presenta la configuración del sitio Ayuda Shita Baja, se utilizó la antena parabólica N050067D019 de 6 pies (ganancia: 38.3 dBi) instalada a 20.0 metros de altura; el análisis del perfil de trayecto confirmó que esta altura es suficiente para el despeje adecuado de la primera zona de Fresnel sin necesidad de utilizar la infraestructura máxima (30 m), la diversidad espacial está habilitada con separación de 5.0 metros. La EIRP máxima es de 46.3 dBm con potencia máxima de 9.0 dBm.

Figura 23

Parámetros de configuración de la antena receptora en el nodo I.E. Shita Baja

I.E Shita Baja

Cambium Networks 6ft Parabolic N050067D019 (38.3dBi)

Antenna Height : 30.0 meters (Max height at site is 30.0 m)

Spatial Diversity : ☒

Diversity Spacing : 5.0 meters ☐ Reflection Mitigation

Cable Loss : 1.0 dB ☐ Calculate

Maximum EIRP : 46.3 dBm ☐ User limit

Maximum Power : 9.0 dBm ☐ User limit

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Fig. 23 presenta la configuración del sitio I.E. Shita Baja, seleccionando la misma antena parabólica N050067D019 con 38.3 dBi de ganancia, se instaló a 30.0 metros de altura, correspondiente a la altura máxima permitida en el sitio, necesaria para asegurar la línea de vista directa y el despeje de Fresnel en el tramo final ascendente, logrando la EIRP máxima es de 46.3 dBm con potencia máxima de 9.0 dBm.

La Fig. 24, muestra el rendimiento en dirección a Ayuda Shita Baja, la potencia de recepción predicha es de $-35 \text{ dBm} \pm 5 \text{ dB}$, la capacidad IP promedio predicha es de 224.28 Mbps, superando el requerimiento de 220.0 Mbps (102 % de cumplimiento) y la disponibilidad IP predicha es del 100.00 %.

Figura 24

Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo Ayuda Shita Baja para el tramo final

Performance to Ayuda ShitaBaja	
Predicted Receive Power :	-35 dBm ± 5 dB
Mean IP Predicted :	224.28 Mbps
Mean IP Required :	220.0 Mbps
% of Required IP :	102 %
Min IP Required :	100.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner.

Figura 25

Indicadores de desempeño del enlace en dirección al nodo I.E. Shita Baja

Performance to I.E Shita Baja	
Predicted Receive Power :	-35 dBm ± 5 dB
Mean IP Predicted :	224.28 Mbps
Mean IP Required :	5.0 Mbps
% of Required IP :	4486 %
Min IP Required :	1.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Fig. 25, presenta los indicadores de rendimiento en el sentido Ayuda Shita Baja → I.E. Shita Baja, la potencia de recepción predicha es de $-35 \text{ dBm} \pm 5 \text{ dB}$. La capacidad IP promedio predicha es de 224.28 Mbps, mientras que la velocidad IP media requerida para este sitio se

configuró en 5.0 Mbps en la simulación, obteniéndose un cumplimiento del 4 486 % del caudal requerido, resultando que la capacidad disponible supera ampliamente la demanda prevista para el sitio final. La disponibilidad IP predicha es del 100.00 %.

La Fig. 26, fortalece los indicadores integrales del tramo final, el throughput IP agregado alcanza 448.56 Mbps., la disponibilidad del modo más bajo es del 100.00 %, el margen de ganancia del sistema es de 53.03 dB, la pérdida en espacio libre es de 118.86 dB, con pérdida por absorción gaseosa de apenas 0.03 dB, la pérdida total del trayecto asciende a 118.89 dB, vinculado con un enlace de corta a media distancia en condiciones de propagación favorables.

Figura 26

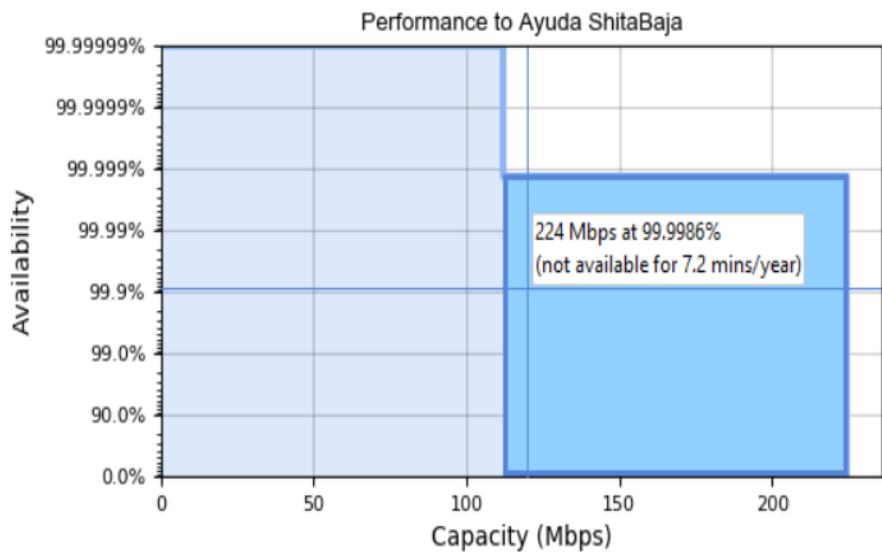
Resumen global de parámetros de desempeño del tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja a 5.8 GHz

Link Summary	
Aggregate IP Throughput :	448.56 Mbps
Lowest Mode Availability :	100.0000 %
System Gain Margin :	53.03 dB
Free Space Path Loss :	118.86 dB
Gaseous Absorption Loss :	0.03 dB
Excess Path Loss :	0.00 dB
Total Path Loss :	118.89 dB

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

Figura 27

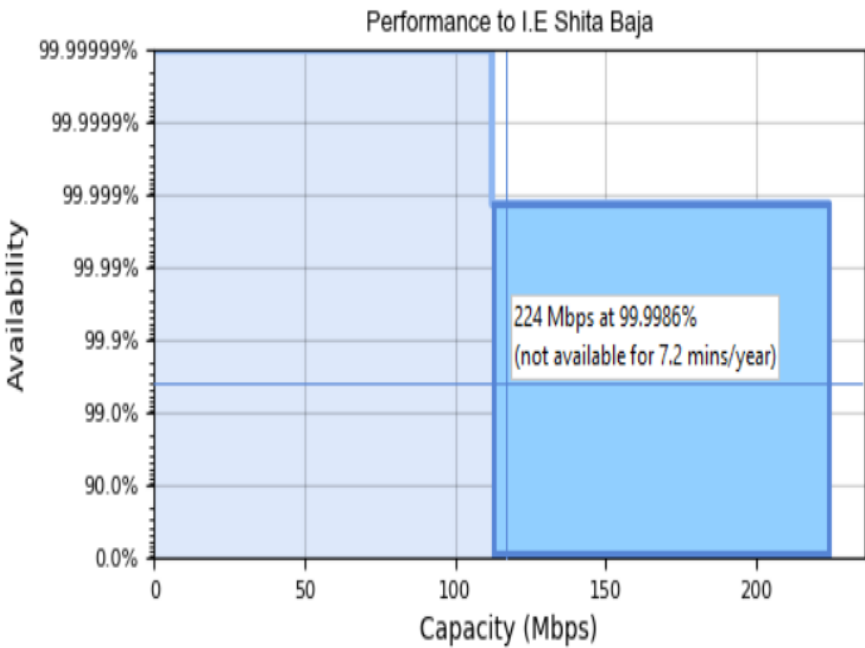
Análisis de modos de modulación y desempeño por modo hacia el nodo Ayuda Shita Baja



Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

Figura 28

Análisis de modos de modulación y desempeño por modo hacia el nodo I.E. Shita Baja



Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

En las Figuras 27 y 28, se detallan el comportamiento del enlace por modo de modulación en ambos sentidos, en 256QAM Dual se alcanzan capacidades agregadas de hasta 448.56 Mbps, el margen de desvanecimiento se sitúa en ~25 dB en 256QAM, aumentando progresivamente hasta superar los 50 dB en los modos BPSK, la disponibilidad de modo es cercana al 99.998 % en los modos de alta capacidad y alcanza el 100 % en los más robustos.

