

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

**“DISEÑO DE UNA RED DE ACCESO DE BANDA ANCHA QUE
MEJORE LOS SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES EN LAS
ZONAS RURALES DE LA PROVINCIA DE HUARI, REGIÓN
ANCASH, EN EL AÑO 2024”**

PARA OPTAR:

TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

Bach. JAIME FERNANDO PORTUGAL MALDONADO

TACNA – PERÚ

2024

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

TESIS

**“DISEÑO DE UNA RED DE ACCESO DE BANDA ANCHA QUE
MEJORE LOS SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES EN LAS
ZONAS RURALES DE LA PROVINCIA DE HUARI, REGIÓN
ANCASH, EN EL AÑO 2024”**

Tesis sustentada y aprobada el 19 de junio de 2025; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : Mag. HUGO JAVIER RIVERA HERRERA

SECRETARIO : Mtra. MARIA ELENA VILDOZO ZAMBRANO

VOCAL : Mag. MARCO ANTONIO COLOMA YUNGANINA

ASESOR : Dr. ANIBAL JUAN ESPINOZA ARANCIAGA

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Jaime Fernando Portugal Maldonado, egresado, de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 04416146, así como Aníbal Espinoza Aranciaga con DNI 06154874 declaramos en calidad de autor y asesor que:

1. Somos los autores de la tesis titulada: *Diseño de una red de acceso de banda ancha que mejore los servicios de telecomunicaciones en las zonas rurales de la provincia de Huari, región Ancash en el año 2024*, la cual presentamos para optar el Título Profesional de *Ingeniero Electrónico*.
2. La tesis es completamente original y no ha sido objeto de plagio, total ni parcialmente, habiéndose respetado rigurosamente las normas de citación y referencias para todas las fuentes consultadas.
3. Los datos presentados en los resultados son auténticos y no han sido objeto de manipulación, duplicación ni copia.

En virtud de lo expuesto, asumimos frente a *La Universidad* toda responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos asociados a la obra.

En consecuencia, nos comprometemos ante a *La Universidad* y terceros a asumir cualquier perjuicio que pueda surgir como resultado del incumplimiento de lo aquí declarado, o que pudiera ser atribuido al contenido de la tesis, incluyendo cualquier obligación económica que debiera ser satisfecha a favor de terceros debido a acciones legales, reclamos o disputas resultantes del incumplimiento de esta declaración.

En caso de descubrirse fraude, piratería, plagio, falsificación o la existencia de una publicación previa de la obra, aceptamos todas las consecuencias y sanciones que puedan derivarse de nuestras acciones, acatando plenamente la normatividad vigente.

Tacna, 24 de Julio de 2024

Jaime Fernando Portugal Maldonado
DNI: 04416146

Aníbal Juan Espinoza Aranciaga
DNI:06154874

DEDICATORIA

Por lo difícil, hermosa y justa que puede llegar a ser...

A mi esposa Deny. Por su paciente espera...

A mis hijos. Por ser mi motivación y orgullo...

A mis padres. Por su anhelo... Aunque ya no están siguen iluminando mi camino.

Jaime Fernando Portugal Maldonado

AGRADECIMIENTO

A Dios por mi fe y fortaleza, a mi familia por su confianza y su mejor apoyo, a mis maestros por sus enseñanzas, a mi asesor por su guía y soporte para la realización de este trabajo de tesis.

Jaime Fernando Portugal Maldonado

ÍNDICE GENERAL

PÁGINAS DE JURADOS	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Formulación del problema	3
1.2.1. Problema general	3
1.2.2. Problemas específicos	3
1.3. Justificación e Importancia	3
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes de la investigación	6
2.1.1. Antecedentes internacionales	6
2.1.2. Antecedentes nacionales	7
2.2. Bases Teóricas	8
2.2.1. Enlaces ópticos no guiados	8
2.2.1.1. Enlaces FSO (Free Space Optical)	9
2.2.1.2. Ventajas de los enlaces FSO	10
2.2.1.3. Desventajas de los enlaces FSO	10
2.2.1.4. Clasificación por banda óptica de operación	11
2.2.2. Funcionamiento de un sistema FSO	11
2.2.2.1. Transmisión de la señal	11
2.2.2.2. Propagación en el espacio libre	12
2.2.2.3. Recepción de la señal	12

2.2.2.4. Modulación y transmisión de datos	12
2.2.2.5. Seguridad y robustez	12
2.2.2.6. Limitaciones y soluciones	12
2.2.3. Topologías para enlaces FSO	13
2.2.3.1. Topología de enlaces ópticos Punto a Punto	13
2.2.3.2. Topología de enlaces ópticos en estrella	13
2.2.3.3. Topología en forma de anillo con derivaciones	14
2.2.3.4. Topología en forma de malla	15
2.2.4. Margen del enlace óptico	16
2.2.4.1. Pérdida óptica	16
2.2.4.2. Pérdida geométrica	16
2.2.4.3. Pérdida atmosférica y sensibilidad del receptor	17
2.2.4.4 Margen del enlace	18
2.3. Definición de términos	18
2.3.1. Margen de enlace FSO	18
2.3.2. Divergencia del haz	18
2.3.3 Dispersión de Mie	19
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	20
3.1. Diseño de la investigación	20
3.2. Acciones y actividades	20
3.2.1. Selección de las localidades en la zona de estudio	21
3.2.2 Ubicación geográfica de las localidades seleccionadas	21
3.2.3. Descripción de la zona de estudio	31
3.2.4. Equipamiento óptico seleccionado	33
3.2.5. Parámetros que intervienen en el diseño de un enlace óptico FSO	34
3.2.5.1. Topología de los enlaces ópticos FSO	34
3.2.5.2. Potencia de transmisión óptica y sensibilidad de recepción óptica	34
3.2.5.3. Banda óptica de operación	34
3.2.5.4. Atenuación geométrica	34
3.2.5.5. Atenuación por lluvia	35
3.2.5.6. Atenuación por niebla	36
3.2.5.7. Pérdidas en el sistema por elementos de un enlace FSO	37
3.2.6. Criterios para el diseño de la red óptica FSO	37
3.2.7. Propuesta de la red de enlaces ópticos FSO	38
3.2.8. Levantamiento de la ruta de los enlaces FSO	40
3.2.8.1. Enlace óptico Huari-Cajay	40

3.2.8.2. Enlace óptico Cajay-Colcas	40
3.2.8.3. Enlace óptico Colcas-Cayas	41
3.2.8.4. Enlace óptico Cayas-Huamantanga	41
3.2.8.5. Enlace óptico Huari-Chinchas	42
3.2.8.6. Enlace óptico Chinchas-Yacya	42
3.2.8.7 Enlace óptico Yacya-Repetidor 1	43
3.2.8.8. Enlace óptico Repetidor 1-Mallas	43
3.2.8.9. Enlace óptico Mallas-Huarac	44
3.2.8.10. Enlace óptico Huarac-Huántar	44
3.3. Materiales y/o instrumentos	45
3.4. Población y/o muestra de estudio	45
3.5. Operacionalización de variables	45
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	47
4.1. Visibilidad directa de cada enlace óptico FSO propuesto	47
4.1.1. Enlace óptico Huari-Cajay	47
4.1.2. Enlace óptico Cajay-Colcas	48
4.1.3. Enlace óptico Colcas-Cayas	48
4.1.4. Enlace óptico Cayas-Huamantanga	49
4.1.5. Enlace óptico Huari-Chinchas	50
4.1.6. Enlace óptico Chinchas-Yacya	51
4.1.7. Enlace óptico Yacya-Repetidor 1	51
4.1.8. Enlace óptico Repetidor 1-Mallas	52
4.1.9. Enlace óptico Mallas-Huarac	53
4.1.10. Enlace óptico Huarac-Huántar	53
4.2. Diseño de los enlaces ópticos FSO	54
4.2.1. Determinación de parámetros para el margen del enlace óptico	54
4.2.2. Cálculo del margen del enlace	59
4.2.2.1. Enlace FSO 1: Huari-Cajay	59
4.2.2.2. Enlace FSO 2: Cajay-Colcas	61
4.2.2.3. Enlace FSO 3: Colcas-Cayas	63
4.2.2.4. Enlace FSO 4: Cayas-Huamantanga	65
4.2.2.5. Enlace FSO 5: Huari-Chinchas	67
4.2.2.6. Enlace FSO 6: Chinchas-Yacya	69
4.2.2.7. Enlace FSO 7: Yacya-Repetidor 1	71
4.2.2.8. Enlace FSO 8: Repetidor 1-Mallas	73
4.2.2.9. Enlace FSO 9: Mallas-Huarac	75

4.2.2.10. Enlace FSO 10: Huarac-Huantar	77
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	80
5.1. Línea de vista de los enlaces ópticos FSO	80
5.2. Pérdidas geométricas vs longitud del enlace	80
5.3. Pérdidas por niebla vs longitud del enlace	82
5.4. Pérdidas por precipitación de lluvia vs longitud del enlace	83
5.5. Análisis del margen del enlace vs longitud del enlace FSO	85
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXOS	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Localidades seleccionadas de la red óptica FSO	22
Tabla 2. Coordenadas geográficas del nodo óptico Huari	22
Tabla 3. Coordenadas geográficas del nodo óptico Cajay	23
Tabla 4. Coordenadas geográficas del nodo óptico Colcas	24
Tabla 5. Coordenadas geográficas del nodo óptico Cayas	24
Tabla 6. Coordenadas geográficas del nodo óptico Huamantanga	25
Tabla 7. Coordenadas geográficas del nodo óptico Chinchas	26
Tabla 8. Coordenadas geográficas del nodo óptico Yacya	26
Tabla 9. Coordenadas geográficas del nodo óptico Repetidor 1	27
Tabla 10. Coordenadas geográficas del nodo óptico Mallas.....	28
Tabla 11. Coordenadas geográficas del nodo óptico Huarac	29
Tabla 12. Coordenadas geográficas del nodo óptico Huántar	29
Tabla 13. Coordenadas geográficas de las localidades de la red óptica FSO	31
Tabla 14. Modelo de Predicción de lluvia	35
Tabla 15. Operacionalización de variables de investigación.....	46
Tabla 16. Características de propagación del enlace óptico Huari-Cajay	47
Tabla 17. Características de propagación del enlace óptico Cajay-Colcas	48
Tabla 18. Características de propagación del enlace óptico Colcas-Cayas	49
Tabla 19. Características de propagación del enlace Cayas-Huamantanga	50
Tabla 20. Características de propagación del enlace óptico Huari-Chinchas	50
Tabla 21. Características de propagación del enlace óptico Chinchas-Yacya	51
Tabla 22. Características de propagación del enlace óptico Yacya-Repetidor 1.....	52
Tabla 23. Características de propagación del enlace óptico Repetidor 1-Mallas	52
Tabla 24. Características de propagación del enlace óptico Mallas-Huarac	53
Tabla 25. Características de propagación del enlace óptico Huarac-Huántar	54
Tabla 26. Longitud de los enlaces FSO para localidades de la provincia de Huari	55
Tabla 27. Pérdidas geométricas en función de la longitud del enlace FSO	81
Tabla 28. Pérdidas por niebla en función de la longitud del enlace FSO	82
Tabla 29. Pérdidas por lluvia en función de la longitud del enlace FSO	84
Tabla 30. Margen del enlace en función de la longitud del enlace FSO	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Red de enlaces ópticos no guiado.....	9
Figura 2. Enlace óptico FSO	9
Figura 3. Arquitectura de varios enlaces punto a punto	13
Figura 4. Arquitectura en estrella	14
Figura 5. Arquitectura en forma de anillo	15
Figura 6. Arquitectura en forma malla	15
Figura 7. Divergencia del haz óptico	16
Figura 8. Tamaño del haz óptico proyectado	17
Figura 9. Ubicación del nodo óptico en el distrito de Huari	23
Figura 10. Ubicación del nodo óptico en el distrito de Cajay	23
Figura 11. Ubicación del nodo óptico en el CPM Colcas	24
Figura 12. Ubicación del nodo óptico en el CPM Cayas	25
Figura 13. Ubicación del nodo óptico en el CPM Huamantanga	25
Figura 14. Ubicación del nodo óptico en el CPM Chinchas	26
Figura 15. Ubicación del nodo óptico en el CPM Yacya	27
Figura 16. Ubicación del nodo óptico Repetidor 1	28
Figura 17. Ubicación del nodo óptico en el CPM Mallas	28
Figura 18. Ubicación del nodo óptico en el CPM Huarac	29
Figura 19. Ubicación del nodo óptico en el distrito de Huántar	30
Figura 20. Disposición de los nodos ópticos en la zona de estudio	30
Figura 21. Distritos de la provincia de Huari	31
Figura 22. Equipo FSO Sonabeam 1250-M	33
Figura 23. Propuesta de la red óptica FSO en la provincia de Huari	39
Figura 24. Levantamiento de la ruta del enlace óptico Huari-Cajay	40
Figura 25. Levantamiento de la ruta del enlace óptico Cajay-Colcas	40
Figura 26. Levantamiento de la ruta del enlace óptico Colcas-Cayas	41
Figura 27. Levantamiento de la ruta del enlace óptico Cayas-Huamantanga	41
Figura 28. Levantamiento de la ruta del enlace óptico Huari-Chinchas	42
Figura 29. Levantamiento de la ruta del enlace óptico Chinchas-Yacya	42
Figura 30. Levantamiento de la ruta del enlace óptico Yacya-Repetidor 1	43
Figura 31. Levantamiento de la ruta del enlace óptico Repetidor 1-Mallas	43
Figura 32. Levantamiento de la ruta del enlace óptico Mallas-Huarac	44
Figura 33. Levantamiento de la ruta del enlace óptico Huarac-Huántar	44
Figura 34. Perfil topográfico del enlace óptico Huari-Cajay	47

Figura 35. Perfil topográfico del enlace óptico Cajay-Colcas	48
Figura 36. Perfil topográfico del enlace óptico Colcas-Cayas	49
Figura 37. Perfil topográfico del enlace óptico Cayas-Huamantanga	49
Figura 38. Perfil topográfico del enlace óptico Huari-Chinchas	50
Figura 39. Perfil topográfico del enlace óptico Chinchas-Yacya	51
Figura 40. Perfil topográfico del enlace óptico Yacya-Repetidor 1	51
Figura 41. Perfil topográfico del enlace óptico Repetidor 1-Mallas	52
Figura 42. Perfil topográfico del enlace óptico Mallas-Huarac	53
Figura 43. Perfil topográfico del enlace óptico Huarac-Huántar	54
Figura 44. Precipitaciones máximas en la provincia de Huari.....	56
Figura 45. Promedio mensual de precipitación en Huari	57
Figura 46. Códigos internacionales de visibilidad en función de la lluvia	58
Figura 47. Perfiles topográficos de los 10 enlaces ópticos FSO	80
Figura 48. Pérdidas geométricas vs longitud del enlace FSO	81
Figura 49. Pérdidas por niebla vs longitud del enlace FSO	83
Figura 50. Pérdidas por lluvia vs longitud del enlace FSO	84
Figura 51. Margen del enlace vs longitud del enlace FSO	86

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.....	92
Anexo 2. Ficha Técnica del Sistema SONABeam E.....	93
Anexo 3. Especificaciones Técnicas del Sistema SONABeam E.....	94
Anexo 4. Ficha Técnica del Sistema SONABeam Z.....	95
Anexo 5. Especificaciones Técnicas de los Sistemas SONABeam 1250-Z y 2500-Z...	96

RESUMEN

El objetivo del siguiente trabajo de tesis fue efectuar una propuesta tecnológica basado un sistema de comunicación óptica de espacio libre (FSO), como solución a los requerimientos de acceso a los servicios de telecomunicaciones, que permita dar soporte de los servicios de banda ancha en las localidades rurales de la provincia de Huari, región Ancash. La metodología desarrollada para la propuesta de la red de enlaces ópticos FSO consistió en primer lugar, realizar un análisis de la situación actual de la infraestructura de telecomunicaciones en la zona de estudio; segundo, se seleccionaron la ubicación de los nodos ópticos que formaron parte de la red FSO tomando en cuenta los criterios de visibilidad directa en localidades rurales de la región quechua de la provincia de Huari con longitudes de los enlaces FSO menores a 4,4 km; tercero, se efectuaron los levantamientos topográficos de los 10 enlaces ópticos FSO utilizando Google Earth PRO; cuarto, se revisaron las especificaciones técnicas del equipamiento óptico FSO requeridos para el diseño de la red de enlaces FSO que opere en el rango óptico de 1550 nm. Analizando los resultados obtenidos del margen del enlace para cada enlace FSO, se verificó que el diseño propuesto cumple con los objetivos planteados en la tesis, obteniendo la solución más adecuada en cuanto a disponibilidad de la red de enlaces FSO.

Palabras claves: Propagación óptica en el espacio libre; Redes de banda ancha; Sistema óptico FSO.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to propose a free-space optical (FSO) communication system as a solution to the requirements for access to telecommunications services, enabling broadband services to be supported in rural areas of Huari Province, Ancash Region. The methodology followed for the proposal of the FSO optical link network consisted, first, of an analysis of the current situation of the telecommunications infrastructure in the study area; second, of selecting the location of the optical nodes that formed part of the FSO network, taking into account the criteria of direct visibility in rural locations in the Quechua region of the Huari province, with FSO link lengths less than 4,4 km; third, topographic surveys of the 10 FSO optical links were conducted using Google Earth PRO; fourth, the technical specifications of the FSO equipment currently on the market, which are necessary for the design of the FSO link network operating in the 1550 nm optical range, were reviewed. Finally, with the results obtained from the link margin for each FSO optical link, it was possible to verify that the proposal meets the established objectives, obtaining the most optimal solution in terms of availability of the FSO link network.

Keywords: Free-space optical propagation; Broadband networks; FSO optical system.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha observado un incremento en el crecimiento de las redes de telecomunicaciones en Perú, así como una mayor competencia entre las empresas proveedoras de servicios móviles e internet, propiciando la instalación de sistemas de alta velocidad con fibra óptica y microondas para atender la alta demanda y brindar la cobertura necesaria.

Los esfuerzos del Estado Peruano han permitido la instalación de la Red Nacional de Fibra Óptica Dorsal (RDNFO) hasta las capitales de provincias de nuestro país, incluyendo un nodo de distribución en la provincia de Huari.

Una solución actual es utilizar sistemas de comunicación óptica que propagan señales ópticas (luz visible o infrarroja) en el espacio libre (perfecto para la propagación de señales en la atmósfera). Estos sistemas denominados Free Space Optical (FSO) son utilizados para la transmisión de señales de voz, datos y video a través de enlaces ópticos inalámbricos de gran capacidad de transmisión (Gbps) con coberturas menores a los 5 km y con las limitaciones de despliegue en zonas de alta actividad atmosférica.

Este trabajo de tesis fue desarrollado en 5 capítulos. El primer capítulo denominado: "Planteamiento del problema", analiza la problemática que existe en las localidades rurales de la provincia de Huari y plantea una propuesta de solución tecnológica para el diseño de una red de banda ancha. El segundo capítulo, "Marco teórico", presenta los fundamentos teóricos que son necesarios para desarrollar mi trabajo de tesis luego de presentar como antecedentes de mi solución técnica los resultados de investigaciones de investigadores nacionales e internacionales. El tercer capítulo, "Marco metodológico", cubre el diseño del estudio, las acciones y actividades desarrolladas para el diseño de la red óptica FSO propuesta, así como la operacionalización de variables. El capítulo denominado IV "Resultados", presenta los resultados obtenidos para el diseño de los enlaces ópticos FSO propuestos para la zona de estudio. El capítulo V denominado "Discusión de resultados": presenta el análisis de los parámetros obtenidos para la disponibilidad y operatividad de los enlaces ópticos FSO en base a la existencia de visibilidad directa y el margen del enlace. Finalizando con la presentación de las conclusiones, las recomendaciones y el listado de las referencias bibliográficas empleada en el desarrollo de la presente tesis.

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

El Estado peruano desde el año 2014, fomentó la implementación de la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, que permite el acceso a los servicios de telecomunicaciones en las diferentes regiones del Perú y así reducir la brecha digital existente.

De acuerdo con Osiptel (2017), la RDNFO consta de 322 nodos, cubriendo 23 departamentos, 180 provincias y 284 distritos del país. Es importante destacar que los nodos alcanzaron las 180 capitales provinciales. El Proyecto concluyó durante el 2021.

De acuerdo con el Programa Nacional de Telecomunicaciones (Pronatel), previo a FITEL, el Estado peruano ha estado promoviendo desde el año 2018 Proyectos Regionales. Estos ofrecen cobertura en áreas rurales y proporcionan acceso a la demanda institucional (escuelas, centros sanitarios y comisarias), que se refiere a la necesidad de Internet de alta velocidad por parte de las instituciones públicas.

De acuerdo a la nota de prensa emitida por Pronatel a julio del 2022, el Proyecto Regional de la Región Ancash se encuentra al 60% de su implementación de la infraestructura de telecomunicaciones, con una puesta en operatividad para el año 2026.

Según el MTC (2023), la RDNFO tiene una capacidad contratada 39,087 Gbps, que representa solo el 8% del total de la capacidad instalada, ello debido a los costos elevados de tarificación de la red que hace poco atractivo su uso por los distintos operadores de telecomunicaciones en nuestro país. Además, indica que la señal radioeléctrica recibida en determinados lugares no tiene la calidad de lo ofrecido por la RDNFO.

Esta falta de conectividad adecuada impide el acceso a oportunidades educativas y laborales, servicios de salud a distancia. La situación requiere una intervención clara y concisa para identificar las tecnologías de telecomunicaciones más adecuadas para su implementación en estas zonas rurales.

La provincia de Huari, situada en la región de Ancash, afronta un gran problema en cuanto a carencia de infraestructura en redes de telecomunicaciones de banda ancha. Esta problemática limita significativamente el acceso a servicios como internet y calidad, afectando el factor socioeconómico de la región.

Está problemática se agrava debido a la dispersión geográfica y las condiciones topográficas de la región, que complican la implementación de soluciones de telecomunicaciones convencionales. Además, existe una brecha significativa entre las

zonas urbanas y rurales en términos de acceso a tecnologías de información y comunicación, perpetuando las desigualdades y limitando las oportunidades de desarrollo en las áreas menos favorecidas.

La investigación se centra en diseñar una red de acceso de banda ancha que sea viable y eficiente para mejorar los servicios de telecomunicaciones en estas zonas rurales, con el objetivo de cerrar la brecha digital y proporcionar a los residentes las herramientas necesarias para mejorar su calidad de vida y fomentar el desarrollo económico y social de la región.

1.2. Formulación del problema

Efectuado la descripción del problema en la presente investigación, a continuación, se planteará las interrogantes de la investigación.

1.2.1. Problema general

La interrogante principal es el resultado de analizar cómo se puede mejorar la situación presentada en la zona de estudio.

¿Cómo se puede diseñar una red de acceso de banda ancha que mejore los servicios de telecomunicaciones en las zonas rurales de la provincia de Huari, región Ancash, en el año 2024?

1.2.2. Problemas específicos

Las interrogantes secundarias son las siguientes:

- a. ¿Cuáles son las necesidades de los servicios de telecomunicaciones que la red de acceso de banda ancha debe soportar en la zona de estudio?
- b. ¿Cuál tecnología de telecomunicaciones que se encuentra disponible y aplicable, permite el diseño de una red de acceso de banda ancha en la zona de estudio?
- c. ¿Cómo se puede desarrollar un diseño de red de acceso que esté adaptado a las características geográficas y demográficas específicas de la zona de estudio, asegurando cobertura eficiente y servicios de calidad?

1.3. Justificación e Importancia

Desde el punto de vista del desarrollo socioeconómico:

- a. La mejora de la conectividad es fundamental para impulsar el crecimiento económico de la región.
- b. Permite a los habitantes acceder a nuevas oportunidades laborales, incluyendo el teletrabajo.
- c. Facilita el desarrollo de emprendimientos locales y su conexión con mercados más amplios.

Desde el punto de vista de la educación:

- a. Una infraestructura de telecomunicaciones adecuada posibilita el acceso a recursos educativos en línea.
- b. Permite a los estudiantes participar en programas de educación a distancia y cursos en línea.
- c. Mejora la calidad de la educación al proporcionar acceso a información actualizada y diversa.

