

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**TESIS**

**“PROPUESTA DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA EN EL ESPACIO LIBRE (FSO), COMO TECNOLOGÍA COMPLEMENTARIA A UNA RED DE RADIOCOMUNICACIÓN (RF) DE LAS INSTITUCIONES EDUCATIVAS DEL DISTRITO LA YARADA LOS PALOS, REGIÓN TACNA, EN EL AÑO 2022”**

**PARA OPTAR:**

**TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. EDWIN RAÚL TELLEZ COLQUE**

**TACNA – PERÚ**

**2022**

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**TESIS**

**“PROPUESTA DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA EN  
EL ESPACIO LIBRE (FSO), COMO TECNOLOGÍA  
COMPLEMENTARIA A UNA RED DE RADIOCOMUNICACIÓN (RF)  
DE LAS INSTITUCIONES EDUCATIVAS DEL DISTRITO LA  
YARADA LOS PALOS, REGIÓN TACNA, EN EL AÑO 2022”**

Tesis sustentada y aprobada el 22 de diciembre de 2022; estando el jurado calificador integrado por:

**PRESIDENTE : Mag. ANÍBAL JUAN ESPINOZA ARANCIAGA**

**SECRETARIO : Mag. JOSÉ MARCIAL SUMARRIVA BUSTINZA**

**VOCAL : Dr. ABEL OBIDIO ARGUMÉ SOTOMAYOR**

**ASESOR : Mtra. MARÍA ELENA VILDOZO ZAMBRANO**

## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Edwin Raúl Tellez Colque, en calidad de bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 00505305 declaro bajo juramento que:

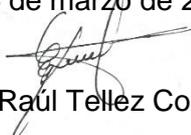
1. Soy autor de la tesis titulada: *Propuesta de un sistema de comunicación óptica en el espacio libre (FSO) como tecnología complementaria a una red de radiocomunicación (RF) de las instituciones educativas del distrito La Yarada Los Palos, Región Tacna, en el año 2022* la misma que presento para optar el *Título Profesional de Ingeniero Electrónico*.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, habiéndose respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico o título profesional.
5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a *La Universidad* cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis/trabajo de investigación, así como por los derechos sobre la obra.

En consecuencia, me hago responsable, frente a *La Universidad* y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que la obra haya sido publicada anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Tacna, 25 de marzo de 2023

  
Edwin Raúl Tellez Colque

DNI: 00505305

## **DEDICATORIA**

A cada una de las personas que me entregaron parte de su tiempo y compartieron sus conocimientos, a mi familia que siempre me brindó su apoyo en todo momento de mi vida.

Edwin Raúl Tellez Colque

## **AGRADECIMIENTO**

Doy gracias a Dios por permitirme llegar hasta este punto de mi vida, a mi familia dándome un ejemplo de humildad y superación, que estuvieron junto a mí cada día y me facilitaron todo el apoyo que pueda necesitar para seguir creciendo como profesional y también como persona.

Edwin Raúl Tellez Colque

## ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADOS.....	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Descripción del Problema.....	2
1.2. Formulación del problema.....	3
1.3. Justificación e importancia.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes del Estudio.....	5
2.2. Bases Teóricas.....	9
2.2.1. El espectro electromagnético.....	9
2.2.1.1. Espectro visible.....	10
2.2.1.2. Clasificación por banda óptica de operación.....	11
2.2.2. Enlaces ópticos no guiados.....	11
2.2.2.1. FSO (Free-Space Optical).....	13
2.2.3. Funcionamiento de un sistema FSO.....	15
2.2.4. Topologías para enlaces FSO.....	16
2.2.5. Pérdidas en un sistema FSO.....	18
2.2.5.1. Pérdidas ópticas.....	18
2.3. Definición de términos.....	25
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	27
3.1. Tipo y nivel de Investigación.....	27
3.2. Población y/o Muestra del Estudio.....	27

3.3. Operacionalización de Variables.....	27
3.4. Técnicas, materiales y/o instrumentos para la recolección de datos.....	28
3.4.1. Técnicas de recolección de los datos.....	28
3.4.2. Instrumentos para la recolección de los datos.....	28
3.5. Procesamiento y Análisis de Datos.....	29
3.5.1. Levantamiento de información de las instituciones educativas en la zona de estudio .....	29
3.5.2. Ubicación geográfica de las I.E. de la Yarada Los Palos.....	33
3.5.3. Clima en el distrito de La Yarada.....	45
3.5.4. Consideraciones previas al diseño de enlaces ópticos FSO.....	46
3.5.5. Parámetros empleados para la determinación del margen del enlace.....	47
CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	52
4.1. Propuesta de la red de enlaces ópticos FSO.....	53
4.2. Levantamiento del perfil topográfico de los enlaces FSO.....	54
4.2.1. Enlace FSO 1: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Alfonso Eyzaguirre .....	54
4.2.2. Enlace FSO 2: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Juan Velasco.....	55
4.2.3. Enlace FSO 3: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Juvenal Ordóñez .....	56
4.2.4. Enlace FSO 4: I.E. Juvenal Ordoñez - I.E. Llacsá Arce .....	56
4.2.5. Enlace FSO 5: I.E. Juvenal Ordoñez - I.E. Omar Salas .....	57
4.2.6. Enlace FSO 6: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Hugo Salazar.....	58
4.2.7. Enlace FSO 7: I.E. Hugo Salazar - I.E. Nuevo Copare .....	59
4.2.8. Enlace FSO 8: Municipalidad La Yarada - I.E. Alfonso Ugarte .....	59
4.2.9. Enlace FSO 9: Municipalidad La Yarada - Estación Los Palos.....	60
4.2.10. Enlace FSO 10: Estación Los Palos - I.E. Rómulo Boluarte .....	61
4.2.11. Enlace FSO 11: Alfonso Ugarte - I.E. Virginia Lázaro.....	62
4.3. Equipamiento seleccionado.....	62
4.4. Diseño de los enlaces ópticos FSO.....	63
4.4.1. Margen del enlace ( $M_{link}$ ).....	63
4.4.2. Parámetros que intervienen en el cálculo del margen del enlace .....	64
4.5. Cálculo del margen del enlace (link margin).....	65
4.5.1. Enlace FSO 1: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Alfonso Eyzaguirre .....	66
4.5.2. Enlace FSO 2: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Juan Velasco.....	68
4.5.3. Enlace FSO 3: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Juvenal Ordoñez .....	69
4.5.4. Enlace FSO 4: I.E. Juvenal Ordoñez - I.E. Llacsá Arce .....	71
4.5.5. Enlace FSO 5: I.E. Juvenal Ordoñez - I.E. Omar Salas .....	73
4.5.6. Enlace FSO 6: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Hugo Salazar.....	75
4.5.7. Enlace FSO 7: I.E. Hugo Salazar - I.E. Nuevo Copare .....	77

4.5.8. Enlace FSO 8: Municipalidad La Yarada - I.E. Alfonso Ugarte .....	78
4.5.9. Enlace FSO 9: Municipalidad La Yarada - Estación Los Palos .....	80
4.5.10. Enlace FSO 10: Estación Los Palos - I.E. Rómulo Boluarte .....	82
4.5.11. Enlace FSO 11: Alfonso Ugarte - I.E. Virginia Lázaro.....	84
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	86
5.1. Análisis de la línea de vista de los enlaces ópticos FSO.....	86
5.2. Análisis de las pérdidas geométricas vs longitud del enlace.....	86
5.3. Análisis de las pérdidas por niebla vs longitud del enlace.....	87
5.4. Análisis de las pérdidas por lluvia vs longitud del enlace.....	89
5.5. Análisis del margen del enlace vs longitud del enlace FSO.....	90
CONCLUSIONES.....	93
RECOMENDACIONES.....	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXOS.....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Deducción del enlace.....	19
Tabla 2.	Perdidas geométricas.....	21
Tabla 3.	Deducción del enlace incluyendo el margen de enlace.....	22
Tabla 4.	Operacionalización de variables.....	27
Tabla 5.	Relación de instituciones educativas de La Yarada Los Palos.....	31
Tabla 6.	Datos estadísticos por institución educativa.....	32
Tabla 7.	Coordenadas geográficas de las I.E. de La Yarada Los Palos.....	33
Tabla 8.	Modelo de Predicción de lluvia.....	50
Tabla 9.	Características de propagación del enlace FSO 1.....	55
Tabla 10.	Características de propagación del enlace FSO 2.....	55
Tabla 11.	Características de propagación del enlace FSO 3.....	56
Tabla 12.	Características de propagación del enlace FSO 4.....	57
Tabla 13.	Características de propagación del enlace FSO 5.....	58
Tabla 14.	Características de propagación del enlace FSO 6.....	58
Tabla 15.	Características de propagación del enlace FSO 7.....	59
Tabla 16.	Características de propagación del enlace FSO 8.....	60
Tabla 17.	Características de propagación del enlace FSO 9.....	61
Tabla 18.	Características de propagación del enlace FSO 10.....	61
Tabla 19.	Características de propagación del enlace FSO 11.....	62
Tabla 20.	Longitud de los enlaces ópticos FSO.....	64
Tabla 21.	Pérdidas geométricas en función de la longitud del enlace FSO.....	86
Tabla 22.	Pérdidas por niebla en función de la longitud del enlace FSO.....	88
Tabla 23.	Pérdidas por lluvia en función de la longitud del enlace FSO.....	89
Tabla 24.	Margen del enlace en función de la longitud del enlace FSO .....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	División del espectro electromagnético.....	9
Figura 2.	El espectro visible.....	10
Figura 3.	Red de enlaces ópticos no guiados.....	12
Figura 4.	Un enlace óptico FSO dentro de una MAN.....	13
Figura 5.	Sistema óptico FSO.....	13
Figura 6.	Arquitectura en forma malla.....	16
Figura 7.	Arquitectura en forma de anillo con derivaciones.....	17
Figura 8.	Arquitectura en estrella.....	17
Figura 9.	Arquitectura de varios enlaces punto a punto.....	18
Figura 10.	Divergencia del rayo.....	19
Figura 11.	Angulo de divergencia más extenso del rayo.....	20
Figura 12.	Tamaño del haz proyectado.....	20
Figura 13.	Margen de enlace en función del alcance para atenuación de 10 dB/Km.....	24
Figura 14.	Margen de enlace en función de la atenuación atmosférica para 1Km.....	25
Figura 15.	Selección de instituciones educativas de La Yarada Los Palos con Escala...30	30
Figura 16.	Ficha de datos, croquis de ubicación y datos estadísticos.....	32
Figura 17.	I.E. 42199 Juan Velasco Alvarado.....	34
Figura 18.	Ubicación geográfica de la I.E. Juan Velasco.....	34
Figura 19.	I.E. 421213 Hugo Salazar Del Alcázar.....	35
Figura 20.	Ubicación geográfica de la I.E. Hugo Salazar Del Alcázar.....	35
Figura 21.	I.E. 421211 Alfonso Eyzaguirre.....	36
Figura 22.	Ubicación geográfica de la I.E. Alfonso Eyzaguirre.....	36
Figura 23.	I.E. 421200 Omar Zilbert Salas.....	37
Figura 24.	Ubicación geográfica de la I.E. Omar Zilbert Salas.....	37
Figura 25.	I.E. 42065 Rómulo Boluarte.....	38

Figura 26.	Ubicación geográfica de la I.E. Rómulo Boluarte.....	38
Figura 27.	I.E. 42017 Llacsa Arce.....	39
Figura 28.	Ubicación geográfica de la I.E. Llacsa Arce.....	39
Figura 29.	I.E. 42044 Alfonso Ugarte.....	40
Figura 30.	Ubicación geográfica de la I.E. Alfonso Ugarte.....	40
Figura 31.	I.E. 43506 Juvenal Ubaldo Ordoñez.....	41
Figura 32.	Ubicación geográfica de la I.E. Juvenal Ubaldo Ordoñez.....	41
Figura 33.	I.E. 42263 Virginia Lázaro.....	42
Figura 34.	Ubicación geográfica de la I.E. Virginia Lázaro.....	42
Figura 35.	I.E. 42261 Nuevo Copare.....	43
Figura 36.	Ubicación geográfica de la I.E. Nuevo Copare.....	43
Figura 37.	Ubicación geográfica de la Estación Los Palos.....	44
Figura 38.	Ubicación geográfica de las I.E. del distrito La Yarada.....	45
Figura 39.	Ubicación geográfica del distrito de La Yarada.....	45
Figura 40.	Precipitación de lluvia durante el año del distrito de La Yarada.....	46
Figura 41.	Esquema de la red de radioenlaces para las I.E. de La Yarada.....	47
Figura 42.	Propuesta de red de enlaces ópticos FSO.....	53
Figura 43.	Perfil topográfico del enlace FSO 1.....	54
Figura 44.	Perfil topográfico del enlace FSO 2.....	55
Figura 45.	Perfil topográfico del enlace FSO 3.....	56
Figura 46.	Perfil topográfico del enlace FSO 4.....	57
Figura 47.	Perfil topográfico del enlace FSO 5.....	57
Figura 48.	Perfil topográfico del enlace FSO 6.....	58
Figura 49.	Perfil topográfico del enlace FSO 7.....	59
Figura 50.	Perfil topográfico del enlace FSO 8.....	60
Figura 51.	Perfil topográfico del enlace FSO 9.....	60
Figura 52.	Perfil topográfico del enlace FSO 10.....	61
Figura 53.	Perfil topográfico del enlace FSO 11.....	62

Figura 54. Equipo FSO SONAbeam 1250-M.....	63
Figura 55. Pérdidas geométricas vs longitud del enlace FSO.....	87
Figura 56. Pérdidas por niebla vs longitud del enlace FSO.....	88
Figura 57. Pérdidas por lluvia vs longitud del enlace FSO.....	90
Figura 58. Margen del enlace vs longitud del enlace FSO.....	91

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo, proponer un sistema de comunicación óptica de espacio libre (FSO) como tecnología complementaria, que permita dar soporte de los servicios de banda ancha en situaciones temporales, a una red de radiocomunicación (RF) de las Instituciones Educativas del distrito de La Yarada Los Palos, región Tacna. La metodología seguida para la propuesta de la red de enlaces ópticos FSO de banda ancha fue: primero verificar la existencia de infraestructura de telecomunicaciones en la zona de estudio, que sirvió para la propuesta de red; segundo, efectuar el levantamiento topográfico del terreno donde se desplegaron los enlaces FSO; tercero, se revisaron las especificaciones técnicas de los equipos FSO que se encuentran en el mercado, necesarios para el diseño de la red de enlaces FSO, de alta disponibilidad, de banda ancha y segura. Finalmente, con los resultados obtenidos del margen del enlace de los enlaces ópticos FSO, se pudo verificar que la propuesta cumplía con los objetivos establecidos, obteniendo la solución más óptima en cuanto a disponibilidad y calidad de la red de enlaces FSO.

**Palabras claves:** Comunicación inalámbrica; Redes de banda ancha; Sistema óptico de espacio libre; Servicio de educación digital a distancia.

## ABSTRACT

The objective of this thesis work is to propose a free space optical communication system (FSO) as a complementary technology, which allows to support broadband services in temporary situations, to a radio communication (RF) network of the Institutions Schools of the district of La Yarada Los Palos, Tacna region. The methodology followed for the proposal of the broadband FSO optical link network was: first, to verify the existence of telecommunications infrastructure in the study area, which served for the network proposal; second, carry out the topographical survey of the land where the FSO links were deployed; Third, the technical specifications of the FSO equipment that are on the market, necessary for the design of the FSO link network, high availability, broadband and secure, were reviewed. Finally, with the results obtained from the link margin of the FSO optical links, it was possible to verify that the proposal met the established objectives, obtaining the most optimal solution in terms of availability and quality of the FSO link network.

**Keywords:** Wireless communication; broadband networks; Free space optical system; Distance digital education service.

## INTRODUCCIÓN

Una de los grandes desafíos que enfrenta el Estado peruano es brindar los servicios de telecomunicaciones a los habitantes de las zonas rurales de nuestro país, en especial a las instituciones educativas, a través de los sistemas de cobertura conocidos como de “Última Milla”. El esfuerzo por parte del Estado, ha permitido instalar la Red Dorsal Nacional de Fibra Óptica hasta las capitales de las provincias de nuestro país y de allí implementar sistema de telecomunicaciones conocidos como de “Última Milla”.

Una de las soluciones en la actualidad, es el uso de sistemas de comunicación óptica que utilizan la propagación de señales ópticas (luz visible o infrarroja) en el espacio libre (condición ideal de propagación de señales en la atmósfera). Estos sistemas se emplean para la transmisión de voz, datos y video a través de enlaces de gran capacidad de transmisión, con las limitaciones de cobertura que ofrecen.

La organización de esta tesis es la siguiente: El capítulo I: “Planteamiento del problema”, desarrolla la problemática que tiene la implantación de una red óptica inalámbrica para las instituciones educativas del distrito La Yarada, región Tacna, a través de la formulación del problema, la justificación de la investigación y objetivos que tiene la tesis. El capítulo II “Marco teórico”: desarrolla y presenta como antecedentes de mi investigación, los resúmenes de investigaciones efectuadas por otros investigadores nacionales e internacionales; luego se presenta los fundamentos teóricos que se requieren conocer para el desarrollo de mi investigación. El capítulo III “Marco metodológico”: Contiene el tipo y diseño de la investigación y la operacionalización de variables, así como las técnicas para recolección de datos y del procesamiento y análisis de datos. El capítulo IV “Resultados”, presenta los resultados obtenidos del dimensionamiento de los enlaces ópticos inalámbricos (FSO) calculados en la zona de estudio. El capítulo V “Discusión”: presenta el análisis de los resultados del cálculo de los enlaces ópticos inalámbricos para implantar un sistema de comunicación óptica en el espacio libre (FSO), de las instituciones educativas del distrito La Yarada Los Palos, Región Tacna.

## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción del Problema**

El 7 de noviembre del año 2015, mediante Ley N.º 30358 el Gobierno del Perú crea el Distrito de La Yarada Los Palos.

La Ley de creación del distrito (Ley N.º 30358) dispone que la administración del distrito sea atendida por la Municipalidad Provincial de Tacna, en tanto se elijan e instalen nuevas autoridades.

El distrito La Yarada Los Palos se caracteriza por ser una localidad donde su población se dedica a la agricultura y ganadería, siendo el primer productor a nivel nacional del Olivo. Cuenta con 12 educaciones educativas dentro del distrito, que enseñan el nivel inicial, primario o secundario.

Si bien es cierto que el Estado peruano hace el esfuerzo por dotar de los servicios de teleeducación digital a las zonas rurales de nuestro país, la pandemia del COVID-19 retrasó muchos proyectos de implementación del acceso a internet a nivel nacional.

Los alumnos de las instituciones educativas de las zonas periféricas de las ciudades de nuestro país requieren utilizar las herramientas interactivas que ofrece el Internet, para poder integrarse culturalmente al ámbito nacional e internacional.

Por otro lado, el desarrollo de sistema de telecomunicaciones de banda ancha conocidas en nuestro país como “la última milla”, ha permitido integrar a muchas localidades periféricas o rurales de nuestro país a la Red Nacional de Fibra Óptica, lo que permitió el acceso a los servicios digitales que presta la Red Internet, como las videoconferencias, video-streaming, chats en línea, mensajería electrónica, etc.

Considerando que los enlaces de radio-frecuencias son muy utilizados en la actualidad, la Municipalidad Provincial de Tacna implementó un sistema de transmisión digital para dar el servicio de acceso a internet a 5 instituciones educativas del distrito La Yarada Los Palos, mediante enlaces de radiofrecuencia (RF).

Dado el uso intensificado de estos sistemas de telecomunicaciones RF, la red existente implementada para las instituciones educativas del distrito La Yarada Los Palos, puede ser afectados por la presencia de otros sistemas RF de las mismas características y de la misma banda de operación, que pueden producir desvanecimientos o interferencias en dicho lugar.

Por lo que consideré conveniente proponer un sistema de telecomunicaciones basado en el despliegue de enlaces ópticos inalámbricos como una solución alternativa o complementaria a la red ya existente implantada para dichas instituciones educativas.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema Principal**

¿En qué medida, la propuesta de un sistema de comunicación óptica de espacio libre (FSO) como tecnología complementaria, permitirá dar soporte de los servicios de banda ancha en situaciones temporales, a una red de radiocomunicación (RF) de las Instituciones Educativas del distrito de La Yarada Los Palos, región Tacna, en el año 2022?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- a. ¿En qué medida la capacidad de transmisión del sistema de comunicación óptica FSO propuesto, dependerá de la arquitectura seleccionada para dar cobertura a las instituciones educativas de la zona de estudio?
- b. ¿En qué medida los resultados obtenidos para el margen del enlace (Mlink) para los enlaces ópticos del sistema de comunicación FSO en la zona de estudio, garantizarán su disponibilidad?
- c. ¿En qué medida el cálculo de las pérdidas obtenidas por la actividad atmosférica en la zona de estudio, incidirá en la operatividad de los enlaces ópticos inalámbricos (FSO)?

## **1.3. Justificación e importancia**

La investigación tiene su justificación debido a:

Este proyecto pretende ser una alternativa tecnológica para integrar a los estudiantes del distrito La Yarada Los Palos, al ámbito nacional e internacional, mediante el acceso a las herramientas interactivas que ofrece el internet.

Por lo que, se requerirá tomar como punto de partida las 5 instituciones educativas que se encuentran interconectadas a través de una red de radiocomunicaciones digitales (RF) que cuentan con el acceso a internet, red implementada por la

Municipalidad Provincial de Tacna. Se propondrá el empleo de enlaces ópticos FSO en reemplazo de radioenlaces RF digitales.

***Desde el punto de vista científico***, la implementación de la conectividad con una línea de internet permitirá a los estudiantes de las instituciones educativas del distrito La Yarada – Los Palos conectarse a la educación digital.

***Desde el punto de vista social***, en las instituciones educativas del distrito de La Yarada – Los Palos, su integración al ámbito nacional a través de las diversas herramientas interactivas existentes en el internet, permitirá ampliar las fronteras de su conocimiento. En este contexto, los estudiantes de las zonas rurales y periférica que no cuentan con el acceso a internet, se ven afectados en desarrollar sus competencias en el nivel educativo.