La Fig. 29 enseña la arquitectura completa del enlace punto a punto en banda 5.8 GHz con los nodos intermedios Salas y Ayuda Shita Baja, el uso de repetidores estratégicamente ubicados permite garantizar: (i) línea de vista y despeje de Fresnel en todos los tramos; (ii) altos niveles de capacidad IP; (iii) amplios márgenes frente a desvanecimientos; y (iv) disponibilidad acorde a enlaces de transporte críticos, el diseño asegura que la I.E. N.º 10212 disponga de una conexión estable y de alta capacidad desde el nodo de origen en Motupe.

Figura 29

Diagrama esquemático de la arquitectura completa del enlace Motupe – I.E. Shita Baja a 5.8 GHz



Nota. Elaboración propia.

3.1.2 Diseño del enlace de microondas en banda 11 GHz (licenciada)

La segunda configuración evaluada corresponde a radioenlaces de microondas en la banda licenciada de 11 GHz, empleando equipos Cambium Networks PTP11850C, esta plataforma está diseñada para aplicaciones de transporte troncal de alta capacidad y elevada disponibilidad, con modulación adaptativa que varía entre 4096QAM y BPSK. El uso de banda licenciada garantiza

un marco de operación coordinado y regulado, reduciendo significativamente el riesgo de interferencias respecto a las bandas no licenciadas, la arquitectura de enlace configurada es 1+0 (punto a punto sin protección redundante) y el ancho de canal es de 80 MHz con espaciado T/R de 490 MHz, al igual que en la configuración anterior, el trayecto total se segmentó en tres tramos manteniendo la misma ubicación geográfica de los nodos de la Tabla 1.

Tramo Motupe – Salas

Figura 30
Parámetros de configuración del equipo Cambium Networks PTP11850C, Motupe – Salas a 11 GHz

Region and Equipment Selection

Band	Product	Regulation	Link Type	Remote Mount
11 GHz	PTP11850C	FCC	1+0	None

PTP11850C Configuration

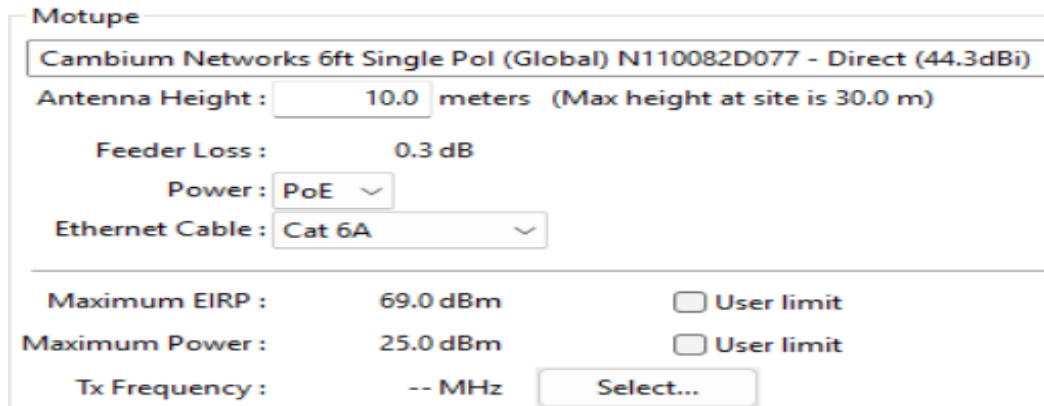
T/R Spacing	Bandwidth	Modulation Mode	Maximum Mod Mode	Minimum Mod Mode	Polarization	ATPC	Hi
490 MHz	80 MHz	Adaptive	12 - 4096QAM	0 - BPSK	Vertical	Disabled	Salas

Nota. Captura de pantalla del software Cambium LINKPlanner

La Fig. 30, presenta los parámetros de configuración del enlace microondas en el tramo Motupe – Salas, el ancho de canal de 80 MHz permite alcanzar capacidades de transmisión muy superiores a las del enlace en 5.8 GHz, la función ATPC se encuentra deshabilitada, manteniendo la potencia de transmisión fija según los parámetros de diseño. El modo de modulación adaptativo comprende desde 4096QAM hasta BPSK.

Figura 31

Parámetros de configuración de la antena emisora del nodo Motupe para el enlace microondas a 11 GHz



Motupe	
Cambium Networks 6ft Single Pol (Global) N110082D077 - Direct (44.3dBi)	
Antenna Height :	10.0 meters (Max height at site is 30.0 m)
Feeder Loss :	0.3 dB
Power :	PoE
Ethernet Cable :	Cat 6A
Maximum EIRP :	69.0 dBm ☐ User limit
Maximum Power :	25.0 dBm ☐ User limit
Tx Frequency :	-- MHz Select...

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Fig. 31, muestra la configuración del sitio Motupe para el enlace microondas, se seleccionó una antena parabólica Cambium Networks de 6 pies, modelo N110082D077, con ganancia de 44.3 dBi, esta ganancia, considerablemente superior a la de la antena empleada en la banda 5.8 GHz, es característica de enlaces microondas troncales de alta capacidad, con una altura de instalación configurada en 10.0 metros, la pérdida del alimentador (Feeder Loss) se estableció en 0.3 dB, reflejando una instalación optimizada con guías de onda de alta calidad, el sistema se alimenta mediante PoE con cable Ethernet Cat 6A.

La Figura 32, presenta la configuración del sitio Salas. Se utilizó la misma antena parabólica N110082D077 de 6 pies con 44.3 dBi de ganancia, instalada a 25.0 metros de altura correspondiente a la altura máxima permitida en el sitio. La pérdida del alimentador es de 0.3 dB con alimentación PoE y cable Cat 6A. La EIRP máxima es de 66.0 dBm con potencia máxima del transmisor de 22.0 dBm.