Desde el punto de vista de la Salud:

- a. La telemedicina se vuelve una realidad, permitiendo consultas remotas y mejorando el acceso a especialistas.
- b. Facilita la formación continua del personal de salud local.
- c. Permite un mejor seguimiento de pacientes y la implementación de sistemas de alerta temprana.

Desde el punto de vista de la Inclusión digital:

- a. Reduce la brecha digital entre las zonas urbanas y rurales.
- b. Proporciona acceso a servicios gubernamentales en línea, mejorando la participación ciudadana.
- c. Facilita la preservación y difusión de la cultura local en el ámbito digital.

Desde el punto de vista de la Competitividad regional:

- a. Atrae inversiones al mejorar la infraestructura básica de la región.
- b. Posibilita la implementación de tecnologías como IoT para agricultura y gestión de recursos.
- c. Mejora la eficiencia en la gestión pública y privada.

Desde el punto de vista de la Sostenibilidad:

- a. Puede reducir la necesidad de desplazamientos, disminuyendo la huella de carbono.
- b. La elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental permite la regulación de obras o actividades para evitar o reducir sus efectos negativos en el ambiente.
- c. Permite la implementación de sistemas de monitoreo ambiental.

1.4. Objetivos

A continuación, como respuesta a las interrogantes de la investigación, se proponen el objetivo general y los objetivos específicos.

1.4.1. Objetivo General

Se plantea el siguiente objetivo general:

Diseñar una red de acceso de banda ancha que mejore los servicios de telecomunicaciones en las zonas rurales de la provincia de Huari, región Ancash, en el año 2024.

1.4.2. Objetivos Específicos

Se plantean los siguientes objetivos específicos:

- a. Analizar las necesidades de los servicios de telecomunicaciones que la red de acceso de banda ancha debe soportar en la zona de estudio.
- b. Seleccionar una tecnología de telecomunicaciones que se encuentra disponible y aplicable para el diseño de una red de acceso en la zona de estudio
- c. Desarrollar un diseño de red de acceso adaptado a las características geográficas y demográficas de la zona de estudio, que asegure una cobertura eficiente y servicios de calidad

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Los antecedentes de la investigación revisados se clasificaron en internacionales y nacionales.

Para los antecedentes internacionales se revisaron artículos científicos de Scopus, ElSevier, Sciendirect y Scielo.

Para los antecedentes nacionales se revisaron repositorios de tesis de pregrado y postgrado que se agrupan en la base de datos Alicia del Consejo de Ciencia y Tecnología (Concytec).

2.1.1. Antecedentes internacionales

Para Briglauer, Kramer y Palan (2024) en su artículo de investigación en ScienceDirect señalaron que la disponibilidad de banda ancha móvil basado en fibra de alta velocidad es un objetivo crucial de la política económica en la Unión Europea y otras naciones desarrolladas. Los creadores de políticas aspiran a fomentar el desarrollo económico, la productividad y el empleo, particularmente en zonas rurales o alejadas, mediante metas audaces de banda ancha y un considerable financiamiento público. Señalan que los principales descubrimientos fueron que (i) los beneficios socioeconómicos en cuanto a crecimiento económico, productividad, costos de vivienda y educación, además de resiliencia económica, son significativos, aunque también pueden experimentar rendimientos decayendo más allá de un cierto grado de calidad de banda ancha, (ii) los impactos en el empleo son más inciertos, (iii) los beneficios socioeconómicos se consolidan solo tras la adopción de la banda ancha por parte de la demanda, no con la simple disponibilidad por parte de la oferta, y (iv) los impactos de la banda ancha varían considerablemente entre las áreas urbanas y las rurales.

En su estudio de investigación, Borwankar y Shah (2020) llevaron a cabo la simulación de los impactos de la niebla y la lluvia en un enlace FSO usando el programa OptiSystem, llegando a la siguiente conclusión: Free Space Optics (FSO) es un sistema de comunicación de línea de visión que puede ofrecer múltiples beneficios como un amplio ancho de banda, velocidades elevadas de datos, comunicación segura y otras más. Analizando la incidencia de la niebla y las precipitaciones pluviales en la zona de estudio obtuvieron los parámetros como el margen de enlace y la atenuación geométrica. Concluyeron que “existen efectos adversos de los factores climáticos y

ambientales en un sistema FSO, haciendo que esta técnica de comunicación sea menos confiable”.

Caizaluisa (2008) desarrolló una investigación que compara el diseño de un sistema FSO con una red de fibra óptica en un Campus Universitario. En el diseño del sistema FSO, realizó un análisis comparativo entre la fibra óptica y la FSO, teniendo en cuenta los factores que limitan el desempeño de la tecnología FSO como las pérdidas relacionadas con la atmósfera; sus costos e implementación, con el propósito de resaltar las ventajas que brinda esta tecnología FSO como las interferencias reducidas, el ancho de banda amplio y la ausencia de una licencia para operar en una banda. Por lo tanto, se plantea el requerimiento de llevar a cabo un análisis de esta tecnología con el objetivo de presentarla como una nueva alternativa o opción de comunicación inalámbrica en el país ecuatoriano.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En su estudio, Huamani (2023) descubrió que algunas comunidades rurales de diferentes regiones del mundo han decidido organizarse y contar con el apoyo de entidades especializadas. De igual manera, detectó y analizó las condiciones operativas y de arquitectura de red que las redes comunitarias utilizan técnicamente, como sintetizar y sugerir tres modelos técnicos, que podrían ser dopados como una opción viable para el acceso a internet.

Casasnovas (2023) en su trabajo de investigación, señaló que muchas de las localidades rurales no cuentan con servicios de banda ancha o su capacidad es insuficiente para poder brindar el servicio de teletrabajo. Por esta razón, presentó diversas opciones tecnológicas que brindan servicios de banda ancha, los cuales se han transformado en un producto esencial y en una fuente de oportunidades.

Soto Carlo (2023) en su investigación, tuvo como objetivo determinar de qué manera el diseño de la red de comunicación de datos distribuye a mejorar la disponibilidad de la información en el Instituto de Educación Superior Pedagógico Público de Huari. Durante el desarrollo de la investigación se aplicó la metodología PPDIOO, que es propuesta por Cisco aplicada a diferentes instituciones empresariales. Utilizó solamente tres fases donde se elaboró, se distribuyó y se formó los puntos donde estaban entrelazados a la red, los cuales fueron simulados en el programa Cisco Packet Tracer.

Malhaber (2019) en su trabajo de investigación, diseñó una red de banda ancha a través de una red de transmisión óptica utilizando los nodos de la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, junto con una red de acceso inalámbrico para proporcionar servicios

de internet y telefonía a las localidades que forman parte de la Provincia de Sihuas en la Región Ancash. Se empleó el software AirLink para el diseño de la red inalámbrica, lo que facilitó la elección adecuada de los parámetros de los radioenlaces para conseguir la interconexión de todas las localidades beneficiadas.

More (2015) en su tesis de maestría, indicó que su objetivo general fue proponer una alternativa satelital a implantar en el Perú, que ofrezca servicios de telecomunicaciones en localidades que no son atendidas por la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica de modo directo o indirecto. Sus conclusiones indican que, debido a las limitaciones de la RDNFO, no se podrá cubrir los servicios de banda ancha en muchas localidades denominados Centros Poblados (CCPP) de nuestro país, por lo que indica que su propuesta es implementar un sistema satelital en la modalidad de Hosted Payload que opere en la banda Ka, cuyo requerimiento de cobertura geográfica es emplear como mínimo 16 huellas satelitales o Spot Beams de 250 MHz.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Enlaces ópticos no guiados

Un enlace óptico en espacio libre es una transmisión inalámbrica láser por infrarrojos Punto a Punto diseñada para la interconexión de dos puntos situados en línea de vista directa. El medio de transmisión utilizado para la transmisión de esta señal es la luz infrarroja generada por una fuente óptica led de alta potencia o diodos láser de baja potencia.

Los sistemas de comunicaciones ópticas de espacio libre (FSO) reciben actualmente una gran consideración por su capacidad para conseguir elevadas tasas binarias como consecuencia directa del enorme ancho de banda disponible. Su aplicación puede tener un gran interés tanto en zonas urbanas densamente pobladas, así como en localidades rurales donde su distribución geográfica dispersa no permite el despliegue de enlaces cableados, tal como se aprecia en la figura 1.

El sistema de espacio libre óptico que emplea la tecnología FSO, es uno de los más empleados en la actualidad para satisfacer las demandas de conexión de "última milla", interconexión de nodos ópticos, respaldo de enlaces y redes ópticas, entre otros. Estos enlaces ópticos FSO proporcionan a los usuarios múltiples beneficios: Sin incidencia de interferencias de radiofrecuencia (RF) ni electromagnética (EM); presentan conexiones ópticas de alta velocidad; sin requerimiento de licencia de operación; son de rápida instalación y de muy alta disponibilidad para coberturas Punto a Punto menores a las 4 km.

Figura 1

Red de enlaces ópticos no guiado



Nota. Adaptada de Nogueira (2007) en la web <https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-32445/estudo-de-sistemas-de-comunicacao-utilizando-optica-no-espaco-livre>. DOC: Estudio de sistemas de comunicación utilizando óptica en espacio libre.

2.2.1.1. Enlaces FSO (Free Space Optical)

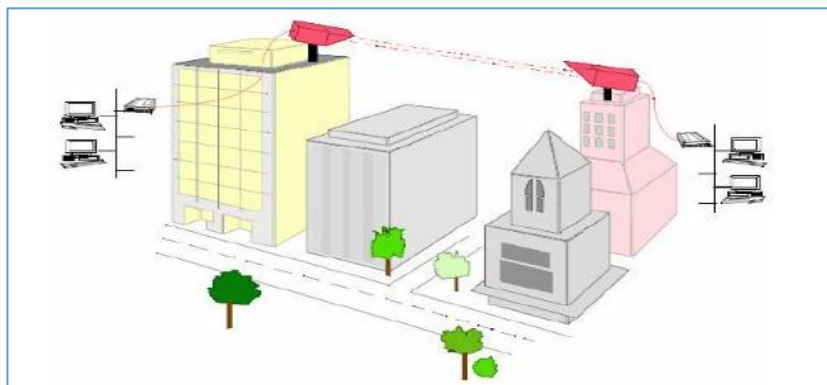
Según UTI (2007), un enlace FSO se define como “el enlace de radiocomunicaciones que utiliza ondas ópticas sin ningún medio guiado”, como se ve en la figura 2.

Los sistemas FSO trabajan en la región infrarroja (IR) del espectro electromagnético. Usan las longitudes de onda cerca del espectro visible, cuyos valores están cerca de 850 y 1550 nm.

Caizaluisa (2008) indica que “debido a la cercanía con el espectro visible, la longitud de onda de IR tiene casi las mismas propiedades que la luz visible y su propagación”.

Figura 2

Enlace óptico FSO



Nota. Adaptada de Nogueira (2007) en la web <https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-32445/estudo-de-sistemas-de-comunicacao-utilizando-optica-no-espaco-livre>. DOC: Estudio de sistemas de comunicación utilizando óptica en espacio libre.

2.2.1.2. Ventajas de los enlaces FSO

Los enlaces FSO presentan muchas ventajas en comparación con otras tecnologías de RF:

- a. Utilizan haces ópticos de muy alta directividad, lo que complica ser interceptados.
- b. Por su naturaleza óptica, los equipos de mediciones de RF no pueden detectarlos, ni con detectores de potencia de RF ni con analizadores de espectro.
- c. Dado que se encuentran fuera del rango de la luz visible, sus haces son invisibles al ojo humano, cuya presencia no resulta evidente.
- d. Presenta un alto grado de seguridad en la transmisión de su información, dado que puede ser transmitido con técnica de modulación digital de forma cifrada.

2.2.1.3. Desventajas de los enlaces FSO

Los enlaces ópticos de espacio libre (FSO), presentan las siguientes desventajas:

- a. Es su alto grado de vulnerabilidad frente a los factores atmosféricos. Al estar operando con ondas luminosas, la atenuación de la señal será muy grande en condiciones de niebla. Esto no invalida las FSO como método de comunicación, simplemente es un factor que debe tenerse en cuenta en el diseño de los enlaces de forma que cumplan las especificaciones requeridas por el usuario. Se deberá garantizar que el enlace estará activo un determinado porcentaje del tiempo.
- b. Es su elevada susceptibilidad ante la presencia de actividad atmosférica. Dado que funciona con ondas de luz, la reducción de la señal será considerable alta en situaciones de niebla. Esto no anula el empleo de los enlaces FSO como método de comunicación, solo es un factor que debe considerarse al diseñarse los enlaces FSO a fin de que satisfagan las especificaciones solicitadas por el usuario. Es esencial asegurar la disponibilidad del enlace FSO durante un alto porcentaje del tiempo bajo severas condiciones de actividad atmosférica.
- c. Interferencia con la radiación solar: el Sol emite también radiación en el espectro del infrarrojo donde trabajan las FSO y por tanto es una fuente de ruido para el sistema. Unos filtros apropiados que eliminen toda la potencia fuera de la banda de interés junto con una potencia suficiente en el receptor solucionan este problema.
- d. Interferencia debido a la presencia de la radiación solar. La radiación solar también se refleja en el espectro infrarrojo donde operan los enlaces FSO, siendo así una fuente de ruido para el sistema. Unos filtros adecuados que reduzcan toda la energía fuera de la banda de interés, sumado a un suficiente a un nivel de potencia en el receptor, resuelven este problema.

e. Incidencia en la salud pública por la emisión de haces ópticos FSO. Los enlaces FSO emiten al espacio libre un alto nivel de potencia óptica concentrada en haces invisibles. La incidencia de este nivel de potencia óptica sobre la retina del ojo humano puede producir graves trastornos de visión. Por ello, es de suma importancia asegurar la inocuidad del empleo de los enlaces FSO en zonas urbanas donde se desplieguen estos sistemas y que sean transitadas por el público.

2.2.1.4. Clasificación por banda óptica de operación

Según Vildoza (2021), indica que “actualmente los transmisores FSO tienen un rango de operaciones según la banda a la que pertenece”, entre las cuales tenemos:

- a. Banda de operación O: Conocida como banda original, cuyo rango de operación es de 1260 – 1360 nm.
- b. Banda de operación E: Conocida como banda extendida, cuyo rango de operación es de 1360 – 1460 nm.
- c. Banda de operación S: Conocida como banda corta, cuyo rango de operación es de 1460 – 1530 nm.
- d. Banda de operación C: Conocida como banda convencional, cuyo rango de operación es de 1530 – 1565 nm.
- e. Banda de operación L: Conocida como banda larga, cuyo rango de operación es de 1565 – 1625 nm.
- f. Banda de operación U: Conocida como banda ultra larga, cuyo rango de operación es de 1625 – 1675 nm.

2.2.2. Funcionamiento de un sistema FSO

Un sistema FSO (Free Space Optics,) transmite información utilizando haces de luz (normalmente infrarroja o visible) a través del aire, sin necesidad de medios de transmisión físicos. Su funcionamiento se basa en los siguientes principios y etapas:

2.2.2.1 Transmisión de la señal

La información (voz, datos, video, etc.) se convierte primero en señales eléctricas. Estas señales eléctricas se transforman en señales ópticas mediante un transmisor, que suele ser un diodo láser o led. El transmisor óptico, junto con un sistema de lentes o un telescopio, emite un haz de luz muy estrecho y dirigido hacia el receptor, ubicado en la línea de visión directa.

2.2.2.2 Propagación en el espacio libre

El haz de luz viaja a través del aire (espacio libre) entre los puntos de transmisión y

recepción. La transmisión es punto a punto, por lo que es imprescindible que ambos dispositivos estén alineados y tengan línea de vista sin obstáculos. La distancia máxima efectiva en la Tierra suele ser de hasta 2-4 km, aunque depende mucho de las condiciones atmosféricas (niebla, lluvia, polvo, calor) que pueden afectar la calidad y estabilidad del enlace.

2.2.2.3. Recepción de la señal

El receptor óptico, equipado con un lente o telescopio, capta el haz de luz transmitido. La luz recibida se enfoca sobre un fotodetector de alta sensibilidad, que convierte la señal óptica de nuevo en señal eléctrica para su posterior procesamiento. El receptor óptico puede estar conectado a la red mediante un cable de fibra óptica o directamente a los equipos de red.

2.2.2.4. Modulación y transmisión de datos

La modulación más común es la modulación en potencia: la intensidad del haz óptico varía según los datos transmitidos (por ejemplo, mayor intensidad para un "1" lógico y menor para un "0" lógico). Los actuales sistemas FSO pueden alcanzar velocidades de transmisión de entre 660 Mbps y los 2,5 Gbps, comparables a las de la fibra óptica.

2.2.2.5. Seguridad y robustez

El haz óptico al ser muy estrecho dificulta su interceptación y permite aumentar la seguridad de la transmisión. Además, la transmisión óptica es inmune a interferencias electromagnéticas, a diferencia de las tecnologías de radiofrecuencia.

2.2.2.6. Limitaciones y soluciones

Obstáculos físicos (como aves o edificios) pueden interrumpir brevemente la señal óptica, pero los sistemas FSO suelen reanudar la transmisión automáticamente cuando el obstáculo desaparece. Para mejorar la disponibilidad de los enlaces ópticos, algunos sistemas emplean haces múltiples o combinan FSO con enlaces de radiofrecuencia (sistemas híbridos).

2.2.3. Topologías para enlaces FSO

Para Nogueira (2007), un factor esencial que debemos considerar al diseñar sistemas FSO es la topología a utilizar. FSO tiene la capacidad de funcionar en todas las estructuras de red (punto-punto, punto-multipunto, malla, anillo y anillo con estribaciones), lo que permite expandir la red según la demanda y funcionar a velocidades de fibra óptica.

A continuación, se describen las principales topologías empleadas en los sistemas ópticos FSO.

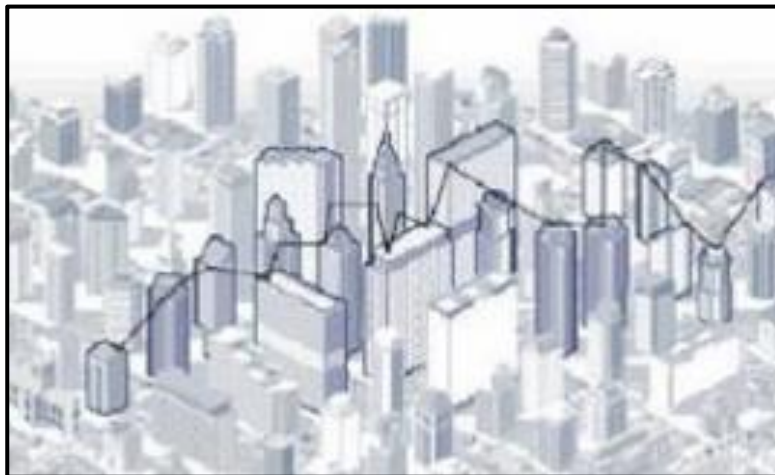
2.2.3.1. Topología de enlaces ópticos Punto a Punto

Según Cimas (2021), esta topología es utilizada cuando se requiere hacer conexiones amplias que puede sobrepasar los límites de los elementos FSO o de las condiciones atmosféricas hechas para alcances con enlaces ópticos, que no requieren dispositivos intermedios. Es la más sencilla y común en enlaces FSO. Conecta directamente dos nodos ópticos (transmisor y receptor) mediante un haz óptico alineado. Empleado para enlaces dedicados, como la conexión entre dos edificios o torres de telecomunicaciones. Tiene la ventaja de ser enlaces de alta velocidad, baja latencia y de fácil implementación”.

Dentro de las limitaciones que presenta es que carece de redundancia, si el enlace falla, se pierde la comunicación entre los nodos conectados. Ver figura 3.

Figura 3

Arquitectura de varios enlaces punto a punto



Nota. Adaptada de Muramoto (2007) del sitio web <http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000431963>. DOC: Estudio y modelamiento de canal óptico atmosférico utilizando el Lightsim como plataforma de simulación.

2.2.3.2. Topología de enlaces ópticos en estrella

Según Cimas (2021), “esta topología es empleada cuando se requiere conectar varios nodos ópticos periféricos a un nodo óptico central (hub), que administra y distribuye el tráfico de datos. El nodo óptico central puede encontrarse en un edificio principal, torre o estación base. Las ventajas que ofrece esta topología es que facilita la gestión y el control del tráfico, y permite escalar la red óptica fácilmente”.

Dentro de las limitaciones que presenta es que el nodo óptico central es un punto único de fallo; si falla, toda la red se ve afectada. Ver figura 4.

Figura 4

Arquitectura en estrella



Nota. Adaptada de Muramoto (2007) del sitio web <http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000431963>. DOC: Estudio y modelamiento de canal óptico atmosférico utilizando el Lightsim como plataforma de simulación.

2.2.3.3. Topología en forma de anillo con derivaciones

Según Cimas (2021), “está topología es empleada cuando se los nodos ópticos están conectados formando un lazo cerrado, donde cada uno se conecta al siguiente y el último al primero. Ello permite que los datos circulen en una o ambas direcciones, mejorando la resiliencia. La ventaja que ofrece es que, si un enlace falla, los datos pueden redirigirse en sentido contrario, manteniendo la conectividad”.

Presenta limitaciones en su implementación debido a que la complejidad aumenta con el número de nodos y la alineación óptica debe ser precisa. Ver figura 5.

Figura 5

Arquitectura en forma de anillo



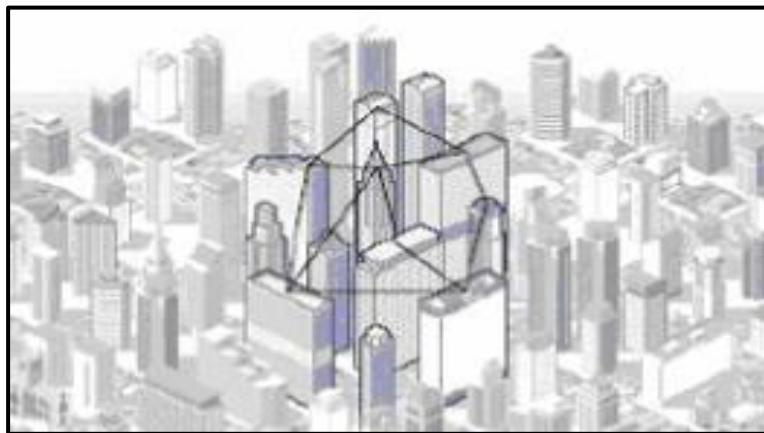
Nota. Adaptada de Muramoto (2007) del sitio web <http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000431963>. DOC: Estudio y modelamiento de canal óptico atmosférico utilizando el Lightsim como plataforma de simulación.

2.2.3.4. Topología en forma de malla

Según Cimas (2021), “está topología es utilizada cuando se requiere que cada nodo óptico puede conectarse directamente con varios nodos ópticos, formando múltiples rutas posibles para los datos. Ofrece alta redundancia y resiliencia, dado que, si un enlace falla los datos pueden tomar rutas alternativas. Es ideal para aplicaciones críticas donde la continuidad del servicio es esencial, como en redes metropolitanas o de misión crítica”. Una de sus limitaciones que presenta esta topología es que requiere mayor número de enlaces y una gestión más compleja. Ver figura 6.

Figura 6

Arquitectura en forma malla



Nota. Adaptada de Muramoto (2007) del sitio web <http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000431963>. DOC: Estudio y modelamiento de canal óptico atmosférico utilizando el Lightsim como plataforma de simulación.

2.2.4. Margen del enlace óptico

El margen del enlace en un sistema de comunicación óptica es un parámetro que indica la operatividad de un enlace óptico. Debido a que la actividad atmosférica y los equipos ópticos ocasionan pérdidas en los enlaces ópticos FSO, se requiere un análisis de la incidencia de estos factores en el margen del enlace entre nodos ópticos a fin de determinar su operatividad en la zona donde se va a desplegar.