***Desde el punto de vista económico***, con la implementación del servicio educativo de calidad, el estudiante podrá reducir las barreras para adquirir los conocimientos con el aprendizaje impartido por los educandos y así mejorar su calidad de vida, articulándose al ámbito socio-económico del país.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo general**

Proponer un sistema de comunicación óptica de espacio libre (FSO) como tecnología complementaria, que permita dar soporte de los servicios de banda ancha en situaciones temporales, a una red de radiocomunicación (RF) de las Instituciones Educativas del distrito de La Yarada Los Palos, región Tacna, en el año 2022.

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a. Determinar la capacidad de transmisión del sistema de comunicación óptica FSO propuesto, tomando en cuenta la arquitectura seleccionada para dar cobertura a las instituciones educativas de la zona de estudio
- b. Determinar la disponibilidad de los enlaces ópticos del sistema de comunicación FSO propuesto en la zona de estudio, utilizando los resultados obtenidos para el margen del enlace (Mlink)
- c. Calcular las pérdidas obtenidas por la actividad atmosférica en la zona de estudio, para determinar su incidencia en la operatividad de los enlaces ópticos inalámbricos (FSO)

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del Estudio

Se tuvo acceso al repositorio de tesis nacional de Pre-Grado y Pos Grado denominado Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC).

Además, se tuvo acceso a los artículos científicos de investigadores internacionales mediante las direcciones URL de los repositorios ubicados en la World Wide Web.

#### 2.1.1 A nivel Internacional

Hassnain, Khan & Amjad (2022) en su artículo científico publicado en ScienceDirect *“Hybrid FSO/RF networks: A review of practical constraints, applications and challenges”*, manifestaron en su resumen sobre redes híbridas RF/FSO lo siguiente (texto traducido al español):

El espectro de radiofrecuencia (RF) está muy ocupado y se ha vuelto difícil agregar más canales de banda ancha para cumplir con los requisitos de los usuarios existentes. La comunicación óptica de espacio libre puede considerarse una posible alternativa, ya que ofrece varias ventajas potenciales, como conectividad confiable, enlace seguro, velocidades de datos más altas y gran ancho de banda. En consecuencia, el sistema de comunicación óptico de espacio libre (FSO), que es la tecnología inalámbrica óptica más dominante, se ha vuelto más atractivo en la era actual para implementar canales de banda ancha adicionales y puede admitir servicios que consumen mucho ancho de banda. FSO tiene beneficios atractivos, como una fácil implementación, comunicación segura heredada, mayor velocidad de datos, enlace sin interferencias y amplio espectro sin licencia. Los enlaces de comunicación FSO también son susceptibles a varias situaciones meteorológicas, como smog, niebla, centelleo, humo, nieve y polvo.

Una cuestión crítica de investigación es garantizar la conectividad en estas circunstancias adversas. La comunicación FSO se ve seriamente obstaculizada por la atenuación del enlace, la turbulencia atmosférica y las demandas de línea de vista (LOS).

Para superar estos desafíos, se pueden emplear nodos de retransmisión para mejorar el área de cobertura y la tasa de error del sistema de comunicación FSO. Sin embargo, los nodos de retransmisión no pueden superar los errores de orientación en la comunicación FSO debido a varios factores críticos, como la oscilación del edificio.

Para mejorar la disponibilidad de los sistemas FSO, una solución viable es un enlace RF de respaldo redundante para formar una red híbrida. Se propone la coexistencia de RF y sistema óptico para abordar los desafíos mencionados anteriormente y obtener beneficios de ambos espectros.

Una tecnología híbrida FSO/RF es prometedora, ya que puede mejorar sustancialmente la disponibilidad y la confiabilidad de los canales individuales y ofrece una solución única para la conectividad inalámbrica de alto rendimiento, tasas de datos comparables e insensibilidad a las condiciones climáticas. Este enfoque de hibridación puede ayudar a ambos canales a recuperar conjuntamente las deficiencias de cada tecnología y asegurar una transmisión de datos eficiente con condiciones de canal altamente variables (p.1).

Barros et al. (2010) en su trabajo de tesis *“Diseño de una red con tecnología láser inalámbrica para el Campus de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil”* manifestó lo siguiente:

Las dos tecnologías satisfacen la necesidad de capacidad en cuanto a las aplicaciones requeridas por la Red, sin embargo, FSO permite hacer un despliegue rápido en cuestión de horas para que los enlaces estén operando, mientras el tendido subterráneo de la fibra debió requerir algunos meses, en consecuencia, cada tecnología tiene sus ventajas y desventajas.

Los sistemas de FSO tienen las limitaciones en la distancia y como cualquier otra tecnología que opera en frecuencias muy altas. Sin embargo; las distancias en los ambientes de acceso de lazos locales están típicamente menos de una milla; por consiguiente, la limitación en la distancia no podría ser un problema real.

Otro rasgo que hace FSO atractivo en comparación con soluciones de microonda inalámbricas es el hecho que los sistemas de FSO no necesitan una licencia para el funcionamiento.

FSO son sumamente confiables y no están sujetos a la interferencia electromagnética (pp.109-110).

Según Gebhart et al. (2004) en su artículo científico "Measurement of Light attenuation in dense fog conditions for FSO applications", llegaron a las siguientes conclusiones (texto traducido al español):

Se realizaron mediciones en niebla marítima densa y se compararon con los modelos de atenuación de luz de Kruse y Kim.

Como muestran nuestros resultados, básicamente no se encontró dependencia de la longitud de onda para visibilidades por debajo de unos pocos cientos de metros para las longitudes de onda investigadas entre 550 y 950 nm, lo que indica que el modelo de Kim se ajusta mejor a los datos de medición.

Sin embargo, debido a la distribución del tamaño de las partículas de los diferentes tipos de niebla, puede que no sea posible encontrar un modelo que relacione correctamente la visibilidad con la atenuación en longitudes de onda IR para todas las condiciones. Especialmente para aplicaciones FSO, también son de interés las características de la niebla en el dominio del tiempo y posiblemente también en el dominio espacial (p.11).

Awam et al. (2009), en su trabajo de investigación "*Characterization of Fog and Snow Attenuations for Free-Space Optical Propagation*" sobre la caracterización de la atenuación de la niebla continental o de radiación y la atenuación por nieve, utilizando la metodología de variación de tiempo de la potencia de recepción óptica durante la niebla continental y la nevada seca en una distancia de enlace de 80 m, concluyeron que:

La medición de los perfiles de densidad correspondientes a los eventos de niebla y nieve nos brinda información muy útil sobre la intensidad de la niebla y la nieve seca y los niveles esperados de atenuaciones ópticas.

Con base en los valores observados de humedad relativa, temperatura y atenuación específica, para el caso del enlace FSO,

propusimos un modelo empírico simple para predecir atenuaciones ópticas en caso de niebla continental que mostró una fuerte correlación con la temperatura y la humedad relativa.

Además, investigamos los desafíos impuestos en el diseño y el rendimiento de los enlaces FSO terrestres al investigar la influencia de la nieve seca y las condiciones de niebla continental teórica y empíricamente (p.544)

### **2.1.2 A nivel nacional**

Según Quesquén (2019), en el desarrollo de su investigación denominada “Diseño Y Configuración De Un Sistema De Comunicaciones Basado En Transmisión Óptica En El Espacio Libre - FSO y Redundancia Con Enlace Wireless Punto A Punto De 5.8 GHz Para Sedes Empresariales en la Ciudad De Lima”, donde explica el diseño de una red óptica inalámbrica la cual servirá para el envío de voz y datos en la ciudad de Lima, es decir se diseñará esta red para comunicar dos sedes que se ubican dentro del distrito de San Isidro, cabe mencionar que este tipo de red actualmente está en constante crecimiento por su nivel de funcionamiento y versatilidad , debido a que operan el medio ambiente sin la necesidad de cables o equipos complejos tanto en su manejo como la configuración .

Para Gallegos (2009) en el trabajo de tesis “Diseño de una red óptica inalámbrica para el envío de voz y datos en áreas no urbanas”, manifestó en el resumen lo siguiente:

Se realizó un estudio sobre las tecnologías existentes, llegando a la conclusión que la que mejor se adapta es la Red Óptica Inalámbrica. Por lo que una vez elegida la tecnología se procede a analizar las condiciones donde se instalará esta, por lo que se llega a la conclusión que la mejor zona de instalación es la ciudad de Tacna, ya que debido a su clima y su geografía asegura un buen desempeño de esta tecnología.

Una vez elegido el lugar, se analizan diferentes modelos de cañones de luz, y se procede a elegir el modelo SONAbeam 155-M, se analizará a fondo este modelo, llegando a la conclusión que su uso es altamente eficiente para el enlace que se requiere implementar.

## 2.2 Bases Teóricas

### 2.2.1 El espectro electromagnético

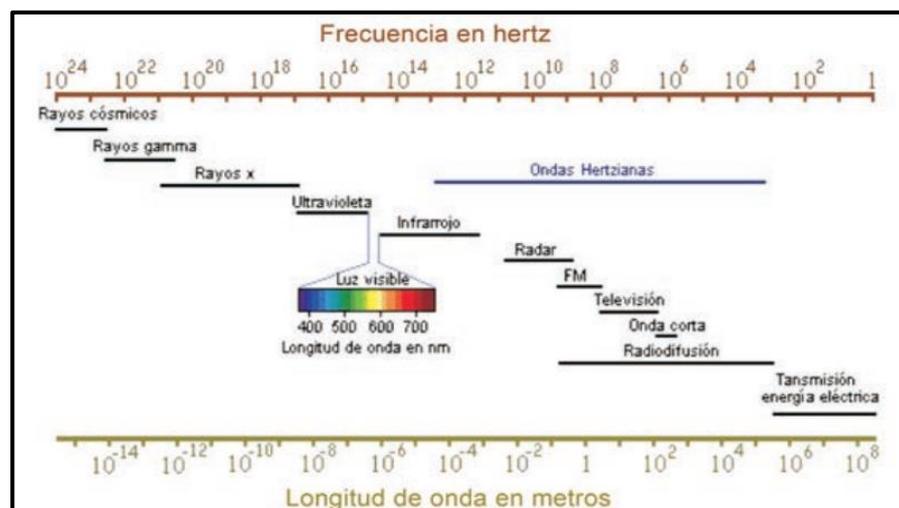
Al flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética. Esta radiación puede ser de origen natural o artificial. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética.

No todas las ondas electromagnéticas tienen el mismo comportamiento en el medio de propagación, la misma procedencia o la misma forma de interacción con la materia. Por ello, el espectro electromagnético se divide convencionalmente en segmentos o bandas de frecuencia.

En la figura 1 se muestra La División del Espectro Electromagnético. Esta división se ha realizado en función de diversos criterios, y en todo caso no es exacta, produciéndose en ocasiones solapamientos en las bandas, pudiendo una frecuencia quedar por tanto incluida en dos rangos (por ejemplo, debido a diferentes fenómenos físicos que originan la radiación, o a diferentes aprovechamientos de la energía radiada a una frecuencia concreta).

**Figura 1**

*División del espectro electromagnético*



Nota. Disponible en: <https://cutt.ly/7NriJeU>

### 2.2.1.1. Espectro visible

Se denomina espectro visible a la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. La radiación electromagnética en este rango es denominada luz visible o luz, y se manifiesta al ser humano en un conjunto continuo de colores y tonalidades.

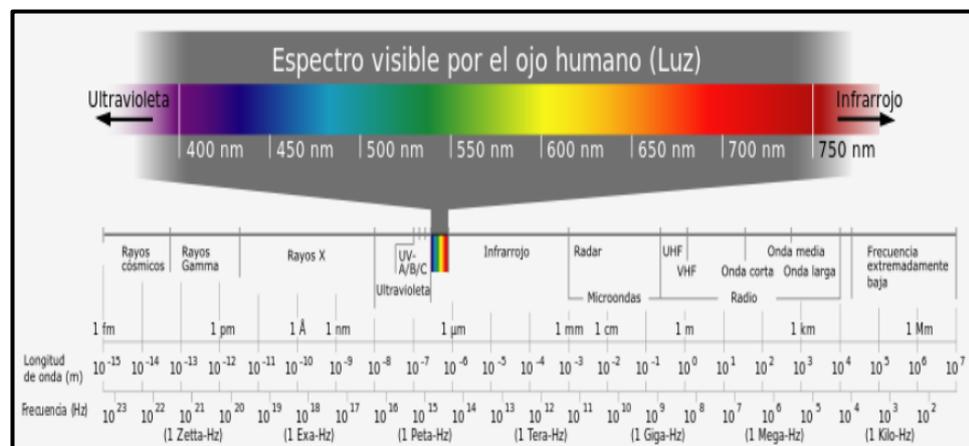
El espectro visible se encuentra entre la radiación infrarroja y la radiación ultravioleta, que reciben sus nombres precisamente por encontrarse sus frecuencias por debajo del rojo o por encima del violeta respectivamente. La radiación electromagnética de la luz visible es empleada en infinidad de disciplinas sociales y científicas, y se corresponde con la percepción visual del mundo. Es además una radiación no ionizante, no afectando a las estructuras moleculares.

No existen límites exactos en esta división del espectro, ya que depende en gran medida de la diferente sensibilidad de las personas a los colores. El ojo humano dispone de conos, elementos que son sensibles a las radiaciones de rojo, verde y azul. La mayor sensibilidad está en torno a 555 nm, en la región verde del espectro visible. Un ojo humano típico percibe como luz visible las longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nm, si bien algunas personas pueden percibir longitudes de onda de 380 a 780 nm.

En la figura 2 se observa el Espectro Visible, éste incluye todos aquellos colores que pueden ser producidos por la luz visible de una única longitud de onda (luz monocromática). Estos son los denominados colores espectrales puros. Cada longitud de onda de la luz es percibida como un color espectral puro, en un espectro continuo.

**Figura 2**

*El espectro visible*



Nota. Disponible en: <https://cutt.ly/7NriJeU>

### 2.2.1.2. Clasificación por banda óptica de operación

Según Vildoza (2021, p.27), indica que actualmente los transmisores FSO tienen un rango de operaciones según la banda a la que pertenece:

- a. Banda de operación-O  
Su nombre es Banda original, el rango de longitudes de onda es de 1260 – 1360 nm trabaja en la segunda ventana.
- b. Banda de operación-E  
Su nombre es Banda Extendida, el rango de longitudes de onda es de 1360 – 1460 nm. Solo es accesible a fibras allwave.
- c. Banda de operación-S  
Su nombre es Banda corta, el rango de longitudes de onda es de 1460 – 1530 nm. Trabaja en la parte alta de la tercera ventana de operación.
- d. Banda de operación-C  
Su nombre es Banda Convencional, el rango de longitudes de onda es de 1530 – 1565 nm. Trabaja en la tercera ventana de operación en el rango de EDFA.
- e. Banda de operación-L  
Su nombre es Banda larga, el rango de longitudes de onda es de 1565 – 1625 nm. Trabaja en el límite de rango EDFA.
- f. Banda de operación-U  
Su nombre es Ultra Larga, el rango de longitudes de onda es de 1625 – 1675 nm. Aun no se conoce su rango de operación.

### 2.2.2 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 visión directa. Los sistemas operan tomando una señal estándar de datos o telecomunicaciones, convirtiéndola a formato digital y enviándola a través del espacio libre. El transporte utilizado para la transmisión de esta señal es la luz infrarroja, generada por LED de alta potencia o diodo(s) láser de baja potencia.

Los sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas están recibiendo actualmente una gran consideración por su capacidad para conseguir elevadas tasas binarias como consecuencia directa del enorme ancho de banda disponible. Su

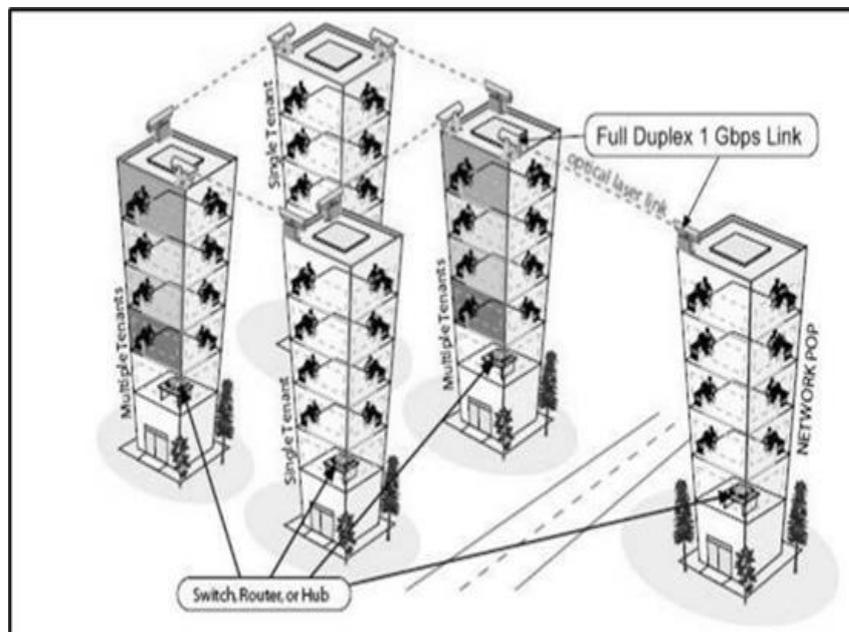
aplicación puede tener un gran interés tanto en zonas urbanas densamente pobladas como en zonas rurales donde la diseminación no justifique el despliegue de enlaces cableados.

En la figura 3 se muestra una Red de enlaces ópticos no guiados. El sistema óptico no guiado que utiliza la tecnología FSO, es uno de los más utilizados hoy en día para cubrir las necesidades de conexión hacia la última milla, interconexión de puntos, respaldo de enlaces y redes ópticas, etc. Estos enlaces tan robustos ofrecen a los usuarios varias ventajas:

- a. Libre de interferencia RF / EM.
- b. Solución óptica de alta velocidad
- c. No requiere licencia de operación
- d. Rápida instalación
- e. Alta disponibilidad

**Figura 3**

*Red de enlaces ópticos no guiados*

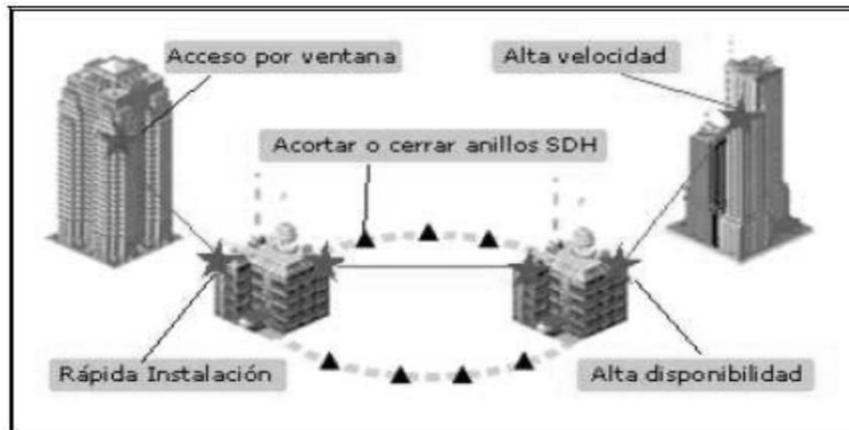


*Nota.* Adaptado de *Enlaces ópticos vía espacio libre (FSO)*, Disponible en: (<https://cutt.ly/HESAWi8>).

Tal como se aprecia en la figura 4, un enlace óptico puede facilitar la interconexión con redes físicas de alta velocidad.

**Figura 4**

*Un enlace óptico FSO dentro de una MAN*



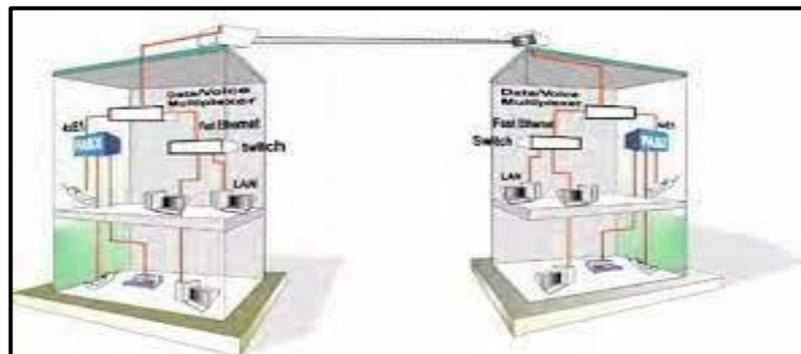
*Nota.* Tomado de Diseño de una red con tecnología láser inalámbrica.  
Disponible en: (<https://cutt.ly/TESPgwU>).

#### 2.2.2.1. FSO (Free-Space Optical).

Se define como el enlace de radiocomunicaciones que utiliza ondas ópticas sin ningún medio guiado (ITU, 2007). Los sistemas FSO trabajan en la región IR del espectro electromagnético. Usan las longitudes de onda cerca del espectro visible, cuyos valores están cerca de 850 y 1550 nm. 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. (Caizaluiza, 2008). En la figura 5 se observa un Sistema óptico FSO.

**Figura 5**

*Sistema óptico FSO*



*Nota.* Imagen obtenida de Redes de banda ancha. Disponible en: <https://cutt.ly/BNyfsqM>

Para Domeño y Medrano (2008), el objetivo de las Free Space Optics (FSO) “es transmitir información por el espacio libre utilizando señales ópticas similares a las que viajan a través de las fibras ópticas. Las FSO permiten conectar edificios cercanos entre sí de una forma barata y sencilla, al no tener que hacer prácticamente ninguna obra. Además, los anchos de banda que proporcionan son muy grandes, gracias a que la información viaja en señales luminosas”.

Los sistemas FSO cuentan con una serie de ventajas frente a otras tecnologías basados en radiofrecuencias:

- a. Los haces láser son altamente directivos y se hace muy complicado interceptarlos sin que el propietario se percate de ello;
- b. tampoco pueden ser detectados mediante analizadores de espectro ni detectores de potencia de RF;
- c. son invisibles al ojo humano así que su presencia no resulta evidente.
- d. Además, la información puede transmitirse de forma cifrada, al igual que en el resto de comunicaciones digitales, lo que proporciona un grado de seguridad aún mayor.