Figura 32

Parámetros de configuración de la antena receptora del nodo Salas para el enlace microondas a 11 GHz

Salas

Cambium Networks 6ft Single Pol (Global) N110082D077 - Direct (44.3dBi)

Antenna Height : 19.0 meters (Max height at site is 25.0 m)

Feeder Loss : 0.3 dB

Power : PoE ▾

Ethernet Cable : Cat 6A ▾

Maximum EIRP : 69.0 dBm ☐ User limit

Maximum Power : 25.0 dBm ☐ User limit

Tx Frequency : -- MHz

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Fig. 33, presenta los indicadores de desempeño para ambos sentidos del enlace microondas Motupe – Salas, la potencia de recepción predicha es de $-24 \text{ dBm} \pm 4 \text{ dB}$, indicando un nivel de señal muy alto en el receptor. La capacidad IP promedio predicha alcanza los 535.29 Mbps, representando un cumplimiento del 268 % del requerimiento de 200.0 Mbps. La disponibilidad IP predicha es del 100.000 %, superando el requisito mínimo del 99.990 %. Los resultados en ambos sentidos son simétricos, confirmando el diseño balanceado del enlace.

Figura 33

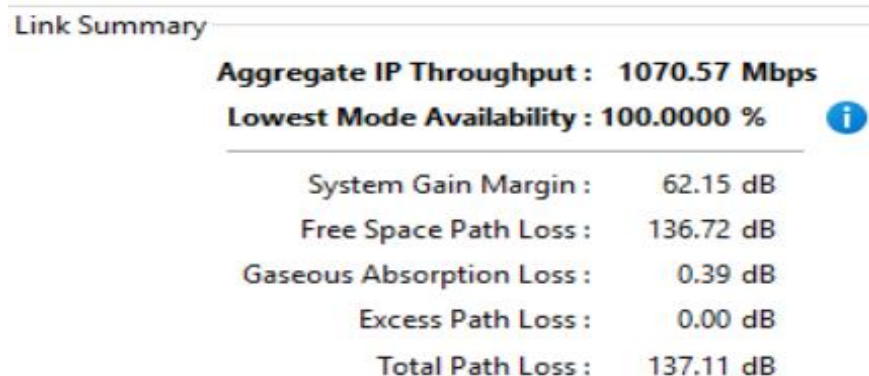
Indicadores de desempeño del enlace microondas en ambos sentidos para el tramo Motupe – Salas

Performance to Motupe	Performance to Salas
Predicted Receive Power : -24 dBm ± 4 dB	Predicted Receive Power : -24 dBm ± 4 dB
Mean IP Predicted : 535.29 Mbps	Mean IP Predicted : 535.29 Mbps
Mean IP Required : 200.0 Mbps	Mean IP Required : 200.0 Mbps
% of Required IP : 268 %	% of Required IP : 268 %
Min IP Required : 100.0 Mbps	Min IP Required : 100.0 Mbps
Min IP Availability Required : 99.9900 %	Min IP Availability Required : 99.9900 %
Min IP Availability Predicted : 100.0000 %	Min IP Availability Predicted : 100.0000 %

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

Figura 34

Resumen global de parámetros de desempeño del tramo Motupe – Salas a 11 GHz

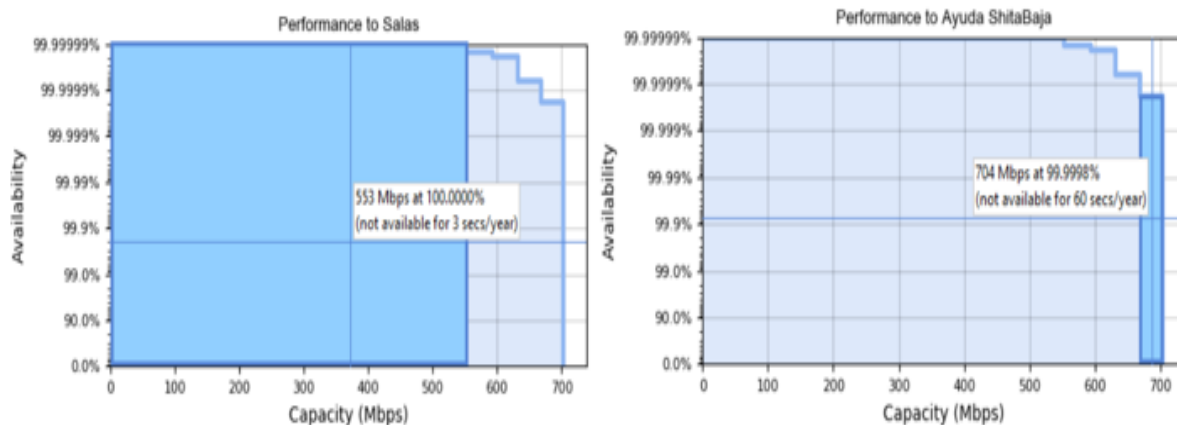


Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Fig. 34, consolida los indicadores globales del tramo Motupe – Salas a 11 GHz. El throughput IP agregado alcanza 1 070.57 Mbps, valor que posiciona al enlace como una infraestructura troncal de muy alta capacidad. La disponibilidad del modo más bajo es del 100.00%. El margen de ganancia del sistema es de 62.15 dB, valor extremadamente elevado para un enlace microondas, mostrando una reserva significativa de potencia frente a desvanecimientos profundos, la pérdida en espacio libre es de 136.72 dB, la pérdida por absorción gaseosa es de 0.39 dB y la pérdida total del trayecto asciende a 137.11 dB.

Figura 35

Análisis de modos de modulación y parámetros de desempeño por modo en el tramo Motupe – Salas a 11 GHz



La Fig. 35, detalla el comportamiento del enlace por modo de modulación. En el modo de máxima capacidad (4096QAM), el enlace alcanza una capacidad agregada de aproximadamente 1 070.58 Mbps. El Max IP Throughput por sentido alcanza 535.29 Mbps en el modo 4096QAM. El margen de desvanecimiento parte de ~19.60 dB en 4096QAM e incrementa progresivamente hasta 62.15 dB en BPSK. La disponibilidad de modo es cercana al 99.9993 % en modulaciones altas y alcanza el 100.00 % en los modos más robustos.

Tramo Salas – Ayuda Shita Baja

Figura 36

Configuración de antenas emisora y receptora para el tramo Salas – Ayuda Shita Baja a 11 GHz

Salas	Ayuda ShitaBaja
Cambium Networks 6ft Single Pol (Global) N110082D077 - Direct (44.3dBi)	Cambium Networks 6ft Single Pol (Global) N110082D077 - Direct (44.3dBi)
Antenna Height: 25.0 meters (Max height at site is 25.0 m)	Antenna Height: 25.0 meters (Max height at site is 30.0 m)
Feeder Loss: 0.3 dB	Feeder Loss: 0.3 dB
Power: PoE	Power: PoE
Ethernet Cable: Cat 6A	Ethernet Cable: Cat 6A
Maximum EIRP: 66.0 dBm ☐ User limit	Maximum EIRP: 66.0 dBm ☐ User limit
Maximum Power: 22.0 dBm ☐ User limit	Maximum Power: 22.0 dBm ☐ User limit
Tx Frequency: -- MHz Select...	Tx Frequency: -- MHz Select...

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner.

La Fig. 36, presenta las configuraciones de los sitios Salas y Ayuda Shita Baja para el enlace microondas, para ambos emplazamientos se utilizan la antena parabólica N110082D077 de 6 pies con 44.3 dBi de ganancia, demostrando un diseño simétrico. En Salas, la antena se instaló a 25.0 metros de altura (máximo del sitio), con EIRP máxima de 66.0 dBm y potencia de transmisión de 22.0 dBm. En Ayuda Shita Baja, la antena se instaló a 25.0 metros sobre una estructura con

altura máxima de 30.0 metros, con los mismos parámetros de potencia. La pérdida por alimentador es de 0.3 dB en ambos emplazamientos, con alimentación PoE y cable Cat 6A.