2.2.4.1. Pérdida óptica

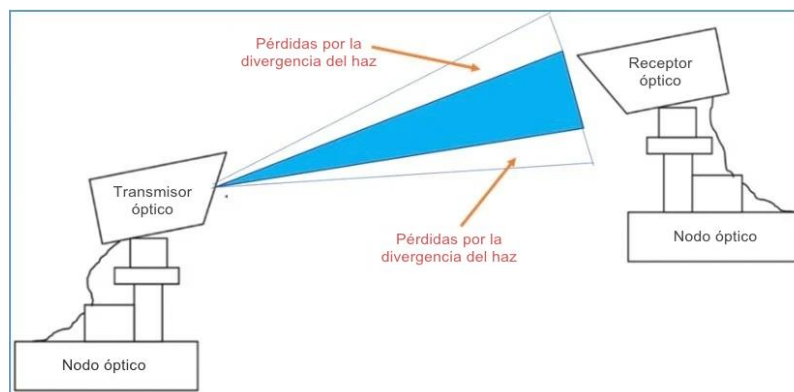
Según Vildoza (2021), estas pérdidas se producen debido a las imperfecciones en los lentes y otros elementos que conforman el equipamiento óptico. Así pues, se debe tener en cuenta que el lente transmite alrededor del 96% de la luz incidente y absorbe el 4% restante, esta propiedad se conoce como pérdida óptica y debe tenerse en cuenta al diseñar un sistema. Las pérdidas generadas dependen de las características del dispositivo y las propiedades del lente, establecidas por el fabricante de equipos ópticos.

2.2.4.2. Pérdida geométrica

Este parámetro está comprendido por pérdidas ocasionadas por el ensanchamiento del haz óptico emitido por el láser mientras se propaga entre dos nodos ópticos. Este fenómeno de propagación óptica se conoce como divergencia del haz, cuyo ángulo de apertura del haz depende del área de cobertura en el receptor y es inversamente proporcional a la potencia recibida, como se puede apreciar en la figura 7.

Figura 7

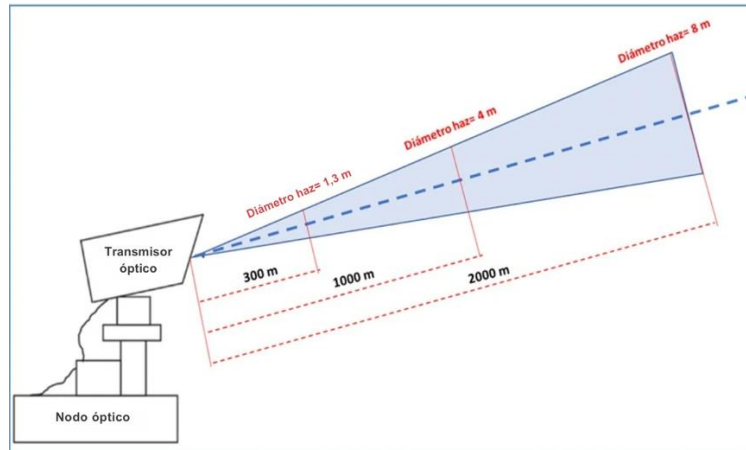
Divergencia del haz óptico



La pérdida geométrica es directamente proporcional a la superficie producida por la longitud del enlace óptico y la divergencia del haz óptico e inversamente proporcional a la superficie de captura en el receptor debido al ángulo de apertura. En

la figura 8 se ve un haz óptico emitido cuyo diámetro se evalúa a 300 m, 1 Km y 2 Km, viéndose el aumento del diámetro con la distancia.

Figura 8
Tamaño del haz óptico proyectado



La expresión matemática 1, presentada en la ecuación 1, permite calcular la pérdida geométrica:

$$\text{Att geométrica} = \frac{S_d}{S_{\text{captura}}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d.\theta)^2}{S_{\text{captura}}} \quad (1)$$

Donde:

θ : divergencia del haz (milirad)

S_{captura}: superficie de captura para un diámetro de apertura (m²).

d: longitud del enlace óptico (m).

La expresión matemática 2, expuesta en la ecuación 2, permite calcular la pérdida geométrica en unidades logarítmicas (dB):

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = 10 \cdot \log (\text{Att}_{\text{geométrica}}) \quad (2)$$

2.2.4.3. Pérdida atmosférica y sensibilidad del receptor

La atenuación atmosférica en un enlace óptico FSO se produce por diversos fenómenos atmosféricos presentes en la zona donde se va a desplegar el sistema FSO, tales como la absorción, dispersión y centelleo, los cuales dependerán de las condiciones meteorológicas. La longitud del enlace FSO entre dos nodos ópticos permitirá establecer el rango de desvanecimiento de la conexión y así determinar la operatividad del enlace óptico.

Dependiendo de la clase de receptor empleado existe un rango teórico de una potencia de onda mínima detectable que determina el límite operativo del sistema óptico

FSO. Esta potencia mínima se le conoce como sensibilidad del receptor. Este parámetro es dado por el fabricante de equipos ópticos.

2.2.4.4. Margen del enlace

Según Nogueira (2007), el margen del enlace se define como la diferencia en decibelios (dB) entre la potencia recibida en el receptor y la potencia mínima necesaria para una detección fiable de la señal, es decir, la sensibilidad del receptor.

La expresión matemática 3, expuesta en la ecuación 3, permite calcular el margen del enlace óptico FSO:

$$\text{Margen de enlace (dB)} = 10 \log (P_{\min}/P_r) \quad (3)$$

Donde:

P_r : es la potencia óptica recibida después de considerar todas las pérdidas del canal y del sistema,

P_{\min} : es la potencia mínima detectable por el receptor para un nivel aceptable de error.

Para Torres y Samaniego (2024), el margen del enlace óptico es importante porque: permite garantizar la continuidad y calidad del enlace FSO ante condiciones adversas como niebla, lluvia, turbulencia y polvo; un margen adecuado asegura que la tasa de error de bits (BER) se mantenga dentro de límites aceptables; facilita la planificación y diseño del sistema. Indican que un valor típico del rango dinámico en enlaces FSO comerciales varían entre 20 a 85 dB, dependiendo de la distancia, condiciones atmosféricas y diseño del sistema óptico.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Margen de enlace FSO

El margen del enlace FSO expresa la contribución de condiciones específicas propias del enlace y los parámetros que tienen que ver con el rendimiento del sistema FSO. Representa un nivel de la degradación que debe superar el sistema FSO, para que el enlace óptico se mantenga operativo (Caizaluisa, 2008).

2.3.2. Divergencia del haz

La divergencia del haz representa el “valor máximo de los ángulos creados por el eje central del haz óptico vinculado a la densidad de potencia máxima, mientras que la dirección corresponde a una densidad de potencia - 3 dB menor, mostrando el valor del ángulo de apertura del diodo láser”. Este ángulo tiene una relación directa con la

superficie de cobertura en el extremo remoto, con una proporcionalidad inversa con la potencia de recepción del equipo óptico remoto (Caizaluisa, 2008).

2.3.3. Dispersión de Mie

La dispersión de Mie es un fenómeno de dispersión de la luz que ocurre cuando las partículas presentes en la atmósfera tienen un tamaño igual o mayor que la longitud de onda de la radiación incidente. Este tipo de dispersión es especialmente relevante en condiciones atmosféricas con presencia de niebla, neblina y aerosoles, donde las partículas tienen tamaños comparables a la longitud de onda de los sistemas FSO (típicamente entre 850 y 1550 nm) (Gil y Jiménez, 2017).

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Diseño de la investigación

La investigación desarrollada en esta tesis es de tipo aplicada, también denominada “investigación práctica”. En esta investigación práctica, la importancia radica en las consecuencias de los resultados obtenidos que permita diseñar una red de banda ancha para la provincia de Huari, región Ancash en el Perú.

El nivel de investigación se refiere a un nivel explicativo, porque la investigación pretende explicar cómo el diseño de una red de acceso de banda ancha mejora los servicios de telecomunicaciones en las localidades rurales de la provincia de Huari, región Ancash en el Perú.

El diseño de la investigación del trabajo de tesis es no experimental, ya que se elaboró una propuesta de un sistema óptico FSO para las localidades rurales de la provincia de Huari, región Ancash con la finalidad de mejorar sus servicios de banda ancha.

Debido a que el trabajo de tesis se desarrolló en un momento específico, se trata de un estudio transversal.

3.2. Acciones y actividades

En esta investigación, la recolección de datos se realizó a través de una serie de actividades programadas.

Para el desarrollo de la presente tesis, se siguió la siguiente secuencia de actividades:

- a. Análisis del estado actual de los servicios de comunicaciones en las localidades rurales de la zona de estudio.
- b. Selección de las localidades que forman parte de la provincia de Huari, región Ancash que se encuentran comprendidas entre las altitudes de 2300 y 3800 msnm.
- c. Ubicación geográfica de los nodos ópticos en las localidades seleccionadas empleando Google Earth Pro.
- d. Propuesta de la topología (interconexión de los nodos ópticos) del sistema FSO.
- e. Levantamiento topográfico de los trayectos de los enlaces ópticos FSO

- f. Verificación de visibilidad directa natural o utilizando torres en los enlaces ópticos FSO.
- g. Determinación de los parámetros de los enlaces ópticos FSO, según longitud máxima del enlace, longitud de operación, potencia de transmisión, sensibilidad de recepción y capacidad de transmisión.
- h. Selección de los equipos ópticos que cumplan con los requerimientos de los enlaces ópticos FSO
- i. Cálculo de las pérdidas geométricas, pérdidas atmosféricas y el margen de los enlaces ópticos FSO.

3.2.1. Selección de las localidades en la zona de estudio

Se siguieron los siguientes criterios para la selección de las localidades:

- a. La altitud de las localidades de la provincia de Huari, no debe exceder de los 4100 msnm para que los enlaces ópticos no sean influenciados por la nieve, es decir, no existan pérdidas por nieve, las cuales imposibilitarían implementar un enlace óptico debido a sus altos valores de pérdidas.
- b. Los enlaces ópticos deben tener una longitud menor a 4,40 km, a fin de mantener la recomendación efectuada por los fabricantes de equipos FSO. Esta distancia máxima está condicionada por la atenuación total y las condiciones atmosféricas.
- c. Se consideraron localidades que según información proporcionada por el Senamhi (2018) tienen precipitaciones entre 1 a 8 mm/h.
- d. Los enlaces ópticos FSO entre 2 nodos ópticos, deben contar con una visibilidad directa sin obstrucciones.
- e. La presencia de hidrometeoros (niebla o neblina) en las localidades de la zona de estudio afecta la visibilidad reduciéndola, especialmente en las mañanas y noches. En la provincia de Huari, la niebla se presenta principalmente durante la temporada de lluvias, que abarca los meses de diciembre a marzo, con mayor frecuencia entre febrero y abril.

3.2.2. Ubicación geográfica de las localidades seleccionadas

Siguiendo los criterios expuestos en el ítem anterior, se seleccionaron 11 localidades de la provincia de Huari, la cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1*Localidades seleccionadas de la red óptica FSO*

N°	Denominación	Tipo de localidad	Elemento del sistema FSO
1	Huari	Distrito	Nodo óptico
2	Cajay	Distrito	Nodo óptico
3	Colcas	Centro Poblado Menor	Nodo óptico
4	Cayas	Centro Poblado Menor	Nodo óptico
5	Huamantanga	Centro Poblado Menor	Nodo óptico
6	Chinchas	Centro Poblado Menor	Nodo óptico
7	Yacya	Centro Poblado Menor	Nodo óptico
8	Repetidor 1	Localidad	Nodo óptico
9	Mallas	Centro Poblado Menor	Nodo óptico
10	Huarac	Centro Poblado Menor	Nodo óptico
11	Huántar	Distrito	Nodo óptico

3.2.2.1. Distrito de Huari

La Tabla 2 muestra sus coordenadas geográficas del nodo óptico en el distrito de Huari.

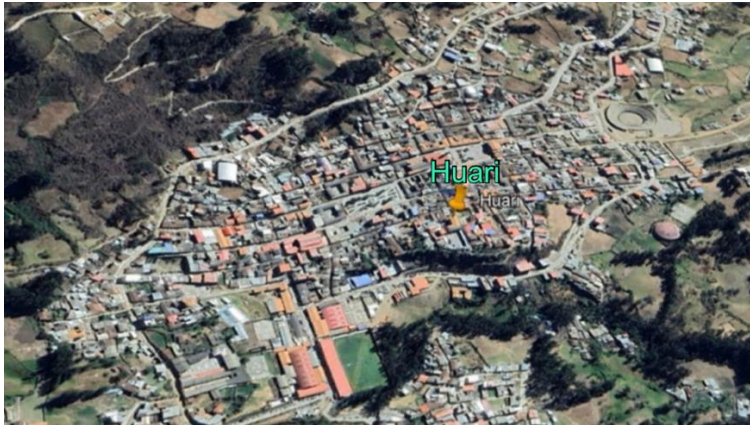
Tabla 2*Coordenadas geográficas del nodo óptico Huari*

Coordenada geográfica	
Latitud	9°20'56,16"S
Longitud	77°10'16,05"O
Altitud	3102 msnm

La figura 9 muestra la ubicación del nodo óptico en el distrito de Huari.

Figura 9

Ubicación del nodo óptico en el distrito de Huari



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.2.2. Distrito de Cajay

La Tabla 3 muestra sus coordenadas geográficas del nodo óptico en el distrito de Cajay.

Tabla 3

Coordenadas geográficas del nodo óptico Cajay

Coordenada geográfica	
Latitud	9°19'30,83"S
Longitud	77° 9'25,27"O
Altitud	3187 msnm

La figura 10 muestra la ubicación del nodo óptico en el distrito de Cajay.

Figura 10

Ubicación del nodo óptico en el distrito de Cajay



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.2.3. Centro Poblado Menor Colcas

La Tabla 4 muestra sus coordenadas geográficas del nodo óptico en el Centro Poblado Menor Colcas.

Tabla 4

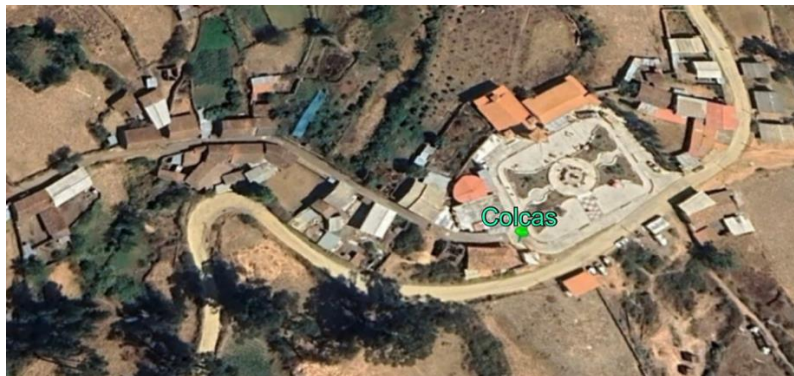
Coordenadas geográficas del nodo óptico Colcas

Coordenada geográfica	
Latitud	9°18'57.93"S
Longitud	77°10'14.05"O
Altitud	3152 msnm

La figura 11 muestra la ubicación del nodo óptico en el Centro Poblado Menor Colcas.

Figura 11

Ubicación del nodo óptico en el CPM Colcas



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.2.4. Centro Poblado Menor Cayas

La Tabla 5 muestra sus coordenadas geográficas del nodo óptico en el Centro Poblado Menor Cayas.

Tabla 5

Coordenadas geográficas del nodo óptico Cayas

Coordenada geográfica	
Latitud	9°18'37.28"S
Longitud	77° 9'38.47"O
Altitud	3190 msnm

La figura 12 muestra la ubicación del nodo óptico en el CPM Cayas.

Figura 12

Ubicación del nodo óptico en el CPM Cayas



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.2.5. Centro Poblado Menor Huamantanga

La Tabla 6 muestra sus coordenadas geográficas del nodo óptico en el Centro Poblado Menor Huamantanga.

Tabla 6

Coordenadas geográficas del nodo óptico Huamantanga

Coordenada geográfica	
Latitud	9°17'57.86"S
Longitud	77°10'7.32"O
Altitud	3308 msnm

La figura 13 muestra la ubicación del nodo óptico en el CPM Huamantanga.

Figura 13

Ubicación del nodo óptico en el CPM Huamantanga



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.2.6. Centro Poblado Menor Chinchas

La Tabla 7 muestra sus coordenadas geográficas del nodo óptico en el Centro Poblado Menor (CPM) Chinchas.

Tabla 7

Coordenadas geográficas del nodo óptico Chinchas

Coordenada geográfica	
Latitud	9°22'19.93"S
Longitud	77° 8'36.12"O
Altitud	2981 msnm

La figura 14 muestra la ubicación del nodo óptico en el CPM Chinchas.

Figura 14

Ubicación del nodo óptico en el CPM Chinchas



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.2.7. Centro Poblado Menor Yacya

La Tabla 8 muestra sus coordenadas geográficas del nodo óptico en el Centro Poblado Menor (CPM) Yacya.

Tabla 8

Coordenadas geográficas del nodo óptico Yacya

Coordenada geográfica	
Latitud	9°23'3.48"S
Longitud	77°10'8.79"O
Altitud	3516 msnm

La figura 15 muestra la ubicación del nodo óptico en el CPM Yacya.

Figura 15

Ubicación del nodo óptico en el CPM Yacya



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.2.8. Repetidor 1

La Tabla 9 muestra sus coordenadas geográficas del nodo óptico Repetidor 1 colindante con el CPM Yacya.

Tabla 9

Coordenadas geográficas del nodo óptico Repetidor 1

Coordenada geográfica	
Latitud	9°22'46.72"S
Longitud	77°10'55.40"O
Altitud	3843 msnm

La figura 16 muestra la ubicación del nodo óptico Repetidor 1.

Figura 16

Ubicación del nodo óptico Repetidor 1



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.2.9. Centro Poblado Menor Mallas

La Tabla 10 muestra sus coordenadas geográficas del nodo óptico en el Centro Poblado Menor (CPM) Mallas.

Tabla 10

Coordenadas geográficas del nodo óptico Mallas

Coordenada geográfica	
Latitud	9°24'7.05"S
Longitud	77°11'42.98"O
Altitud	3157 msnm

La figura 17 muestra la ubicación del nodo óptico en el CPM Mallas.

Figura 17

Ubicación del nodo óptico en el CPM Mallas



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.2.10. Centro Poblado Menor Huarac

La Tabla 11 muestra sus coordenadas geográficas del nodo óptico en el Centro Poblado Menor (CPM) Huarac.

Tabla 11

Coordenadas geográficas del nodo óptico Huarac

Coordenada geográfica	
Latitud	9°25'57.28"S
Longitud	77°10'32.44"O
Altitud	3102 msnm

La figura 18 muestra la ubicación del nodo óptico en el CPM Huarac.

Figura 18

Ubicación del nodo óptico en el CPM Huarac



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.2.11. Distrito de Huántar

La Tabla 12 muestra sus coordenadas geográficas del nodo óptico en el distrito de Huántar.

Tabla 12

Coordenadas geográficas del nodo óptico Huántar

Coordenada geográfica	
Latitud	9°27'13.68"S
Longitud	77°10'32.47"O
Altitud:	3352 msnm

La figura 19 muestra la ubicación del nodo óptico en el distrito de Huántar.

Figura 19

Ubicación del nodo óptico en el distrito de Huántar



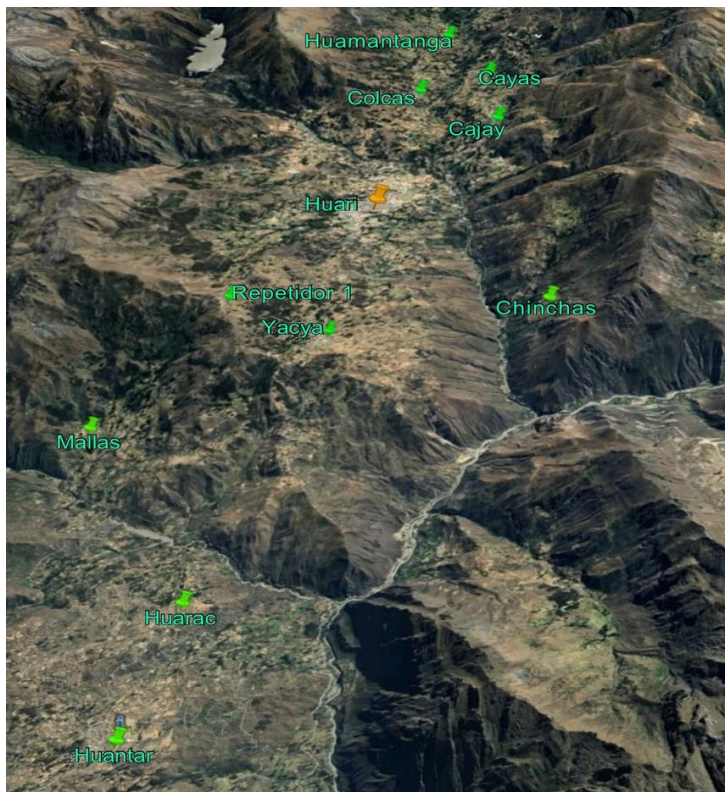
Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

A continuación, se presentan la distribución geográfica de las localidades de la provincia de Huari comprendidas entre las altitudes de 2300 y 3800 msnm, que conforman la red propuesta de enlaces ópticos FSO.

La Figura 20 muestra la disposición de los nodos ópticos distribuidos en las localidades de la zona de estudio.

Figura 20

Disposición de los nodos ópticos en la zona de estudio



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro., adaptada para mostrar las localidades de la red FSO propuesta

La Tabla 13 presenta las coordenadas geográficas de los nodos ópticos ubicadas en las localidades de la provincia de Huari que forman parte de la red óptico FSO.

Tabla 13

Coordenadas geográficas de las localidades de la red óptica FSO

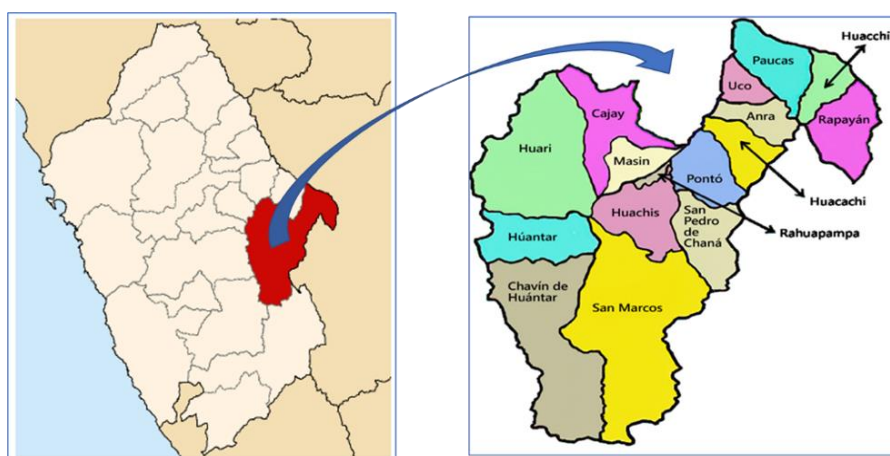
Denominación	Latitud	Longitud	Altitud
Huari	9°20'56,16"S	77°10'16,05"O	3102 msnm
Cajay	9°19'30,83"S	77° 9'25,27"O	3187 msnm
Colcas	9°18'57,93"S	77°10'14,05"O	3152 msnm
Cayas	9°18'37,28"S	77° 9'38,47"O	3190 msnm
Huamantanga	9°17'57,86"S	77°10'7,32"O	3308 msnm
Chinchas	9°22'19,93"S	77° 8'36,12"O	2981 msnm
Yacya	9°23'3,48"S	77°10'8,79"O	3516 msnm
Repetidor 1	9°22'46,72"S	77°10'55,40"O	3843 msnm
Mallas	9°24'7,05"S	77°11'42,98"O	3157 msnm
Huarac	9°25'57,28"S	77°10'32,44"O	3102 msnm
Huántar	9°27'13,68"S	77°10'32,47"O	a. m

3.2.3. Descripción de la zona de estudio

La provincia de Huari se encuentra ubicada en la zona central y oriental del departamento de Ancash y la conforman 15 distritos. Ver figura 21

Figura 21

Distritos de la provincia de Huari



Nota: Adaptada de Provincia de Huari (2023) en el sitio web <https://provinciadehuari.com/huari/mapa-de-la-provincia-de-Huari/>. DOC: Mapa de la provincia de Huari.