Entre las principales desventajas que presentan los sistemas ópticos FSO se encuentran:

- 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. La posibilidad de obstrucción del enlace, por ejemplo, por pájaros. Dado que éste es un hecho inevitable, la única solución es la redundancia en los equipos transmisores y receptores.
- c. Estabilidad de los edificios: para que el enlace por FSO funcione correctamente, emisor y receptor deben estar perfectamente enfrentados. Cualquier pequeño desplazamiento de uno de ellos conllevaría la caída del enlace. Por ello, en el diseño deben tenerse en cuenta los movimientos a los que están sujetos los edificios. Esto se ha logrado, y el equipamiento

comercial está preparado para soportar la mayoría de los movimientos a los que pueden verse sometidos.

- d. 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.
- e. Salud pública: las FSO emiten al espacio una gran potencia luminosa concentrada en haces láser invisibles. Si esta potencia incide sobre la retina de los ojos de las personas, puede quemarla y provocar graves trastornos de visión. Por ello, es muy importante que se asegure la inocuidad de la utilización de las FSO en zonas transitadas por el público.

Los sistemas FSO utilizan las mismas longitudes de onda que en los sistemas de comunicación por fibra óptica. Se aprovecha de esta forma la tecnología ya desarrollada para las comunicaciones convencionales de fibra óptica: led's, láseres, moduladores, demoduladores y fotodiodos.

### **2.2.3 Funcionamiento de un sistema FSO**

Esta tecnología emplea rayos de luz a través del aire para propagar información a altas velocidades, opera en la región infrarroja y emplea las longitudes de onda cerca del espectro visible, por lo que presentan propiedades similares de propagación que la luz visible, con valores entre 850 y 1550nm, correspondientes a frecuencias de unos 200 THz.

El principio de funcionamiento de los sistemas FSO es el siguiente (Lándsberg, 1983), (Mohamed, 2009):

- a. Se colocan los transmisores que envían una señal modulada hacia los receptores de forma segura (eye-safe) y confiable (carrier class) en los lugares de interés y también se transmiten entre ellos haces láser infrarrojos que pueden transportar desde mensajes de Internet, vídeo, señales de radio hasta ficheros informáticos. La velocidad de transmisión de estos enlaces se encuentra entre los 100 Mbit/ s y los 2,5 Gbit/s. Experimentalmente se han logrado velocidades de transmisión de hasta 1,6 Gbit/s. Por lo tanto, ofrece prestaciones similares a la fibra óptica.

- b. Las ondas de información, en formato eléctrico arriban al transmisor, para transformarse en señales ópticas. Se emplea modulación en potencia porque no es realmente una modulación de amplitud, ya que se cambia la potencia de la señal óptica para que, al enviar un uno lógico, la intensidad de la señal sea mayor que al transmitir un cero lógico. Un enlace FSO es exactamente igual que un enlace convencional de fibra, pero que utiliza un canal de transmisión diferente. FSO no necesita licencia para operar y son completamente inmunes a interferencias radioeléctricas o electromagnéticas. (Nogueira, 2007).

#### **2.2.4 Topologías para enlaces FSO**

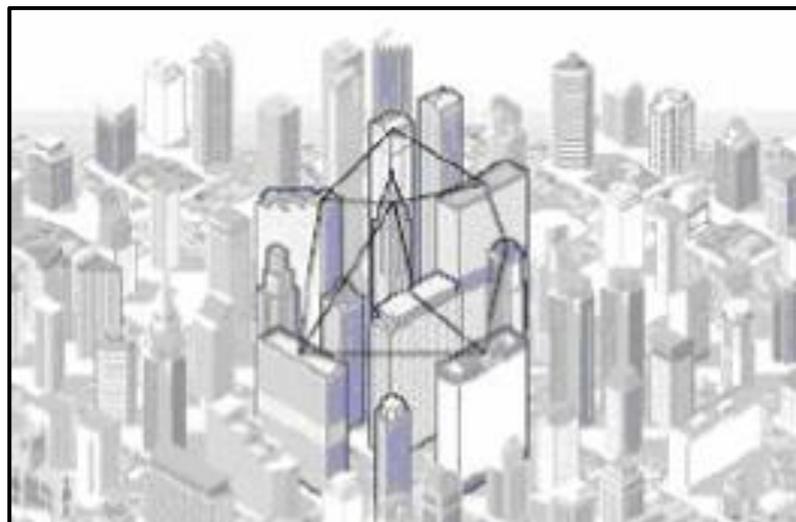
Un aspecto que tenemos que tener en cuenta y es fundamental al diseñar sistemas FSO es la topología a emplearse. FSO puede trabajar en todas las topologías de red (punto-punto, punto-multipunto, malla, anillo y anillo con estribaciones), esto posibilita ampliar la red de acuerdo a la demanda y operar a velocidades de la fibra óptica. (Nogueira D., 2007).

##### **2.2.4.1. Topología en forma de malla**

Son una serie de nodos que están constituidos con cierta redundancia. Cualquier red interconectada de este tipo, nos permite enlazar nodos con otros nodos. La figura 6 muestra la Arquitectura en forma de malla.

**Figura 6**

*Arquitectura en forma de malla*



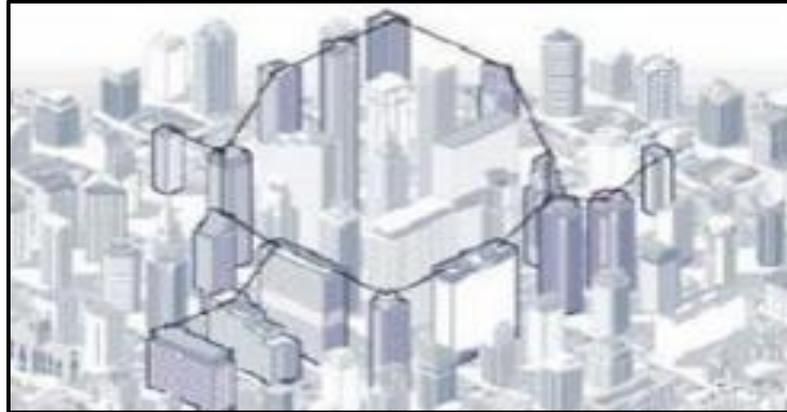
*Nota.* (Sadaiti, 2010)

#### 2.2.4.2. Topología en forma de anillo con derivaciones

Esto nos permite instaurar anillos con una velocidad alta en representación del núcleo, mediante fibra o FSO. Lo cual hace posible enlazar sub-anillos mediante un router de capa 3. La figura 7 muestra la Arquitectura en forma de anillos con derivaciones.

**Figura 7**

*Arquitectura en forma de anillo con derivaciones*



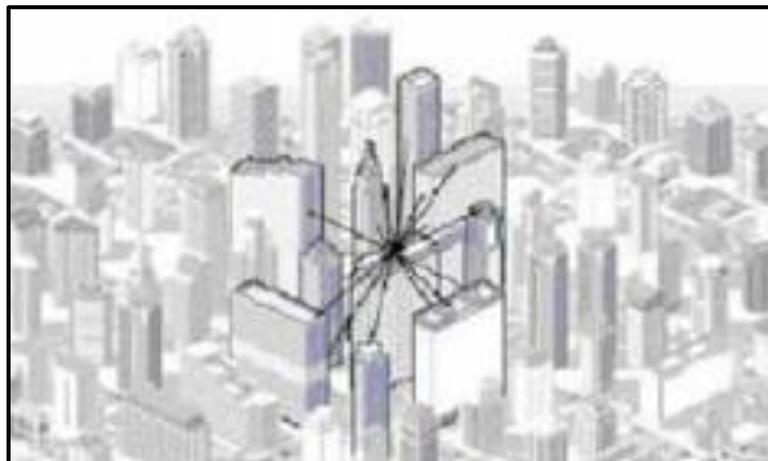
*Nota.* (Sadaiti, 2010)

#### 2.2.4.3. Topología en forma de estrella

La topología estrella está constituida por varias conexiones a partir de un solo nodo. En las que posee diversas maneras para implementar esta topología en FSO, pero el que más se utiliza es la conexión de cada enlace FSO con un terminal de capa dos o tres ubicado en una edificación cercana. Sus conexiones se juntan mediante fibras al switch o al router y son ubicadas en posiciones arbitrarias en el techo de la vivienda o en un cuarto u oficina. La figura 8 muestra la Arquitectura en forma de estrella.

**Figura 8**

*Arquitectura en estrella*



*Nota.* (Sadaiti, 2010)

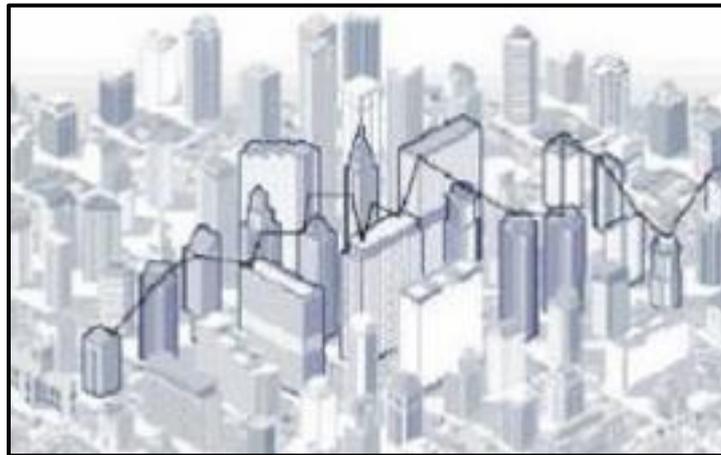
Esta topología tiene la ventaja de que a cada puerto en el switch o en el router puede asignársele una velocidad determinada dependiendo de la clase de aplicación del usuario final. Por lo que esta arquitectura de red tiene la forma más dúctil de intercambiar información de un solo punto a múltiples puntos.

#### **2.2.4.3. Topología de enlaces punto a punto**

Es utilizado cuando se necesitan hacer conexiones amplias que pueden sobrepasar los límites de los elementos FSO o de las condiciones atmosféricas hechas para alcances con enlaces ópticos, de este modo algunos enlaces punto a punto se conectan sin necesidad de dispositivos intermedios. La figura 9 muestra la Arquitectura de enlaces punto a punto.

**Figura 9**

*Arquitectura de varios enlaces punto a punto*



*Nota.* (Sadaiti, 2010)

#### **2.2.5 Pérdidas en un sistema FSO**

Las pérdidas que se producen en un enlace FSO se deben tener muy en cuenta ya que pueden afectar de manera significativa la calidad de la transmisión. Las de mayor impacto se explicarán a continuación.

##### **2.2.5.1. Pérdidas ópticas**

Esto sucede por la imperfección en los lentes y otros dispositivos ópticos. Por lo que se debe considerar que el lente propaga el 96% de luz incidente aproximadamente y absorbe el 4% restante, esta característica es la pérdida óptica y deberá considerarse

al diseñar un sistema. Las pérdidas producidas dependen de las propiedades del dispositivo y las características del lente y estarán determinadas en la producción de los elementos ópticos.

Al diseñar este sistema será ventajoso diseñar un cuadro como el que se mostrará en la tabla 1 con valores a manera de ejemplo: una potencia de salida de 4mW o sea 6dBm para una pérdida óptica de 4 dB, valor que se restará del valor de potencia inicial. En la tabla 1 se incluyen estos datos y se irán añadiendo las pérdidas que se vayan calculando por otros factores en la evaluación del enlace.

**Tabla 1**

*Deducción del enlace*

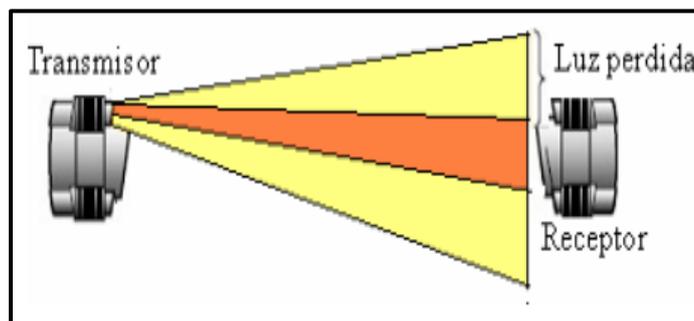
Descripción	Valor	Unidad
Potencia de transmisión	6	dBm
Pérdidas Ópticas	-4	dB

#### 2.2.5.2. Pérdidas geométricas

Esto está comprendido por pérdidas producidas a causa de la divergencia del rayo de luz. Como ya se dijo el láser no es tan puntual y se ensancha mientras se propaga. Esa divergencia producida, mostrará el ángulo de apertura del rayo, el cual dependerá del área de cobertura en el receptor y es inversamente proporcional a la potencia recibida. El uso de detectores activos disminuye la divergencia del rayo, sin embargo, los equipos que no lo utilizan tienen que diseñarse para que, al ocurrir una oscilación del rayo, parte de él arribe al receptor manteniendo la conexión, ya que esto ocurre porque el rayo es absorbido por el receptor y su ángulo presenta forma cónica, como se verá en la figura 10.

**Figura 10**

*Divergencia del rayo*

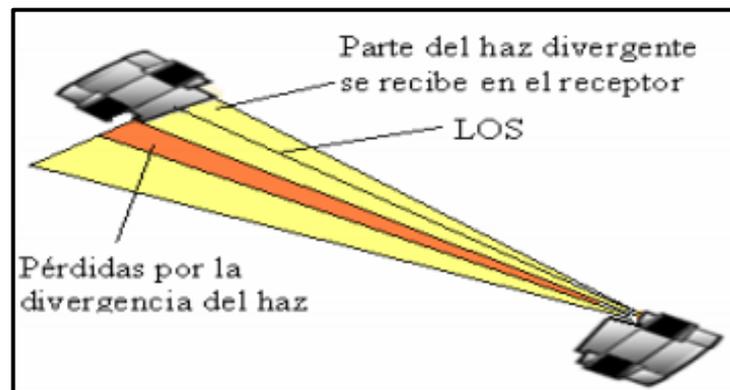


*Nota.* (Nogueira D., 2007)

Al disminuir la divergencia del rayo, una cantidad aumentada de luz ingresa al receptor, entonces esto dificultará que el rayo esté alineado en los equipos. En la figura 11 se aprecia el efecto de un ángulo de divergencia del rayo más amplio, adaptándose a las oscilaciones generadas por movimientos de las estructuras de instalación o a causa de fuertes vientos. Sin embargo, si se tiene un ángulo más angosto cualquier variación provocaría el desajuste del rayo.

**Figura 11**

*Angulo de divergencia más extenso del rayo*

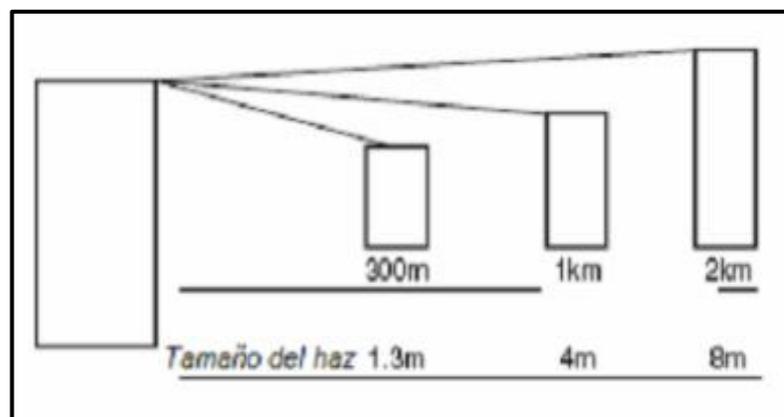


*Nota.* (Nogueira D., 2007)

La pérdida geométrica sería igual a la relación entre el área del receptor y la del rayo obtenido, esto será determinado empleando una ecuación geométrica teniendo en consideración que la divergencia se origina a una velocidad constante después que el rayo sale del emisor. En la figura 12 se observa un rayo emitido, teniendo un diámetro de 300m, 1Km y 2Km, viéndose el incremento del diámetro al igual que la distancia.

**Figura 12**

*Tamaño del haz proyectado*



*Nota.* (Nogueira D., 2007)

En teoría la propagación del rayo es precisa y lineal, es por eso que existen equipos fabricados para operar obviando la dispersión de Rayleigh, por lo tanto, el radio del rayo emitido y el área de la onda recepcionada se obtiene mediante la expresión (2-1) y (2-2) respectivamente (Nogueira D., 2007), (Ledesma, 2012). Ecuación 1:

$$Radio = \left( \frac{Diametro\ de\ optica\ recibida}{Diametro\ de\ optica\ transmitida + Distancia * divergencia\ del\ angulo} \right) \quad (1)$$

Para el diámetro expresado en centímetros, la distancia en kilómetros y la divergencia en mili-radianes, vienen expresados por la ecuación 2:

$$\frac{A_B}{A_R} = \left[ \frac{D}{D_T \frac{R}{100 * d * \theta}} \right]^2 \quad (2)$$

Donde:

AB=área del haz

AR= área del receptor

El valor de esta relación se puede extraerse en decibelios. Para un mejor entendimiento de este enunciado, se hace el análisis de la ecuación dada para la relación AB/AR mediante un ejemplo: para un diámetro del rayo emitido 3cm, el del receptor es 8cm y una divergencia de 2 mrad, a una distancia de 1Km la pérdida estaría dada por la ecuación 3:

$$\frac{A_B}{A_R} = 0,001569 = -28dB \quad (3)$$

En el caso de sistemas que funcionan con variados rayos para emitir información o en los que los rayos no son equivalentes, la determinación de la pérdida geométrica es más difusa, pero el concepto fundamental continúa similar. En la tabla 2 se tiene las pérdidas geométricas agregadas a los valores anteriores.

**Tabla 2**

*Pérdidas geométricas*

Descripción	Valor	Unidad
Potencia de transmisión	6	dBm
Perdidas Ópticas	-4	dB
Perdidas geométricas	-28	dB

### 2.2.5.3. Pérdidas en el aire y sensibilidad en el receptor

La atenuación de la conexión FSO y la disminución de onda son producidas por el aire de varias formas, como la absorción, dispersión y centelleo, quienes cambian en el tiempo y dependerán de las condiciones atmosféricas. Para el término de la evaluación de la conexión se deberá conocer la distancia a la que puede instalar el transmisor y el receptor, esto permitirá establecer el rango de desvanecimiento de la conexión para lograr un alcance determinado y así poder obtener la seguridad de la conexión. La capacidad del detector para emplear el rango de energía obtenida se mide a través de la sensibilidad, el que dependerá de la velocidad de modulación de la onda entrante, altas velocidades implican una mayor cantidad de bits en la unidad de tiempo que poseen pocos fotones para ser detectados y recibidos, lo cual hace muy difícil poder diferenciar los estados lógicos 1 y 0. FSO tiene codificación binaria simple y códigos NRZ.

Dependiendo de la clase de receptor empleado existe un rango teórico de una potencia de onda mínima que es perceptible a pesar del ruido de fondo que puede producirse de fuentes como la luz del ambiente, el ruido de disparo que genera oscilaciones estadísticas en una medición y el ruido térmico provocado por el movimiento aleatorio de electrones en los conductores. El uso de diodos APD aumentan el ruido durante la amplificación.

Cuando diseñas un equipo se debe conocer la energía de las fuentes de ruido para determinar la sensibilidad y verificar los detalles de fábrica, en caso estos datos no estén disponibles, sería posible obtenerlos empleando un medidor de potencia óptica y otro de BER. A causa del ruido se incrementa la tasa de error a un límite definido que puede elegirse según la aplicación y alta tasa de propagación.

En la tabla 3 se incluye 17 dB como margen de enlace señalado para proteger la conexión ante efectos del aire.

**Tabla 3**

*Deducción del enlace incluyendo el margen de enlace*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Potencia de transmisión	6	dBm
Pérdidas Ópticas	-4	dB
Pérdidas geométricas	-28	dB
Margen de enlace	17	dB

#### 2.2.5.4. Margen de enlace

En el margen de enlace se relaciona con el rango dinámico, es decir la diferencia en decibelios entre el valor mínimo de entrada requerido para discernir una onda, es decir la sensibilidad del receptor y el máximo que sobrecarga el receptor FSO, este nivel genera inconvenientes de saturación produciendo alinealidades, para lo cual se da en enlaces cortos donde la señal se atenúa poco en el aire. Un valor típico del rango dinámico es de unos 30 decibelios que da a entender que el máximo valor de señal que se pueda detectar es mil veces más grande que el mínimo que se requiere, cabe indicar en este punto que un valor de rango dinámico alto permite que el enlace sea más versátil y fuerte en FSO (Nogueira D. 2007).

#### Generalidad del margen de enlace

La siguiente ecuación 4 nos permite establecer la potencia recibida en el receptor:

$$P_{recibida} = P_{transmitida} * \frac{L \cdot D^2}{d^2 R^2 1e6} * 10^{-a \cdot R / 10} \quad (4)$$

Donde:

P: potencia (mW)

L: pérdidas ópticas en el transmisor y receptor (dB)

D: diámetro de apertura del receptor (m)

D: divergencia del haz (radianes)

R: rango (Km)

A: atenuación atmosférica (dB)

La potencia recibida es la mínima necesaria y depende de la sensibilidad del receptor, por tanto, en margen de enlace en función de la sensibilidad se obtiene de la ecuación 5:

$$\text{Margen de enlace} = 10 \cdot \log \left( \frac{P_{recibida}}{S} \right) \quad (5)$$

Donde:

S: sensibilidad del receptor

También, será posible determinar el margen de enlace en función del rango de enlace y la atenuación atmosférica, como se muestra en las ecuaciones 6 y 7:

$$\text{Margen de enlace} = 10 \cdot \log \left( \frac{P \text{ trans.} L \cdot D^2}{S \cdot d^2} \cdot \frac{10^{(-\alpha \cdot \frac{R}{10})}}{1e6 \cdot R^2} \right) \quad (6)$$

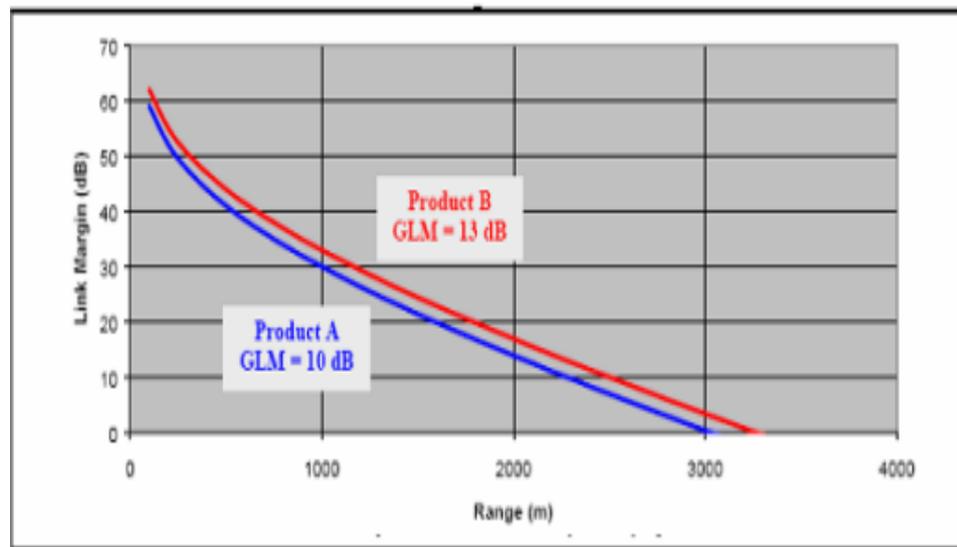
$$= 10 \cdot \log \left( \frac{P \text{ trans.} L \cdot D^2}{S \cdot d^2} \right) + 10 \cdot \log \left( \frac{10^{(-\alpha \cdot \frac{R}{10})}}{1e6 \cdot R^2} \right) \quad (7)$$

Como se podrá visualizar, vemos que el margen de enlace pertenece a la suma de un componente que envuelve las circunstancias determinadas del enlace, es decir, la atenuación que debe vencerse para así conservar operativa la conexión y un segundo componente dado por las medidas que incluyen al rendimiento del sistema FSO, lo que quiere decir es que la medida de la capacidad del sistema para vencer esa atenuación, siendo los dos componentes independientes.