Figura 37
Indicadores de desempeño del enlace microondas en ambos sentidos para el tramo Salas – Ayuda Shita Baja

Performance to Salas	Performance to Ayuda ShitaBaja
Predicted Receive Power: -25 dBm ± 4 dB	Predicted Receive Power: -25 dBm ± 4 dB
Mean IP Predicted: 703.65 Mbps	Mean IP Predicted: 703.65 Mbps
Mean IP Required: 220.0 Mbps	Mean IP Required: 220.0 Mbps
% of Required IP: 320 %	% of Required IP: 320 %
Min IP Required: 100.0 Mbps	Min IP Required: 100.0 Mbps
Min IP Availability Required: 99.9900 %	Min IP Availability Required: 99.9900 %
Min IP Availability Predicted: 100.0000 %	Min IP Availability Predicted: 100.0000 %

Las Figuras 37 y 38, presentan los indicadores de desempeño y el resumen global del tramo Salas – Ayuda Shita Baja. El throughput IP agregado alcanza 1 407.31 Mbps. La disponibilidad del modo más bajo es del 100.00 %, y el sistema cumple con los criterios regulatorios FCC al 99.95 % para 32QAM. El margen de ganancia del sistema asciende a 59.69 dB. La pérdida en espacio libre es de 134.39 dB, con pérdida por absorción gaseosa de 0.27 dB, resultando en una pérdida total del trayecto de 134.67 dB, resultados que confirman que el enlace microondas entre Salas y Ayuda Shita Baja opera como una troncal de clase carrier.

La Fig. 39, detalla el comportamiento del tramo Salas – Ayuda Shita Baja por modo de modulación. En la configuración 4096QAM se alcanza la capacidad máxima de 1 407.31 Mbps. El Max IP Throughput por sentido alcanza 703.65 Mbps en el modo 4096QAM, con margen de desvanecimiento de ~21.64 dB que aumenta hasta 59.69 dB en BPSK. La disponibilidad de modo

en configuraciones de alta capacidad es cercana al 99.9998 %, alcanzando el 100 % en modos más robustos.

Figura 38

Parámetros de desempeño del tramo Salas – Ayuda Shita Baja a 11 GHz

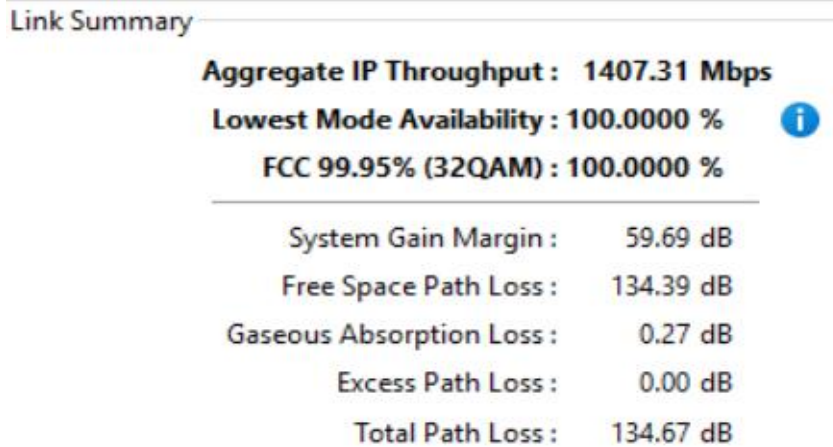
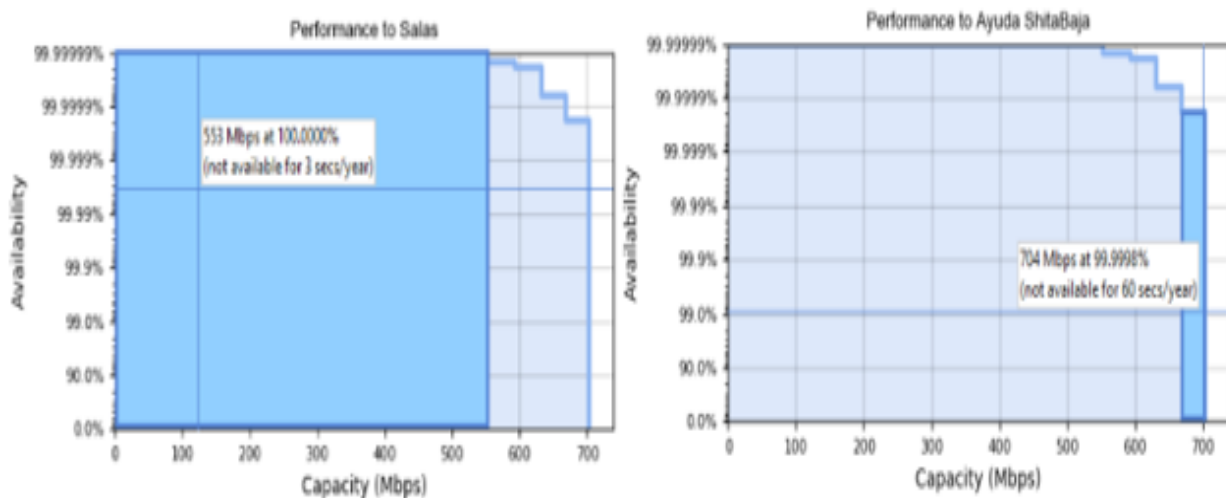


Figura 39

Análisis de modos de modulación y parámetros de desempeño por modo para el tramo Salas – Ayuda Shita Baja a 11 GHz



Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

Tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja

Figura 40

Configuración de antenas emisora y receptora para el tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja a 11 GHz

Ayuda ShitaBaja	I.E Shita Baja
Cambium Networks 6ft Single Pol (Global) N110082D077 - Direct (44.3dBi)	Cambium Networks 6ft Single Pol (Global) N110082D077 - Direct (44.3dBi)
Antenna Height: 20.0 meters (Max height at site is 30.0 m)	Antenna Height: 30.0 meters (Max height at site is 30.0 m)
Feeder Loss: 0.3 dB	Feeder Loss: 0.3 dB
Power: PoE	Power: PoE
Ethernet Cable: Fiber Optic SFP+	Ethernet Cable: Fiber Optic SFP+
Maximum EIRP: 56.0 dBm ☐ User limit	Maximum EIRP: 56.0 dBm ☐ User limit
Maximum Power: 12.0 dBm ☐ User limit	Maximum Power: 12.0 dBm ☐ User limit
Tx Frequency: -- MHz Select...	Tx Frequency: -- MHz Select...