Según Wikipedia (2025), la altitud de las localidades de la provincia de Huari varía desde los 2150 msnm hasta los 6370 msnm, comprendidas entre las siguientes regiones naturales: Yunga (2150 a 2300 msnm.), Quechua (2300 a 3500 msnm.), Suni o Jalca (3500 a 4000 msnm.), Puna (4000 a 4500 msnm.) y Janca (4500 a 6370 msnm.)

El clima en la provincia de Huari, región Áncash, varía significativamente según la altitud y la región natural, presentando una amplia diversidad climática:

- a. Yunga (2150 a 300 msnm.): Clima cálido-templado, con temperaturas más elevadas y condiciones relativamente agradables.
- b. Quechua (2300 a 3500 msnm.): Clima templado, con temperaturas moderadas y condiciones adecuadas para la agricultura.
- c. Suni o Jalca (3500 a 4000 msnm.): Clima frío, con temperaturas más bajas y mayor presencia de heladas.
- d. Puna (4000 a 4500 msnm.): Clima frío y seco, con temperaturas bajas y vegetación adaptada a condiciones extremas.
- e. Janca (4500 a 6370 msnm.): Clima frígido, con temperaturas muy bajas, presencia de nieve y hielo, y condiciones extremas para la vida.

La capital Huari, ubicada a unos 3149 msnm, presenta un clima semi frío con temperaturas promedio anuales alrededor de 13,6 °C, máximas cercanas a 21,5 °C y mínimas que pueden bajar a 2,9 °C en invierno. La región tiene una temporada seca y una temporada de lluvias, con precipitaciones concentradas principalmente entre noviembre y marzo.

En general, el relieve accidentado con valles estrechos y cordilleras altas genera microclimas diversos, con variaciones térmicas marcadas entre el día y la noche, y entre diferentes zonas altitudinales

La altitud afecta de manera significativa el clima en la provincia de Huari, generando variaciones marcadas en temperatura, humedad y condiciones atmosféricas a lo largo de su territorio andino. La temperatura disminuye aproximadamente 6,5 °C por cada kilómetro de ascenso en altitud, lo que implica que las zonas más altas de Huari (hasta más de 6000 msnm.) tienen climas mucho más fríos que las zonas bajas

En la ciudad de Huari, ubicada en la sierra de Áncash, la precipitación de nieve es poco frecuente y está generalmente limitada a zonas de mayor altitud. Según los avisos del Senamhi, la nieve se presenta en la sierra por encima de los 4100 metros sobre el nivel del mar, especialmente en la zona centro y sur de Áncash, mientras que Huari se encuentra a una altitud menor (alrededor de 3100 msnm), por lo que la precipitación en forma de nieve en la ciudad misma es muy rara o nula.

En consecuencia, el nivel de precipitación de nieve en la ciudad de Huari es prácticamente inexistente o muy bajo, ya que las condiciones para la nieve se dan principalmente a altitudes superiores a 4100 msnm, y Huari está por debajo de ese umbral. La precipitación en Huari durante la época de lluvias se presenta mayormente en forma de lluvia y, ocasionalmente, granizo en zonas altas cercanas.

3.2.4. Equipamiento óptico seleccionado

De acuerdo con las evaluaciones efectuadas de las condiciones atmosféricas, longitud de los enlaces ópticos, intensidad de lluvia y neblina presente en las localidades de la zona de estudio, los equipos ópticos deben cumplir con las siguientes especificaciones técnicas para establecer nuestra red óptica FSO:

- a. Protocolo de transmisión: Estándar Gigabit Ethernet
- b. Capacidad de transmisión: 600 – 1,25 Gbps
- c. Longitud máxima del enlace óptico: 4,4 km
- d. Banda óptica de operación: $\lambda=1550$ nm
- e. Potencia óptica de transmisión: 4 diodos láseres de 160 mW (28 dBm)
- f. Sensibilidad de recepción óptica:
 - Para 662 Mbps: -33 dBm
 - Para 1,25 Gbps: -20 dBm

En concordancia con los parámetros seleccionado para los enlaces ópticos FSO, se revisó las especificaciones técnicas de diferentes fabricantes de equipos FSO, siendo seleccionado el fabricante “FSONA Optical Wireless, la serie Sonabeam – M, modelo 1250-M”, que satisface nuestros requerimientos. La figura 22 muestra el equipo seleccionado (especificaciones en anexo 2 al 5).

Figura 22

Equipo FSO Sonabeam 1250-M



Nota. Imagen extraída de Sonabeam (2023) en el sitio web <http://www.fsona.com/prod/SONABEAM-Datasheets.pdf>. DOC: catálogo técnico del fabricante FSONA Optical Wireless.

3.2.5. Parámetros que intervienen en el diseño de un enlace óptico FSO

3.2.5.1. Topología de los enlaces ópticos FSO

Por la distribución geográfica de los nodos ópticos en la propuesta del sistema FSO, la topología seleccionada fue de Punto a Punto.

Se elaboraron 10 enlaces ópticos FSO para los 11 nodos ópticos ubicados en la provincia de Huari, Ancash.

Se eligieron las ubicaciones de los nodos ópticos en las localidades seleccionadas, a fin de garantizar la visibilidad directa entre nodos ópticos.

3.2.5.2. Potencia de transmisión óptica y sensibilidad de recepción óptica

Los valores de la potencia de transmisión óptica y de la sensibilidad del receptor óptico fueron suministrados por el fabricante.

Tomando en cuenta que la longitud máxima que alcanza uno de los enlaces ópticos fue de 4,17 km, se requirió utilizar fuentes ópticas de mayor potencia.

Así mismo, para garantizar la operatividad de cada enlace óptico, se requirió operar a una menor capacidad de transmisión. Esta menor capacidad de transmisión va a permitir operar al receptor óptico con una menor sensibilidad de recepción.

Las especificaciones técnicas requeridas al equipamiento FSO del fabricante FSONA modelo 1250 M fueron:

- a. Sensibilidad de recepción óptica a 662 Mbps: - 33 dBm
- b. Potencia óptica de transmisión: 28 dBm

3.2.5.3 Banda óptica de operación

Para determinar la banda de operación óptica de los enlaces FSO, se consideró que la banda óptica permita emplear fuentes ópticas que alcancen niveles de potencia mayores para cubrir enlaces ópticos de mayor longitud. Los sistemas ópticos FSO que se encuentran en el mercado operan entre las longitudes de onda de 850 nm y 1550 nm.

La longitud de onda operación seleccionada para el presente trabajo de tesis fue de 1550 nm.

3.2.5.4 Atenuación geométrica

La atenuación geométrica es un factor que restringe la cobertura del enlace óptico FSO y reduce la disponibilidad de un enlace FSO. El haz óptico emitido por el transmisor óptico sufre divergencia, de esta manera el receptor óptico capta únicamente una fracción de la energía emitida.

Según el modelo Sonabeam 1250–M del fabricante FSONA, se tiene los siguientes datos técnicos:

Θ : divergencia del haz = 3 milirad (0.003 radianes)

S_{captura}: superficie de captura para un diámetro de apertura de 20 cms.

d: longitud del enlace óptico.

La expresión matemática 1 de la ecuación 4 permite calcular la atenuación geométrica:

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d.\theta)^2}{S_{captura}} \quad (4)$$

La expresión matemática 2, mostrada en la ecuación 5, permite calcular la atenuación geométrica en unidades logarítmicas (dB):

$$Att_{geométrica} = 10 * \log (Att_{geométrica}) \quad (5)$$

3.2.5.5. Atenuación por lluvia

La UIT (2016) emite el Informe UIT-R F.2106 empleado para calcular la intensidad de la lluvia, se empleó el Informe UIT-R F.2106 sobre Aplicaciones del servicio fijo que utilizan enlaces ópticos en el espacio libre.

Del informe, la expresión matemática 5 de la ecuación 6 permite calcular la atenuación específica (dB/km) debida a la lluvia:

$$\Upsilon_{lluvia} = k . R^\alpha \quad (6)$$

Donde:

Υ_{lluvia} : Atenuación específica debida a la lluvia (dB / km),

R: Intensidad del nivel de precipitación de lluvia (mm/h),

k y α : Coeficientes de lluvia.

En la tabla 14 se presentan los valores de los coeficientes de atenuación por lluvia, de acuerdo con los Modelos de Predicción francés y japonés.

Tabla 14

Modelo de Predicción de Lluvia

Modelo	k	α	Υ_{lluvia}
Japonés	1,58	0,63	$1,58 * R^{0,63}$
Francés	1,076	0,67	$1,076 * R^{0,67}$

Nota. Obtenida de Informe UIT-R F.2106 (2007) em el sitio web https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-F.2106-2007-PDF-S.pdf

De la tabla 14 se seleccionó el Modelo de Predicción Francés o de Carboneau.

La expresión matemática 5, expuesta en la ecuación 7, permite calcular la atenuación específica debida a la lluvia:

$$Y_{\text{lluvia}} = 1,076 R^{0,67} \quad (7)$$

La expresión matemática 6, presentada en la ecuación 8, permite calcular la atenuación por lluvia:

$$Att_{\text{lluvia}} = Y_{\text{lluvia}} * d(\text{km}) \quad (8)$$

3.2.5.6. Atenuación por niebla (Att_{niebla})

Según Vildoza (2021), “la atenuación debida a la niebla es originada por la dispersión Mie, que depende del número de partículas (densidad de la niebla). El efecto de la atenuación debida a la niebla Att_{niebla} (dB) puede relacionarse con la visibilidad atmosférica, V (km), definida como la máxima distancia a la que puede reconocerse un objeto negro en el cielo”.

La variación del coeficiente de atenuación “ q ” relacionado con una visibilidad V , está definida por la ley de Kruse, que se expone en la ecuación 9.

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50 \text{ km} \\ 1,3 & \text{si } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,16 (V) + 0,34 & \text{si } 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \end{array} \right\} \quad (9)$$

Según los Códigos Internacionales de visibilidad, Existe una relación entre la precipitación lluvia y la visibilidad (V).

Con los valores de Visibilidad (V) y la intensidad de la lluvia (R), se obtuvo el valor del coeficiente de atenuación con la visibilidad “ q ”.

La expresión matemática 7, como se presenta en la ecuación 10, permite calcular el coeficiente de atenuación por niebla (α_{fog}).

$$\alpha_{\text{fog}} = (13/V) * (\lambda/550)^{-q} \quad (10)$$

La expresión matemática 8, de la ecuación 11, calcula la atenuación por niebla:

$$Att_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) \quad (11)$$

Donde:

q : coeficiente de atenuación con la visibilidad

V : visibilidad en el enlace óptico

λ : longitud de onda de operación = 1550 nm.

α_{fog} : coeficiente de atenuación de la niebla.

3.2.5.7. Pérdidas en el sistema por elementos de un enlace FSO

Las pérdidas en el sistema son ocasionadas por los siguientes elementos del enlace FSO que degradan la señal óptica transmitida:

a. Atenuación en equipos FSO

Surgen debido al desgaste que sufren los equipos electrónicos FSO con el tiempo. Es dado por el fabricante, que considera un valor de reserva.

b. Atenuación en conectores

Los conectores degradan la potencia de transmisión de la señal óptica. En cada enlace FSO hay un conector en cada extremo.

c. Atenuación en la fibra óptica

Las pérdidas en la fibra óptica oscilan entre 5 y 10 dB por kilómetro. En un enlace FSO estas pérdidas son despreciables dado que los tramos de fibra óptica que se emplean son muy cortos.

d. Atenuación por desalineamiento

Se produce cuando los haces ópticos no se encuentran alineados, provocando degradación en la recepción de la señal óptica.

La expresión matemática 9, de la ecuación 12, permite calcular las pérdidas en el sistema:

$$\text{Pérdidas}_{\text{sistema}} = \text{Att}_{\text{equipo}} + \text{Att}_{\text{conectores}} + \text{Att}_{\text{por FO}} + \text{Att}_{\text{por desalineamiento}} \quad (12)$$

3.2.6. Criterios para el diseño de la red óptica FSO

Para el dimensionamiento y diseño del sistema FSO propuesto, se tuvo que verificar en primer lugar, la existencia de un punto de acceso de la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica en la provincia de Huari, la cual se encuentra en la ciudad de Huari. Luego, se tomó en cuenta la información ofrecida por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) referente a los servicios de banda ancha en las localidades de la zona de estudio

Para la planificación, diseño y dimensionamiento de la red óptica FSO, se procedió a realizar un estudio de gabinete y un estudio de campo.

El estudio de gabinete realizado permitió:

- a. Seleccionar las localidades cuyas altitudes se encuentran por debajo de los 4100 msnm, a fin de evitar la presencia de precipitaciones por nieve cuyas pérdidas atmosféricas son muy elevadas.

- b. Trazar las rutas de propagación de los enlaces ópticos FSO que cuenten con visibilidad directa sin obstáculos.
- c. Establecer enlaces ópticos que no excedan de los 4,5 km de longitud recomendado por los fabricantes de equipos FSO.
- d. Determinar la ubicación de los nodos ópticos en las localidades seleccionadas.
- e. Utilizando Google Earth Pro, obtener el perfil topográfico de cada enlace óptico.
- f. Determinar la altura de las torres donde irán instalados los equipos FSO, que permita la existencia de visibilidad directa en cada uno de los enlaces ópticos.
- g. Proponer el esquema del sistema de enlaces ópticos FSO.

Se realizó el estudio de campo en la zona de estudio, la cual permitió la verificación de:

- a. Los servicios de banda ancha y la infraestructura de telecomunicaciones existentes en la zona de estudio.
- b. La no presencia de ningún obstáculo físico en la ruta de propagación de un enlace FSO propuesto, como la presencia de árboles, arbustos o la existencia de nuevas edificaciones que podrían impedir la visibilidad directa de los enlaces ópticos.
- c. Verificar que las localidades donde se establecieron los nodos ópticos cuenten con suministro de energía eléctrica permanente. Dicho suministro eléctrico está brindado por la Empresa Hidrandina.
- d. Acceso mediante carretera al nodo óptico denominado Repetidor 1 y que su suministro de energía eléctrica está garantizado por Hidrandina, así como la disponibilidad de espacio físico para la instalación del equipamiento óptico y la instalación de la torre de antenas.
- e. La ubicación geográfica de cada uno de los nodos ópticos del sistema FSO propuesto empleando un equipo GPS.

3.2.7. Propuesta de la red de enlaces ópticos FSO

Efectuado el estudio de gabinete y el estudio de campo, se propuso la red de enlaces ópticos FSO que se interconectará al Punto de Acceso de la Red Dorsal de Fibra Óptica del Perú para el acceso a Internet, a través del nodo óptico ubicado en el distrito de Huari de la ciudad de Huari.

En nuestra propuesta, la Municipalidad Provincial de Huari se encargará de la administración de la red de enlaces ópticos FSO propuesto. En la figura x se observa que la red óptica FSO está compuesta por 11 enlaces ópticos FSO, que interconectan 11 nodos ópticos ubicados en la provincia de Huari.

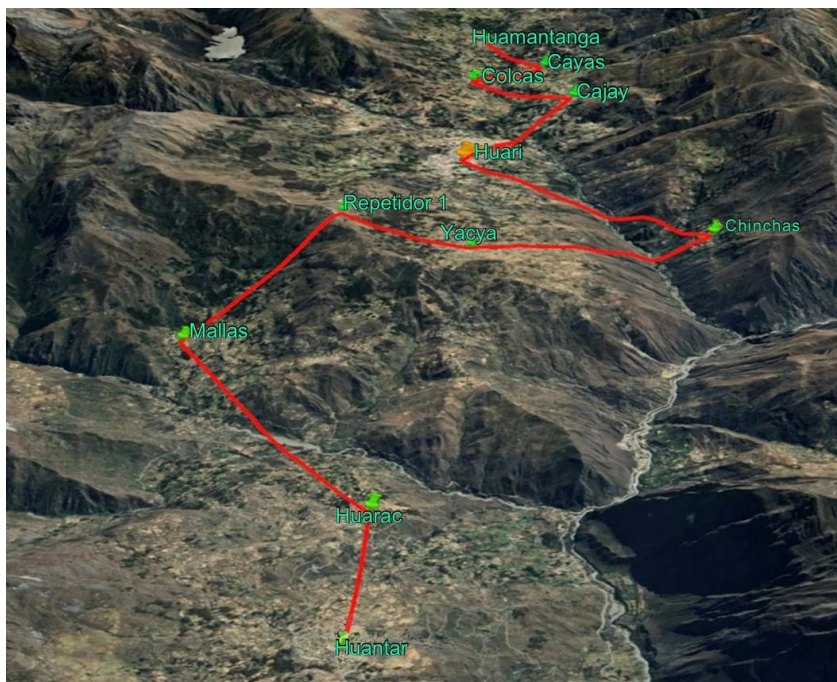
A continuación, se muestra la relación de los 10 enlaces ópticos FSO a ser desplegados en la zona de estudio:

- a. Enlace FSO 1: Huari-Cajay
- b. Enlace FSO 2: Cajay-Colcas
- c. Enlace FSO 3: Colcas-Cayas
- d. Enlace FSO 4: Cayas-Huamantanga
- e. Enlace FSO 5: Huari-Chinchas
- f. Enlace FSO 6: Chinchas-Yacya
- g. Enlace FSO 7: Yacya-Repetidor 1
- h. Enlace FSO 8: Repetidor 1-Mallas
- i. Enlace FSO 9: Mallas-Huarac
- j. Enlace FSO 10: Huarac-Huántar

En la figura 23 se observa la ruta de propagación de la red óptica FSO compuesta por 10 enlaces ópticos FSO que interconectan 11 nodos ópticos, ubicados en las localidades seleccionadas de la provincia de Huari.

Figura 23

Propuesta de la red óptica FSO en la provincia de Huari



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

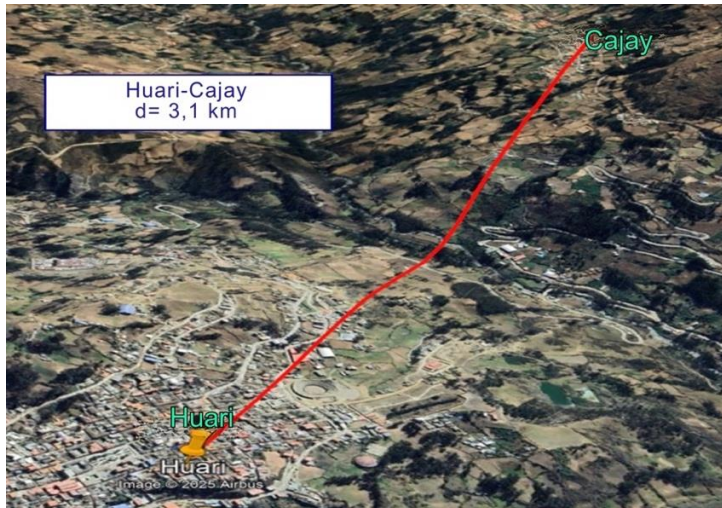
3.2.8. Levantamiento de la ruta de los enlaces FSO

3.2.8.1. Enlace óptico Huari-Cajay

La figura 24 ilustra el levantamiento de la ruta del enlace óptico Huari-Cajay, elaborado con el software Google Earth Pro.

Figura 24

Levantamiento de la ruta del enlace óptico Huari-Cajay



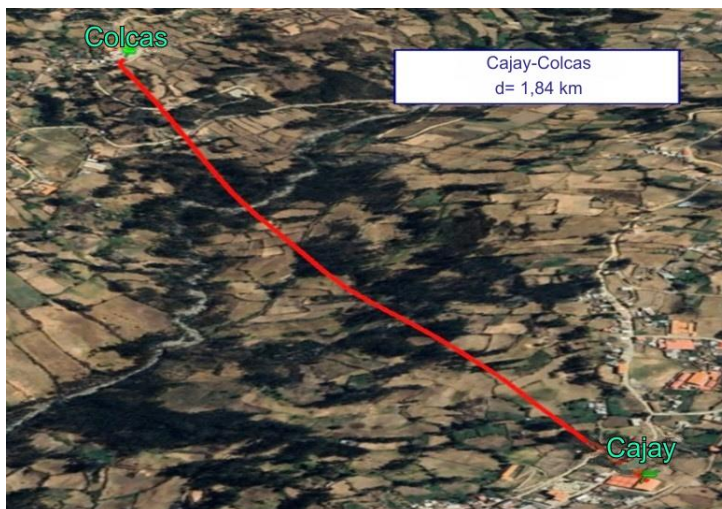
Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.8.2. Enlace óptico Cajay-Colcas

La figura 25 ilustra el levantamiento de la ruta del enlace óptico Cajay-Colcas, elaborado con el software Google Earth Pro.

Figura 25

Levantamiento de la ruta del enlace óptico Cajay-Colcas



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.8.3. Enlace óptico Colcas-Cayas

La figura 26 ilustra el levantamiento de la ruta del enlace óptico Colcas-Cayas, elaborado con el software Google Earth Pro.

Figura 26

Levantamiento de la ruta del enlace óptico Colcas-Cayas



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.8.4. Enlace óptico Cayas-Huamantanga

La figura 27 ilustra el levantamiento de la ruta del enlace óptico Cayas-Huamantanga, elaborado con el software Google Earth Pro.

Figura 27

Levantamiento de la ruta del enlace óptico Cayas-Huamantanga



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.8.5. Enlace óptico Huari-Chinchas

La figura 28 ilustra el levantamiento de la ruta del enlace óptico Huari-Chinchas, elaborado con el software Google Earth Pro.

Figura 28

Levantamiento de la ruta del enlace óptico Huari-Chinchas



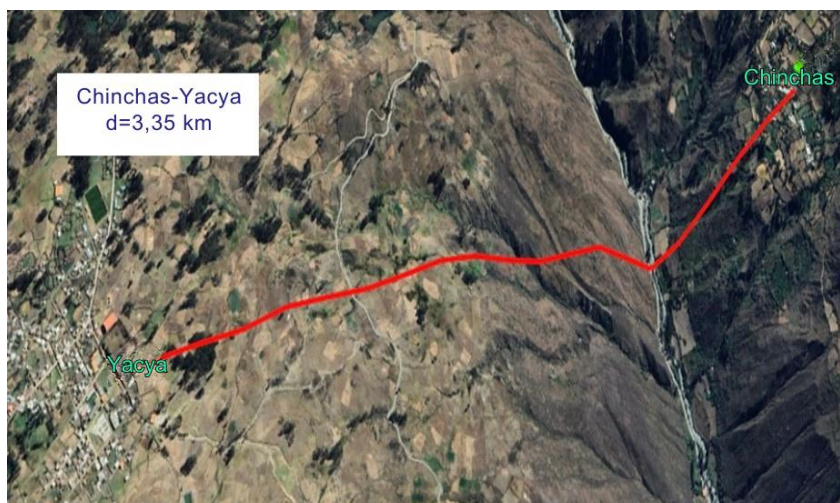
Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.8.6. Enlace óptico Chinchas-Yacya

La figura 29 ilustra el levantamiento de la ruta del enlace óptico Chinchas-Yacya, elaborado con el software Google Earth Pro.

Figura 29

Levantamiento de la ruta del enlace óptico Chinchas-Yacya



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.8.7. Enlace óptico Yacya-Repetidor 1

La figura 30 ilustra el levantamiento de la ruta del enlace óptico Yacya-Repetidor 1, elaborado con el software Google Earth Pro.

Figura 30

Levantamiento de la ruta del enlace óptico Yacya-Repetidor 1



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.8.8. Enlace óptico Repetidor 1-Mallas

La figura 31 ilustra el levantamiento de la ruta del enlace óptico Repetidor 1-Mallas, elaborado con el software Google Earth Pro.