En la siguiente figura 13 se observará el margen de enlace en función del alcance para una atenuación de 10 dB/Km y en la figura 14 se observa el margen de enlace en función de la atenuación atmosférica para 1Km de enlace, las dos imágenes representan al producto A y al producto B.

**Figura 13**

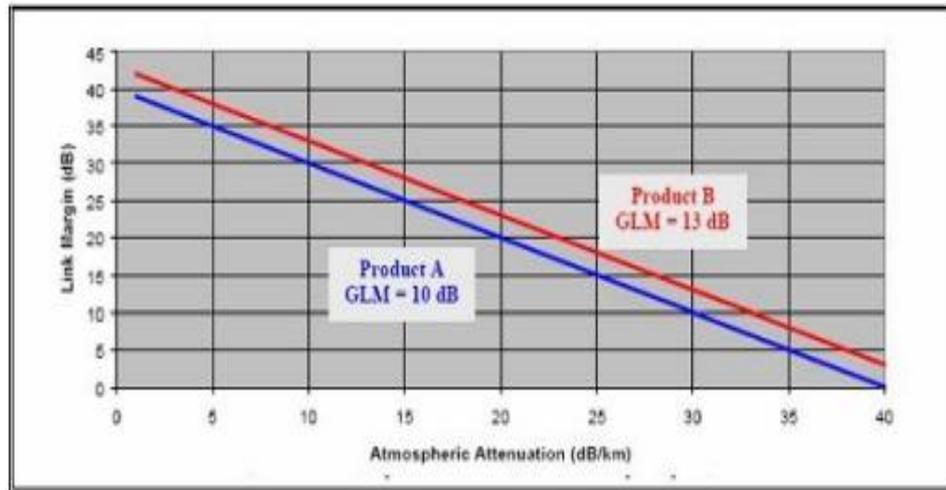
*Margen de enlace en función del alcance para atenuación de 10 dB/Km*



*Nota.* (Nogueira D., 2007)

**Figura 14**

*Margen de enlace en función de la atenuación atmosférica para 1Km*



*Nota.* (Nogueira D., 2007)

### 2.3 Definición de términos

**Atenuación Atmosférica:** La atenuación atmosférica es definida por la “Ley de Beer- Lambert”, la cual explica la atenuación de la luz viajando a través de la atmósfera debido a la absorción y dispersión. (Caizaluiza, 2008).

**Coefficiente de absorción:** Es el resultado de la absorción de energía que hace el medio (atmósfera) y ciertas partículas.

**Coefficiente de dispersión de Rayleigh:** Es el resultado de la interacción de la luz con partículas de tamaño pequeño en relación a la longitud de onda.

**Coefficiente de dispersión de Mie:** Aparece cuando las partículas incidentes son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la onda transmitida.

**F.S.O.** (del acrónimo inglés Free Space Optical: Se refiere a la propagación de la señal óptica no guiada en el espacio libre.

**Meteoros:** Según un informe de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1993), un meteoro “es un fenómeno observado en la atmósfera o sobre la superficie de la tierra, que consiste en una suspensión, una precipitación, o un depósito de partículas líquidas, acuosas o de partículas sólidas, o un fenómeno de la naturaleza de manifestación óptica o eléctrica.”

**Pérdida Geométrica:** La pérdida geométrica hace referencia a las pérdidas que existen debido a la divergencia del haz óptico. Los rayos láser presentan un margen de error en su direccionamiento, estos van "abriéndose" conforme van

avanzando por la interfaz. La divergencia explica cuanto es el ángulo de apertura del láser. Este ángulo es directamente proporcional al área de cobertura en el extremo remoto, y es inversamente proporcional a la potencia recibida en el receptor del equipo remoto. (Caizaluisa, 2008)

**Pérdida Óptica:** La causa primordial de pérdida en un sistema FSO se debe a la imperfección entre los lentes y otros elementos ópticos. Por ejemplo, el lente transmite el 96% de luz y el porcentaje restante se absorbe. Entonces esta cantidad llamada “pérdida óptica” sucede en la planificación del enlace. El monto de pérdida se basa de las características del equipo y la calidad de los lentes. Este valor es medido desde la fabricación de los componentes ópticos. Por ejemplo, asumimos una potencia de la señal de salida de 4mW que corresponde a 6 decibeles por milivatio, si la pérdida óptica de la señal es de 4dB, existe atenuación en la potencia, teniendo como consecuencia una substracción de 4dB de la señal original (6dB). (Caizaluisa, 2008)

**Rango De Enlace:** Un concepto básico sobre el margen de enlace es el “rango dinámico” en un sistema FSO. Su principal definición es la diferencia entre el máximo y el mínimo nivel de potencia que un sistema FSO puede permitir. Una señal con un nivel de potencia alta, podría causar problemas de saturación en el receptor, este hecho se da en enlace de corto alcance donde muy poca luz se atenúa en la atmósfera. (Caizaluisa, 2008)

**Ruido Térmico:** Es el ruido provocado por el movimiento de los electrones en los componentes de los circuitos. (Caizaluisa, 2008)

**Sensibilidad Del Receptor:** La sensibilidad del receptor también es una función de la frecuencia de modulación de la señal recibida; frecuencias altas contienen pocos fotones que pueden ser detectados y recibidos, causando errores en diferenciar si es 1 y 0 lógico. (Caizaluisa, 2008)

**UIT:** De las siglas (Unión Internacional de Telecomunicaciones) es un organismo de las Naciones Unidas que regula los servicios de telecomunicaciones a nivel mundial.

## CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

### 3.1. Tipo y nivel de Investigación

#### 3.1.1 Tipo de Investigación

Por el tipo de investigación, el presente trabajo de tesis reúne las condiciones metodológicas de una investigación aplicada, en razón que se utilizaron los fundamentos teóricos, las normas internacionales y los métodos de las Ciencias de Ingeniería, a fin de aplicarlas para la evaluación de la operatividad de los enlaces ópticos inalámbricos de tecnología FSO.

#### 3.1.2 Nivel de la Investigación

De acuerdo a la naturaleza del trabajo de tesis, reúne por su nivel las características de un trabajo descriptivo y explicativo, porque tratará de explicar las causas que inciden en la operatividad del sistema de comunicación óptica.

### 3.2. Población y/o Muestra del Estudio

#### 3.2.1 Muestra de Estudio

La muestra de estudio o la unidad de análisis propiamente dicho, consiste en un sistema de comunicación híbrida FSO para brindar el acceso de internet en las Instituciones Educativas del distrito de La Yarada Los Palos, región Tacna.

### 3.3. Operacionalización de Variables

En la Tabla 4 se muestra la operacionalización de variables de nuestro trabajo de investigación, la cual consideró una variable de estudio.

**Tabla 4**

*Operacionalización de variables*

Variable de estudio	Dimensión	Instrumento	Indicadores	Unidades de medida
Sistema de comunicación óptica en el espacio libre (FSO), como tecnología complementaria a una red de radiocomunicación (RF) de las instituciones educativas del distrito La Yarada	Operatividad del sistema	Recomendación UIT-R P.1817-1	Longitud del enlace	(km)
			Longitud de onda	(nm)
			Margen del enlace óptico	(dB)

### **3.4. Técnicas, materiales y/o instrumentos para la recolección de datos**

#### **3.4.1. Técnicas de recolección de los datos.**

Se emplearon las siguientes técnicas para la recolección de datos en la presente tesis:

##### **Estudio de gabinete**

- a. Se elaboró un Plan de Trabajo para ubicar las instituciones educativas que cuentan en la actualidad con un sistema de radiocomunicación digital para el acceso a internet dentro del distrito de La Yarada.
- b. Se analizó el tipo de plataforma tecnológica que utiliza el operador América Móvil para el servicio de voz.
- c. Con los resultados obtenidos de las mediciones radioeléctricas RSRP, RSRQ y SINR, se hizo una propuesta para optimizar la cobertura de la red 4G LTE del operador América Móvil, en la zona de estudio. La propuesta consiste en utilizar dos métodos: a) reorientar las antenas de las estaciones bases; b) instalar una nueva estación base.

##### **Estudio de campo**

- a. Se hizo una visita de campo, para verificar la ubicación de las instituciones educativas en el distrito de La Yarada. La ubicación se determinó mediante geo-posicionamiento (GPS).
- b. Se verificó el estado actual del servicio de acceso a internet y la infraestructura de telecomunicaciones en los colegios de la zona de estudio.

#### **3.4.2. Instrumentos para la recolección de los datos**

Se utilizaron los siguientes equipos y dispositivos para las pruebas radioeléctricas comprendidas dentro del estudio de campo.

- a. Un equipo de posicionamiento satelital (GPS)
- b. Una laptop
- c. El sistema GIS Google Earth
- d. El software ESCALE del Ministerio de Educación
- e. Reportes de la estación meteorológica del SENAMHI-TACNA

### **3.5. Procesamiento y Análisis de Datos**

El procesamiento de datos de la investigación, consistió en la secuencia de actividades planificadas mediante el cual los datos individuales se agrupan y estructuran con el propósito de responder al problema de Investigación, a los objetivos planteados.

En el presente trabajo de tesis se va a recolectar información directa de la zona de estudio (ubicación de las instituciones educativas en el distrito La Yarada Los Palos, línea de vista de los enlaces ópticos), para luego calcular los parámetros de los enlaces ópticos inalámbricos (FSO).

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

- a. Levantamiento de información respecto a las instituciones educativas de educación primaria y secundaria del distrito La Yarada Los Palos.
- b. Ubicación geográfica de las instituciones educativas.
- c. Levantamiento topográfico de los trayectos de los enlaces ópticos FSO.
- d. Propuesta de la red de enlaces ópticos FSO.
- e. Cálculo de los parámetros de los enlaces ópticos FSO.
- f. Presentación de los resultados de los cálculos efectuados.
- g. Análisis de los resultados obtenidos, para determinar la operatividad de los enlaces ópticos.

#### **3.5.1 Levantamiento de información de las instituciones educativas en la zona de estudio**

Para la obtención de la información de las Instituciones Educativas del distrito de La Yarada Los Palos, se utilizó el sistema Escale del Ministerio de Educación, donde se pueden ubicar las instituciones educativas en las diferentes localidades a nivel nacional, tanto para zonas urbanas y rurales.

El sistema Escale cuenta con una base de datos donde se encuentra la ficha de datos del año 2021 de cada institución educativa. Dentro de la información que allí se encontró, se observó el mapa de ubicación de la I.E., el nombre del director de la I.E., el número telefónico de la I.E., además un cuadro estadístico de los alumnos matriculados en el periodo del 2004 al periodo del 2021.

La verificación de la información se realizó recorriendo gran parte de la zona de estudio. Se tomó en cuenta la ubicación exacta de las 10 instituciones educativas en el distrito de La Yarada Los Palos, región Tacna, utilizando la herramienta informática GIS Google Earth y un GPS.

Se siguió el siguiente procedimiento:

- a. Se filtró la información de las instituciones educativas del Perú que se encuentran en el distrito de La Yarada Los Palos. La figura 15 muestra el mapa de Escuelas utilizando el Sistema ESCALE del Minedu. Para ello, se tuvo que filtrar la información seleccionando: Departamento: Tacna, Provincia: Tacna y distrito: La Yarada Los Palos.

**Figura 15**

*Selección de instituciones educativas de La Yarada Los Palos con ESCALE*

Cod. Modular	Nombre de SSEE	Ubigeo	Departamento	Provincia	Distrito	Cod. Cen. Pob.	Centro Poblado	Cod. Local	Nivel	Gestión / Dep.	Altitud	Latitud	Longitud	Fuente de coordenadas	Detalle
0306837	42199 JUAN VELASCO ALVARADO	230111	TACNA	TACNA	LA YARADA LOS PALOS	539214	28 DE AGOSTO	406681	Primaria	Pública - Sector Educación	97	-18.16600000	-70.45700000	GPS_OTRAS_FUENTES (LOCAL)	
0614909	42199 JUAN VELASCO ALVARADO	230111	TACNA	TACNA	LA YARADA LOS PALOS	539214	28 DE AGOSTO	406681	Secundaria	Pública - Sector Educación	97	-18.16600000	-70.45700000	GPS_OTRAS_FUENTES (LOCAL)	
0542415	42213 HUGO SALAZAR DEL ALCAZAR	230111	TACNA	TACNA	LA YARADA LOS PALOS	572880	ASENTAMIENTO 4	406620	Primaria	Pública - Sector Educación	98	-18.14900958	-70.46583533	GPS_OTRAS_FUENTES (LOCAL)	
1569763	42213 HUGO SALAZAR DEL ALCAZAR	230111	TACNA	TACNA	LA YARADA LOS PALOS	572880	ASENTAMIENTO 4	406620	Inicial - Jardín	Pública - Sector Educación	98	-18.14900958	-70.46583533	GPS_OTRAS_FUENTES (LOCAL)	

- b. Se obtuvo la data seleccionada. El sistema Escale nos proporciona la data de las instituciones educativas rurales, donde nos proporciona características plasmadas en columnas con nombres de Código Modular, Anexo, Nombre de SS.EE., Ubigeo, Departamento, Provincia, Distrito, Código DRE/UGEL, DRE/UGEL, Centro Poblado, Código de Centro Poblado, Código Local, Dirección, Nivel/Modalidad, Gestión/Dependencia, Latitud, Longitud, Altitud, Fuente de coordenadas.

La tabla 5 muestra la información filtrada de las instituciones educativas de La Yarada Los Palos, indicando el código modular, nombre, DRE/UGEL, Centro Poblado, Nivel, Latitud, Longitud y Altitud.

**Tabla 5**

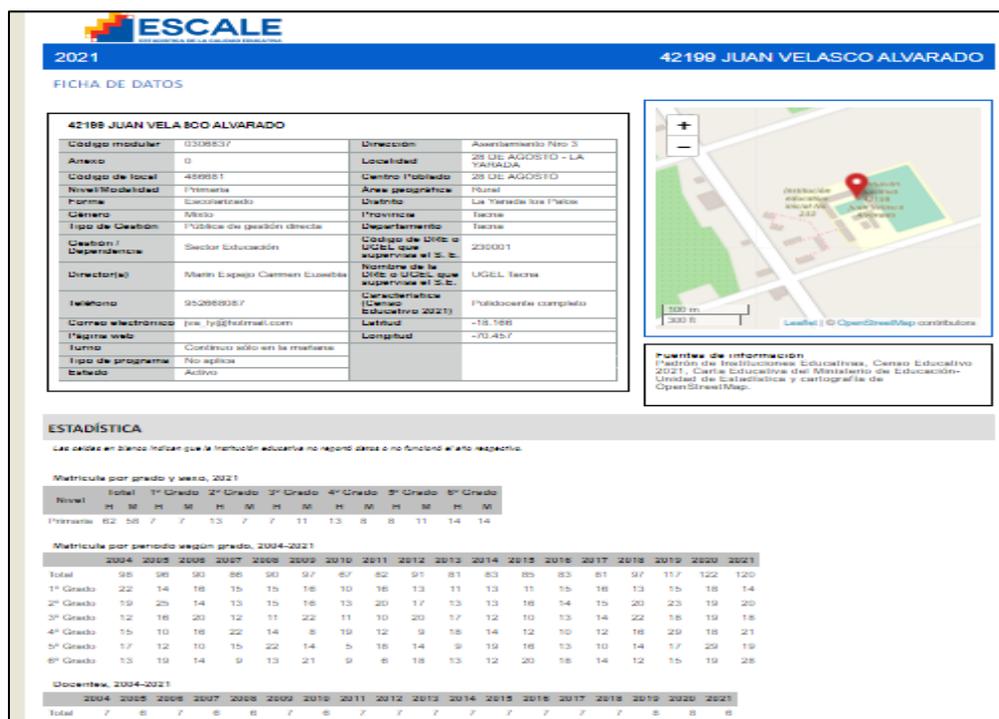
*Relación de instituciones educativas de La Yarada Los Palos*

Código Modular	Nombre de SS.EE.	DRE/UGEL	Centro	Nivel	Latitud	Longitud	Altitud
			Poblado	Modalidad			
0306837	42199 Juan Velasco Alvarado	TACNA	28 de Agosto	Primaria	-18,16600000	-70,45700000	97
0614909	42199 Juan Velasco Alvarado	TACNA	28 de Agosto	Secundaria	-18,16600000	-70,45700000	97
0542415	42213 Hugo Salazar del Alcázar	TACNA	Asentamiento 4	Primaria	-18,14900958	-70,46583533	98
0876375	42211 Alfonso Eyzaguirre Tara	TACNA	Asentamiento 5 y 6	Secundaria	-18,18320000	-70,42680000	111
0542316	42211 Alfonso Eyzaguirre Tara	TACNA	Asentamiento 5 y 6	Primaria	-18,18320000	-70,42680000	111
0306845	42200 Omar Zilbert Salas	TACNA	La Esperanza	Primaria	-18,18971236	-70,52632427	45
0321356	42065 Rómulo Boluarte	TACNA	La Yarada	Primaria	-18,18380000	-70,45880000	83
0568733	42044 Alfonso Ugarte	TACNA	Los Palos	Secundaria	-18,29130000	-70,43380000	24
0321141	42044 Alfonso Ugarte	TACNA	Los Palos	Primaria	-18,29130000	-70,43380000	24
1595735	42261 Nuevo Copare	TACNA	Nuevo Copare	Primaria	-18,12410000	-70,43070000	136
1406131	43506 Juvenal Ordoñez Salazar	TACNA	Pueblo Libre	Secundaria	-18,17522900	-70,50495600	60
1472463	43506 Juvenal Ordoñez Salazar	TACNA	Pueblo Libre	Inicial - Jardín	-18,17522900	-70,50495600	60
1595503	43506 Juvenal Ordoñez Salazar	TACNA	Pueblo Libre	Primaria	-18,17522900	-70,50495600	60
1595719	42263 Adalgiza Lázaro Villaroel	TACNA	Santa Rosa	Primaria	-18,33455400	-70,39469900	12
1533447	42263 Adalgiza Lázaro Villaroel	TACNA	Santa Rosa	Inicial - Jardín	-18,33455400	-70,39469900	12

- c. Se seleccionó la ficha de datos de cada una de las instituciones educativas, donde se muestra los datos descargados de las instituciones educativas rurales mediante el sistema Escale del Ministerio de Educación, se tomó como referencia para ubicar las coordenadas geográficas, el nivel educativo, el croquis de ubicación de la institución educativa, el número de alumnos y docentes desde el 2004 hasta el 2022. La figura 16 muestra la ficha de datos y el croquis de la ubicación, así como los datos estadísticos de alumnos y docentes en el período 2004 al 2021.

Figura 16

Ficha de datos, croquis de ubicación y datos estadísticos



- d. Se elaboró la tabla 6 de datos estadísticos de la cantidad de estudiantes y docentes en cada institución educativa de La Yarada, a fin de determinar que instituciones educativas se incluirá en la red de enlaces ópticos FSO.

Tabla 6

Datos estadísticos por institución educativa

Código Modular	Nombre de SS.EE.	Distrito	Centro Poblado	Nivel Modalidad	N° Alumnos	N° Docentes
0614909	42199 Juan Velasco Alvarado	La Yarada Los Palos	28 de Agosto	Secundaria	120	6
0542415	42213 Hugo Salazar del Alcázar	La Yarada Los Palos	Asentamiento 4	Primaria	10	1
0876375	42211 Alfonso Eyzaguirre Tara	La Yarada Los Palos	Asentamiento 5 y 6	Secundaria	153	14
0306845	42200 Omar Zilbert Salas	La Yarada Los Palos	La Esperanza	Primaria	18	1
0321356	42065 Rómulo Boluarte	La Yarada Los Palos	La Yarada	Primaria	21	2
0568733	42044 Alfonso Ugarte	La Yarada Los Palos	Los Palos	Secundaria	212	23
1595735	42261 Nuevo Copare	La Yarada Los Palos	Nuevo Copare	Primaria	10	1
1406131	43506 Juvenal Ordoñez Salazar	La Yarada Los Palos	Pueblo Libre	Secundaria	121	13
0320887	2017 Neiser Llacsa Arce	La Yarada Los Palos	Los Olivos	Primaria	97	6
1595719	42263 Adalgiza Lázaro Villaroel	La Yarada Los Palos	Santa Rosa	Primaria	7	1

### 3.5.2 Ubicación geográfica de las I.E. de la Yarada Los Palos

A continuación, se presentaron la ubicación geográfica de las 10 instituciones educativas del distrito de la Yarada Los Palos, que forman parte de la zona de estudio. Se utilizaron tanto el sistema GIS Google Earth y la ficha de datos de cada institución educativa utilizando el sistema ESCALE del Ministerio de Educación. La tabla 7 muestra las coordenadas geográficas de 10 instituciones educativas de la zona de estudio.