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

La Fig. 40, presenta las configuraciones de los sitios Ayuda Shita Baja e I.E. Shita Baja para el tramo final. En el sitio Ayuda Shita Baja se utilizó la antena N110082D077 de 6 pies (44.3 dBi) instalada a 20.0 metros de altura, con alimentación PoE y transmisión de datos a través de fibra óptica SFP+. La EIRP máxima es de 56.0 dBm con potencia máxima de 12.0 dBm. En el sitio I.E. Shita Baja, la misma antena fue instalada a 30.0 metros de altura (máximo del sitio), necesaria para asegurar la línea de vista directa y el despeje de Fresnel en el segmento final ascendente. Los parámetros de potencia se mantienen idénticos al sitio opuesto

La Figura 41, presenta los indicadores de desempeño para ambos sentidos del enlace. Hacia el nodo Ayuda Shita Baja, la potencia de recepción predicha es de $-25 \text{ dBm} \pm 4 \text{ dB}$, con capacidad IP promedio predicha de 1 412.08 Mbps (642 % del requerimiento de 220 Mbps). Hacia

I.E. Shita Baja, los resultados son simétricos: potencia de recepción predicha $-25 \text{ dBm} \pm 4 \text{ dB}$ y capacidad IP promedio predicha de 1 412.08 Mbps, frente a un requerimiento configurado de 5.0 Mbps (28 242 % de cumplimiento), lo que evidencia que el enlace está ampliamente sobredimensionado para las necesidades actuales del sitio final. La disponibilidad IP predicha es del 100.000 % en ambos sentidos.

Figura 41

Indicadores de desempeño del enlace microondas en ambos sentidos, el tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja

Performance to Ayuda ShitaBaja		Performance to I.E Shita Baja	
Predicted Receive Power : $-25 \text{ dBm} \pm 4 \text{ dB}$		Predicted Receive Power : $-25 \text{ dBm} \pm 4 \text{ dB}$	
Mean IP Predicted :	1412.08 Mbps	Mean IP Predicted :	1412.08 Mbps
Mean IP Required :	220.0 Mbps	Mean IP Required :	5.0 Mbps
% of Required IP :	642 %	% of Required IP :	28242 %
Min IP Required :	100.0 Mbps	Min IP Required :	1.0 Mbps
Min IP Availability Required :	99.9900 %	Min IP Availability Required :	99.9900 %
Min IP Availability Predicted :	100.0000 %	Min IP Availability Predicted :	100.0000 %

Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

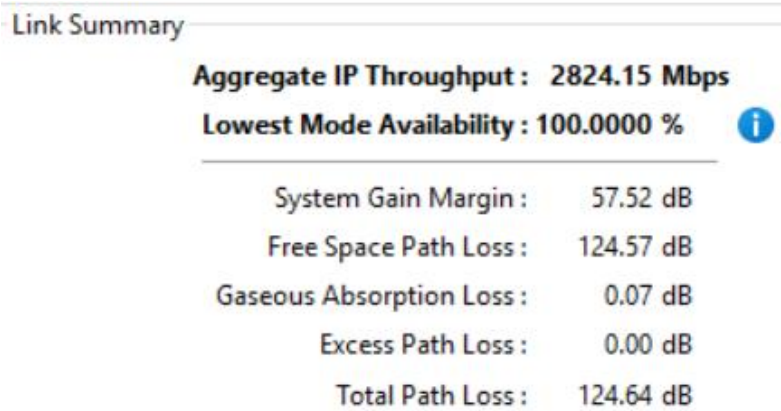
La Figura 42, consolida los indicadores globales del tramo final. El throughput IP agregado alcanza 2 824.15 Mbps. La disponibilidad del modo más bajo es del 100.00 %. El margen de ganancia del sistema asciende a 57.52 dB. La pérdida en espacio libre es de 124.57 dB, con pérdida por absorción gaseosa prácticamente despreciable (0.07 dB), resultando en una pérdida total del trayecto de 124.64 dB.

La Figura 43, detalla el comportamiento del tramo final por modo de modulación. En la configuración de máxima eficiencia espectral (2048QAM), el enlace alcanza una capacidad

agregada de 2 824.15 Mbps, manteniéndose por encima de 1 200 Mbps en modulaciones de 32QAM y garantizando 221 Mbps en BPSK para condiciones adversas extremas. El Max IP Throughput por sentido alcanza 1 412.08 Mbps, con margen de desvanecimiento que varía de 21.37 dB en el modo de mayor capacidad hasta 57.52 dB en BPSK. La disponibilidad de modo es del 100.00 % en todos los modos de operación.

Figura 42

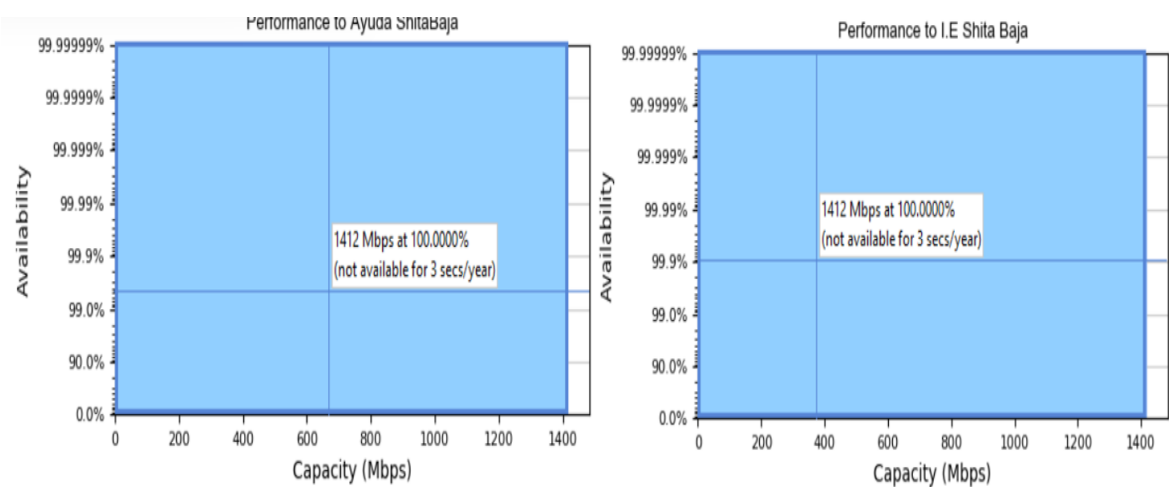
Resumen global de parámetros de desempeño del tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja a 11 GHz



Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

Figura 43

Parámetros de desempeño para el tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja a 11 GHz



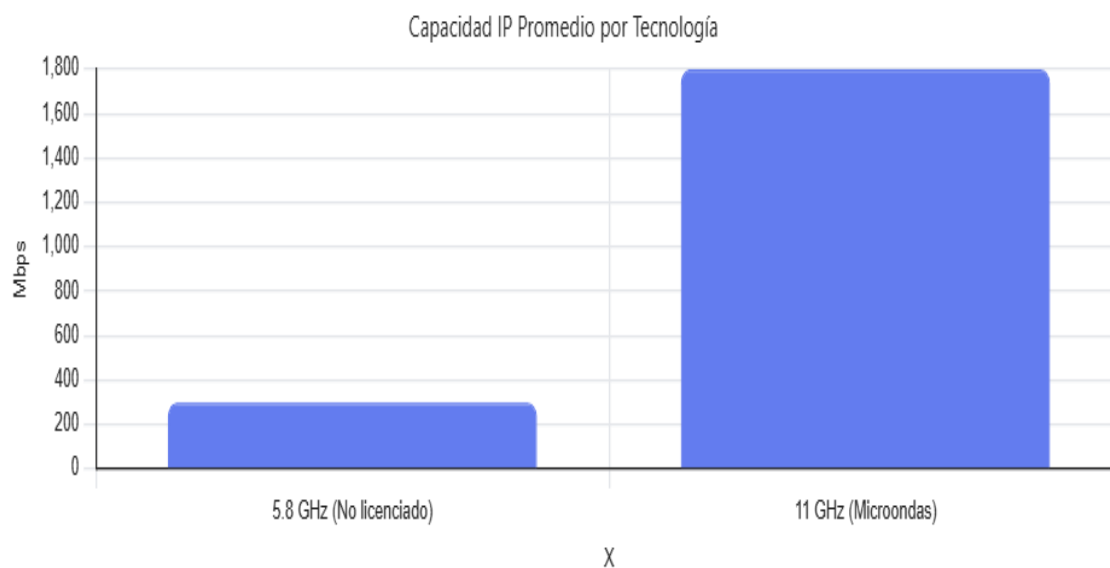
Nota. Captura de pantalla obtenida del software Cambium LINKPlanner