Figura 31

Levantamiento de la ruta del enlace óptico Repetidor 1-Mallas



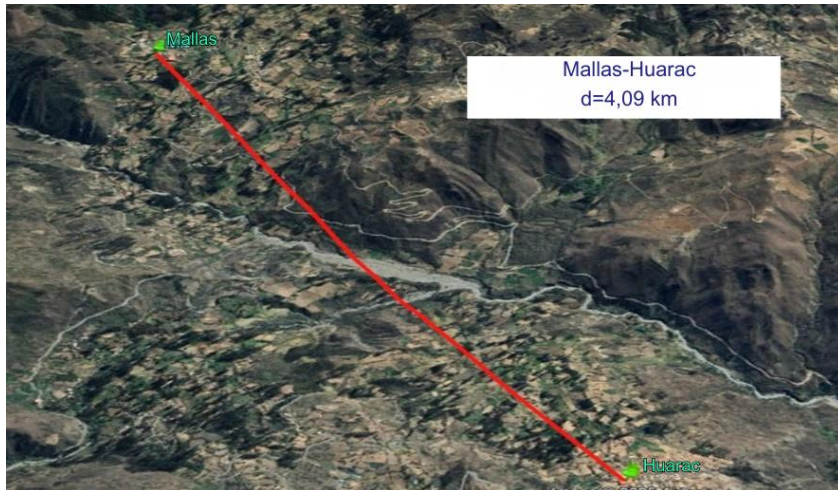
Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.8.9. Enlace óptico Mallas-Huarac

La figura 32 ilustra el levantamiento de la ruta del enlace óptico Mallas-Huarac, elaborado con el software Google Earth Pro.

Figura 32

Levantamiento de la ruta del enlace óptico Mallas-Huarac



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.2.8.10. Enlace óptico Huarac-Huántar

La figura 33 ilustra el levantamiento de la ruta del enlace óptico Huarac-Huántar, elaborado con el software Google Earth Pro.

Figura 33

Levantamiento de la ruta del enlace óptico Huarac-Huántar



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

3.3. Materiales e instrumentos

En el presente trabajo de tesis se emplearon los siguientes materiales e instrumentos de medición en el estudio de gabinete y de campo:

- a. Un posicionador satelital (GPS)
- b. Una laptop para las pruebas de gabinete
- c. La hoja de cálculo Excel para determinar los parámetros de los enlaces ópticos FSO
- d. El software Google Earth Pro para el levantamiento del perfil topográfico de cada enlace óptico.
- e. Reportes de la estación meteorológica del Senamhi en la región Ancash, provincia de Huari.
- f. Reportes estadísticos del Instituto Nacional de Estadística e Informática de población, vivienda e infraestructura de telecomunicaciones de la provincia de Huari.
- g. Reportes meteorológicos de pronósticos del clima por mes de la provincia de Huari.
- h. Recomendación UIT-R P.1817-1: Proporciona los datos de propagación necesarios para el diseño de enlaces ópticos terrestres FSO en el espacio libre.
- i. Recomendación UIT-R F.2106: Aplicaciones del servicio fijo que utilizan enlaces ópticos en el espacio libre.

3.4. Población y muestra de estudio

La muestra de estudio consistió en una red de acceso de banda ancha, conformada por enlaces ópticos FSO, que cubran las localidades rurales alrededor de la ciudad de Huari de la provincia de Huari, región Ancash.

3.5. Operacionalización de variables

Por tratarse de una investigación aplicada o tecnológica, en la operacionalización de las variables, se utilizó el concepto de variable de estudio.

La Tabla15 muestra la operacionalización de la variable de estudio del trabajo de tesis desarrollado.

Tabla 15*Operacionalización de variables de investigación*

Variable de estudio	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Escala	Técnicas o métodos
Diseño de una red de acceso de banda ancha que mejore los servicios de telecomunicaciones en las zonas rurales de la provincia de Huari, región Ancash, en el año 2024.	Es una red de acceso de banda ancha, compuesta por enlaces ópticos que cubran las localidades rurales alrededor de la ciudad de Huari, región Ancash, en el año 2024.	Pérdidas geométricas	Divergencia del haz	radianes	Empleo de la Recomendación UIT-R P.1817-1
			Superficie de captura	m ²	
			Longitud del enlace óptico	m	
		Pérdidas atmosféricas	Pérdidas por lluvia	dB	Empleo de la Recomendación UIT-R F.2106
			Pérdidas por niebla	dB	
			Pérdidas por nieve	dB	

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. Visibilidad directa de cada enlace óptico FSO propuesto

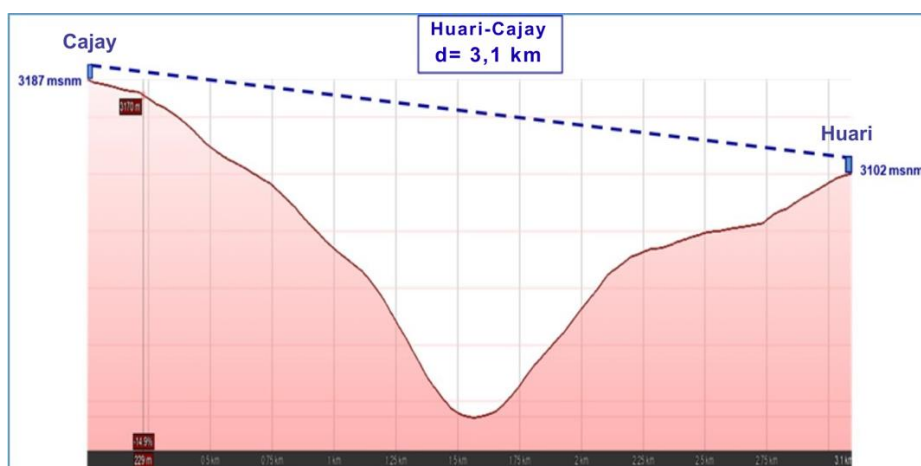
Para la verificación de la visibilidad directa de cada enlace óptico, se realizó el levantamiento del perfil topográfico mediante el software Google Earth Pro.

4.1.1. Enlace óptico Huari-Cajay

La figura 34 ilustra el levantamiento del perfil topográfico del enlace óptico Huari-Cajay.

Figura 34

Perfil topográfico del enlace óptico Huari-Cajay



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

Las características de propagación del enlace óptico Huari-Cajay se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16

Características de propagación del enlace óptico Huari-Cajay

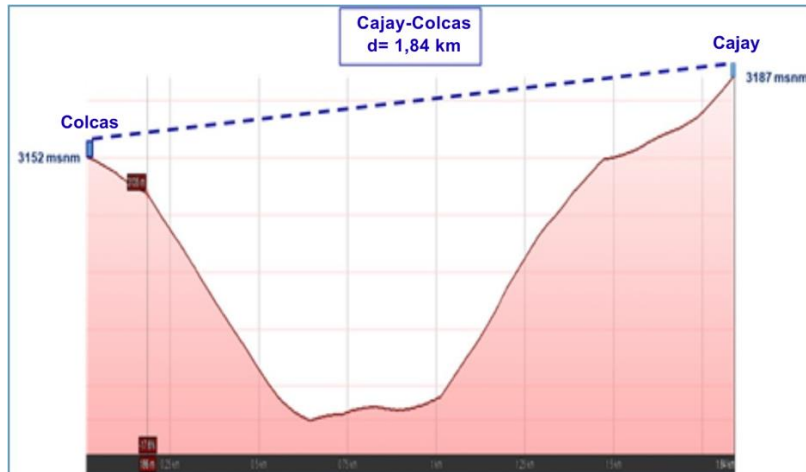
Parámetros	Distrito de Huari	CPM Cajay
Altitud	3102 msnm	3187 msnm
Altura de antena	4 m	4 m
Longitud del enlace óptico	d= 3,1 km	
Modo de propagación	Troposférica con visibilidad directa	

4.1.2. Enlace óptico Cajay-Colcas

La figura 35 ilustra el levantamiento del perfil topográfico del enlace óptico Cajay-Colcas.

Figura 35

Perfil topográfico del enlace óptico Cajay-Colcas



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

Las características de propagación del enlace óptico Cajay-Colcas se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17

Características de propagación del enlace óptico Cajay-Colcas

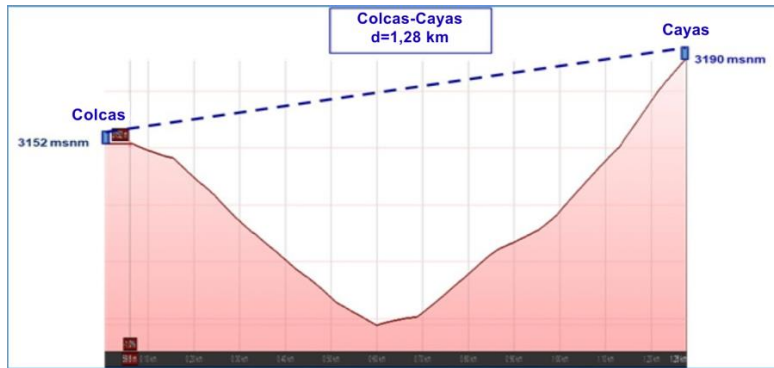
Parámetros	CPM Cajay	CPM Colcas
Altitud	3187 msnm	3152 msnm
Altura de antena	4 m	4 m
Longitud del enlace óptico	d= 1,84 km	
Modo de propagación	Troposférica con visibilidad directa	

4.1.3. Enlace óptico Colcas-Cayas

La figura 36 ilustra el levantamiento del perfil topográfico del enlace óptico Colcas-Cayas.

Figura 36

Perfil topográfico del enlace óptico Colcas-Cayas



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

Las características de propagación del enlace óptico Colcas-Cayas se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18

Características de propagación del enlace óptico Colcas-Cayas

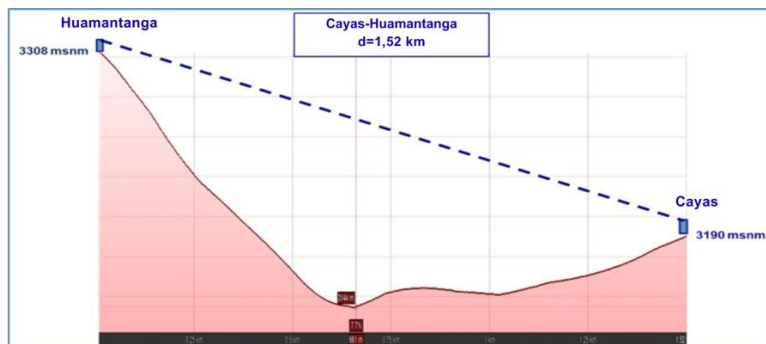
Parámetros	CPM Colcas	CPM Cayas
Altitud	3152 msnm	3190 msnm
Altura de antena	4 m	4 m
Longitud del enlace óptico	d= 1,28 km	
Modo de propagación	Troposférica con visibilidad directa	

4.1.4. Enlace óptico Cayas-Huamantanga

La figura 37 ilustra el levantamiento del perfil topográfico del enlace óptico Cayas-Huamantanga.

Figura 37

Perfil topográfico del enlace óptico Cayas-Huamantanga



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

Las características de propagación del enlace óptico Cayas-Huamantanga se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19

Características de propagación del enlace óptico Cayas-Huamantanga

Parámetros	CPM Cayas	CPM Huamantanga
Altitud	3190 msnm	3308 msnm
Altura de antena	4 m	4 m
Longitud del enlace óptico	d=1,52 km	
Modo de propagación	Troposférica con visibilidad directa	

4.1.5. Enlace óptico Huari-Chinchas

La figura 38 ilustra el levantamiento del perfil topográfico del enlace óptico Huari-Chinchas.

Figura 38

Perfil topográfico del enlace óptico Huari-Chinchas



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

Las características de propagación del enlace óptico Huari-Chinchas se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20

Características de propagación del enlace óptico Huari-Chinchas

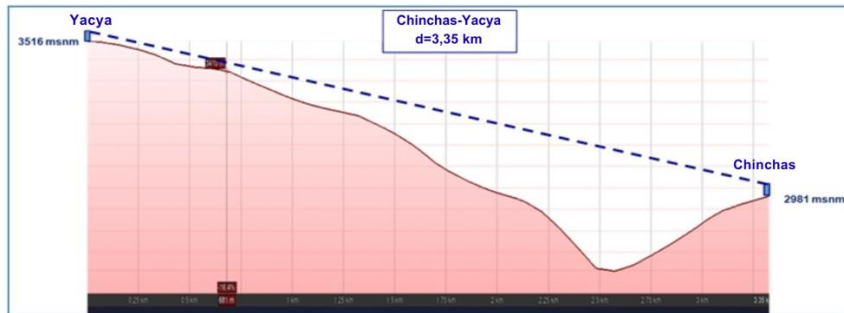
Parámetros	CPM Huari	CPM Chinchas
Altitud	3102 msnm	2981 msnm
Altura de antena	6 m	6 m
Longitud del enlace óptico	d= 4,17 km	
Modo de propagación	Troposférica con visibilidad directa	

4.1.6. Enlace óptico Chinchas-Yacya

La figura 39 ilustra el levantamiento del perfil topográfico del enlace óptico Chinchas-Yacya.

Figura 39

Perfil topográfico del enlace óptico Chinchas-Yacya



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

Las características de propagación del enlace óptico Chinchas-Yacya se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21

Características de propagación del enlace óptico Chinchas-Yacya

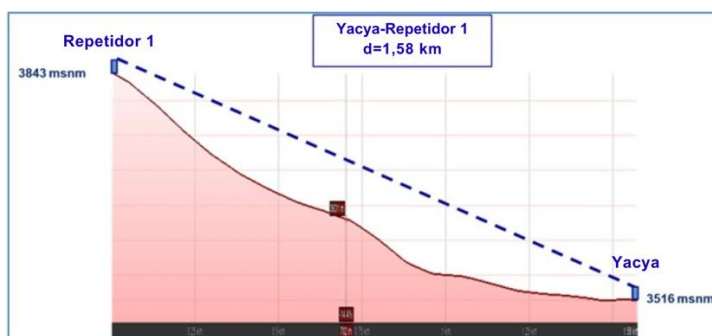
Parámetros	CPM Chinchas	CPM Yacya
Altitud	2981 msnm	3516 msnm
Altura de antena	4 m	4 m
Longitud del enlace óptico	d= 3,35 km	
Modo de propagación	Troposférica con visibilidad directa	

4.1.7. Enlace óptico Yacya-Repetidor 1

La figura 40 ilustra el levantamiento del perfil del enlace óptico Yacya-Repetidor 1.

Figura 40

Perfil topográfico del enlace óptico Yacya-Repetidor 1



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

Las características de propagación del enlace óptico Yacya-Repetidor 1 se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22

Características de propagación del enlace óptico Yacya-Repetidor 1

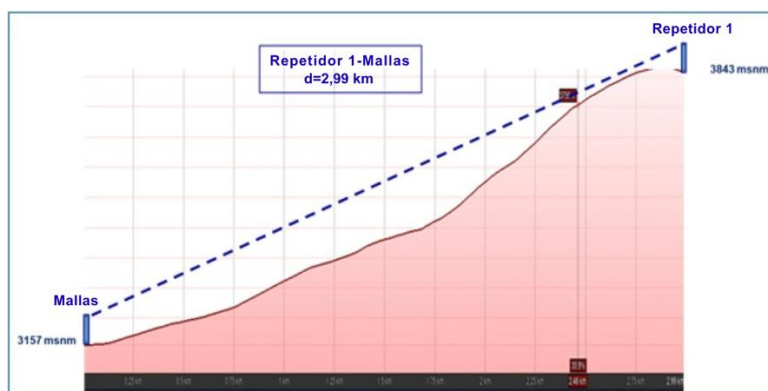
Parámetros	CPM Yacya	CPM Repetidor 1
Altitud	3516 msnm	3843 msnm
Altura de antena	4 m	4 m
Longitud del enlace óptico	d= 1,58 km	
Modo de propagación	Troposférica con visibilidad directa	

4.1.8. Enlace óptico Repetidora 1-Mallas

La figura 41 ilustra el levantamiento del perfil topográfico del enlace óptico Repetidor 1-Mallas.

Figura 41

Perfil topográfico del enlace óptico Repetidor 1-Mallas



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

Las características de propagación del enlace óptico Repetidor 1-Mallas se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23

Características de propagación del enlace óptico Repetidor 1-Mallas

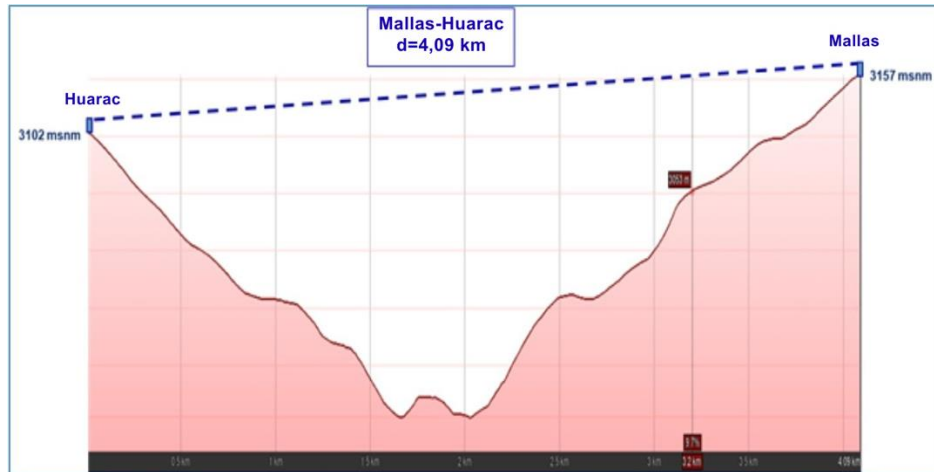
Parámetros	Repetidor 1	CPM Mallas
Altitud	3843 msnm	3157 msnm
Altura de antena	6 m	6 m
Longitud del enlace óptico	d= 2,99 km	
Modo de propagación	Troposférica con visibilidad directa	

4.1.9. Enlace óptico Mallas-Huarac

La figura 42 ilustra el levantamiento del perfil topográfico del enlace óptico Mallas-Huarac.

Figura 42

Perfil topográfico del enlace óptico Mallas-Huarac



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

Las características de propagación del enlace óptico Mallas-Huarac se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24

Características de propagación del enlace óptico Mallas-Huarac

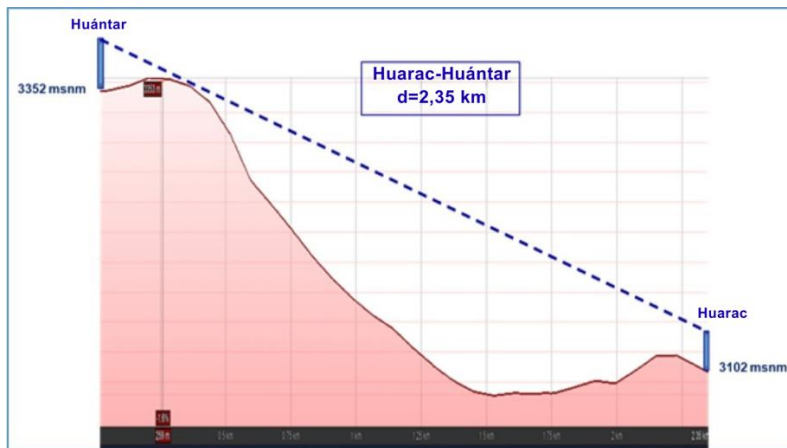
Parámetros	CPM Mallas	CPM Huarac
Altitud	3157 msnm	3102 msnm
Altura de antena	4 m	4 m
Longitud del enlace óptico	d= 4,09 km	
Modo de propagación	Troposférica con visibilidad directa	

4.1.10. Enlace óptico Huarac-Huántar

La figura 43 ilustra el levantamiento del perfil topográfico del enlace óptico Huarac-Huántar.

Figura 43

Perfil topográfico del enlace óptico Huarac-Huántar



Nota. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

Las características de propagación del enlace óptico Huarac-Huántar se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25

Características de propagación del enlace óptico Huarac-Huántar

Parámetros	CPM Huarac	CPM Huántar
Altitud	3102 msnm	3352 msnm
Altura de antena	6 m	9 m
Longitud del enlace óptico	d= 2,35 km	
Modo de propagación	Troposférica con visibilidad directa	

4.2. Diseño de los enlaces ópticos FSO

4.2.1. Determinación de parámetros para el margen del enlace óptico

a. Potencia de transmisión óptica y sensibilidad de recepción

Del fabricante FSONA de la serie Sonabeam 1250-M, se tienen los datos:

$$P_e = 28 \text{ dBm}$$

$$S_r = -33 \text{ dBm para } 662 \text{ Mbps}$$

b. Longitud del enlace óptico FSO (d)

La Tabla 26 presenta los valores de las longitudes de los enlaces ópticos desplegados en la red óptica FSO propuesta para las localidades de la provincia de Huari.

Tabla 26*Longitud de los enlaces FSO para localidades de la provincia de Huari*

Enlace óptico FSO	Longitud del enlace (km)
Huari-Cajay	3,1
Cajay-Colcas	1,84
Colcas-Cayas	1,28
Cayas-Huamantanga	1,52
Huari-Chinchas	4,17
Chinchas-Yacya	3,35
Yacya-Repetidor 1	1,58
Repetidor 1-Mallas	2,99
Mallas-Huarac	4,09
Huarac-Huantar	2,35

c. Banda óptica de operación

En concordancia de la propuesta de la red óptica FSO, se seleccionó la banda óptica que opera a la longitud de onda $\lambda = 1550 \text{ nm}$, banda que permite trabajar con niveles de potencia de transmisión óptica altos, necesarios para los enlaces ópticos de mayor longitud.

d. Divergencia del haz, diámetro de apertura y superficie de captura

De las especificaciones técnicas brindadas por el fabricante FSONA para su modelo Sonabeam 1250-M, se obtuvieron los siguientes datos:

Para una longitud de onda de operación $\lambda = 1550 \text{ nm}$ se obtuvo del fabricante:

Θ : divergencia del haz

$\Theta = 3 \text{ milirad}$ (0,003 radianes).

D: Diámetro de apertura

D= 20 cm.

S_{captura} : superficie de captura

$S_{\text{captura}} = \pi D^2/4$

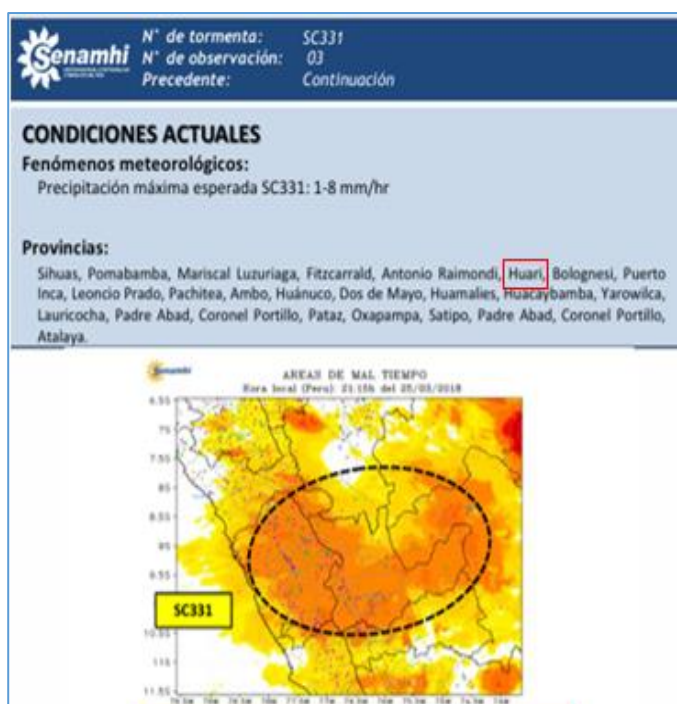
$S_{captura} = 0,031 \text{ m}^2$

e. Intensidad de Lluvia (mm/h)

Según Senamhi (2018), los reportes emitidos por la estación meteorológica Huari de los niveles de intensidad de lluvias durante todo el año, indicaron que estos tuvieron una variación de 1 a 8 mm/h, tal como se aprecia en la figura 44.

Figura 44

Precipitaciones máximas en la provincia de Huari



Nota. Adaptada de Senamhi (2018) en el sitio web <https://www.senamhi.gob.pe/site/descarga-datos/>.