**Tabla 7**

*Coordenadas geográficas de las I.E. de La Yarada Los Palos*

<b>Código</b>	<b>Centro</b>	<b>Altitud</b>			
<b>Modular</b>	<b>Nombre de SS.EE.</b>	<b>Poblado</b>			
		<b>Latitud</b>			
		<b>Longitud</b>			
		<b>(m.s.n.m.)</b>			
0614909	42199 Juan Velasco Alvarado	28 de Agosto	-18,16600000	-70,45700000	97
0542415	42213 Hugo Salazar del Alcázar	Asentamiento 4	-18,14900958	-70,46583533	98
0876375	42211 Alfonso Eyzaguirre Tara	Asentamiento 5 y 6	-18,18320000	-70,42680000	111
0306845	42200 Omar Zilbert Salas	La Esperanza	-18,18971236	-70,52632427	45
0321356	42065 Rómulo Boluarte	La Yarada	-18,18380000	-70,45880000	83
0568733	42044 Alfonso Ugarte	Los Palos	-18,29130000	-70,43380000	24
1595735	42261 Nuevo Copare	Nuevo Copare	-18,12410000	-70,43070000	136
1406131	43506 Juvenal Ordoñez Salazar	Pueblo Libre	-18,17522900	-70,50495600	60
320887	2017 Neiser Llacsa Arce	Los Olivos	-18,20812	-70,51310000	40
1595719	42263 Adalgiza Lázaro Villaroel	Santa Rosa	-18,334555	-70,39470000	12

#### 1. I.E. 42199 Juan Velasco Alvarado

La figura 17 muestra la ficha de datos y el croquis de ubicación de la institución educativa.

**Figura 17***I.E. 42199 Juan Velasco Alvarado***Ubicación geográfica**

Latitud: 18°09'57,6" S

Longitud: 70°27'25,2" O

Altitud: 96 m.s.n.m

En la figura 18 se muestra la ubicación geográfica de la institución educativa.

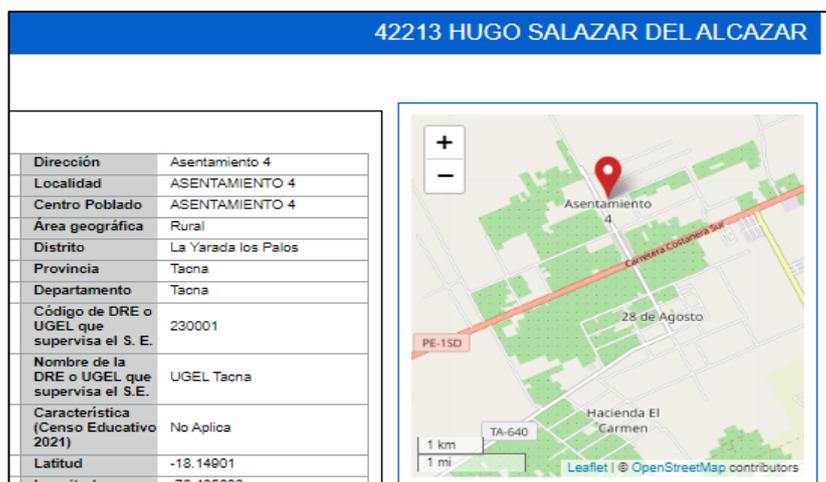
**Figura 18***Ubicación geográfica de la I.E. Juan Velasco*

## 2. I.E. 421213 Hugo Salazar Del Alcázar

La figura 19 muestra la ficha de datos y el croquis de ubicación de la institución educativa.

**Figura 19**

*I.E. 421213 Hugo Salazar Del Alcázar*



### Ubicación geográfica

Latitud: 18°08'56,4" S

Longitud: 70°27'57" O

Altitud: 99 m.s.n.m

En la figura 20 se muestra la ubicación geográfica de la institución educativa.

**Figura 20**

*Ubicación geográfica de la I.E. Hugo Salazar Del Alcázar*

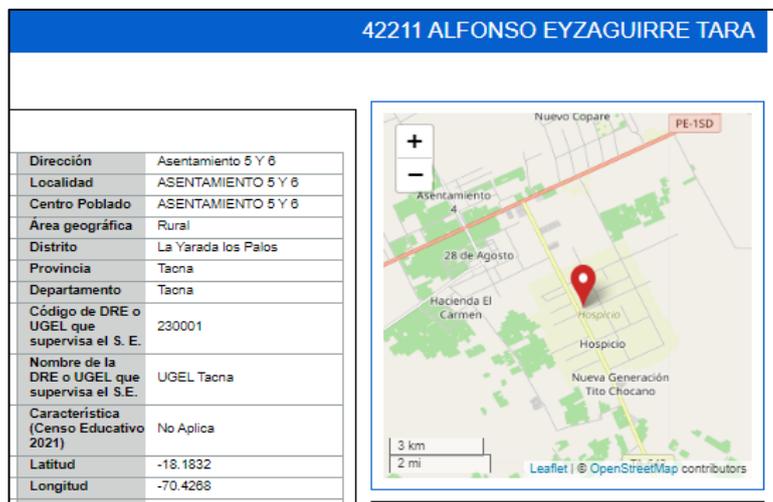


### 3. I.E. 421211 Alfonso Eyzaguirre Tara

La figura 21 muestra la ficha de datos y el croquis de ubicación de la institución educativa.

**Figura 21**

*I.E. 421211 Alfonso Eyzaguirre*



#### Ubicación geográfica

Latitud: 18°10'59,5" S

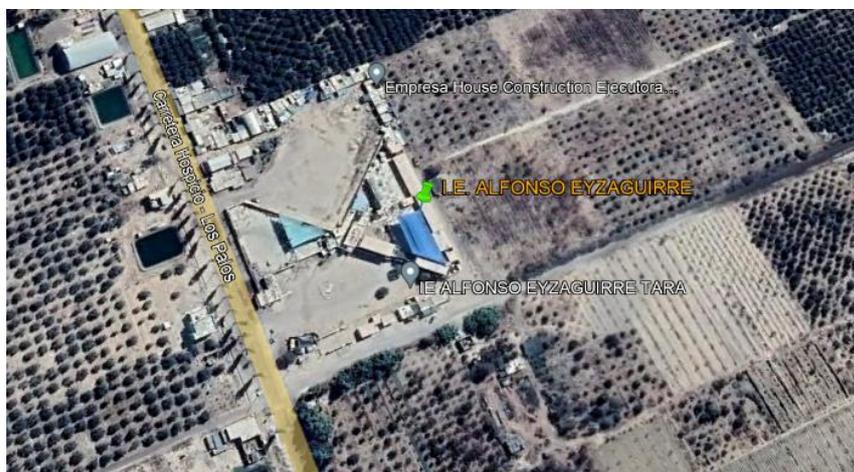
Longitud: 70°25'36,5" O

Altitud: 110 m.s.n.m

En la figura 22 se muestra la ubicación geográfica de la institución educativa.

**Figura 22**

*Ubicación geográfica de la I.E. Alfonso Eyzaguirre*

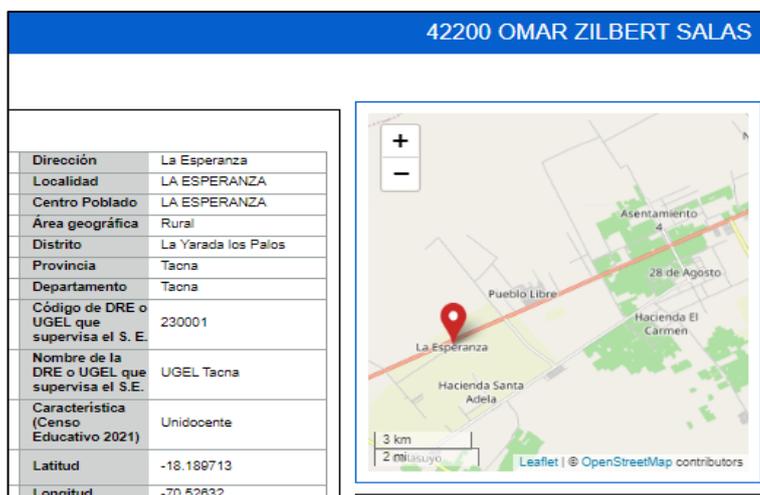


#### 4. I.E. 421200 Omar Zilbert Salas

La figura 23 muestra la ficha de datos y el croquis de ubicación de la institución educativa.

**Figura 23**

*I.E. 421200 Omar Zilbert Salas*



#### Ubicación geográfica

Latitud: 18°11'23" S

Longitud: 70°31'34,8" O

Altitud: 46 m.s.n.m

En la figura 24 se muestra la ubicación geográfica de la institución educativa.

**Figura 24**

*Ubicación geográfica de la I.E. Omar Zilbert Salas*

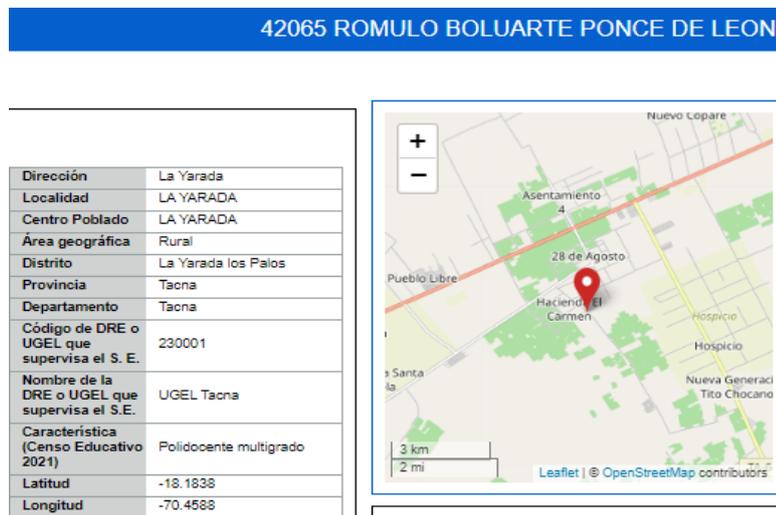


## 5. I.E. 42065 Rómulo Boluarte Ponce de León

La figura 25 muestra la ficha de datos y el croquis de ubicación de la institución educativa.

### Figura 25

*I.E. 42065 Rómulo Boluarte*



### Ubicación geográfica

Latitud: 18°11'1,7" S

Longitud: 70°27'31,7" O

Altitud: 84 m.s.n.m

En la figura 26 se muestra la ubicación geográfica de la institución educativa.

### Figura 26

*Ubicación geográfica de la I.E. Rómulo Boluarte*

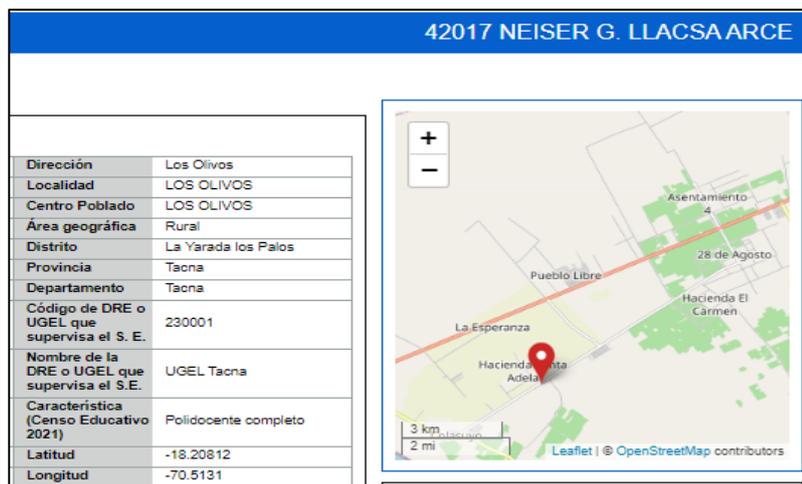


## 6. I.E. 42017 Neiser G. Llacsá Arce

La figura 27 muestra la ficha de datos y el croquis de ubicación de la institución educativa.

**Figura 27**

*I.E. 42017 Llacsá Arce*



### Ubicación geográfica

Latitud: 18°12'29,2" S

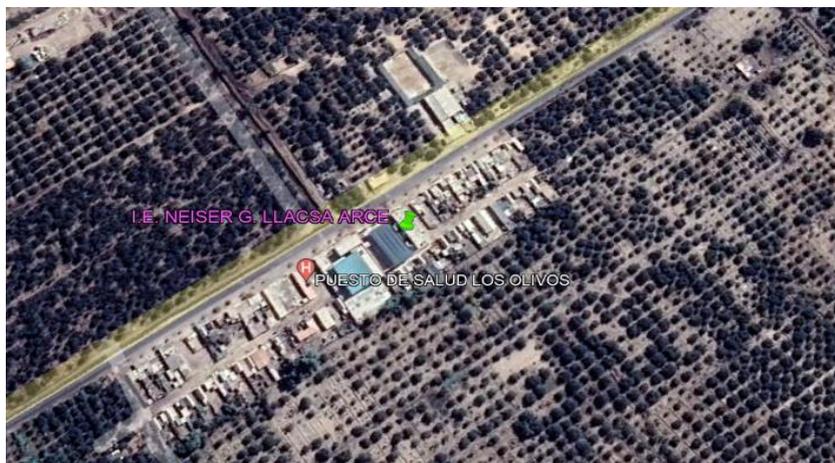
Longitud: 70°30'47,2" O

Altitud: 40 m.s.n.m

En la figura 28 se muestra la ubicación geográfica de la institución educativa.

**Figura 28**

*Ubicación geográfica de la I.E. Llacsá Arce*

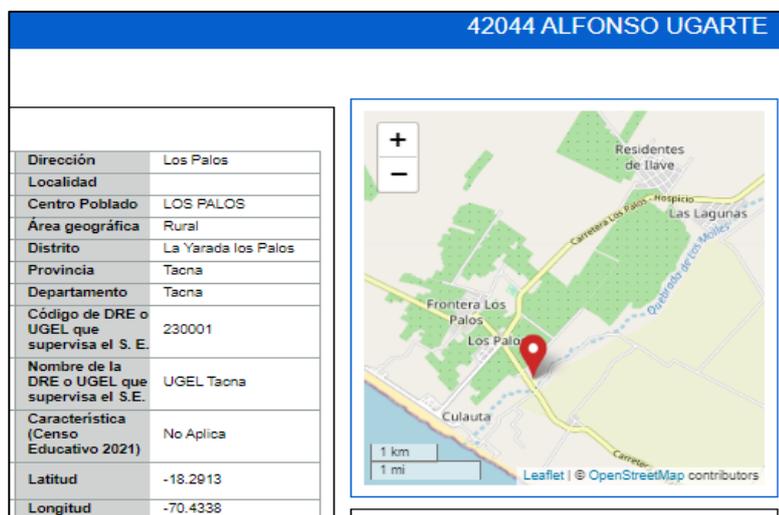


## 7. I.E. 42044 Alfonso Ugarte

La figura 29 muestra la ficha de datos y el croquis de ubicación de la institución educativa.

### Figura 29

*I.E. 42044 Alfonso Ugarte*



### Ubicación geográfica

Latitud: 18°17'28,7" S

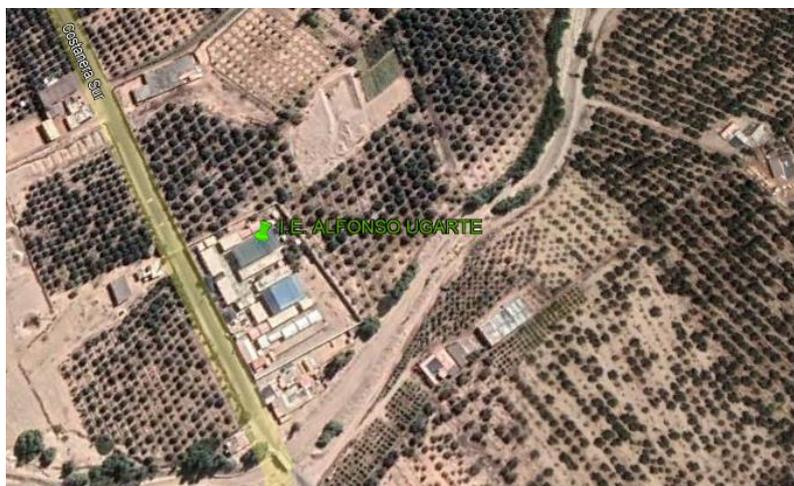
Longitud: 70°26'1,7" O

Altitud: 25 m.s.n.m

En la figura 30 se muestra la ubicación geográfica de la institución educativa.

### Figura 30

*Ubicación geográfica de la I.E. Alfonso Ugarte*



## 8. I.E. 43506 Juvenal Ubaldo Ordoñez Salazar

La figura 31 muestra la ficha de datos y el croquis de ubicación de la institución educativa.

**Figura 31**

*I.E. 43506 Juvenal Ubaldo Ordoñez*



### Ubicación geográfica

Latitud: 18°10'30,8" S

Longitud: 70°30'17,8" O

Altitud: 62 m.s.n.m

En la figura 32 se muestra la ubicación geográfica de la institución educativa.

**Figura 32**

*Ubicación geográfica de la I.E. Juvenal Ubaldo Ordoñez*

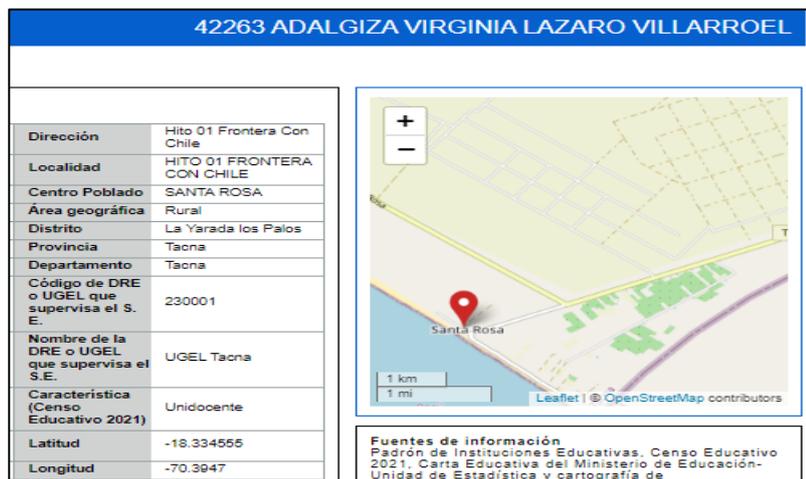


## 9. I.E. 42263 Adalgiza Virginia Lázaro Villaroel

La figura 33 muestra la ficha de datos y el croquis de ubicación de la institución educativa.

**Figura 33**

*I.E. 42263 Virginia Lázaro*



### Ubicación geográfica

Latitud: 18°20'4,4" S

Longitud: 70°23'40,9" O

Altitud: 14 m.s.n.m

En la figura 34 se muestra la ubicación geográfica de la institución educativa.

**Figura 34**

*Ubicación geográfica de la I.E. Virginia Lázaro*

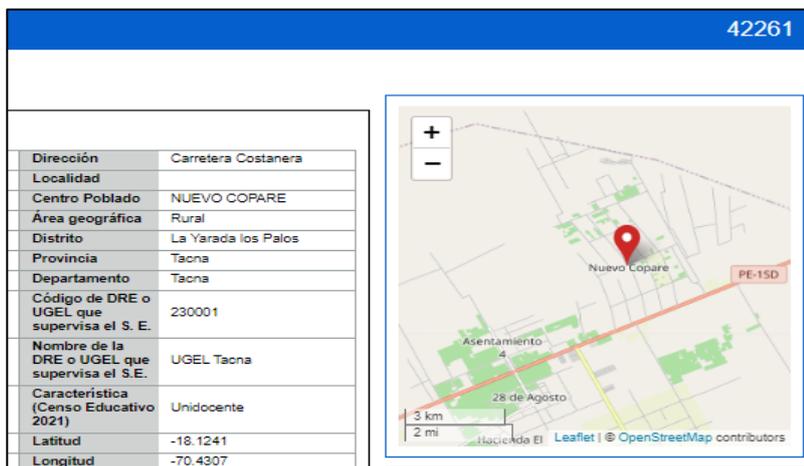


## 10. I.E. 42261 Nuevo Copare

La figura 35 muestra la ficha de datos y el croquis de ubicación de la institución educativa.

**Figura 35**

*I.E. 42261 Nuevo Copare*



### Ubicación geográfica

Latitud: 18°07'26,8" S

Longitud: 70°25'50,5" O

Altitud: 132 m.s.n.m

En la figura 36 se muestra la ubicación geográfica de la institución educativa.

**Figura 36**

*Ubicación geográfica de la I.E. Nuevo Copare*



## 11. Estación Los Palos

La estación Los Palos se encuentra dentro del distrito La Yarada Los Palos, es utilizado como una estación de interconexión entre la Institución educativa Rómulo Boluarte y la Municipalidad Distrital La Yarada. Las coordenadas geográficas se dan a continuación:

### Ubicación geográfica

Latitud: 18°14'7.07" S

Longitud: 70°26'35,44" O

Altitud: 25 m.s.n.m

En la figura 37 se muestra la ubicación geográfica de la estación óptica Los Palos.

### Figura 37

*Ubicación geográfica de la Estación Los Palos*



### ***Distribución geográfica de las Instituciones Educativas en La Yarada***

A continuación, en la figura 38 se muestra la distribución geográfica de las 10 instituciones educativas de educación primaria y educación secundaria que se encuentra en el distrito de La Yarada Los Palos.

**Figura 38**

*Ubicación geográfica de las I.E. del distrito La Yarada*



### 3.5.3 Clima en el distrito de La Yarada

El distrito de La Yarada los Palos es uno de los once distritos que conforman la provincia de Tacna en el departamento de Tacna, bajo la administración del Gobierno Regional de Tacna en el sur del Perú. Su capital es el pueblo de Los Palos. La superficie del distrito es de 2320 km<sup>2</sup>, con una población de 5,529 habitantes según el Censo del 2017. La figura 39 muestra la ubicación geográfica del distrito.

**Figura 39**

*Ubicación geográfica del distrito de La Yarada*



El distrito tiene un clima árido, húmedo en invierno, cuando abundan las neblinas o camanchacas y semicálido el resto del año. Sus temperaturas promedio son 24,6°C (76,28°F) en febrero y la mínima 13,6°C en (55,4°F) en julio. Según la figura 40, el promedio anual de precipitación de lluvia es de 1.5 mm/h.