3.1.3 Análisis comparativo de tecnologías y selección de la configuración óptima

La Fig. 44, presenta una comparación de la capacidad IP promedio por tecnología. El enlace en banda 5.8 GHz con equipo PTP670 registra una capacidad promedio representativa de aproximadamente 300 Mbps, limitada por las características del entorno de espectro compartido. El enlace de microondas en banda licenciada de 11 GHz alcanza una capacidad promedio próxima a los 1 800 Mbps, con posibilidad de escalar hasta 2.5–2.8 Gbps según el modo de modulación activo. Esta diferencia de capacidad de un orden de magnitud refleja el impacto del ancho de canal (45 MHz frente a 80 MHz), el orden de modulación máximo disponible (256QAM frente a 4096QAM) y las ventajas del entorno regulado de la banda licenciada.

Figura 44

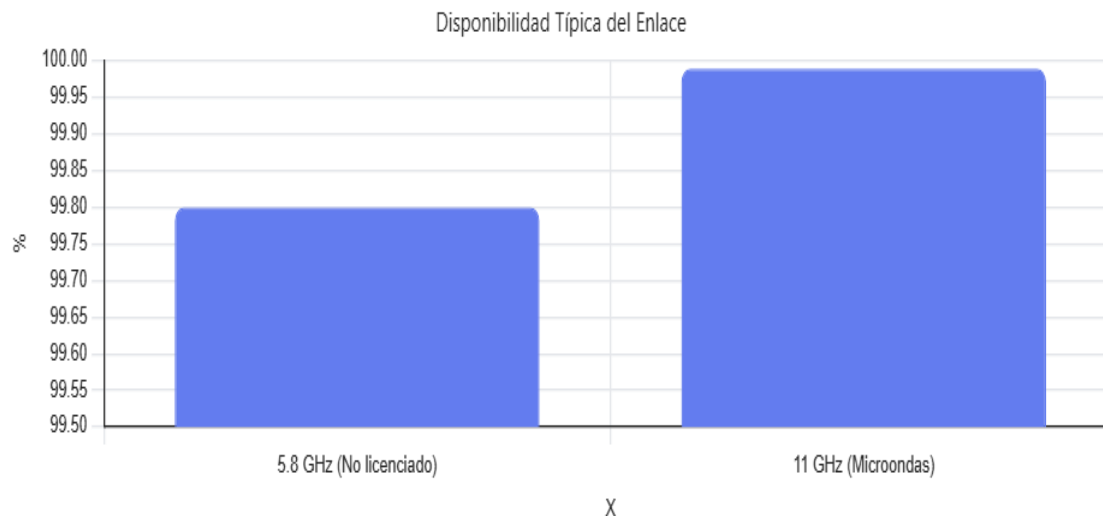
Comparación de la capacidad IP promedio por tecnología para los tramos del enlace Motupe – I.E. Shita



Nota. Elaboración propia mediante análisis de resultados de simulación en Python.

Figura 45

Comparación de la disponibilidad típica del enlace por tecnología



Nota. Elaboración propia mediante análisis de resultados de simulación en Python

La Fig. 45, ilustra la disponibilidad típica del enlace por tecnología. La banda de 5.8 GHz presenta una disponibilidad típica próxima al 99.8 %, afectada por la posibilidad de interferencias externas propias del espectro no licenciado. El enlace de microondas en banda de 11 GHz alcanza una disponibilidad igual o superior al 99.99 %, sustentada en el entorno regulado y controlado de la banda licenciada, que elimina las fuentes de interferencia externa no coordinada. Para aplicaciones educativas con requisitos de continuidad del servicio, esta diferencia tiene un impacto directo sobre la confiabilidad del acceso a plataformas educativas y recursos en línea.

La Tabla 2 sintetiza la comparación entre ambas tecnologías. Se observa que la solución microondas a 11 GHz es superior en los parámetros críticos de capacidad y disponibilidad, mientras que la banda de 5.8 GHz ofrece ventajas en costo inicial y resulta adecuada para tramos finales de corta distancia donde los requerimientos de tráfico son menores. Este análisis sustenta

una estrategia de arquitectura híbrida: microondas licenciada en los tramos troncales de mayor tráfico y 5.8 GHz en el segmento final hacia la institución educativa.

Tabla 2

Comparativa de criterios técnicos y económicos entre tecnologías de enlace evaluadas

Criterio de evaluación	Tecnología con mejor desempeño
Capacidad IP agregada	Microondas 11 GHz
Disponibilidad del enlace	Microondas 11 GHz
Costo inicial de implementación	Banda 5.8 GHz (no licenciada)
Uso como enlace troncal (backhaul)	Microondas 11 GHz
Tramos cortos o acceso final	Banda 5.8 GHz (no licenciada)

3.1.4 Configuración óptima recomendada por tramo

- **Tramo 1: Motupe – Salas.** Tecnología seleccionada: Microondas en banda licenciada de 11 GHz. El tramo Motupe – Salas constituye el segmento troncal inicial de la red y concentra la totalidad del tráfico del sistema. La selección del enlace microondas a 11 GHz se fundamenta en su capacidad agregada de 1 070.57 Mbps, disponibilidad del 100 %, margen de ganancia de 62.15 dB y respaldo normativo de banda licenciada, parámetros que superan ampliamente los obtenidos con la configuración de 5.8 GHz (Sotelo, 2021).

Tabla 3

Presupuesto estimado de implementación para el tramo Motupe – Salas (enlace microondas 11 GHz)

Componente	Equipo / Referencia	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Costo total (S/.)
Radio microondas 11 GHz	Cambium Networks PTP11850C	2	30,000	60,000
Antena parabólica 6 pies (44.3 dBi)	Cambium / RadioWaves N110082D077 11 GHz	2	10,000	20,000
Alimentador, montaje, PoE, puesta a tierra	Accesorios microondas	1 kit	5,000	5,000
Total				85,000

- **Tramo 2: Salas – Ayuda Shita Baja.** Tecnología seleccionada: Microondas en banda licenciada de 11 GHz. El tramo intermedio transporta el tráfico agregado de la red hacia la zona de distribución y funciona como segmento principal de la troncal. El enlace microondas a 11 GHz ofrece en este tramo una capacidad agregada de 1 407.31 Mbps, disponibilidad del 100 %, margen de ganancia de 59.69 dB y cumplimiento de los criterios regulatorios FCC.