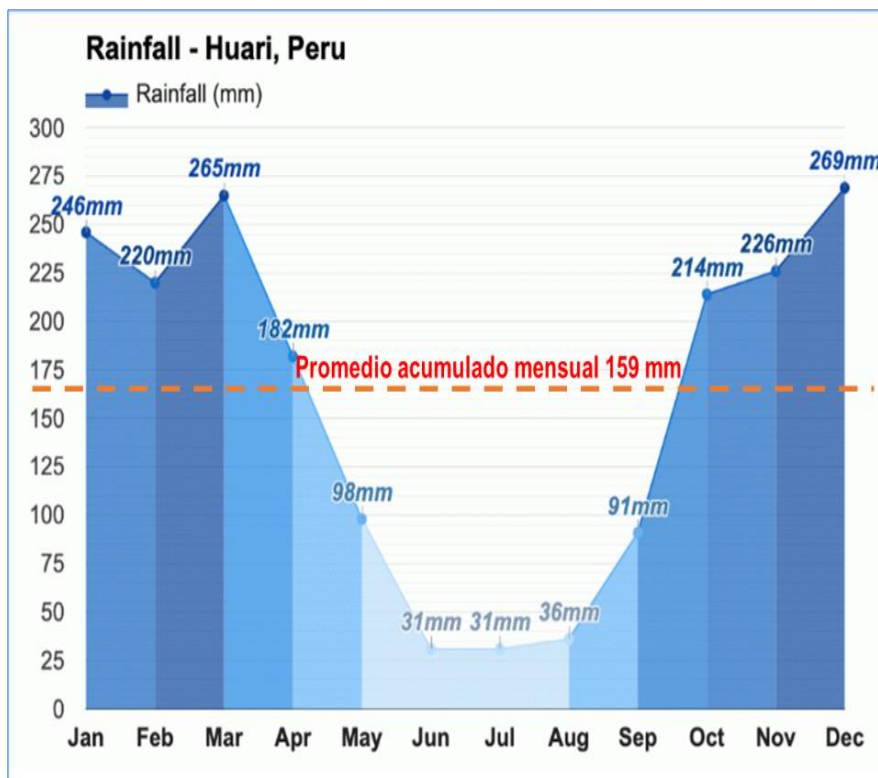
DOC: Descarga de datos meteorológicos.

Según el Portal Web meteorológico Weather Atlas (2024), se obtuvo una precipitación de lluvia acumulada anual de 1909 mm, siendo la precipitación acumulada promedio mensual de 159 mm, representando una **intensidad de lluvia promedio R= 6,63 mm/h**.

La figura 45 muestra la variación mes a mes de las precipitaciones durante todo el año.

Figura 45

Promedio mensual de precipitación en Huari



Nota. Tomada del portal web meteorológico Weather (2025) en <https://www.weather-atlas.com/en/peru/huari-climate>.

f. Visibilidad del enlace (V)

Según los reportes meteorológicos del Senamhi (2018), en la región quechua que comprende la provincia de Huari se presenta neblina ligera en las primeras horas de los meses de lluvia (diciembre a marzo).

Teniendo en cuenta que la dispersión atmosférica es el factor principal que provoca las pérdidas de visibilidad por presencia de niebla, se utilizaron los códigos internacionales de visibilidad basados en las condiciones climáticas y las lluvias, para calcular el valor de la visibilidad en el área estudiada.

Se empleó el diagrama que relaciona los códigos internacionales de visibilidad en función de la intensidad de lluvia.

Para nuestra zona de estudio, con un valor promedio de **6,63 mm/h de precipitación de lluvia**, se pudo estimar la visibilidad en la zona de estudio obteniéndose **V=4,5 km**, ver figura 46.

Figura 46

Códigos internacionales de visibilidad en función de la intensidad de lluvia

Condiciones climáticas	Precipitación		Visibilidad	Pérdida (dB/km)
	mm/hr			
Niebla densa			0 m	
			50 m	- 315,0
Niebla espesa			200 m	- 75,3
Niebla moderada			500 m	- 28,9
Niebla ligera	Aguacero	100	770 m	- 18,3
			1 km	- 13,8
Neblina ténue	Lluvia dura	25	1,9 km	- 6,9
			2 km	- 6,6
Neblina	Lluvia moderada	12,5	2,8 km	- 4,6
			4 km	- 3,1
			4,5 km	
Neblina ligera	Lluvia ligera	2,5	5,9 km	- 2,0
			10 km	- 1,1
Cielo despejado	Llovizna	0,25	18,1 km	- 0,6
			20 km	- 0,54

Nota. Adaptada de Caizaluisa (2008) en el sitio web <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4232>. DOC: "Diseño de una red con tecnología láser free space optics (FSO), para el campus de la Escuela Politécnica Nacional".

g. Pérdidas del sistema (L_{sistema})

Atenuación por equipos FSO

Para el equipo FSONA Sonabeam 1250 -M en valor que indica el fabricante es 0,7 dB.

Atenuación equipo = 0,7 dB

Atenuación por conectores

En cada enlace FSO hay un conector en cada extremo. Cada conector ocasiona una pérdida de 0,5 dB.

Atenuación conectores= 1 dB

Atenuación por la fibra óptica

Estas pérdidas se consideran despreciables para los enlaces FSO en nuestra zona de estudio, dado que los tramos de fibra óptica para la conexión de los equipos FSO y los dispositivos de interconexión son muy cortos.

Atenuación por FO = 0 dB

Atenuación por desalineamiento

El margen de pérdida en la recepción de la señal conocida como como pérdida por desalineamiento, es estimado en 1 dB.

Atenuación por desalineamiento= 1 dB

Pérdidas del sistema

La expresión matemática 9, mostrada en la ecuación 11, permite calcular las pérdidas en el sistema:

$$L_{\text{sistema}} = \text{Atenuación}_{\text{equipo}} + \text{Atenuación}_{\text{conectores}} + \text{Atenuación}_{\text{por FO}} + \text{Atenuación}_{\text{por desalineamiento}} \quad (11)$$

L sistema = 2,7 dB.

4.2.2. Cálculo del margen del enlace

La expresión matemática 10, expuesta en la ecuación 12, permite calcular el margen del enlace (link margin) para cada enlace óptico de la red FSO propuesta:

$$M_{\text{link}} = P_e - |S_r| - \text{Att}_{\text{geométrica}} - \text{Att}_{\text{niebla}} - \text{Att}_{\text{lluvia}} - L_{\text{sistema}} \quad (12)$$

4.2.2.1. Enlace FSO 1: Huari-Cajay

a. Atenuación geométrica

Para el cálculo de la atenuación geométrica se utilizó la expresión matemática 1:

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = S_d / S_{\text{captura}}$$

Donde:

$$S_{\text{captura}} = 0,0314 \text{ m}^2$$

S_d: Divergencia del haz (m²)

Cálculo de la divergencia del haz

$$S_d = \pi * (d * \Theta)^2 / 4$$

$$\Theta = 3 \text{ milirad (0,003 rad)}$$

$$d = 3,1 \text{ km} = 3100 \text{ m}$$

$$S_d = \pi * (3100 * 0,003)^2 / 4$$

$$S_d = 67,93 \text{ m}^2$$

Cálculo de la atenuación geométrica

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = S_d / S_{\text{captura}} = 67,93 / 0,0314$$

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = 2163,35$$

Para el cálculo de la atenuación geométrica en unidades logarítmicas se utilizó la expresión matemática 2:

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} (\text{dB}) = 10 * \log (2163,35)$$

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} (\text{dB}) = 33,35 \text{ dB}$$

b. Atenuación por niebla

Como: $V = 4,5 \text{ km}$, entonces en base a la ley de Kruse se seleccionó la expresión para calcular "q":

$$q = 0,16 * (V) + 0,34 \quad \text{para} \quad 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$$

$$q = (0,16 * V + 0,34) = (0,16 * 4,5 + 0,34)$$

$$q = 1,06$$

Cálculo de la atenuación por niebla

Para el cálculo del coeficiente por atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 7:

$$\lambda = 1550 \text{ nm}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = (13/V) * (\lambda/550)^{-q} = (13/4,5) * (1550/550)^{-1,06}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = 0,963 \text{ dB/km}$$

Para el cálculo de la atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 8:

Para $d = 3,1 \text{ km}$, la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 0,963 * 3,1$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 2,99 \text{ dB}$$

c. Atenuación por lluvia

Para el cálculo del coeficiente de lluvia α_{rain} se utilizó la expresión matemática 5:

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * (R)^{0,67}$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 6,63 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * (6,63)^{0,67}$$

$$\alpha_{\text{rain}} = 3,821 \text{ dB/km}$$

Cálculo de la atenuación por lluvia

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se utilizó la expresión matemática 6:

Para $d = 3,1 \text{ km}$, la atenuación por lluvia es:

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} * d(\text{km}) = 3,821 * 3,1$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 11,85 \text{ dB}$$

d. Margen del enlace (Mlink)

Para el cálculo del margen del enlace se utilizó la expresión matemática 10:

$$P_e: 28 \text{ dBm}$$

$$S_r: -33 \text{ dBm}$$

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = 33,35 \text{ dB}$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 2,99 \text{ dB}$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 11,85 \text{ dB}$$

$$L_{\text{sistema}} = 2,7 \text{ dB}$$

$$M_{\text{link}} = 28 \text{ dBm} - (-33 \text{ dBm}) - 33,35 \text{ dB} - 2,99 \text{ dB} - 11,85 \text{ dB} - 2,7 \text{ dB}$$

$$M_{\text{link}} = 10,116 \text{ dB}$$

4.2.2.2. Enlace FSO 2: Cajay-Colcas

a. Atenuación geométrica

Para el cálculo de la atenuación geométrica se utilizó la expresión matemática 1:

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = S_d / S_{\text{captura}}$$

Donde:

$$S_{\text{captura}} = 0,0314 \text{ m}^2$$

S_d : Divergencia del haz (m^2)

Cálculo de la divergencia del haz

$$S_d = \pi * (d * \Theta)^2 / 4$$

$$\Theta = 3 \text{ milirad} (0,003 \text{ rad})$$

$$d = 1,84 \text{ km} = 1840 \text{ m}$$

$$S_d = \pi * (1840 * 0,003)^2 / 4$$

$$S_d = 23,93 \text{ m}^2$$

Cálculo de la atenuación geométrica

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = S_d / S_{\text{captura}} = 23,93 / 0,0314$$

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = 762,15$$

Para el cálculo de la atenuación geométrica en unidades logarítmicas se utilizó la expresión matemática 2:

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} (\text{dB}) = 10 * \log (762,15)$$

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} (\text{dB}) = \mathbf{28,82 \text{ dB}}$$

b. Atenuación por niebla

Como: $V = 4,5 \text{ km}$, entonces en base a la ley de Kruse se seleccionó la expresión para calcular "q":

$$\mathbf{q = 0,16 * (V) + 0,34 \quad \text{para} \quad 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}}$$

$$q = (0,16 * V + 0,34) = (0,16 * 4,5 + 0,34)$$

$$\mathbf{q = 1,06}$$

Cálculo de la atenuación por niebla

Para el cálculo del coeficiente por atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 7:

$$\lambda = 1550 \text{ nm}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = (13/V) * (\lambda/550)^{-q} = (13/4,5) * (1550/550)^{-1,06}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = \mathbf{0.963 \text{ dB/km}}$$

Para el cálculo de la atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 8:

Para $d = 1,84 \text{ km}$, la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 0,963 * 1,84$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \mathbf{1,77 \text{ dB}}$$

c. Atenuación por lluvia

Para el cálculo del coeficiente de lluvia α_{rain} se utilizó la expresión matemática 5:

$$\alpha_{\text{rain}} = \mathbf{1,076 * (R)^{0,67}}$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = $6,63 \text{ mm/h}$

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * (6,63)^{0,67}$$

$$\alpha_{\text{rain}} = 3,821 \text{ dB/km}$$

Cálculo de la atenuación por lluvia

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se utilizó la expresión matemática 6:

Para $d = 1,84$ km, la atenuación por lluvia es:

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} * d(\text{km}) = 3,21 * 1,84$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 7,03 \text{ dB}$$

d. Margen del enlace (Mlink)

Para el cálculo del margen del enlace se utilizó la expresión matemática 10:

$$P_e: 28 \text{ dBm}$$

$$S_r: -33 \text{ dBm}$$

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = 28,82 \text{ dB}$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 1,77 \text{ dB}$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 7,03 \text{ dB}$$

$$L_{\text{sistema}} = 2,7 \text{ dB}$$

$$M_{\text{link}} = 28 \text{ dBm} - (-33 \text{ dBm}) - 28,82 \text{ dB} - 1,77 \text{ Db} - 7,03 \text{ dB} - 2,7 \text{ dB}$$

$$M_{\text{link}} = 20,676 \text{ dB}$$

4.2.2.3. Enlace FSO 3: Colcas-Cayas

a. Atenuación geométrica

Para el cálculo de la atenuación geométrica se utilizó la expresión matemática 1:

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = S_d / S_{\text{captura}}$$

Donde:

$$S_{\text{captura}} = 0,0314 \text{ m}^2$$

S_d : Divergencia del haz (m^2)

Cálculo de la divergencia del haz

$$S_d = \pi * (d * \Theta)^2 / 4$$

$$\Theta = 3 \text{ milirad} (0,003 \text{ rad})$$

$$d = 1,28 \text{ km} = 1280 \text{ m}$$

$$S_d = \pi * (1280 * 0,003)^2 / 4$$

$$S_d = 11,58 \text{ m}^2$$

Cálculo de la atenuación geométrica

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = S_d / S_{\text{captura}} = 11,58 / 0,0314$$

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = 368,83$$

Para el cálculo de la atenuación geométrica en unidades logarítmicas se utilizó la expresión matemática 2:

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} (\text{dB}) = 10 \cdot \log(368,83)$$

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} (\text{dB}) = 25,67 \text{ dB}$$

b. Atenuación por niebla

Como: $V = 4,5$ km, entonces en base a la ley de Kruse se seleccionó la expresión para calcular "q":

$$q = 0,16 \cdot (V) + 0,34 \quad \text{para} \quad 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$$

$$q = (0,16 \cdot V + 0,34) = (0,16 \cdot 4,5 + 0,34)$$

$$q = 1,06$$

Cálculo de la atenuación por niebla

Para el cálculo del coeficiente por atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 7:

$$\lambda = 1550 \text{ nm}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = (13/V) \cdot (\lambda/550)^{-q} = (13/4,5) \cdot (1550/550)^{-1,06}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = 0,963 \text{ dB/km}$$

Para el cálculo de la atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 8:

Para $d = 1,28$ km, la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} \cdot d(\text{km}) = 0,963 \cdot 1,28$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 1,23 \text{ dB}$$

c. Atenuación por lluvia

Para el cálculo del coeficiente de lluvia α_{rain} se utilizó la expresión matemática 5:

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 \cdot (R)^{0,67}$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 6.63 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 \cdot (6,63)^{0,67}$$

$$\alpha_{\text{rain}} = 3,821 \text{ dB/km}$$

Cálculo de la atenuación por lluvia

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se utilizó la expresión matemática 6:

Para $d = 1,28$ km, la atenuación por lluvia es:

$$Att_{lluvia} = \alpha_{rain} * d(\text{km}) = 3,821 * 1,28$$

$$Att_{lluvia} = 4,89 \text{ dB}$$

d. Margen del enlace (Mlink)

Para el cálculo del margen del enlace se utilizó la expresión matemática 10:

$$P_e: 28 \text{ dBm}$$

$$S_r: -33 \text{ dBm}$$

$$Att_{geométrica} = 25,67 \text{ dB}$$

$$Att_{niebla} = 1,23 \text{ dB}$$

$$Att_{lluvia} = 4,89 \text{ dB}$$

$$L_{sistema} = 2,7 \text{ dB}$$

$$M_{link} = 28 \text{ dBm} - (-33 \text{ dBm}) - 25,67 \text{ dB} - 1,23 \text{ dB} - 4,89 \text{ dB} - 2,7 \text{ dB}$$

$$M_{link} = 26,507 \text{ dB}$$

4.2.2.4. Enlace FSO 4: Cayas-Huamantanga

a. Atenuación geométrica

Para el cálculo de la atenuación geométrica se utilizó la expresión matemática 1:

$$Att_{geométrica} = S_d / S_{captura}$$

Donde:

$$S_{captura} = 0,0314 \text{ m}^2$$

S_d : Divergencia del haz (m^2)

Cálculo de la divergencia del haz

$$S_d = \pi * (d * \Theta)^2 / 4$$

$$\Theta = 3 \text{ milirad} (0,003 \text{ rad})$$

$$d = 1,52 \text{ km} = 1520 \text{ m}$$

$$S_d = \pi * (1520 * 0,003)^2 / 4$$

$$S_d = 16,33 \text{ m}^2$$

Cálculo de la atenuación geométrica

$$Att_{geométrica} = S_d / S_{captura} = 16,33 / 0,0314$$

$$Att_{geométrica} = 520,10$$

Para el cálculo de la atenuación geométrica en unidades logarítmicas se utilizó la expresión matemática 2:

$$Att_{geométrica} \text{ (dB)} = 10 \cdot \log(520,10)$$

$$Att_{geométrica} \text{ (dB)} = 27,16 \text{ dB}$$

b. Atenuación por niebla

Como: $V = 4,5$ km, entonces en base a la ley de Kruse se seleccionó la expresión para calcular "q":

$$q = 0,16 \cdot (V) + 0,34 \quad \text{para} \quad 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$$

$$q = (0,16 \cdot V + 0,34) = (0,16 \cdot 4,5 + 0,34)$$

$$q = 1,06$$

Cálculo de la atenuación por niebla

Para el cálculo del coeficiente por atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 7:

$$\lambda = 1550 \text{ nm}$$

$$\alpha_{fog} = (13/V) \cdot (\lambda/550)^{-q} = (13/4,5) \cdot (1550/550)^{-1,06}$$

$$\alpha_{fog} = 0,963 \text{ dB/km}$$

Para el cálculo de la atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 8:

Para $d = 1,52$ km, la atenuación por niebla es:

$$Att_{niebla} = \alpha_{fog} \cdot d(\text{km}) = 0,963 \cdot 1,52$$

$$Att_{niebla} = 1,46 \text{ dB}$$

c. Atenuación por lluvia

Para el cálculo del coeficiente de lluvia α_{rain} se utilizó la expresión matemática 5:

$$\alpha_{rain} = 1,076 \cdot (R)^{0,67}$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 6,63 mm/h

$$\alpha_{rain} = 1,076 \cdot (6,63)^{0,67}$$

$$\alpha_{rain} = 3,821 \text{ dB/km}$$

Cálculo de la atenuación por lluvia

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se utilizó la expresión matemática 6:

Para $d = 1,52$ km, la atenuación por lluvia es:

$$Att_{lujvia} = \alpha_{rain} * d(\text{km}) = 3,821 * 1,52$$

$$Att_{lujvia} = 5,81 \text{ dB}$$

d. Margen del enlace (Mlink)

Para el cálculo del margen del enlace se utilizó la expresión matemática 10:

$$Pe: 28 \text{ dBm}$$

$$Sr: -33 \text{ dBm}$$

$$Att_{geométrica} = 27,16 \text{ dB}$$

$$Att_{niebla} = 1,46 \text{ dB}$$

$$Att_{lujvia} = 5,81 \text{ dB}$$

$$L_{sistema} = 2,7 \text{ dB}$$

$$Mlink = 28 \text{ dBm} - (-33 \text{ dBm}) - 27,16 \text{ dB} - 1,46 \text{ dB} - 5,81 \text{ dB} - 2,7 \text{ dB}$$

$$Mlink = 23,866 \text{ dB}$$

4.2.2.5. Enlace FSO 5: Huari-Chinchas

a. Atenuación geométrica

Para el cálculo de la atenuación geométrica se utilizó la expresión matemática

1:

$$Att_{geométrica} = S_d / S_{captura}$$

Donde:

$$S_{captura} = 0,0314 \text{ m}^2$$

S_d: Divergencia del haz (m²)

Cálculo de la divergencia del haz

$$S_d = \pi * (d * \Theta)^2 / 4$$

$$\Theta = 3 \text{ milirad (0,003 rad)}$$

$$d = 4,17 \text{ km} = 4170 \text{ m}$$

$$S_d = \pi * (4170 * 0,003)^2 / 4$$

$$S_d = 122,91 \text{ m}^2$$

Cálculo de la atenuación geométrica

$$Att_{geométrica} = S_d / S_{captura} = 122,91 / 0,0314$$

$$Att_{geométrica} = 3914,49$$

Para el cálculo de la atenuación geométrica en unidades logarítmicas se utilizó la expresión matemática 2:

$$Att_{geométrica} (\text{dB}) = 10 * \log (3914,49)$$

Attgeométrica (dB)= 35,93 dB

b. Atenuación por niebla

Como: $V = 4,5$ km, entonces en base a la ley de Kruse se seleccionó la expresión para calcular "q":

$$q = 0,16 * (V) + 0,34 \quad \text{para} \quad 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$$

$$q = (0,16 * V + 0,34) = (0,16 * 4,5 + 0,34)$$

$$q = 1,06$$

Cálculo de la atenuación por niebla

Para el cálculo del coeficiente por atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 7:

$$\lambda = 1550 \text{ nm}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = (13/V) * (\lambda/550)^{-q} = (13/4,5) * (1550/550)^{-1,06}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = 0,963 \text{ dB/km}$$

Para el cálculo de la atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 8:

Para $d = 4,17$ km, la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 0,963 * 4,17$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 4,02 \text{ dB}$$

c. Atenuación por lluvia

Para el cálculo del coeficiente de lluvia α_{rain} se utilizó la expresión matemática 5:

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * (R)^{0,67}$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 6,63 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * (6,63)^{0,67}$$

$$\alpha_{\text{rain}} = 3,821 \text{ dB/km}$$

Cálculo de la atenuación por lluvia

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se utilizó la expresión matemática 6:

Para $d = 4,17$ km, la atenuación por lluvia es:

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} * d(\text{km}) = 3,821 * 4,17$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 15,94 \text{ dB}$$

d. Margen del enlace (Mlink)

Para el cálculo del margen del enlace se utilizó la expresión matemática 10:

Pe: 28 dBm

Sr: -33 dBm

Attgeométrica= 35,93 dB

Attniebla= 4,02 dB

Attlluvia= 15,94 dB

Lsistema= 2,7 dB

Mlink = 28 dBm – (-33 dBm) – 35,93 dB – 4,02 dB – 15,94 dB – 2,7 dB

Mlink = 2,421 dB

4.2.2.6. Enlace FSO 6: Chinchas-Yacya

a. Atenuación geométrica

Para el cálculo de la atenuación geométrica se utilizó la expresión matemática

1:

Attgeométrica = Sd /Scaptura

Donde:

Scaptura = 0,0314 m²

Sd: Divergencia del haz (m²)

Cálculo de la divergencia del haz

$Sd = \pi * (d * \Theta)^2 / 4$

$\Theta = 3 \text{ milirad} (0,003 \text{ rad})$

$d = 3,35 \text{ km} = 3350 \text{ m}$

$Sd = \pi * (3350 * 0,003)^2 / 4$

$Sd = 79,33 \text{ m}^2$

Cálculo de la atenuación geométrica

Attgeométrica = Sd/Scaptura = 79,33/0,0314

Attgeométrica = 2526,34

Para el cálculo de la atenuación geométrica en unidades logarítmicas se utilizó la expresión matemática 2:

Attgeométrica (dB)= 10*log (2526,34)

Attgeométrica (dB)= 34,02 dB

b. Atenuación por niebla

Como: $V = 4,5$ km, entonces en base a la ley de Kruse se seleccionó la expresión para calcular "q":

$$q = 0,16 \cdot (V) + 0,34 \quad \text{para} \quad 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$$

$$q = (0,16 \cdot V + 0,34) = (0,16 \cdot 4,5 + 0,34)$$

$$q = 1,06$$

Cálculo de la atenuación por niebla

Para el cálculo del coeficiente por atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 7:

$$\lambda = 1550 \text{ nm}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = (13/V) \cdot (\lambda/550)^{-q} = (13/4,5) \cdot (1550/550)^{-1,06}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = 0,963 \text{ dB/km}$$

Para el cálculo de la atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 8:

Para $d = 3,35$ km, la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} \cdot d(\text{km}) = 0,963 \cdot 3,35$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 3,23 \text{ dB}$$

c. Atenuación por lluvia

Para el cálculo del coeficiente de lluvia α_{rain} se utilizó la expresión matemática 5:

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 \cdot (R)^{0,67}$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 6.63 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 \cdot (6,63)^{0,67}$$

$$\alpha_{\text{rain}} = 3,821 \text{ dB/km}$$

Cálculo de la atenuación por lluvia

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se utilizó la expresión matemática 6:

Para $d = 3,35$ km, la atenuación por lluvia es:

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} \cdot d(\text{km}) = 3,821 \cdot 3,35$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 12,80 \text{ dB}$$

d. Margen del enlace (Mlink)

Para el cálculo del margen del enlace se utilizó la expresión matemática 10:

$$P_e: 28 \text{ dBm}$$

$$S_r: -33 \text{ dBm}$$

$$A_{t\text{geométrica}} = 34,02 \text{ dB}$$

$$A_{t\text{niebla}} = 3,23 \text{ dB}$$

$$A_{t\text{luvia}} = 12,80 \text{ dB}$$

$$L_{\text{sistema}} = 2,7 \text{ dB}$$

$$M_{\text{link}} = 28 \text{ dBm} - (-33 \text{ dBm}) - 34,02 \text{ dB} - 3,23 \text{ dB} - 12,80 \text{ dB} - 2,7 \text{ dB}$$

$$M_{\text{link}} = 8,246 \text{ dB}$$

4.2.2.7. Enlace FSO 7: Yacya-Repetidor 1

a. Atenuación geométrica

Para el cálculo de la atenuación geométrica se utilizó la expresión matemática

1:

$$A_{t\text{geométrica}} = S_d / S_{\text{captura}}$$

Donde:

$$S_{\text{captura}} = 0,0314 \text{ m}^2$$

S_d : Divergencia del haz (m^2)

Cálculo de la divergencia del haz

$$S_d = \pi * (d * \Theta)^2 / 4$$

$$\Theta = 3 \text{ milirad} (0,003 \text{ rad})$$

$$d = 1,58 \text{ km} = 1580 \text{ m}$$

$$S_d = \pi * (1580 * 0,003)^2 / 4$$

$$S_d = 17,65 \text{ m}^2$$

Cálculo de la atenuación geométrica

$$A_{t\text{geométrica}} = S_d / S_{\text{captura}} = 17,65 / 0,0314$$

$$A_{t\text{geométrica}} = 561,97$$

Para el cálculo de la atenuación geométrica en unidades logarítmicas se utilizó la expresión matemática 2:

$$A_{t\text{geométrica}} (\text{dB}) = 10 * \log (561,97)$$

$$A_{t\text{geométrica}} (\text{dB}) = 27,50 \text{ dB}$$

b. Atenuación por niebla

Como: $V = 4,5$ km, entonces en base a la ley de Kruse se seleccionó la expresión para calcular "q":

$$q = 0,16 \cdot (V) + 0,34 \quad \text{para} \quad 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$$

$$q = (0,16 \cdot V + 0,34) = (0,16 \cdot 4,5 + 0,34)$$

$$q = 1,06$$

Cálculo de la atenuación por niebla

Para el cálculo del coeficiente por atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 7:

$$\lambda = 1550 \text{ nm}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = (13/V) \cdot (\lambda/550)^{-q} = (13/4,5) \cdot (1550/550)^{-1,06}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = 0,963 \text{ dB/km}$$

Para el cálculo de la atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 8:

Para $d = 1,58$ km, la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} \cdot d(\text{km}) = 0,963 \cdot 1,58$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 1,52 \text{ dB}$$

c. Atenuación por lluvia

Para el cálculo del coeficiente de lluvia α_{rain} se utilizó la expresión matemática 5:

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 \cdot (R)^{0,67}$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 6,63 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 \cdot (6,63)^{0,67}$$

$$\alpha_{\text{rain}} = 3,821 \text{ dB/km}$$

Cálculo de la atenuación por lluvia

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se utilizó la expresión matemática 6:

Para $d = 1,58$ km, la atenuación por lluvia es:

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} \cdot d(\text{km}) = 3,821 \cdot 1,58$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 6,04 \text{ dB}$$

d. Margen del enlace (Mlink)

Para el cálculo del margen del enlace se utilizó la expresión matemática 10:

$$P_e: 28 \text{ dBm}$$

$$S_r: -33 \text{ dBm}$$

$$Att_{geométrica} = 27,50 \text{ dB}$$

$$Att_{niebla} = 1,52 \text{ dB}$$

$$Att_{luvia} = 6,04 \text{ dB}$$

$$L_{sistema} = 2,7 \text{ dB}$$

$$Mlink = 28 \text{ dBm} - (-33 \text{ dBm}) - 27,50 \text{ dB} - 1,52 \text{ dB} - 6,04 \text{ dB} - 2,7 \text{ dB}$$

$$Mlink = 23,243 \text{ dB}$$

4.2.2.8. Enlace FSO 8: Repetidor 1-Mallas

a. Atenuación geométrica

Para el cálculo de la atenuación geométrica se utilizó la expresión matemática

1:

$$Att_{geométrica} = S_d / S_{captura}$$

Donde:

$$S_{captura} = 0,0314 \text{ m}^2$$

S_d : Divergencia del haz (m^2)

Cálculo de la divergencia del haz

$$S_d = \pi * (d * \Theta)^2 / 4$$

$$\Theta = 3 \text{ milirad} (0,003 \text{ rad})$$

$$d = 2,99 \text{ km} = 2990 \text{ m}$$

$$S_d = \pi * (2990 * 0,003)^2 / 4$$

$$S_d = 63,19 \text{ m}^2$$

Cálculo de la atenuación geométrica

$$Att_{geométrica} = S_d / S_{captura} = 63,19 / 0,0314$$

$$Att_{geométrica} = 2012,54$$

Para el cálculo de la atenuación geométrica en unidades logarítmicas se utilizó la expresión matemática 2:

$$Att_{geométrica} (\text{dB}) = 10 * \log (2012,54)$$

$$Att_{geométrica} (\text{dB}) = 33,04 \text{ dB}$$

b. Atenuación por niebla

Como: $V = 4,5$ km, entonces en base a la ley de Kruse se seleccionó la expresión para calcular "q":

$$q = 0,16 \cdot (V) + 0,34 \quad \text{para} \quad 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$$

$$q = (0,16 \cdot V + 0,34) = (0,16 \cdot 4,5 + 0,34)$$

$$q = 1,06$$

Cálculo de la atenuación por niebla

Para el cálculo del coeficiente por atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 7:

$$\lambda = 1550 \text{ nm}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = (13/V) \cdot (\lambda/550)^{-q} = (13/4,5) \cdot (1550/550)^{-1,06}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = 0,963 \text{ dB/km}$$

Para el cálculo de la atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 8:

Para $d = 2,99$ km, la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} \cdot d(\text{km}) = 0,963 \cdot 2,99$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 2,88 \text{ dB}$$

c. Atenuación por lluvia

Para el cálculo del coeficiente de lluvia α_{rain} se utilizó la expresión matemática 5:

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 \cdot (R)^{0,67}$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 6,63 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 \cdot (6,63)^{0,67}$$

$$\alpha_{\text{rain}} = 3,821 \text{ dB/km}$$

Cálculo de la atenuación por lluvia

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se utilizó la expresión matemática 6:

Para $d = 2,99$ km, la atenuación por lluvia es:

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} \cdot d(\text{km}) = 3,821 \cdot 2,99$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 11,43 \text{ dB}$$

d. Margen del enlace (Mlink)

Para el cálculo del margen del enlace se utilizó la expresión matemática 10:

$$P_e: 28 \text{ dBm}$$

$$S_r: -33 \text{ dBm}$$

$$A_{t\text{geométrica}} = 33,04 \text{ dB}$$

$$A_{t\text{niebla}} = 2,88 \text{ dB}$$

$$A_{t\text{lluvia}} = 11,43 \text{ dB}$$

$$L_{\text{sistema}} = 2,7 \text{ dB}$$

$$M_{\text{link}} = 28 \text{ dBm} - (-33 \text{ dBm}) - 33,04 \text{ dB} - 2,88 \text{ dB} - 11,43 \text{ dB} - 2,7 \text{ dB}$$

$$M_{\text{link}} = 10,956 \text{ dB}$$

4.2.2.9. Enlace FSO 9: Mallas-Huarac**a. Atenuación geométrica**

Para el cálculo de la atenuación geométrica se utilizó la expresión matemática

1:

$$A_{t\text{geométrica}} = S_d / S_{\text{captura}}$$

Donde:

$$S_{\text{captura}} = 0,0314 \text{ m}^2$$

S_d : Divergencia del haz (m^2)

Cálculo de la divergencia del haz

$$S_d = \pi * (d * \Theta)^2 / 4$$

$$\Theta = 3 \text{ milirad} (0,003 \text{ rad})$$

$$d = 4,09 \text{ km} = 4090 \text{ m}$$

$$S_d = \pi * (4090 * 0,003)^2 / 4$$

$$S_d = 118,24 \text{ m}^2$$

Cálculo de la atenuación geométrica

$$A_{t\text{geométrica}} = S_d / S_{\text{captura}} = 118,24 / 0,0314$$

$$A_{t\text{geométrica}} = 3765,73$$

Para el cálculo de la atenuación geométrica en unidades logarítmicas se utilizó la expresión matemática 2:

$$A_{t\text{geométrica}} (\text{dB}) = 10 * \log (3765,73)$$

$$A_{t\text{geométrica}} (\text{dB}) = 35,76 \text{ dB}$$

b. Atenuación por niebla

Como: $V = 4,5$ km, entonces en base a la ley de Kruse se seleccionó la expresión para calcular "q":

$$q = 0,16 \cdot (V) + 0,34 \quad \text{para} \quad 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$$

$$q = (0,16 \cdot V + 0,34) = (0,16 \cdot 4,5 + 0,34)$$

$$q = 1,06$$

Cálculo de la atenuación por niebla

Para el cálculo del coeficiente por atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 7:

$$\lambda = 1550 \text{ nm}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = (13/V) \cdot (\lambda/550)^{-q} = (13/4,5) \cdot (1550/550)^{-1,06}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = 0,963 \text{ dB/km}$$

Para el cálculo de la atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 8:

Para $d = 4,09$ km, la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} \cdot d(\text{km}) = 0,963 \cdot 4,09$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 3,94 \text{ dB}$$

c. Atenuación por lluvia

Para el cálculo del coeficiente de lluvia α_{rain} se utilizó la expresión matemática 5:

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 \cdot (R)^{0,67}$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 6,63 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 \cdot (6,63)^{0,67}$$

$$\alpha_{\text{rain}} = 3,821 \text{ dB/km}$$

Cálculo de la atenuación por lluvia

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se utilizó la expresión matemática 6:

Para $d = 4,09$ km, la atenuación por lluvia es:

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} \cdot d(\text{km}) = 3,821 \cdot 4,09$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 15,63 \text{ dB}$$

d. Margen del enlace (Mlink)

Para el cálculo del margen del enlace se utilizó la expresión matemática 10:

Pe: 28 dBm

Sr: -33 dBm

Attgeométrica= 35,76 dB

Att_{niebla}= 3,94 dB

Att_{luvia}= 15,63 dB

Lsistema= 2,7 dB

Mlink = 28 dBm – (-33 dBm) – 35,76 dB – 3,94 dB – 15,63 dB – 2,7 dB

Mlink = 2,972 dB

4.2.2.10. Enlace FSO 10: Huarac-Huantar

a. Atenuación geométrica

Para el cálculo de la atenuación geométrica se utilizó la expresión matemática 1:

$$\text{Attgeométrica} = S_d / S_{\text{captura}}$$

Donde:

$$S_{\text{captura}} = 0,0314 \text{ m}^2$$

S_d: Divergencia del haz (m²)

Cálculo de la divergencia del haz

$$S_d = \pi * (d * \Theta)^2 / 4$$

$$\Theta = 3 \text{ milirad (0,003 rad)}$$

$$d = 2,35 \text{ km} = 2350 \text{ m}$$

$$S_d = \pi * (2350 * 0,003)^2 / 4$$

$$S_d = 67,93 \text{ m}^2$$

Cálculo de la atenuación geométrica

$$\text{Attgeométrica} = S_d / S_{\text{captura}} = 67,93 / 0,0314$$

$$\text{Attgeométrica} = 2163,35$$

Para el cálculo de la atenuación geométrica en unidades logarítmicas se utilizó la expresión matemática 2:

$$\text{Attgeométrica (dB)} = 10 * \log (2163,35)$$

$$\text{Attgeométrica (dB)} = 33,35 \text{ dB}$$

b. Atenuación por niebla

Como: V= 4,5 km, entonces en base a la ley de Kruse se seleccionó la expresión para calcular “q”:

$$q = 0,16 * (V) + 0,34 \quad \text{para} \quad 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$$

$$q = (0,16 * V + 0,34) = (0,16 * 4,5 + 0,34)$$

$$q = 1,06$$

Cálculo de la atenuación por niebla

Para el cálculo del coeficiente por atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 7:

$$\lambda = 1550 \text{ nm}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = (13/V) * (\lambda/550)^{-q} = (13/4,5) * (1550/550)^{-1,06}$$

$$\alpha_{\text{fog}} = 0,963 \text{ dB/km}$$

Para el cálculo de la atenuación por niebla se utilizó la expresión matemática 8:

Para $d = 2,35 \text{ km}$, la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 0,963 * 2,35$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 2,99 \text{ dB}$$

c. Atenuación por lluvia

Para el cálculo del coeficiente de lluvia α_{rain} se utilizó la expresión matemática 5:

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * (R)^{0,67}$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 6,63 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * (6,63)^{0,67}$$

$$\alpha_{\text{rain}} = 3,821 \text{ dB/km}$$

Cálculo de la atenuación por lluvia

Para el cálculo de la atenuación por lluvia se utilizó la expresión matemática 6:

Para $d = 2,35 \text{ km}$, la atenuación por lluvia es:

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} * d(\text{km}) = 3,821 * 2,35$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 9,93 \text{ dB}$$

d. Margen del enlace (Mlink)

Para el cálculo del margen del enlace se utilizó la expresión matemática 10:

$$P_e: 28 \text{ dBm}$$

$$S_r: -33 \text{ dBm}$$

$$\text{Att}_{\text{geométrica}} = 33,35 \text{ dB}$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 2,99 \text{ dB}$$

$Att_{\text{luvia}} = 9,93 \text{ dB}$

$L_{\text{sistema}} = 2,7 \text{ dB}$

$M_{\text{link}} = 28 \text{ dBm} - (-33 \text{ dBm}) - 33,35 \text{ dB} - 2,99 \text{ dB} - 9,93 \text{ dB} - 2,7 \text{ dB}$

$M_{\text{link}} = 12,030 \text{ dB}$

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

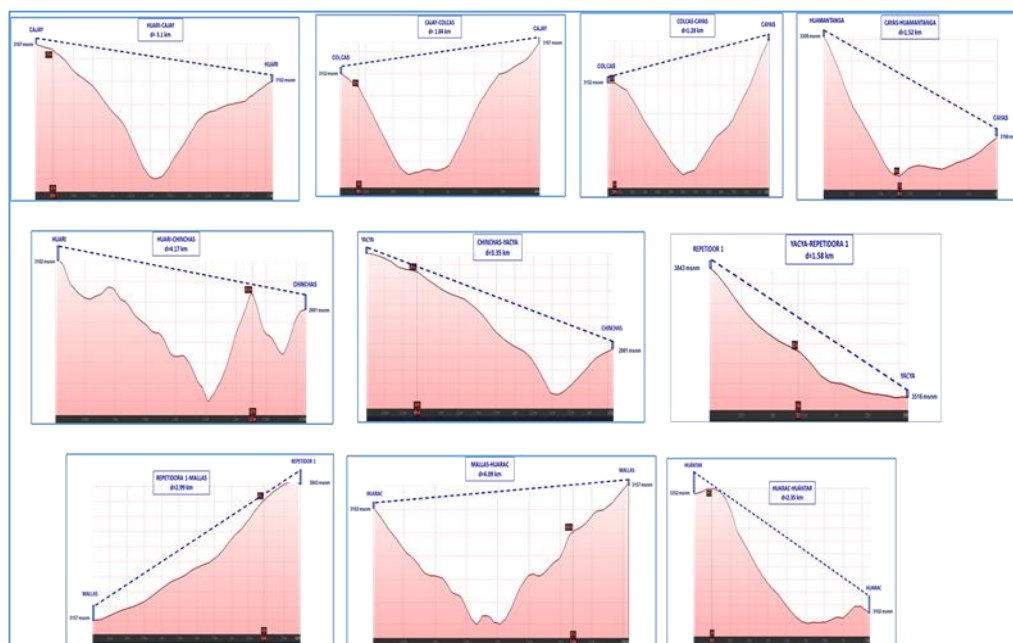
5.1. Línea de vista de los enlaces ópticos FSO

Los enlaces ópticos FSO para que puedan estar operativos requieren tener una línea de vista directa en los nodos ópticos ubicados en cada una de las localidades de la zona de estudio.

La Figura 47 muestra los perfiles topográficos de los 10 enlaces ópticos propuestos en la zona de estudio, elaborados en el estudio de gabinete empleando el software Google Earth Pro.

Figura 47

Perfiles topográficos de los 10 enlaces ópticos FSO



5.1.1. Análisis de los resultados

Se pudo verificar la existencia de visibilidad directa en cada uno de los enlaces ópticos FSO. En 8 de los 10 enlaces ópticos existía visibilidad directa de modo natural. En los enlaces ópticos Repetidora 1- Mallas y en Huarac – Huántar se requirió postera de 6 m a fin de asegurar la visibilidad directa de dichos enlaces FSO.

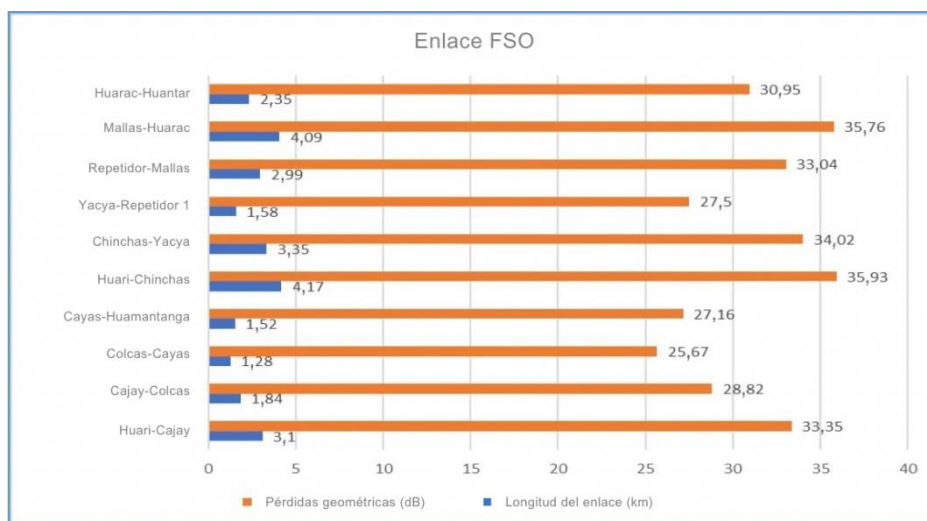
5.2. Pérdidas geométricas vs longitud del enlace

La Tabla 27 muestra los valores de las pérdidas geométricas y de la longitud de cada enlace óptico FSO.

Tabla 27*Pérdidas geométricas en función de la longitud del enlace FSO*

Enlace FSO	Longitud del enlace (km)	Pérdidas geométricas (dB)
Huari-Cajay	3,1	33,35
Cajay-Colcas	1,84	28,82
Colcas-Cayas	1,28	25,67
Cayas-Huamantanga	1,52	27,16
Huari-Chinchas	4,17	35,93
Chinchas-Yacya	3,35	34,02
Yacya-Repetidor 1	1,58	27,50
Repetidor-Mallas	2,99	33,04
Mallas-Huarac	4,09	35,76
Huarac-Huantar	2,35	30,95

La figura 48 muestra la relación entre la longitud del enlace FSO y las pérdidas geométricas.

Figura 48*Pérdidas geométricas vs longitud del enlace FSO*

5.2.1. Análisis de los resultados

Considerando que la red FSO opera a 1550 nm y una variación de la longitud de los enlaces FSO de 1,28 km a 4,17 km produjeron que las pérdidas geométricas se incrementaron desde los 25,67 dB hasta los 35,93 dB. Existe una relación directa entre las pérdidas geométricas y la longitud del enlace FSO.

Por otro lado, la selección de la frecuencia de operación de 1550 nm en lugar de 850 nm fue con la finalidad de tener transmisores ópticos de mayor potencia, produciendo un incremento en la divergencia del haz de 0,002 mrad a 0,003 rad. Una frecuencia de operación de 850 nm produjo que las pérdidas geométricas 22,15 dB para 1,28 km a 32,40 dB para 4,17 km. Es decir, un incremento en la frecuencia de operación del enlace óptico FSO produce un incremento en las pérdidas geométricas del enlace FSO.

5.3. Pérdidas por niebla vs longitud del enlace

La Tabla 28 muestra las pérdidas por niebla y de la longitud de cada enlace óptico FSO.

Tabla 28

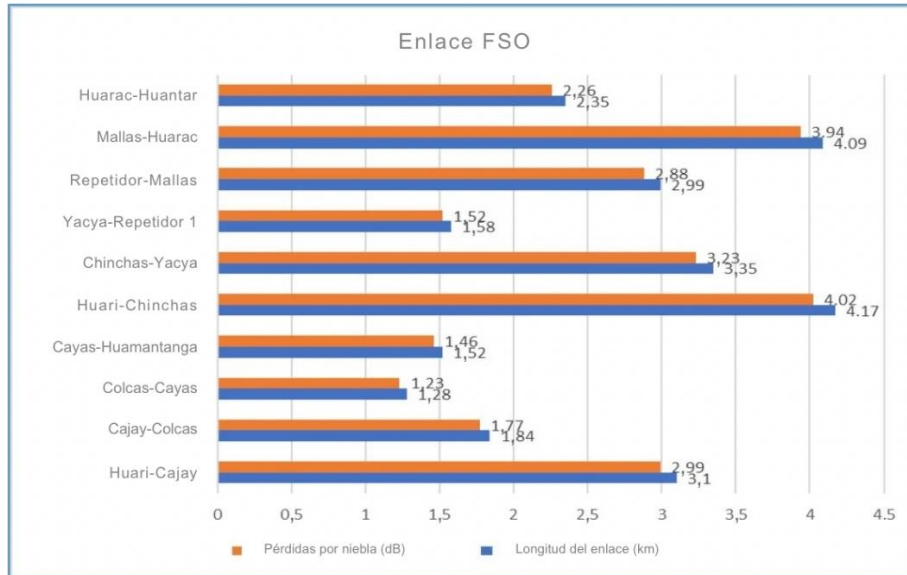
Pérdidas por niebla en función de la longitud del enlace FSO

Enlace FSO	Longitud del enlace (km)	Pérdidas por niebla (dB)
Huari-Cajay	3,1	2,99
Cajay-Colcas	1,84	1,77
Colcas-Cayas	1,28	1,23
Cayas-Huamantanga	1,52	1,46
Huari-Chinchas	4,17	4,02
Chinchas-Yacya	3,35	3,23
Yacya-Repetidor 1	1,58	1,52
Repetidor 1-Mallas	2,99	2,88
Mallas-Huarac	4,09	3,94
Huarac-Huantar	2,35	2,26

La figura 49 muestra la relación entre la longitud del enlace FSO y las pérdidas por niebla.

Figura 49

Pérdidas por niebla vs longitud del enlace FSO



5.3.1. Análisis de los resultados

Considerando que la red FSO opera a 1550 nm y una variación de la longitud de los enlaces FSO de 1,28 km a 4,17 km produjeron que las pérdidas por niebla variarían de 1,23 dB hasta 4,02 dB. Existe una relación directa entre las pérdidas por niebla y la longitud del enlace FSO.

Por otro lado, la elección de la banda de operación de 1550 nm en lugar de 850 nm produjo una reducción en las pérdidas por niebla. Para la banda de operación de 850 nm se produjeron pérdidas por niebla de 2,33 dB a 7,59 dB para 1,28 km a 4,17 km. Es decir, un incremento en la frecuencia de operación produjo una reducción en las pérdidas geométricas del enlace FSO.

Para una $V = 4,5$ km, una disminución de la longitud de onda de operación de 1550 a 850 nm del enlace FSO, produjeron un incremento de las pérdidas por niebla de 1,23 dB a 2,33 dB para un enlace de longitud 1,28 km. Existe una relación inversa entre la longitud de operación y las pérdidas por niebla.