**Figura 40**

*Precipitación de lluvia durante el año del distrito de La Yarada*

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación	3	4	3	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Días de lluvia	3	5	6	3	1	-	1	-	1	-	-	1
Días secos	28	23	25	27	30	30	30	31	29	31	30	30

### 3.5.4 Consideraciones previas al diseño de enlaces ópticos FSO

La Municipalidad Distrital de La Yarada Los Palos en conjunción con la Municipalidad Provincial de Tacna, ejecutaron en Administración Directa el Proyecto “Conectividad distrital – interconexión electrónica inalámbrica a colegios mediante red digital de radiofrecuencia para telecomunicaciones full-duplex con acceso a internet en el distrito de la yarada los palos” en el año 2017.

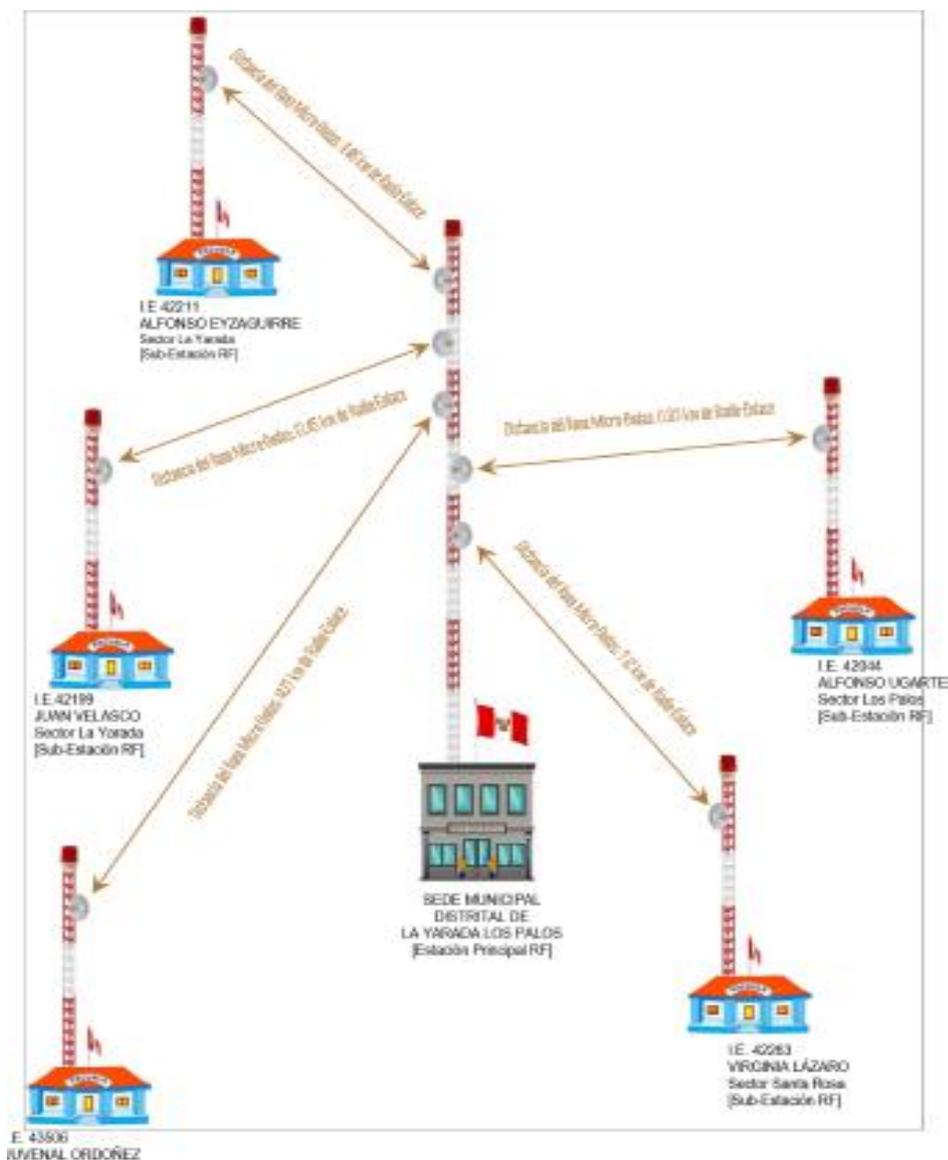
Dicho proyecto contempló la implementación de una red de radioenlaces digitales con acceso de internet para cinco instituciones educativas del distrito de La Yarada; I.E. 42263 – Virginia Lázaro Villarroel, I.E. 42044 – Alfonso Ugarte, I.E. 42211 – Alfonso Eyzaguirre Tara, I.E. 43506 – Juvenal Ordoñez y I.E. 42199 – Juan Velasco Alvarado.

La infraestructura de telecomunicaciones está compuesta por una torre de antena de 24 metros de altura, colocado en la Municipalidad distrital de La Yarada y 5 torres de antenas de 9 metros de altura, colocados en las 5 instituciones educativas antes mencionados.

La red de radioenlaces digitales, opera en las bandas de frecuencias de 2,4 y 5 GHz. La figura 41 muestra el esquema pictórico de la red de enlaces de radiofrecuencia digitales con acceso a internet. La infraestructura existente de la red de radioenlaces, servirá como soporte de las antenas de la red óptica FSO.

**Figura 41**

*Esquema de la red de radioenlaces para las I.E. de La Yarada*



### 3.5.5 Parámetros empleados para la determinación del margen del enlace

#### a. Distancia del enlace óptico

Se debe elegir un emplazamiento adecuado que garantice la visibilidad directa. Para ello es necesario caracterizar el trayecto, evitándose los obstáculos físicos entre el transmisor y el receptor.

De acuerdo a la topología establecida para la zona de estudio, se elaboró 9 enlaces ópticos para las 10 instituciones educativas del distrito de La Yarada, Tacna.

### b. Potencia de emisión óptica y sensibilidad de recepción óptica

Los datos de la potencia de emisión de la señal y la sensibilidad del receptor son proporcionados por los fabricantes de los equipos FSO.

Considerando que, las longitudes de los enlaces ópticos alcanzan los 6 km, se requiere emplear equipos ópticos que generen mayor potencia.

Para el diseño se ha seleccionado los datos típicos de uno de los equipos del fabricante FSONA modelo 1250 M, cuyas especificaciones técnicas son:

**Potencia de emisión:** 4 x 160 mW= 640 mW (28 dBm)

**Sensibilidad de recepción óptica:** -34 dBm

### c. Banda óptica de operación

Para elegir la longitud de onda, se debe considerar que la longitud de onda seleccionada no sea fuertemente absorbida en la atmósfera. Los sistemas FSO que se encuentran en el mercado operan en longitudes de onda cercanas a los 850 nm y a los 1550 nm. La longitud de onda seleccionada en este proyecto es **1550 nm**, dado que puede alcanzar mayores niveles de potencia para enlaces ópticos largos.

### d. Atenuación geométrica

La atenuación geométrica es un factor que limita la distancia del enlace inalámbrico óptico y puede reducir la disponibilidad del sistema, su valor será mayor en relación a cuan menor sea el área de captura y a la distancia que tendrá que recorrer el haz de información. El haz emitido por el transmisor óptico sufre divergencia, de esta manera el receptor óptico capta únicamente una fracción de la energía emitida. Según el fabricante FSONA para el modelo 1250-M, se tiene los siguientes datos:

**$\Theta$ :** 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 Atenuación Geométrica viene dada por la ecuación 8

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2}{S_{captura}} \quad (8)$$

**Att geométrica= 10\*log (Att geométrica)**

### e. Atenuación por niebla ( $Att_{niebla}$ )

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 con la visibilidad "q" es descrita mediante la ley de Kruse, la cual viene dada por la ecuación 9:

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

De acuerdo al SENAMHI-Tacna, la visibilidad promedio en la localidad de La Yarada es de  $V= 3,5$  km. Con este valor se seleccionó el valor de "q" y se determinó el coeficiente de atenuación por niebla ( $\alpha_{fog}$ ) dado por la ecuación 10.

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

Para calcular la atenuación por niebla se utiliza la siguiente ecuación matemática 11:

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

Donde:

**q**: variación del coeficiente de atenuación con la visibilidad

**V**: visibilidad en el enlace óptico

**$\lambda$** : longitud de onda de operación = 1550 nm.

**$\alpha_{fog}$** : coeficiente de atenuación de la niebla.

### f. Atenuación por lluvia

Para el cálculo de 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. En dicho informe, indica que la atenuación específica (dB/km) debida a la lluvia utiliza la siguiente ecuación 12:

$$\gamma_{lluvia} = k \cdot R^\alpha \quad (12)$$

Donde  $\gamma_{lluvia}$  es la atenuación específica debida a la lluvia (dB / km), R es la intensidad de la lluvia (mm/hr), k y  $\alpha$  son los coeficientes de lluvia.

En la tabla 8 se muestra los valores de los coeficientes de atenuación por lluvia, según el Modelo de Predicción japonés y francés.

**Tabla 8**

*Modelo de Predicción de Lluvia*

	<b>k</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\gamma_{lluvia}</math></b>
<b>Modelo japonés</b>	1,58	0,63	$1,58 \cdot R^{0,63}$
<b>Modelo francés</b>	1,076	0,67	$1,076 \cdot R^{0,67}$

**Nota.** Tomada de Informe UIT-R F.2106 (2007)

Para mi proyecto se tomó el Modelo de Predicción Francés o de Carboneau, el cual viene dado por la ecuación 13:

$$Y_{lluvia} = 1,076R^{0,67} \quad (13)$$

**Att<sub>lluvia</sub> =  $\gamma_{lluvia}$  \* d(km)**

Según Senamhi, las lluvias ligeras varían entre 1 – 3 mm/hr. Para Tacna consideran el valor de 1,5 mm/hr.

#### **g. Pérdidas del sistema**

Se producen por las pérdidas que se ocasionan en los siguientes elementos del enlace FSO:

##### **Pérdidas en equipos FSO**

Estos valores surgen del hecho de que con el tiempo todos los equipos electrónicos sufren desgaste y cambio en sus propiedades de funcionamiento; exige que se considere un valor de reserva para adoptar la situación real. El dato de pérdida de un equipo FSO es dado por el fabricante.

Para el equipo FSONA 1250 -M el valor que indica el fabricante es 1 dB.

**Pérdidas equipo = 1 dB**

### **Pérdidas en Conectores**

Los conectores ocasionan pérdidas que reducen la potencia de la señal. Estas pérdidas son de acuerdo al número de conectores presentes en la interconexión de equipos FSO. En cada enlace FSO hay un conector en cada extremo. Cada conector ocasiona una pérdida de 0,5 dB.

$$\text{Pérdidas conectores} = 1 \text{ dB}$$

### **Pérdidas en la fibra óptica**

Las pérdidas en la fibra óptica son directamente proporcionales con la longitud de la misma. Su valor oscila entre 5 y 10 dB por kilómetro.

Estas pérdidas son despreciables para nuestros enlaces FSO, dado que los tramos de fibra óptica que se necesitan para la conexión de los equipos FSO y los dispositivos de networking son bastante cortos.

$$\text{Pérdidas por F.O} = 0 \text{ dB}$$

### **Pérdidas por Desalineamiento**

Esta clase de pérdidas se producen cuando los haces ópticos no se encuentran perfectamente alineados, generando un margen de pérdida en la recepción de la señal, que se conoce como pérdida por desalineamiento.

$$\text{Pérdidas por desalineamiento} = 1 \text{ dB}$$

Las pérdidas en el sistema serán:

$$\text{Pérdidas sistema} = \text{Pérdidas equipo} + \text{Pérdidas conectores} + \text{Pérdidas por F.O} +$$

$$\text{Pérdidas por desalineamiento}$$

$$\text{Pérdidas sistema} = 3 \text{ dB.}$$

### **Margen del enlace (M<sub>link</sub>)**

El margen del enlace óptico es el nivel disponible por encima de la sensibilidad del receptor. El M<sub>link</sub> debe tener un valor mínimo de 0 dB. La siguiente ecuación 14 indica como calcular el M<sub>link</sub>:

$$M_{\text{link}} = P_e - |S_r| - \text{Att}_{\text{geométrica}} - \text{Att}_{\text{niebla}} - L_{\text{sistema}} - \text{Att}_{\text{luz}} \quad (14)$$

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

### Consideraciones Preliminares

Para el diseño de la red de enlaces ópticos, se tomó en cuenta la infraestructura de telecomunicaciones existentes en la zona de estudio. Dicha infraestructura forma parte del sistema de radioenlaces digitales de microondas para el acceso de internet de 5 instituciones educativas del distrito de La Yarada, que se encuentran interconectadas con la Municipalidad distrital de La Yarada, entidad que está conectado a la Red Dorsal de Fibra Óptica del Perú.

El estudio de gabinete permitió:

- a. Trazar la ruta del enlace óptico y determinar la longitud del enlace óptico en la zona de estudio.
- b. Determinar su perfil topográfico utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.
- c. Verificar la existencia de línea de vista en cada uno de los enlaces ópticos con el empleo de torres de antenas en cada estación óptica.
- d. Establecer la estructura de la red de enlaces ópticos que forman parte de mi trabajo de tesis.

El estudio de campo en la zona de estudio permitió a lo largo del desarrollo del trabajo de tesis:

- a. Verificar el estado en las que se encuentra la infraestructura de telecomunicaciones desplegado en las instituciones educativas de La Yarada que forman parte de la red de radioenlaces.
- b. Verificar que no exista ningún obstáculo físico en la trayectoria de un enlace óptico, ya sea por el crecimiento de vegetación o árboles o la presencia de edificaciones que impida la propagación con línea de vista de los enlaces ópticos.
- c. Verificar que las instituciones educativas que forman parte de la red de enlaces ópticos tengan suministro de energía eléctrica permanente.
- d. Verificar que la estación óptica Los Palos tenga suministro de energía eléctrica, así como espacio físico para la instalación del equipamiento óptico y la instalación de la torre de antenas.
- e. Verificar con un equipo GPS la ubicación cartográfica de cada uno de las estaciones óptica de la red propuesta.

#### 4.1. Propuesta de la red de enlaces ópticos FSO

Mediante el estudio de gabinete, se llegó a determinar una propuesta de la red de enlaces ópticos que interconectarán con la Municipalidad distrital de La Yarada, entidad pública que se encargará de la administración de la red propuesta. Ello debido que la Municipalidad distrital de la Yarada tiene acceso a la Red Dorsal de Fibra Óptica del Perú para el acceso a Internet. En la figura 42 se observa que la red, está compuesta por 11 enlaces ópticos FSO, que interconectan 10 instituciones educativas del distrito de la Yarada.

**Figura 42**

*Propuesta de red de enlaces ópticos FSO*



A continuación, se presentan los 11 enlaces ópticos FSO desplegados en la zona de estudio:

- a. Enlace FSO 1: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Alfonso Eyzaguirre
- b. Enlace FSO 2: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Juan Velasco
- c. Enlace FSO 3: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Juvenal Ordoñez
- d. Enlace FSO 4: I.E. Juvenal Ordoñez - I.E. Llacsá Arce
- e. Enlace FSO 5: I.E. Juvenal Ordoñez - I.E. Omar Salas
- f. Enlace FSO 6: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Hugo Salazar
- g. Enlace FSO 7: I.E. Hugo Salazar - I.E. Nuevo Copare
- h. Enlace FSO 8: Municipalidad La Yarada - I.E. Alfonso Ugarte
- i. Enlace FSO 9: Municipalidad La Yarada - Estación Los Palos
- j. Enlace FSO 10: Estación Los Palos - I.E. Rómulo Boluarte
- k. Enlace FSO 11: Alfonso Ugarte - I.E. Virginia Lázaro

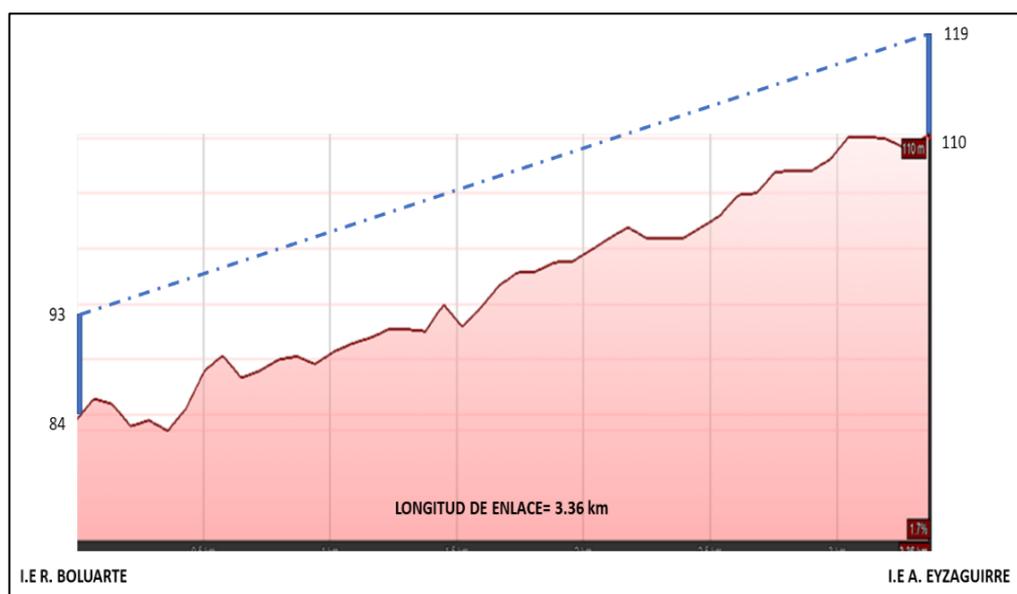
## 4.2. Levantamiento del perfil topográfico de los enlaces FSO

### 4.2.1 Enlace FSO 1: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Alfonso Eyzaguirre

La figura 43 muestra el perfil topográfico del enlace óptico FSO 1, elaborado utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.

**Figura 43**

*Perfil topográfico del enlace FSO 1*



Las características principales de propagación del enlace FSO 1 se muestra en la tabla 9:

**Tabla 9**

*Características de propagación del enlace FSO 1*

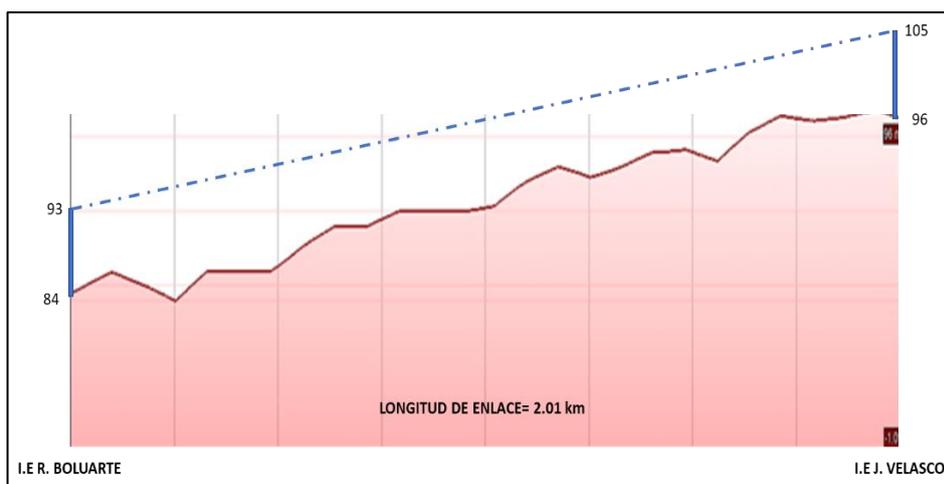
	<b>I.E. Rómulo Boluarte</b>	<b>I.E. Alfonso Eyzaguirre</b>
Altitud	84 msnm	110 msnm
Altura de antena	9 m	9 m
Torre de antena	Propuesto	Existe
Longitud del enlace FSO	d= 3,36 km	
Propagación	Línea de vista troposférica	

#### 4.2.2 Enlace FSO 2: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Juan Velasco

La figura 44 muestra el perfil topográfico del enlace óptico FSO 2, elaborado utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.

**Figura 44**

*Perfil topográfico del enlace FSO 2*



Las características principales de propagación del enlace FSO 2 se muestra en la tabla 10:

**Tabla 10**

*Características de propagación del enlace FSO 2*

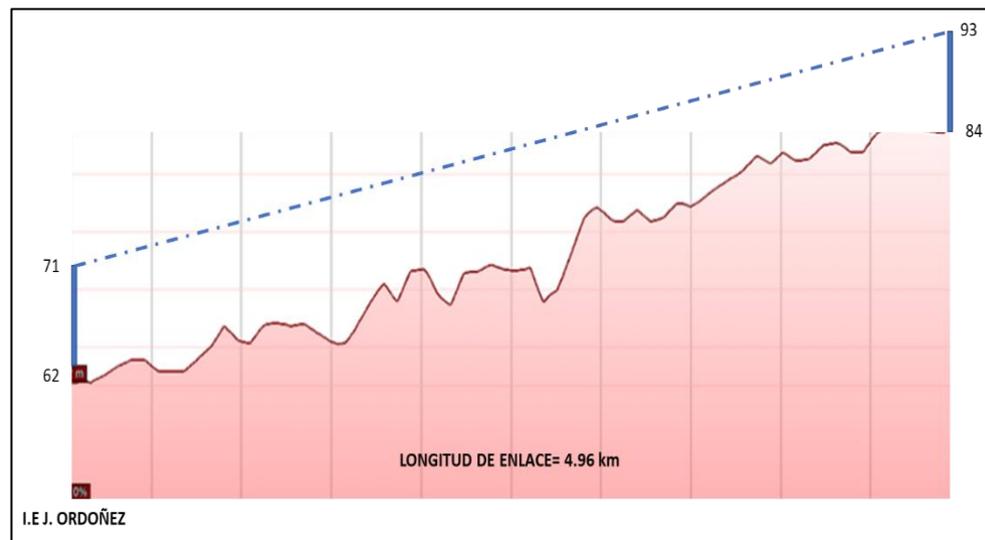
	<b>I.E. Rómulo Boluarte</b>	<b>I.E. Juan Velasco</b>
Altitud	84 msnm	96 msnm
Altura de antena	9 m	9 m
Torre de antena	Propuesto	Existe
Longitud del enlace FSO	d= 2,01 km	
Propagación	Línea de vista troposférica	

### 4.2.3 Enlace FSO 3: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Juvenal Ordoñez

La figura 45 muestra el perfil topográfico del enlace óptico FSO 3, elaborado utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.