Tabla 4

Presupuesto estimado de implementación para el tramo Salas – Ayuda Shita Baja

Componente	Equipo / Referencia	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Costo total (S/.)
Radio microondas 11 GHz	Cambium Networks PTP11850C	2	30,000	60,000
Antena parabólica 6 pies (44.3 dBi)	Cambium / RadioWaves N110082D077 11 GHz	2	10,000	20,000
Alimentador, montaje, PoE, puesta a tierra	Accesorios microondas	1 kit	5,000	5,000
Total				85 000

- **Tramo 3: Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja.** Tecnología seleccionada: Banda 5.8 GHz (no licenciada) — opción con mayor relación costo-beneficio. El tramo final cubre una distancia corta de aproximadamente 3.6 km con un requerimiento de tráfico relativamente bajo. Los resultados de simulación demuestran que el enlace en banda 5.8 GHz está ampliamente sobredimensionado para las necesidades actuales del sitio, registrando disponibilidad del 100 % y márgenes de ganancia superiores a 53 dB incluso en la configuración de menor potencia. En función del análisis de relación costo-beneficio, la tecnología de 5.8 GHz (Cambium ePMP Force 300-25) representa la opción óptima para este tramo. Si se prioriza la máxima confiabilidad a futuro, el enlace microondas a 11 GHz constituye la alternativa de mayor robustez.

Tabla 5*Presupuesto estimado de implementación para el tramo Ayuda Shita Baja – I.E. Shita Baja*

Componente	Equipo / Referencia	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Costo total (S/.)
Radio inalámbrico 5.8 GHz	Cambium ePMP Force 300-25	2	900	1,800
Accesorios (PoE, soportes, cableado)	Estándar	1 kit	700	700
Total				2,500

El costo total estimado para la implementación de la arquitectura híbrida recomendada (microondas 11 GHz en los tramos Motupe–Salas y Salas–Ayuda Shita Baja, y enlace 5.8 GHz en el tramo final) asciende a S/. 172 500, conformado por S/. 85 000 para cada uno de los dos tramos troncales y S/. 2 500 para el tramo de acceso final. Esta arquitectura garantiza la cobertura, capacidad y disponibilidad requeridas para el servicio de internet en la I.E. N.º 10212, asegurando la sostenibilidad operativa del sistema en el contexto rural del caserío Shita Baja.

3.2 Discusión

Los resultados de simulación obtenidos demuestran que el diseño de un sistema de radioenlaces punto a punto, segmentado en tres tramos con tecnologías diferenciadas según la función de cada segmento, constituye una solución técnicamente adecuada para garantizar el acceso a internet en la I.E. N.º 10212. Ambas configuraciones evaluadas, banda de 5.8 GHz y microondas de 11 GHz, lograron superar los requerimientos mínimos de capacidad (200 Mbps) y disponibilidad (99.99 %), con throughputs agregados de hasta 449 Mbps y 2 824 Mbps, y márgenes de ganancia superiores a 52 dB en todos los tramos, demostrando una solidez en el diseño ante condiciones de desvanecimiento y propagación adversas.

Los resultados son consistentes con los obtenidos Apaza y Ramos (2022), quienes diseñaron un sistema de radioenlaces digitales de banda ancha para instituciones educativas rurales en el distrito de Torata, Moquegua, bajo condiciones topográficas andinas similares. El estudio coincide en que los radioenlaces punto a punto en bandas de microondas representan la solución más adecuada para el transporte de datos en zonas rurales con línea de vista disponible. El presente estudio amplía esta conclusión al introducir una comparación cuantitativa entre la banda de 5.8 GHz y la de 11 GHz bajo condiciones reales del entorno de Lambayeque, aportando evidencia diferencial sobre las ventajas de cada tecnología según el rol del tramo en la arquitectura.

Estela & Jimenez (2024), en su análisis de desempeño de red de banda ancha rural en el distrito de Shamboyacu, San Martín, identificaron que las infraestructuras inalámbricas preexistentes presentan limitaciones de capacidad y disponibilidad que comprometen la calidad

del servicio. El diseño propuesto en la presente investigación aborda esta problemática desde la perspectiva del diseño ex novo, dimensionando cada tramo específicamente para las condiciones topográficas y de demanda de Shita Baja, obteniendo márgenes de ganancia y capacidades muy superiores a los mínimos requeridos, lo que garantiza escalabilidad ante el crecimiento futuro de la demanda educativa.

Sáenz & Navarro (2022) diseñaron una solución inalámbrica terrestre basada en microondas PTP y PTMP para la Provincia de San Ignacio, Cajamarca, concluyendo que la tecnología inalámbrica adaptada a la geografía local es técnica y económicamente viable. El presente estudio refuerza esta conclusión e identifica que la combinación de microondas 11 GHz en tramos troncales y 5.8 GHz en el tramo de acceso final, mostrando una arquitectura híbrida, logra optimiza simultáneamente el rendimiento técnico y la sostenibilidad económica, aspecto no abordado en el estudio de Sáenz y Navarro.

No obstante, es pertinente señalar que los resultados corresponden a simulación computacional y no a mediciones en campo. Si bien el software Cambium LINKPlanner emplea modelos de propagación basados en estándares ITU reconocidos e incorpora datos topográficos reales, la validación experimental constituye una etapa necesaria para confirmar el desempeño real del sistema ante variables no modeladas, como la densidad de vegetación, efectos de multipath, variaciones estacionales de precipitación y fuentes de interferencia locales. Adicionalmente, la viabilidad financiera deberá evaluarse en el marco de los programas de conectividad rural del Estado peruano gestionados por PRONATEL.

Desde la perspectiva de la inclusión digital, el sistema diseñado representa una contribución concreta al cierre de la brecha de acceso de primer nivel definida por Alejo (2024) y Ziegler et al. (2022). La magnitud de la capacidad proyectada garantiza no solo la cobertura de la demanda actual sino también la escalabilidad necesaria para incorporar nuevas aplicaciones educativas digitales, videoconferencias y plataformas de aprendizaje en línea.

4 **CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

4.1 Conclusiones

- La revisión de la literatura científica y técnica sobre sistemas inalámbricos en contextos rurales permitió identificar que los radioenlaces punto a punto en bandas de microondas licenciadas y no licenciadas constituyen las alternativas tecnológicas más adecuadas para el diseño del backhaul inalámbrico en el caserío Shita Baja. Las condiciones topográficas del área de estudio con desniveles entre 150 m y 1 350 m s.n.m. y distancias de hasta 14.5 km entre nodos excluyen la viabilidad de soluciones de fibra óptica y redes móviles convencionales, mientras que la disponibilidad de línea de vista en los tres tramos confirma la pertinencia de la arquitectura de radioenlaces PTP propuesta.

- El análisis comparativo del desempeño de las dos configuraciones mediante Cambium LINKPlanner reveló que el enlace en banda de 5.8 GHz (Cambium Networks PTP670) alcanza un throughput IP agregado de hasta 449 Mbps con márgenes de ganancia superiores a 52 dB, mientras que el enlace de microondas en banda licenciada de 11 GHz (Cambium Networks PTP11850C) alcanza hasta 2,824 Mbps con márgenes superiores a 57 dB. Ambas tecnologías logran disponibilidad del 100 % en todos los tramos y superan el requerimiento de 200 Mbps, con la diferencia de que la banda de 11 GHz ofrece mayor capacidad, mayor margen de ganancia y mayor inmunidad a interferencias externas, aunque a un costo de implementación significativamente superior.