5.4. Pérdidas por precipitación de lluvia vs longitud del enlace

La Tabla 29 muestra los valores de las pérdidas por lluvia y de la longitud de cada enlace óptico FSO.

Tabla 29

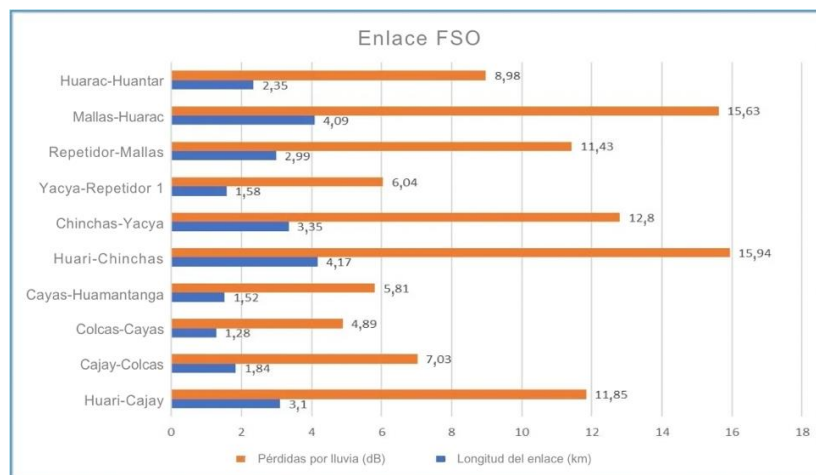
Pérdidas por lluvia en función de la longitud del enlace FSO

Enlace FSO	Longitud del enlace (km)	Pérdidas por lluvia (dB)
Huari-Cajay	3,1	11,85
Cajay-Colcas	1,84	7,03
Colcas-Cayas	1,28	4,89
Cayas-Huamantanga	1,52	5,81
Huari-Chinchas	4,17	15,94
Chinchas-Yacya	3,35	12,80
Yacya-Repetidor 1	1,58	6,04
Repetidor 1-Mallas	2,99	11,43
Mallas-Huarac	4,09	15,63
Huarac-Huantar	2,35	8,98

La figura 50 muestra la longitud del enlace FSO versus las pérdidas por lluvia.

Figura 50

Pérdidas por lluvia vs longitud del enlace FSO



5.4.1. Análisis de los resultados

Considerando que la red óptica FSO propuesta opera a 1550 nm con una variación de la longitud de los enlaces de 1,28 km hasta 4,17 km, produjeron que las pérdidas por lluvia variarán desde los 4,89 dB hasta los 15,94 dB. Existe una relación directa entre las pérdidas por niebla y la longitud del enlace FSO. Existe una relación directa entre las pérdidas por lluvia y la longitud del enlace FSO.

5.5. Análisis del margen del enlace vs longitud del enlace FSO

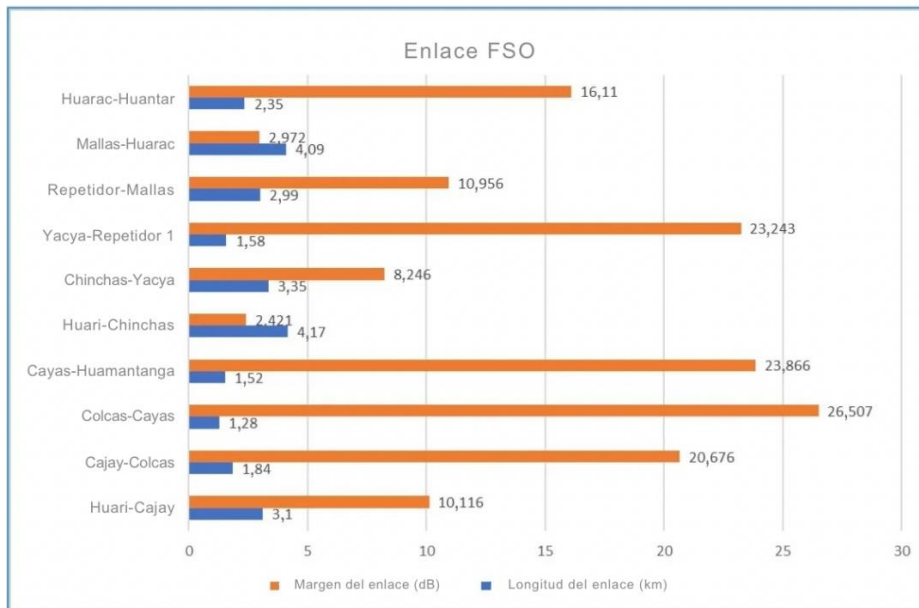
La Tabla 30 muestra los valores de las pérdidas por lluvia y de la longitud de cada enlace óptico FSO.

Tabla 30

Margen del enlace en función de la longitud del enlace FSO

Enlace FSO	Longitud del enlace (km)	Márgen del enlace (dB)
Huari-Cajay	3,1	10,116
Cajay-Colcas	1,84	20,676
Colcas-Cayas	1,28	26,507
Cayas-Huamantanga	1,52	23,866
Huari-Chinchas	4,17	2,421
Chinchas-Yacya	3,35	8,246
Yacya-Repetidor 1	1,58	23,243
Repetidor 1-Mallas	2,99	10,956
Mallas-Huarac	4,09	2,972
Huarac-Huantar	2,35	16,110

La figura 51 muestra la relación entre la longitud del enlace FSO y el margen del enlace.

Figura 51*Margen del enlace vs longitud del enlace FSO***5.5.1. Análisis de los resultados**

Considerando que la red óptica FSO propuesta opera a 1550 nm con una variación de la longitud de los enlaces de 1,28 km hasta 4,17 km, produjeron el margen del enlace (Mlink) variarán desde los 26,51 dB hasta los 2,42 dB. Existe una relación inversa entre el margen del enlace y la longitud del enlace FSO.

Se observó de los valores obtenidos del margen del enlace todos son mayores a 0 dB, lo que indica que en las condiciones iniciales planteadas para la red de enlaces FSO del proyecto, todos los enlaces pueden operar. Sin embargo, para garantizar la operatividad hacia futuras degradaciones de los enlaces FSO, el Mlink debe ser mayor o igual que 3 dB, indicando que la longitud de los enlaces FSO deben ser menores a 4,0 km.

CONCLUSIONES

La propuesta de una red de enlaces óptico a FSO en el presente trabajo de tesis, permitió dar cobertura a 10 localidades rurales que se encuentra en la región quechua (altitud menor a 4100 msnm) de la provincia de Huari de la región Ancash, a través de una plataforma tecnológica de banda ancha de protocolo Gigabit Ethernet.

Para el diseño de la red de enlaces FSO en la zona de estudio, se utilizó la configuración Punto a Punto, por ser esta configuración la que más se adecuaba a las características geográficas y demográficas empleando conexiones de banda ancha de 660 Mbps que opera a longitud de onda de 1550 nm.

En el diseño de cada enlace óptico FSO, se calculó el Margen del Enlace (Mlink), obteniendo como resultado 2,42 dB para el enlace óptico de 4,17 km y 26,51 dB para el enlace óptico de 2,18 km. De los valores obtenidos del Mlink, se puede concluir que los 10 enlaces ópticos FSO se encuentran disponibles en la zona de estudio, dado que el Mlink obtenido para cada enlace fue mayor a 0 dB ($Mlink > 0$ dB).

Para diseñar la red óptica FSO en las localidades rurales de la provincia de Huari, región Ancash, fue importante definir que la zona de estudio sea próxima a la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica, cuyo acceso se encuentra en la ciudad de Huari.

RECOMENDACIONES

Al seleccionar localidades rurales de la región quechua cuyas altitudes son menores a los 4100 msnm, se evitó considerar las pérdidas por precipitación por nieve, pérdidas que hubiesen impedido proponer esta solución tecnológica de banda ancha en la zona de estudio. Las pérdidas que ocasionan las precipitaciones de nieve en un enlace óptico FSO que opera a 1550 nm con una precipitación de nieve de 6,63 mm/h en localidades por encima de los 4100 msnm son de 75,9 dB/km.

Al seleccionar la longitud de onda de operación de la red óptica FSO, se debe tomar en cuenta la longitud de los enlaces ópticos. Al seleccionar una longitud de onda de operación de 1550 nm, se tomó en cuenta que los fabricantes emplean transmisores ópticos de mayor potencia, lo que permite establecer enlaces ópticos FSO de mayor longitud ($d < 5$ km).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APA (2019) *Guía de Norma APA, 7ª Edición*. <https://normas-apa.org/wp-content/uploads/Guia-Normas-APA-7ma-edicion.pdf>
- Awan, M., Csurgai, L., Sajid, M., Leitgeb, E., Farukh, N., & Khan, M. (2009). Characterization of Fog and Snow Attenuations for Free-Space Optical Propagation. *Journal of Communications*, 4 (8), 533-545. <https://cutt.ly/ONe1BYL>
- Borwankar, S. y Shah, D. (2020). *Effect of weather conditions on FSO link*. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2009/2009.08317.pdf>
- Caizaluisa (2008). *Diseño de una red con tecnología láser Free Space Optics (FSO), para el Campus de la Escuela Politécnica Nacional*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4232>
- Cuenca, Ch., & Palacio, C. (2009). *Diseño y Factibilidad de una Red Inalámbrica Óptica utilizando Tecnología FSO para la comunicación entre los edificios de la Escuela Politécnica Nacional y el Observatorio Astronómico* En Memorias de las XXII Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica (2009 J-FIEE). Repositorio Digital EPN. <https://cutt.ly/5XweBQA>
- Gebhart, M., Leitgeb, E., Sheikh Muhammad, S., Flecker, B., Chlestil, C., Al Naboulsi, M., de Fornel, F., & Sizun, H. (2005). *Measurement of Light attenuation in dense fog conditions for FSO applications* (S. M. Doss-Hammel & A. Kohnle, Eds.; p. 58910K). <https://doi.org/10.1117/12.614830>
- Gallegos, C. (2009). *Diseño De Una Red Óptica Inalámbrica Para El Envío De Voz Y Datos En Áreas No Urbanas* [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Digital de la Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://cutt.ly/bNe4XUM>
- Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., & Amjad, H. (2023). Hybrid FSO/RF networks: A review of practical constraints, applications and challenges. *Optical Switching and Networking*, 47(2), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2022.100697>
- Khan, M. (2012). *FSO Channel Characterization for Continental Fog Environments* [Tesis de doctorado, Graz University of Technology]. TU Graz Digital Library. <https://cutt.ly/IXwrijw8>

- Muramoto, W. (2007). *Estudo e modelagem de canal optico atmosferico utilizando o Lightsim como plataforma de simulação* [Tesis de Maestría, Universidad de Estadual de Campinas]. Repositorio Digital da Unicamp. <http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000431963>
- Nogueira, T. (2007). *Estudo de sistemas de comunicação utilizando óptica no espaço livre* [Tesis de maestría, Instituto Militar de Engenharia]. Instituto Militar de Engenharia. <https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-32445/estudo-de-sistemas-de-comunicacao-utilizando-optica-no-espaco-livre>
- SONABEAM (2023). *Catálogo técnico del fabricante FSONA OPTICAL WIRELESS*. <http://www.fsona.com/prod/SONAbeam-Datasheets.pdf>
- Weather Atlas (2025). Climate and monthly weather forecast Huari, Perú. <https://www.weather-atlas.com/en/peru/huari-climate>
- Senamhi (2018). *Descarga de datos meteorológicos de la provincia de Huari, Perú*. <https://www.senamhi.gob.pe/site/descarga-datos/>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicador	Metodología
<p>Problema general ¿Cómo se puede diseñar una red de acceso de banda ancha que mejore los servicios de telecomunicaciones en las zonas rurales de la provincia de Huari, región Ancash, en el año 2024?</p> <p>Problemas específicos</p> <p>a. ¿Cuáles son las necesidades de los servicios de telecomunicaciones que la red de acceso de banda ancha debe soportar en la zona de estudio?</p> <p>b. ¿Cuál tecnología de telecomunicaciones que se encuentra disponible y aplicable, permite el diseño de una red de acceso de banda ancha en la zona de estudio?</p> <p>c. ¿Cómo se puede desarrollar un diseño de red de acceso que esté adaptado a las características geográficas y demográficas específicas de la zona de estudio, asegurando cobertura eficiente y servicios de calidad?</p>	<p>Objetivo general Diseñar una red de acceso de banda ancha que mejore los servicios de telecomunicaciones en las zonas rurales de la provincia de Huari, región Ancash, en el año 2024.</p> <p>Objetivos específicos</p> <p>a. Analizar las necesidades de los servicios de telecomunicaciones que la red de acceso de banda ancha debe soportar en la zona de estudio.</p> <p>b. Seleccionar una tecnología de telecomunicaciones que se encuentra disponible y aplicable para el diseño de una red de acceso en la zona de estudio</p> <p>c. Desarrollar un diseño de red de acceso adaptado a las características geográficas y demográficas de la zona de estudio, que asegure una cobertura eficiente y servicios de calidad</p>	<p>Hipótesis general No se plantea hipótesis general</p> <p>Hipótesis específicas No se plantea hipótesis específica</p>	<p>Variable de estudio Diseño de una red de acceso de banda ancha que mejore los servicios de telecomunicaciones en las zonas rurales de la provincia de Huari, región Ancash, en el año 2024.</p>	<p>Pérdidas geométricas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Divergencia del haz - Superficie de captura - Longitud del enlace óptico <p>Pérdidas atmosféricas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pérdidas por lluvia - Pérdidas por niebla - Pérdidas por nieve 	<p>Tipo de investigación: - Investigación aplicada</p> <p>Nivel de investigación: - Explicativo</p> <p>Diseño de investigación - No experimental</p>

Anexo 2. Ficha Técnica del Sistema SONABeam E







The SONABeam E series is extremely versatile. It's compact, yet rugged aluminum housing is equally at home outdoors in challenging weather as it is indoors operating through a window. The SONABeam E can be easily transported to installation sites making it ideal for situations that require rapid deployment. The E can be ordered as a Flyaway kit complete with carbon-fiber tripods and water-tight carrying cases, ideal for disaster recovery operations. Like all SONABeams, the E series offers full-rate, full-duplex bandwidth. The E Series supports native Ethernet and offers the added flexibility of protocol transparent operation to support custom datarates.

THE SONABEAM ADVANTAGE

By transmitting through the atmosphere, the SONABeam eliminates the substantial costs of digging up streets and sidewalks required to install fiber, and unlike other wireless solutions, the SONABeam is immune to electro-magnetic (EM) and radio-frequency (RF) interference which means no licensing is required. Plus, the SONABeam's narrow, highly directional transmission all but eliminates eavesdropping or interception. Key to SONABeam's breakthrough laser technology is its operational wavelength of 1550 nm, which provides a broad spectrum of safety and performance advantages. The SONABeam's high-powered laser transmitters are able to penetrate heavy rain, snow and fog far more effectively and consistently than any other available FSO technology. SONABeam's protocol transparent technology gives service provider, enterprise and government customers the ability to integrate free space optics (FSO) quickly and easily into any existing network.

TYPICAL APPLICATIONS

Mobile Wireless
3G/4G/LTE Backhaul
Backhaul Redundancy
Remote Antenna Extension

Enterprise, Government, Military
High-bandwidth campus
Fiber-line replacement
Secure links

Service Provider
High-speed backbone
RF/Wi-Fi/WiMax aggregation
Private lines








RAPID DEPLOYMENT • HIGH CAPACITY • NON INTERFERING • UNLICENSED • 1550 NM TRANSMISSION
FULL-RATE, FULL-DUPLEX • SECURE & UNDETECTABLE • LOW LATENCY/PACKET LOSS

Anexo 3. Especificaciones Técnicas del Sistema SONABeam E



Free-Space Optical		155-M ²	1250-M ²
<i>Datarate/protocol:</i>	Fast Ethernet: 125 Mbps, full duplex OC-3/STM-1: 155 Mbps, full duplex	Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps, full duplex OC-12/STM-4: 622 Mbps, full duplex CPRI 1/CPRI 2	
<i>Range: 3 dB/km (clear air):</i>	300 m to 5400 m (980 ft to 3.4 mi)	400 m to 4800 m (1310 ft to 3.0 mi)	
<i>10 dB/km (extreme rain):</i>	300 m to 2400 m (980 ft to 1.5 mi)	400 m to 2200 m (1310 ft to 1.4 mi)	
<i>Laser output power:</i>	640 mW peak (4 x 160 mW)	640 mW peak (4 x 160 mW)	
<i>Receive aperture:</i>	20 cm (8 in) diameter, effective clear	20 cm (8 in) diameter, effective clear	
<i>Free-space wavelength:</i>	1550 nm	1550 nm	
Interface Options		1000-Base-SX (850 nm)	1000-Base-LX (1310 nm)
<i>Data physical interface:</i>	Multimode fiber, LC	Singlemode fiber, LC	
<i>Fiber xmtr/rcvr wavelength:</i>	850 nm nominal	1310 nm nominal	
<i>Fiber xmtr output power:</i>	-9 dBm (min), -3 dBm (max)	-11 dBm (min), -3 dBm (max)	
<i>Fiber rcvr input power:</i>	0 dBm (min), -17 dBm (max)	-20 dBm (min), -3 dBm (max)	
Mechanical / Electrical / Environmental			
<i>Operating temperature:</i>	-40°C to 60°C (-40°F to 140°F)	<i>Weight:</i>	Head: 20 kg (44 lbs); Yoke: 8 kg (17 lbs)
<i>Solar filters:</i>	2 spatial, 2 spectral	<i>Input voltage:</i>	-48 VDC (-40 V to -57 V) or 100-240 VAC
<i>Pointing stability:</i>	120 kmh/75 mph operating, >160 kmh/100 mph survival	<i>Power consumption:</i>	Transceiver: 60 watts
<i>Environmental seal:</i>	Water-tight, IP66/NEMA-4 Cert.		
<i>Dimensions (W*H*D):</i>	41 x 41 x 46 cm; 16 x 16 x 18 in		
Carrier-Class Reliability and Durability			
<i>Window heating:</i>	Prevents optics fogging, snow/sleet accumulation		
<i>Laser cooling:</i>	Active solid state cooling to 35°C (95°F)		
<i>Redundant transmitters:</i>	4 independent lasers, drivers, coolers & cooler controllers		
<i>Power supply:</i>	Telco grade, >550,000 hour		
<i>Structure:</i>	Cast aluminum housing, yoke & mount		
Element Management and Control			
<i>Management interface:</i>	USB, Serial & 10/100-baseT	<i>GUI control program:</i>	SONABeam Terminal Controller
<i>SNMP:</i>	Embedded v.1 agent	<i>Command line interface:</i>	Via USB, RS232 or IP address
<i>Key parameters monitored:</i>	Receive signal strength; Power supply currents & voltages; Laser currents, power levels & temperatures; Internal temperature; Clock recovery / sync status; Network interface signal status		
<i>Historical logging:</i>	Internal data and event logging		

Anexo 4. Ficha Técnica del Sistema SONABeam Z







The SONABeam Z series was designed to provide a lightweight, economical solution for short distance links. It is ideal for high capacity links up to 500 meters. The SONABeam Z is housed in a low-profile, all aluminum enclosure suitable for outdoor operation in all weather environments as well as for indoor installation operating through a window. Featuring near-zero latency and packet loss, the SONABeam Z transmits full-rate, full-duplex native Gigabit Ethernet and can also operate in protocol transparent mode in order to support custom datarates or carry both TDM and IP traffic on the same link.

THE SONABEAM ADVANTAGE

By transmitting through the atmosphere, the SONABeam eliminates the substantial costs of digging up streets and sidewalks required to install fiber, and unlike other wireless solutions, the SONABeam is immune to electro-magnetic (EM) and radio-frequency (RF) interference which means no licensing is required. Plus, the SONABeam's narrow, highly directional transmission all but eliminates eavesdropping or interception. Key to SONABeam's breakthrough laser technology is its operational wavelength of 1550 nm, which provides a broad spectrum of safety and performance advantages. The SONABeam's high-powered laser transmitters are able to penetrate heavy rain, snow and fog far more effectively and consistently than any other available FSO technology. SONABeam's protocol transparent technology gives service provider, enterprise and government customers the ability to integrate free space optics (FSO) quickly and easily into any existing network.

TYPICAL APPLICATIONS

Mobile Wireless
3G/4G/LTE Backhaul
Backhaul Redundancy
Remote Antenna Extension

Enterprise, Government, Military
High-bandwidth campus
Fiber-line replacement
Secure links

Service Provider
High-speed backbone
RF/Wi-Fi/WiMax aggregation
Private lines







RAPID DEPLOYMENT • HIGH CAPACITY • NON INTERFERING • UNLICENSED • 1550 NM TRANSMISSION
 FULL-RATE, FULL-DUPLEX • SECURE & UNDETECTABLE • LOW LATENCY/PACKET LOSS

Anexo 5. Especificaciones Técnicas de los Sistemas SONABeam 1250-Z y 2500-Z



Free-Space Optical	1250-Z ¹	2500-Z ²
Data rate/protocol:	Fast Ethernet: 125 Mbps, full duplex; OC-3/STM-1: 155 Mbps, full duplex; Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps, full duplex; OC-12/STM-4: 622 Mbps, full duplex CPRI 1/CPRI 2	Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps, full duplex; OC48/STM16, 2.5 Gbps, full duplex CPRI 2/CPRI 3
Range: 3 dB/km (clear air):	50 m to 500 m (160 ft to 0.3 mi)	50 m to 500 m (160 ft to 0.3 mi)
10 dB/km (extreme rain):	50 m to 350 m (160 ft to 0.2 mi)	50 m to 350 m (160 ft to 0.2 mi)
Laser output power:	160 mW peak	160 mW peak
Receive aperture:	50 mm (2 in) diameter	50 mm (2 in) diameter
Free-space wavelength:	1550 nm	1550 nm
Interface Options	1000-Base-SX (850 nm)	1000-Base-LX (1310 nm)
Data physical interface:	Multimode fiber, LC	Singlemode fiber, LC
Fiber xmt/rcvr wavelength:	850 nm nominal	1310 nm nominal
Fiber xmt output power:	-9 dBm (min), -3 dBm (max)	-11 dBm (min), -3 dBm (max)
Fiber rcvr input power:	0 dBm (min), -17 dBm (max)	-20 dBm (min), -3 dBm (max)
Mechanical/ Electrical/ Environmental		
Operating temperature:	-40°C to 60°C (-40°F to 140°F)	Dimensions (W*H*D): 25 x 33 x 46 cm; 10 x 13 x 18 in
Pointing stability:	120 kmh/75 mph operating, >160 kmh/100 mph survival	Weight: 10 kg (22 lbs)
Environmental seal:	Water-tight, IP66/NEMA-4 Cert.	Input voltage: -48 VDC (-40 V to -57 V) or 100-240 VAC Power consumption: 25 watts (no heater)
Carrier-Class Reliability and Durability		
Laser cooling:	Active solid state cooling to 35°C (95°F)	Power supply: Telco grade, >550,000 hour
Structure:	Aluminum housing	
Element Management and Control		
Management interface:	USB, Serial & 10/100-baseT	GUI control program: SONABeam Terminal Controller
SNMP:	Embedded v.1 agent	Command line interface: Via USB, RS232 or IP address
Key parameters monitored:	Receive signal strength; Power supply currents & voltages; Laser currents, power levels & temperatures; Internal temperature; Clock recovery / sync status; Network interface signal status	
Historical logging:	Internal data and event logging	
Certifications & Classifications	International	US/Canada
Laser safety	IEC 60825-1, Class 1M EN 55022 - emissions	CDRH 21 CFR including Laser Notice 50, Class 1M; ANSI Z136.1 & Z136.6, Class 1
EMC	EN 55024 - Immunity	FCC - Part 15 / ICES - 003
Electrical	EN 60950 (CB scheme)	UL 60950 / CSA 60950

Printed specifications subject to change. Please refer to www.fsona.com for current information.

¹100 - 1500 Mbps
²500 - 2500 Mbps
04-0206-1

FSONA NETWORKS CORP. 100 - 13200 Delf Place Richmond BC V6V 2A2 Canada
Tel: 604 273 0333, Fax: 604 278 0340, Web: www.fsona.com, Email: sales@fsona.com