**Figura 45**

*Perfil topográfico del enlace FSO 3*



Las características principales de propagación del enlace FSO 3 se muestra en la tabla 11:

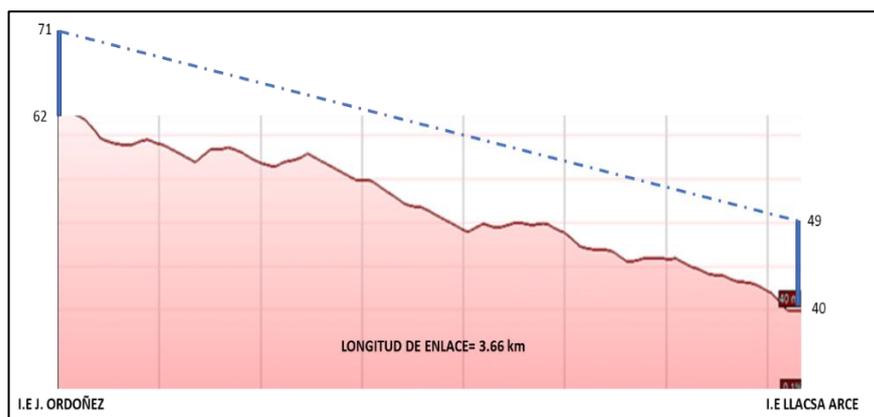
**Tabla 11**

*Características de propagación del enlace FSO 3*

	<b>I.E. Rómulo Boluarte</b>	<b>I.E. Juvenal Ordoñez</b>
Altitud	84 msnm	62 msnm
Altura de antena	9 m	9 m
Torre de antena	Propuesto	Existe
Longitud del enlace FSO	d= 4,96 km	
Propagación	Línea de vista troposférica	

### 4.2.4 Enlace FSO 4: I.E. Juvenal Ordoñez - I.E. Liacsca Arce

La figura 46 muestra el perfil topográfico del enlace óptico FSO 4, elaborado utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.

**Figura 46***Perfil topográfico del enlace FSO 4*

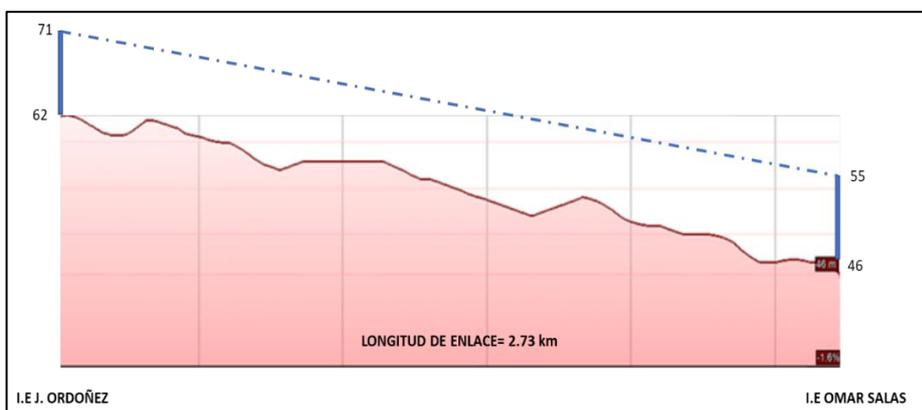
Las características principales de propagación del enlace FSO 4 se muestra en la tabla 12:

**Tabla 12***Características de propagación del enlace FSO 4*

	I.E. Llacsá Arce	I.E. Juvenal Ordoñez
Altitud	40 msnm	62 msnm
Altura de antena	9 m	9 m
Torre de antena	Propuesto	Existe
Longitud del enlace FSO	d= 3,66 km	
Propagación	Línea de vista troposférica	

#### 4.2.5 Enlace FSO 5: I.E. Juvenal Ordoñez - I.E. Omar Salas

La figura 47 muestra el perfil topográfico del enlace óptico FSO 5, elaborado utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.

**Figura 47***Perfil topográfico del enlace FSO 5*

Las características principales de propagación del enlace FSO 5 se muestra en la tabla 13:

**Tabla 13**

*Características de propagación del enlace FSO 5*

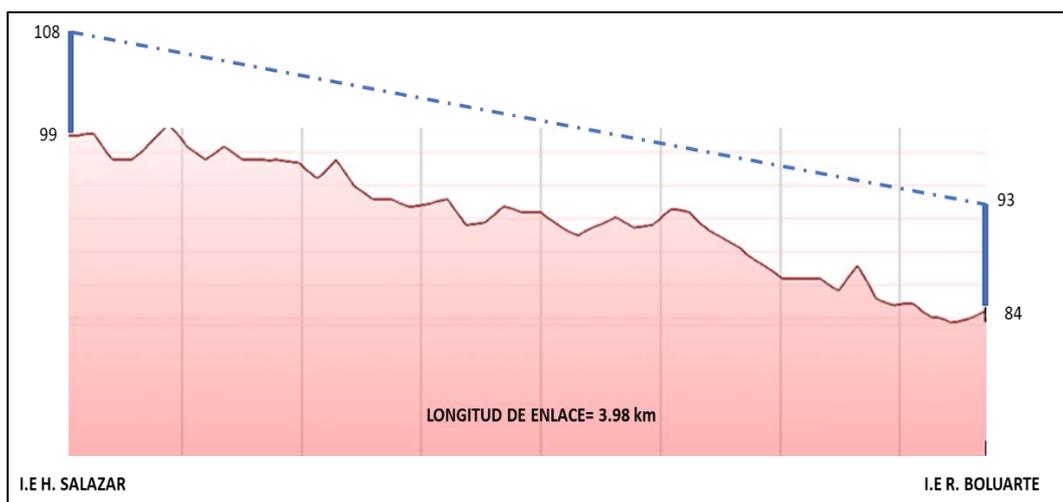
	<b>I.E. Omar Salas</b>	<b>I.E. Juvenal Ordoñez</b>
Altitud	46 msnm	62 msnm
Altura de antena	9 m	9 m
Torre de antena	Propuesto	Existe
Longitud del enlace FSO	d= 2,73 km	
Propagación	Línea de vista troposférica	

#### 4.2.6 Enlace FSO 6: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Hugo Salazar

La figura 48 muestra el perfil topográfico del enlace óptico FSO 6, elaborado utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.

**Figura 48**

*Perfil topográfico del enlace FSO 6*



Las características principales de propagación del enlace FSO 6 se muestra en la tabla 14:

**Tabla 14**

*Características de propagación del enlace FSO 6*

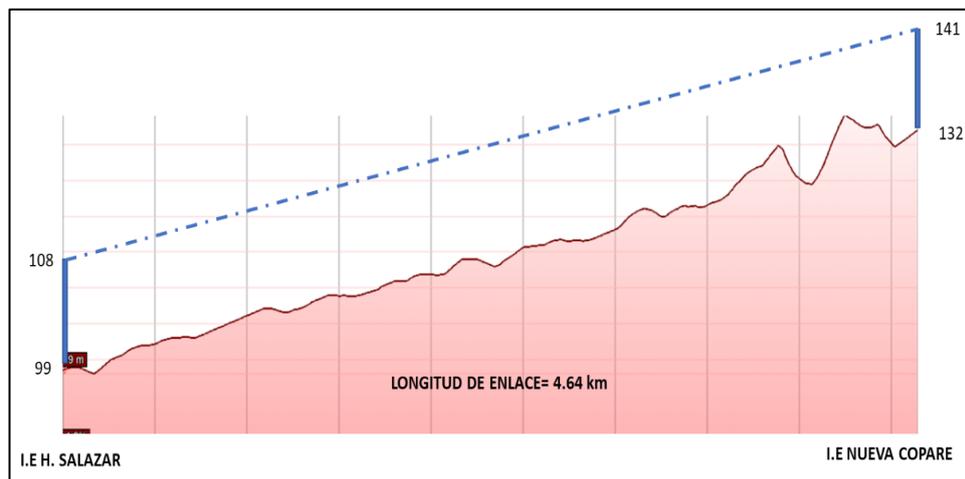
	<b>I.E. Hugo Salazar</b>	<b>I.E. Rómulo Boluarte</b>
Altitud	99 msnm	84 msnm
Altura de antena	9 m	9 m
Torre de antena	Propuesto	Propuesto
Longitud del enlace FSO	d= 3,98 km	
Propagación	Línea de vista troposférica	

#### 4.2.7 Enlace FSO 7: I.E. Hugo Salazar - I.E. Nuevo Copare

La figura 49 muestra el perfil topográfico del enlace óptico FSO 7, elaborado utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.

**Figura 49**

*Perfil topográfico del enlace FSO 7*



Las características principales de propagación del enlace FSO 7 se muestra en la tabla 15:

**Tabla 15**

*Características de propagación del enlace FSO 7*

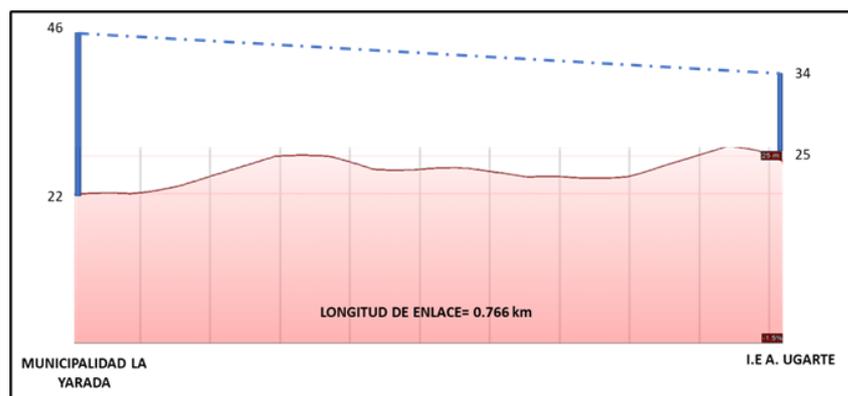
	<b>I.E. Hugo Salazar</b>	<b>I.E. Nuevo Copare</b>
Altitud	99 msnm	132 msnm
Altura de antena	9 m	9 m
Torre de antena	Propuesto	Propuesto
Longitud del enlace FSO	d= 4,64 km	
Propagación	Línea de vista troposférica	

#### 4.2.8 Enlace FSO 8: Municipalidad La Yarada - I.E. Alfonso Ugarte

La figura 50 muestra el perfil topográfico del enlace óptico FSO 8, elaborado utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.

**Figura 50**

*Perfil topográfico del enlace FSO 8*



Las características principales de propagación del enlace FSO 8 se muestra en la tabla 16:

**Tabla 16**

*Características de propagación del enlace FSO 8*

	Municipalidad La Yarada	I.E. Alfonso Ugarte
Altitud	22 msnm	25 msnm
Altura de antena	24 m	9 m
Torre de antena	Existe	Propuesto
Longitud del enlace FSO	d= 0,766 km	
Propagación	Línea de vista troposférica	

#### 4.2.9 Enlace FSO 9: Municipalidad La Yarada - Estación Los Palos

La figura 51 muestra el perfil topográfico del enlace óptico FSO 9, elaborado utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.

**Figura 51**

*Perfil topográfico del enlace FSO 9*



Las características principales de propagación del enlace FSO 9 se muestra en la tabla 17:

**Tabla 17**

*Características de propagación del enlace FSO 9*

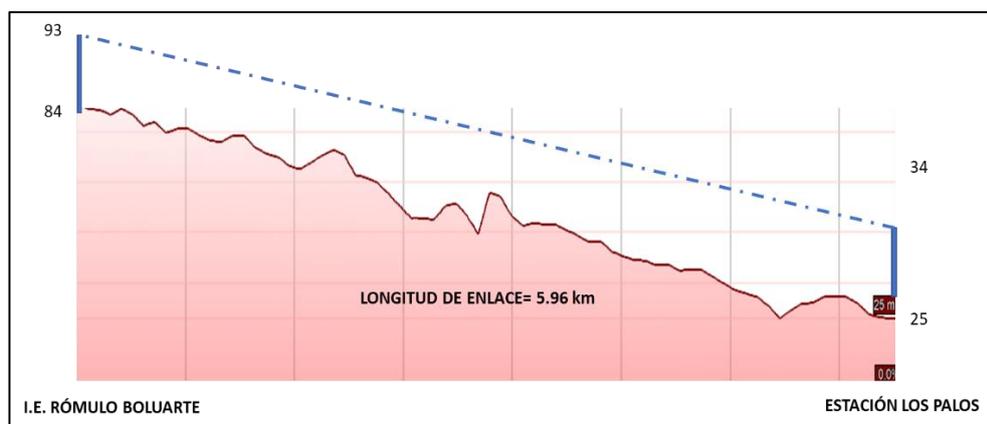
	<b>Municipalidad La Yarada</b>	<b>Estación Los Palos</b>
Altitud	22 msnm	25 msnm
Altura de antena	24 m	9 m
Torre de antena	Existe	Propuesto
Longitud del enlace FSO	d= 5,67 km	
Propagación	Línea de vista troposférica	

#### 4.2.10 Enlace FSO 10: Estación Los Palos - I.E. Rómulo Boluarte

La figura 52 muestra el perfil topográfico del enlace óptico FSO 10, elaborado utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.

**Figura 52**

*Perfil topográfico del enlace FSO 10*



Las características principales de propagación del enlace FSO 10 se muestra en la tabla 18:

**Tabla 18**

*Características de propagación del enlace FSO 10*

	<b>I.E. Rómulo Boluarte</b>	<b>Estación Los Palos</b>
Altitud	84 msnm	25 msnm
Altura de antena	9 m	9 m
Torre de antena	Propuesto	Propuesto
Longitud del enlace FSO	d= 5,96 km	
Propagación	Línea de vista troposférica	

#### 4.2.11 Enlace FSO 11: Alfonso Ugarte - I.E. Virginia Lázaro

La figura 53 muestra el perfil topográfico del enlace óptico FSO 11, elaborado utilizando la herramienta informática Google Earth Pro.

**Figura 53**

*Perfil topográfico del enlace FSO 11*



Las características principales de propagación del enlace FSO 11 se muestra en la tabla 19:

**Tabla 19**

*Características de propagación del enlace FSO 11*

	<b>I.E. Alfonso Ugarte</b>	<b>I.E. Virginia Lázaro</b>
Altitud	84 msnm	25 msnm
Altura de antena	9 m	9 m
Torre de antena	Existe	Propuesto
Longitud del enlace FSO	d= 6,32 km	
Propagación	Línea de vista troposférica	

#### 4.3. Equipamiento seleccionado

De acuerdo a los requerimientos necesarios para la red de enlaces FSO en la zona de estudio, se tomó en cuenta los siguientes parámetros que deben tener los equipos ópticos FSO:

1. Protocolo de transmisión: Gigabit Ethernet
2. Capacidad de transmisión (data rate): 2,5 Gbps
3. Cobertura del enlace: hasta los 6 km
4. Longitud de onda de operación: 1550 nm
5. Potencia de emisión: mínimo 28 dBm
6. Sensibilidad de recepción: -34 dBm

De acuerdo a los requerimientos del equipamiento FSO se seleccionó al fabricante Fsona Optical Wireless, la serie SONAbeam – M, modelo 1250-M, que cumple con dichos requerimientos. La figura 54 muestra el equipo seleccionado.

#### Figura 54

Equipo FSO SONAbeam 1250-M



Nota. Imagen obtenida del Data Sheet del fabricante FSONA OPTICAL WIRELESS. Disponible en:

<https://onx.la/6be3a>

#### 4.4. Diseño de los enlaces ópticos FSO

##### 4.4.1 Margen del enlace ( $M_{link}$ )

Se realizarán en base a la expresión del margen del enlace dada por la siguiente ecuación 15:

$$M_{link} = P_e - |S_r| - Att_{geométrica} - Att_{niebla} - L_{sistema} - Att_{lluvia} \quad (15)$$

Donde.

$P_e$ : potencia de emisión (dBm)

$S_r$ : sensibilidad de recepción (dBm)

$Att_{geométrica}$ : atenuación geométrica (dB)

$Att_{niebla}$ : atenuación por niebla (dB)

$Att_{lluvia}$ : atenuación por lluvia (dB)

$L_{sistema}$ : pérdida del sistema (dB)

#### 4.4.2 Parámetros que intervienen en el cálculo del margen del enlace

##### a. Potencia de emisión de la señal y Sensibilidad del Receptor

Del fabricante seleccionado FSONA de la serie SONAbeam 1250-M, se tienen los siguientes valores:

**Pe = 28 dBm**

**Sr= -34 dBm**

##### b. Longitud del enlace (d)

De acuerdo a la propuesta de la red óptica FSO, en la tabla 20 se muestran las longitudes de los enlaces ópticos desplegados en la red óptica.

**Tabla 20**

*Longitud de los enlaces ópticos FSO*

<b>Enlace FSO</b>	<b>Longitud del Enlace (km)</b>
I.E. R. Boluarte - I.E. Alfonso Eyzaguirre	3,36
I.E. R. Boluarte - I.E. Juan Velasco	2,01
I.E. R. Boluarte - I.E. Juvenal Ordoñez	4,96
I.E. J. Ordoñez - I.E. Llacsá Arce	3,66
I.E. J. Ordoñez - I.E. Omar Salas	2,73
I.E. R. Boluarte - I.E. Hugo Salazar	3,98
I.E. H. Salazar - I.E. Nueva Copare	4,64
Municipalidad La Yarada - I.E. Alfonso Ugarte	0,766
Municipalidad La Yarada - Estación Los Palos	5,67
Estación Los Palos - I.E. Rómulo Boluarte	5,96
I.E. Alfonso Ugarte - I.E. Virginia Lázaro	6,32

**c. Longitud de onda de operación ( $\lambda$ )**

De acuerdo a la propuesta de la red óptica FSO, se seleccionó la longitud de onda  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , porque permite trabajar con mayores niveles de potencia de emisión, necesarios para los enlaces ópticos largos que se despliegan en la red óptica propuesta.

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

Según el fabricante FSONA para el modelo 1250-M, se tiene los siguientes datos:

**$\Theta$ : divergencia del haz = 3 milirad (0,003 radianes).**

**D: Diámetro de apertura= 20 cm.**

$S_{\text{captura}}$ : superficie de captura

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

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

**e. Visibilidad del enlace (V)**

Según SENAMHI, siendo el distrito de La Yarada de clima árido y pocas precipitaciones, la formación de niebla es ligera, por lo que se recomienda una visibilidad **V = 3,5 km.**

**f. Intensidad de lluvia (mm/h)**

Según SENAMHI, la estación meteorológica Tacna reporta bajos niveles de precipitaciones durante todo el año, presentando una **intensidad de lluvia promedio de 1,5 mm/h.**

**g. Pérdidas del sistema (dB)**

Según el fabricante FSONA para el modelo 1250-M, **las pérdidas del sistema estimadas son de 3 dB.**

**4.5. Cálculo del margen del enlace (link margin)**

A continuación, se calculó el margen del enlace ( $M_{\text{link}}$ ) para cada enlace óptico de la red FSO propuesta, según la siguiente ecuación 16

$$M_{\text{link}} = P_e - |S_r| - A_{\text{t geométrica}} - A_{\text{t niebla}} - L_{\text{ sistema}} - A_{\text{t lluvia}} \quad (16)$$

#### 4.5.1 Enlace FSO 1: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Alfonso Eyzaguirre

##### a. Atenuación geométrica

Para el cálculo se empleó la siguiente ecuación 17

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d.\theta)^2}{S_{captura}} \quad (17)$$

Donde:

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

$$d = 3,36 \text{ km} = 3360 \text{ m}$$

$$S_{captura} = 0,31 \text{ m}^2$$

$$S_d = \pi * (3360 * 0,003)^2 / 4$$

$$S_d = 79,801 \text{ m}^2$$

*Cálculo de la atenuación geométrica*

$$Att_{geométrica} = S_d / S_{captura} = 79,801 / 0,31$$

$$Att_{geométrica} = 2574,241$$

$$Att_{geométrica} \text{ (dB)} = 10 * \log (2574,241)$$

$$Att_{geométrica} \text{ (dB)} = 34,106 \text{ dB}$$

##### b. Atenuación por niebla

Como:  $V = 3,5 \text{ km}$ , para calcular "q" se emplea la siguiente ecuación 18

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50 \text{ km} \\ 1,3 & \text{si } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,16 (V) + 0,34 & \text{si } 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \end{array} \right\} \quad (18)$$

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

$$q = 0,9$$

*Cálculo de la atenuación por niebla*

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

$$\alpha_{fog} = (13/V) * (\lambda/550)^{-q} = (13/3,5) * (1550/550)^{-0,9}$$

$$\alpha_{fog} = 1,462 \text{ dB/km}$$

Para  $d = 3,36$  km, la atenuación por niebla es:

$$Att_{niebla} = \alpha_{fog} * d(\text{km}) = 1,462 * 3,36$$

$$Att_{niebla} = 4,912 \text{ dB}$$

### c. Atenuación por lluvia

El coeficiente de lluvia se calculó con la siguiente ecuación 19

$$\alpha_{rain} = 1,076 * R^{0,67} \quad (19)$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 1,5 mm/h

$$\alpha_{rain} = 1,076 * (1,5)^{0,67}$$

$$\alpha_{rain} = 1,412 \text{ dB/km}$$

*Cálculo de la atenuación por lluvia*

Para  $d = 3,36$  km, la atenuación por lluvia es:

$$Att_{lluvia} = \alpha_{rain} * d(\text{km}) = 1,412 * 3,36$$

$$Att_{lluvia} = 4,744 \text{ dB}$$

### d. Margen del enlace\_(Mlink)

Pe: 28 dBm

Sr: -34 dBm

Attgeométrica (dB): 34,106 dB

Attniebla= 4,912 dB

Attlluvia= 4,744 dB

Lsistema= 3 dB

$$M_{link} = 28 \text{ dBm} - (-34 \text{ dBm}) - 34,106 \text{ dB} - 4,912 \text{ dB} - 3 \text{ dB} - 4,744 \text{ dB}$$

$$M_{link} = 15,238 \text{ Db}$$

#### 4.5.2 Enlace FSO 2: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Juan Velasco

##### a. Atenuación geométrica

Para el cálculo se empleó la siguiente ecuación 20

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d.\theta)^2}{S_{captura}} \quad (20)$$