- La configuración óptima seleccionada es una arquitectura híbrida que combina microondas en banda licenciada de 11 GHz (Cambium Networks PTP11850C) en los tramos troncales Motupe–Salas y Salas–Ayuda Shita Baja, y enlace en banda de 5.8 GHz (Cambium ePMP Force 300-25) en el tramo de acceso final Ayuda Shita Baja–I.E. Shita Baja, esta arquitectura optimiza simultáneamente los criterios de viabilidad técnica, cobertura, estabilidad del servicio y sostenibilidad económica, posicionándola como la solución de mayor relación valor-costo para las condiciones particulares del caserío Shita Baja.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar mediciones de nivel de señal recibida (RSSI), throughput real y disponibilidad del sistema en condiciones climáticas reales, incluyendo épocas de lluvia y estiaje para verificar y ajustar los márgenes de ganancia proyectados en la simulación.
- Se recomienda complementar el diseño con una red Wi-Fi de acceso local en la I.E. N.º 10212 (estándar IEEE 802.11ac o superior en banda de 5 GHz) para distribuir la conectividad a aulas, laboratorio de cómputo y áreas administrativas, aprovechando la capacidad disponible del enlace 5.8 GHz del tramo final.
- Se recomienda incluir en el presupuesto final los costos de instalación civil, puesta en servicio, capacitación técnica al personal docente y administrativo, y mantenimiento preventivo anual de los equipos, aspectos no contemplados en el presupuesto referencial del presente estudio y determinantes para la sostenibilidad operativa del sistema.
- Se recomienda evaluar la incorporación de sistemas fotovoltaicos en los nodos remotos especialmente en Ayuda Shita Baja e I.E. Shita Baja para garantizar la continuidad del servicio ante cortes de suministro eléctrico convencional en la zona rural.
- Se recomienda a futuras investigaciones abordar el análisis de la disponibilidad del sistema end-to-end, el diseño detallado del segmento de distribución Wi-Fi local, y la evaluación de modelos de gestión comunitaria del sistema como alternativa de sostenibilidad operativa a largo plazo.

5 REFERENCIAS

- Alejo, L. (2024). Acceso a la red de banda ancha fija y el cierre de la brecha digital de la población del área rural del Distrito de Santiago de Chocorvos, Huancavelica, 2023 [Tesis de grado]. Universidad San Ignacio de Loyola.
- Apaza, F., & Ramos, J. (2022). Diseño de un sistema de radioenlaces digitales de banda ancha para mejorar el acceso a los servicios de tele-educación digital en las instituciones educativas rurales del distrito de Torata, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua, año 2022 [Tesis de grado, Universidad Privada de Tacna].
<http://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/2412>
- Chanchavac, B. (2023). Diseño de red de fibra óptica para la migración del medio de transmisión a tres radiobases de un operador de telecomunicaciones ubicadas en el casco urbano de San Antonio Ilotenango, Quiché [Tesis de grado]. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Estela, A., & Jimenez, S. S. (2024). Análisis de desempeño de red de banda ancha rural—Caso de estudio distrito de Shamboyacu, San Martin [Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/12782>
- James, A., Seth, A., & Mukhopadhyay, S. C. (2022). WiFi Based IoT System. En Smart Sens. Meas. Instrum. (Vol. 41, pp. 105-136). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85863-6_6
- Kousias, K., Rajiullah, M., Caso, G., Ali, U., Alay, O., Brunstrom, A., De Nardis, L., Neri, M., & Di Benedetto, M.-G. (2024). A Large-Scale Dataset of 4G, NB-IoT, and 5G Non-

Standalone Network Measurements. IEEE Communications Magazine, 62(5), 44-49.

Scopus. <https://doi.org/10.1109/MCOM.011.2200707>

Martinez, J. (2022). Comparación entre enlaces punto a punto y redes TVWS para conectividad del grupo de escuelas rurales del departamento del Cesar asignadas a la empresa GLL Ingeniería EU en el Marco del Contrato 10K [Tesis de grado, Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/44052/2022juanmartinez.pdf?sequence=1>

Montenegro, C. (2021). Estudio técnico para la implementación de una Red GPON para la Parroquia Sinaí De La Provincia de Morona Santiago [Tesis de grado]. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Monzón, V., & Sánchez, C. M. (2024). Dimensionamiento del segmento terrestre para constelaciones no geoestacionarias [Tesis de grado, Universidad Oberta de Cataluña]. <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/149825/4/bbermudezfataTFM0124memoria.pdf>

Noman, H. M., Hussein, M. A., & Abdulrazzaq, A. A. (2023). WiMax Network Design and Simulation for Middle Technical University Campus Using OPNET Modeler. Iraqi Journal of Science, 64(12), 6586-6595. Scopus. <https://doi.org/10.24996/ijs.2023.64.12.38>

Pincay, D. (2021). Estudio de factibilidad de una red de fibra óptica para el mejoramiento de la comunicación de La Unidad Educativa Alejo Lascano [Tesis de grado]. Universidad Estatal del Sur de Manabí.

- Rodríguez, R. (2021). Análisis de tecnologías de redes inalámbricas para centros poblados rurales en el Perú [Tesis de grado, Universidad Señor de Sipán].
<http://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/9332>
- Sáenz, M., & Navarro, F. (2022). Solución para acceso a internet de banda ancha para la provincia de San Ignacio, Región Cajamarca [Tesis de grado]. Universidad Ricardo Palma.
- Sellan, Y. (2022). 5g basado en open source como una solución de bajo costo para el fortalecimiento de las comunicaciones inalámbricas del gobierno autónomo descentralizado municipal del cantón Babahoyo [bachelorThesis, Babahoyo: UTB-FAFI. 2022]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/11673>
- Solorzano, G. (2025). Diseño y simulación de infraestructura WiMAX para la parroquia Colonche [bachelorThesis, La Libertad, Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2025]. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/12852>
- Sotelo, M. A. (2021). Diseño e implementación de una red de banda ancha en apoyo a la localidad de Torohuichcana, distrito de Pampachiri, provincia de Andahuaylas, departamento de Apurímac-Perú [Tesis de grado, Universidad Tecnológica del Perú].
<http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/5187>
- Tumbaco, Z. Y. (2023). Análisis y medición vectorial de las características de transmisión de un enlace punto a multipunto basado en el estándar IEEE 802.16 en el rango de las súper altas frecuencias proporcionando conectividad a las estaciones suscriptoras [bachelorThesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2023.].
<https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/9619>

- Yacine, H., & Boufeldja, K. (2024). Wireless internet of things solutions for efficient photovoltaic system monitoring via WiFi networks. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 33(2), 901-910. Scopus.
<https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i2.pp901-910>
- Zarkadas, K., & Dimitrakopoulos, G. (2021). Rain Attenuation in 5G Wireless Broadband Backhaul Link and Develop (IoT) Rainfall Monitoring System. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(5), 1-8. Scopus.
<https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120501>
- Ziegler, S., Arias Segura, J., & Agroalimentaria (PDA), P. de D. (2022). Conectividad rural en América Latina y el Caribe. Estado de situación y acciones para la digitalización y desarrollo sostenible. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
<https://repositorio.iica.int/handle/11324/21350>