Donde:

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

$$d = 2,01 \text{ km} = 2010 \text{ m}$$

$$S_{captura} = 0,31 \text{ m}^2$$

$$S_d = 28,558 \text{ m}^2$$

*Cálculo de la atenuación geométrica*

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

$$Att_{geométrica} = 921,219$$

$$Att_{geométrica} \text{ (dB)} = 29,644 \text{ dB}$$

##### b. Atenuación por niebla

Con  $V = 3,5 \text{ km}$ , se calcula "q" de acuerdo a la ecuación 21

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50\text{km} \\ 1,3 & \text{si } 6\text{km} < V < 50\text{km} \\ 0,16(V) + 0,34 & \text{si } 1\text{km} < V < 6\text{km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5\text{km} < V < 1\text{km} \end{array} \right\} \quad (21)$$

$$q = 0,9$$

*Cálculo de la atenuación por niebla*

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

$$\alpha_{fog} = 1,462 \text{ dB/km}$$

Para  $d = 2,01 \text{ km}$ , la atenuación por niebla es:

$$Att_{niebla} = \alpha_{fog} * d(\text{km}) = 1,462 * 2,01$$

$$Att_{niebla} = 2,938 \text{ dB}$$

**c. Atenuación por lluvia**

El coeficiente de lluvia se calculó con la siguiente ecuación 22

$$\alpha_{rain} = 1,076 \times R^{0,67} \quad (22)$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 1,5 mm/h

**$\alpha_{rain} = 1,412 \text{ dB/km}$**

*Cálculo de la atenuación por lluvia*

Para d= 2,01 km, la atenuación por lluvia es:

$$Att_{lluvia} = \alpha_{rain} \times d(\text{km}) = 1,412 \times 2,01$$

**$Att_{lluvia} = 2,838 \text{ dB}$**

**d. Margen del enlace\_(Mlink)**

Pe: 28 dBm

Sr: -34 dBm

Attgeométrica (dB): 29,644 dB

Attniebla= 2,938 dB

Attlluvia= 2,838 dB

Lsistema= 3 dB

Calculamos el Mlink con la ecuación 23

$$M_{link} = P_e - |S_r| - Att_{geométrica} - Att_{niebla} - L_{sistema} - Att_{lluvia} \quad (23)$$

**$M_{link} = 23,580 \text{ dB}$**

**4.5.3 Enlace FSO 3: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Juvenal Ordoñez**

**a. Atenuación geométrica**

Para el cálculo se empleó la siguiente ecuación 24

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2}{S_{captura}} \quad (24)$$

Donde:

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

$$d = 4,96 \text{ km} = 4960 \text{ m}$$

$$S_{\text{captura}} = 0,31 \text{ m}^2$$

$$S_d = 173,898 \text{ m}^2$$

*Cálculo de la atenuación geométrica*

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

$$Att_{\text{geométrica}} = 5609,628$$

$$Att_{\text{geométrica}} \text{ (dB)} = 37,489 \text{ dB}$$

#### b. Atenuación por niebla

Con  $V = 3,5 \text{ km}$ , se calcula "q" de acuerdo a la ecuación 25

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50\text{km} \\ 1,3 & \text{si } 6\text{km} < V < 50\text{km} \\ 0,16(V) + 0,34 & \text{si } 1\text{km} < V < 6\text{km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5\text{km} < V < 1\text{km} \end{array} \right\} \quad (25)$$

$$q = 0,9$$

*Cálculo de la atenuación por niebla*

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

$$\alpha_{\text{fog}} = 1,462 \text{ dB/km}$$

Para  $d = 4,96 \text{ km}$ , la atenuación por niebla es:

$$Att_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 1,462 * 4,96$$

$$Att_{\text{niebla}} = 7,251 \text{ dB}$$

**c. Atenuación por lluvia**

El coeficiente de lluvia se calculó con la siguiente ecuación 26

$$\alpha_{rain} = 1,076 \times R^{0,67} \quad (26)$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 1,5 mm/h

**$\alpha_{rain} = 1,412 \text{ dB/km}$**

*Cálculo de la atenuación por lluvia*

Para d= 4,96 km, la atenuación por lluvia es:

$$Att_{lluvia} = \alpha_{rain} \times d(\text{km}) = 1,412 \times 4,96$$

**$Att_{lluvia} = 7,003 \text{ dB}$**

**d. Margen del enlace ( $M_{link}$ )**

Pe: 28 dBm

Sr: -34 dBm

Attgeométrica (dB): 37,489 dB

Attniebla= 7,251 dB

Attlluvia= 7,003 dB

Lsistema= 3 dB

Calculamos el  $M_{link}$  con la ecuación 27

$$M_{link} = P_e - |S_r| - Att_{geométrica} - Att_{niebla} - L_{sistema} - Att_{lluvia} \quad (27)$$

**$M_{link} = 7,257 \text{ dB}$**

**4.5.4 Enlace FSO 4: I.E. Juvenal Ordoñez - I.E. Liacsá Arce**

**a. Atenuación geométrica**

Para el cálculo se empleó la siguiente ecuación 28

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2}{S_{captura}} \quad (28)$$

Donde:

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

$$d = 3,66 \text{ km} = 3660 \text{ m}$$

$$S_{\text{captura}} = 0,31 \text{ m}^2$$

$$S_d = 94,688 \text{ m}^2$$

*Cálculo de la atenuación geométrica*

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

$$Att_{\text{geométrica}} = 3054,449$$

$$Att_{\text{geométrica}} \text{ (dB)} = 34,849 \text{ dB}$$

#### b. Atenuación por niebla

Con  $V = 3,5 \text{ km}$ , se calcula "q" de acuerdo a la ecuación 29

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50 \text{ km} \\ 1,3 & \text{si } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,16(V) + 0,34 & \text{si } 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \end{array} \right\} \quad (29)$$

$$q = 0,9$$

*Cálculo de la atenuación por niebla*

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

$$\alpha_{\text{fog}} = 1,462 \text{ dB/km}$$

Para  $d = 3,66 \text{ km}$ , la atenuación por niebla es:

$$Att_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 1,462 * 3,66$$

$$Att_{\text{niebla}} = 5,350 \text{ dB}$$

#### c. Atenuación por lluvia

El coeficiente de lluvia se calculó con la siguiente ecuación 30

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * R^{0,67} \quad (30)$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 1,5 mm/h

$\alpha_{rain} = 1,412 \text{ dB/km}$

*Cálculo de la atenuación por lluvia*

Para  $d = 3,66 \text{ km}$ , la atenuación por lluvia es:

$Att_{lluvia} = \alpha_{rain} * d(\text{km}) = 1,412 * 3,66$

**$Att_{lluvia} = 5,167 \text{ dB}$**

**d. Margen del enlace ( $M_{link}$ )**

$P_e$ : 28 dBm

$S_r$ : -34 dBm

$Att_{geométrica}$  (dB): 34,849 dB

$Att_{niebla} = 5,350 \text{ dB}$

$Att_{lluvia} = 5,167 \text{ dB}$

$L_{sistema} = 3 \text{ dB}$

Calculamos el  $M_{link}$  con la ecuación 31

$$M_{link} = P_e - |S_r| - Att_{geométrica} - Att_{niebla} - L_{sistema} - Att_{lluvia} \quad (31)$$

**$M_{link} = 13,633 \text{ dB}$**

#### 4.5.5 Enlace FSO 5: I.E. Juvenal Ordoñez - I.E. Omar Salas

**a. Atenuación geométrica**

Para el cálculo se empleó la siguiente ecuación 32

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2}{S_{captura}} \quad (32)$$

Donde:

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

$d = 2,73 \text{ km} = 2730 \text{ m}$

$S_{captura} = 0,31 \text{ m}^2$

$S_d = 52,681 \text{ m}^2$

*Cálculo de la atenuación geométrica*

Attgeométrica = Sd/Scaptura

Attgeométrica = 1699,401

**Attgeométrica (dB)= 32,303 dB**

**b. Atenuación por niebla**

Con **V= 3,5 km**, se calcula “q” de acuerdo a la ecuación 33

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50\text{km} \\ 1,3 & \text{si } 6\text{km} < V < 50\text{km} \\ 0,16(V) + 0,34 & \text{si } 1\text{km} < V < 6\text{km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5\text{km} < V < 1\text{km} \end{array} \right\} \quad (33)$$

**q = 0,9**

*Cálculo de la atenuación por niebla*

$\lambda = 1550 \text{ nm}$

**$\alpha_{\text{fog}} = 1,462 \text{ dB/km}$**

Para  $d = 2,73 \text{ km}$ , la atenuación por niebla es:

Attniebla =  $\alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 1,462 * 2,73$

**Attniebla = 3,991 dB**

**c. Atenuación por lluvia**

El coeficiente de lluvia se calculó con la siguiente ecuación 34

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * R^{0,67} \quad (34)$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 1,5 mm/h

**$\alpha_{\text{rain}} = 1,412 \text{ dB/km}$**

*Cálculo de la atenuación por lluvia*

Para  $d = 2,73 \text{ km}$ , la atenuación por lluvia es:

Attlluvia =  $\alpha_{\text{rain}} * d(\text{km}) = 1,412 * 2,73$

**Attlluvia = 3,854 dB**

**d. Margen del enlace (M<sub>link</sub>)**

Pe: 28 dBm

Sr: -34 dBm

Attgeométrica (dB): 32,303 dB

Attniebla= 3,991 dB

Attlluvia= 3,854 dB

Lsistema= 3 dB

Calculamos el M<sub>link</sub> con la ecuación 35

$$M_{link} = P_e - |S_r| - Att_{geométrica} - Att_{niebla} - L_{sistema} - Att_{lluvia} \quad (35)$$

**M<sub>link</sub> = 18,852 dB****4.5.6 Enlace FSO 6: I.E. Rómulo Boluarte - I.E. Hugo Salazar****a. Atenuación geométrica**

Para el cálculo se empleó la siguiente ecuación 36

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d \cdot \theta)^2}{S_{captura}} \quad (36)$$

Donde:

 $\theta = 3$  milirad (0,003 rad)

d= 3,98 km = 3980 m

S<sub>captura</sub> = 0,31 m<sup>2</sup>S<sub>d</sub> = 111,969 m<sup>2</sup>*Cálculo de la atenuación geométrica*Attgeométrica = S<sub>d</sub>/S<sub>captura</sub>

Attgeométrica = 3611,909

**Attgeométrica (dB)= 35,577 Db****b. Atenuación por niebla**Con **V= 3,5 km**, se calcula "q" de acuerdo a la ecuación 37

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50km \\ 1,3 & \text{si } 6km < V < 50km \\ 0,16(V) + 0,34 & \text{si } 1km < V < 6km \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5km < V < 1km \end{array} \right\} \quad (37)$$

**q = 0,9**

*Cálculo de la atenuación por niebla*

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

$$\alpha_{\text{fog}} = 1,462 \text{ dB/km}$$

Para  $d = 3,98 \text{ km}$ , la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 1,462 * 3,98$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 5,818 \text{ dB}$$

**c. Atenuación por lluvia**

El coeficiente de lluvia se calculó con la siguiente ecuación 38

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * R^{0,67} \quad (38)$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 1,5 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,412 \text{ dB/km}$$

*Cálculo de la atenuación por lluvia*

Para  $d = 3,98 \text{ km}$ , la atenuación por lluvia es:

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} * d(\text{km}) = 1,412 * 3,98$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 5,619 \text{ dB}$$

**d. Margen del enlace ( $M_{\text{link}}$ )**

$P_e$ : 28 dBm

$S_r$ : -34 dBm

$\text{Att}_{\text{geométrica}}$  (dB): 35,577 dB

$\text{Att}_{\text{niebla}} = 5,818 \text{ dB}$

$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 5,619 \text{ dB}$

$L_{\text{sistema}} = 3 \text{ dB}$

Calculamos el  $M_{\text{link}}$  con la ecuación 39

$$M_{\text{link}} = P_e - |S_r| - \text{Att}_{\text{geométrica}} - \text{Att}_{\text{niebla}} - L_{\text{sistema}} - \text{Att}_{\text{lluvia}} \quad (39)$$

$$M_{\text{link}} = 11,985 \text{ dB}$$

#### 4.5.7 Enlace FSO 7: I.E. Hugo Salazar - I.E. Nuevo Copare

##### a. Atenuación geométrica

Para el cálculo se empleó la siguiente ecuación 40

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d.\theta)^2}{S_{captura}} \quad (40)$$

Donde:

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

$$d = 4,64 \text{ km} = 4640 \text{ m}$$

$$S_{captura} = 0,31 \text{ m}^2$$

$$S_d = 152,184 \text{ m}^2$$

*Cálculo de la atenuación geométrica*

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

$$Att_{geométrica} = 4909,154$$

$$Att_{geométrica} \text{ (dB)} = 36,910 \text{ dB}$$

##### b. Atenuación por niebla

Con  $V = 3,5 \text{ km}$ , se calcula "q" de acuerdo a la ecuación 41

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50\text{km} \\ 1,3 & \text{si } 6\text{km} < V < 50\text{km} \\ 0,16(V) + 0,34 & \text{si } 1\text{km} < V < 6\text{km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5\text{km} < V < 1\text{km} \end{array} \right\} \quad (41)$$

$$q = 0,9$$

*Cálculo de la atenuación por niebla*

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

$$\alpha_{fog} = 1,462 \text{ dB/km}$$

Para  $d = 4,64 \text{ km}$ , la atenuación por niebla es:

$$Att_{niebla} = \alpha_{fog} * d(\text{km}) = 1,462 * 4,64$$

$$Att_{niebla} = 6,783 \text{ dB}$$

**c. Atenuación por lluvia**

El coeficiente de lluvia se calculó con la siguiente ecuación 42

$$\alpha_{rain} = 1,076 \times R^{0,67} \quad (42)$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 1,5 mm/h

$$\alpha_{rain} = 1,412 \text{ dB/km}$$

*Cálculo de la atenuación por lluvia*

Para d= 4,64 km, la atenuación por lluvia es:

$$Att_{lluvia} = \alpha_{rain} \times d(\text{km}) = 1,412 \times 4,64$$

$$Att_{lluvia} = 6,551 \text{ dB}$$

**d. Margen del enlace\_(Mlink)**

Pe: 28 dBm

Sr: -34 dBm

Attgeométrica (dB): 36,910 dB

Attniebla= 6,783 dB

Attlluvia= 6,551 dB

Lsistema= 3 dB

Calculamos el M<sub>link</sub> con la ecuación 43

$$M_{link} = P_e - |S_r| - Att_{geométrica} - Att_{niebla} - L_{sistema} - Att_{lluvia} \quad (43)$$

$$M_{link} = 8,756 \text{ dB}$$

#### 4.5.8 Enlace FSO 8: Municipalidad La Yarada - I.E. Alfonso Ugarte

**a. Atenuación geométrica**

Para el cálculo se empleó la siguiente ecuación 44

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2}{S_{captura}} \quad (44)$$

Donde:

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

$$d = 0,766 \text{ km} = 766 \text{ m}$$

$$S_{\text{captura}} = 0,31 \text{ m}^2$$

$$S_d = 4,148 \text{ m}^2$$

*Cálculo de la atenuación geométrica*

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

$$Att_{\text{geométrica}} = 133,791$$

$$Att_{\text{geométrica}} \text{ (dB)} = 21,264 \text{ dB}$$

#### b. Atenuación por niebla

Con  $V = 3,5 \text{ km}$ , se calcula "q" de acuerdo a la ecuación 45

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50 \text{ km} \\ 1,3 & \text{si } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,16 (V) + 0,34 & \text{si } 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \end{array} \right\} \quad (45)$$

$$q = 0.9$$

*Cálculo de la atenuación por niebla*

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

$$\alpha_{\text{fog}} = 1,462 \text{ dB/km}$$

Para  $d = 0,766 \text{ km}$ , la atenuación por niebla es:

$$Att_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 1,462 * 0,766$$

$$Att_{\text{niebla}} = 1,120 \text{ dB}$$

#### c. Atenuación por lluvia

El coeficiente de lluvia se calculó con la siguiente ecuación 46

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * R^{0,67} \quad (46)$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 1,5 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,412 \text{ dB/km}$$

*Cálculo de la atenuación por lluvia*

Para  $d = 0,766$  km, la atenuación por lluvia es:

$$Att_{lluvia} = \alpha_{rain} * d(\text{km}) = 1,412 * 0,766$$

$$Att_{lluvia} = 1,081 \text{ dB}$$

**d. Margen del enlace ( $M_{link}$ )**

$P_e$ : 28 dBm

$S_r$ : -34 dBm

$Att_{geométrica}$  (dB): 21,264 dB

$Att_{niebla}$  = 1,120 dB

$Att_{lluvia}$  = 1,081 dB

$L_{sistema}$  = 3 dB

Calculamos el  $M_{link}$  con la ecuación 47

$$M_{link} = P_e - |S_r| - Att_{geométrica} - Att_{niebla} - L_{sistema} - Att_{lluvia} \quad (47)$$

$$M_{link} = 35,534 \text{ dB}$$

#### 4.5.9 Enlace FSO 9: Municipalidad La Yarada - Estación Los Palos

**a. Atenuación geométrica**

Para el cálculo se empleó la siguiente ecuación 48

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d.\theta)^2}{S_{captura}} \quad (48)$$

Donde:

$\theta = 3$  milirad (0,003 rad)

$d = 5,67$  km = 5670 m

$S_{captura} = 0,31 \text{ m}^2$

$S_d = 227,247 \text{ m}^2$

*Cálculo de la atenuación geométrica*

$Att_{geométrica} = S_d/S_{captura}$

$Att_{geométrica} = 7330,554$

$$Att_{geométrica} \text{ (dB)} = 38,651 \text{ dB}$$

**b. Atenuación por niebla**

Con  $V = 3,5 \text{ km}$ , se calcula "q" de acuerdo a la ecuación 49

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50\text{km} \\ 1,3 & \text{si } 6\text{km} < V < 50\text{km} \\ 0,16 (V) + 0,34 & \text{si } 1\text{km} < V < 6\text{km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5\text{km} < V < 1\text{km} \end{array} \right\} \quad (49)$$

$$q = 0,9$$

*Cálculo de la atenuación por niebla*

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

$$\alpha_{\text{fog}} = 1,462 \text{ dB/km}$$

Para  $d = 5,67 \text{ km}$ , la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 1,462 * 5,67$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 8,289 \text{ dB}$$

**c. Atenuación por lluvia**

El coeficiente de lluvia se calculó con la siguiente ecuación 50

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * R^{0,67} \quad (50)$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 1,5 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,412 \text{ dB/km}$$

*Cálculo de la atenuación por lluvia*

Para  $d = 5,67 \text{ km}$ , la atenuación por lluvia es:

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} * d(\text{km}) = 1,412 * 5,67$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 8,005 \text{ dB}$$

**d. Margen del enlace\_(M<sub>link</sub>)**

Pe: 28 dBm

Sr: -34 dBm

Attgeométrica (dB): 38,651 dB

Attniebla= 8,289 dB

Attlluvia= 8,005 dB

Lsistema= 3 dB

Calculamos el M<sub>link</sub> con la ecuación 51

$$M_{link} = P_e - |S_r| - Att_{geométrica} - Att_{niebla} - L_{sistema} - Att_{lluvia} \quad (51)$$

**M<sub>link</sub> = 4,055 dB****4.5.10 Enlace FSO 10: Estación Los Palos - I.E. Rómulo Boluarte****a. Atenuación geométrica**

Para el cálculo se empleó la siguiente ecuación 52

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4} (d \cdot \theta)^2}{S_{captura}} \quad (52)$$

Donde:

Θ = 3 milirad (0,003 rad)

d= 5,96 km = 5960 m

S<sub>captura</sub> = 0,31 m<sup>2</sup>S<sub>d</sub> = 251,087 m<sup>2</sup>*Cálculo de la atenuación geométrica*Attgeométrica = S<sub>d</sub>/S<sub>captura</sub>

Attgeométrica = 8099,593

**Attgeométrica (dB)= 39,085 dB**

**b. Atenuación por niebla**

Con  $V = 3,5 \text{ km}$ , se calcula "q" de acuerdo a la ecuación 53

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50\text{km} \\ 1,3 & \text{si } 6\text{km} < V < 50\text{km} \\ 0,16(V) + 0,34 & \text{si } 1\text{km} < V < 6\text{km} \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5\text{km} < V < 1\text{km} \end{array} \right\} \quad (53)$$

$$q = 0,9$$

*Cálculo de la atenuación por niebla*

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

$$\alpha_{\text{fog}} = 1,462 \text{ dB/km}$$

Para  $d = 5,96 \text{ km}$ , la atenuación por niebla es:

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 1,462 * 5,96$$

$$\text{Att}_{\text{niebla}} = 8,713 \text{ dB}$$

**c. Atenuación por lluvia**

El coeficiente de lluvia se calculó con la siguiente ecuación 54

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 * R^{0,67} \quad (54)$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 1,5 mm/h

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,412 \text{ dB/km}$$

*Cálculo de la atenuación por lluvia*

Para  $d = 5,96 \text{ km}$ , la atenuación por lluvia es:

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} * d(\text{km}) = 1,412 * 5,96$$

$$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 8,415 \text{ dB}$$

**d. Margen del enlace (M<sub>link</sub>)**

Pe: 28 dBm

Sr: -34 dBm

Attgeométrica (dB): 39,085 dB

Attniebla= 8,713 dB

Attlluvia= 8,415 dB

Lsistema= 3 dB

Calculamos el M<sub>link</sub> con la ecuación 55

$$M_{link} = P_e - |S_r| - Att_{geométrica} - Att_{niebla} - L_{sistema} - Att_{lluvia} \quad (55)$$

**M<sub>link</sub> = 2,788 dB****4.5.11 Enlace FSO 11: Alfonso Ugarte - I.E. Virginia Lázaro****a. Atenuación geométrica**

Para el cálculo se empleó la siguiente ecuación 56

$$Att_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d \cdot \theta)^2}{S_{captura}} \quad (56)$$

Donde:

Θ = 3 milirad (0,003 rad)

d= 6,32 km = 6320 m

S<sub>captura</sub> = 0,31 m<sup>2</sup>S<sub>d</sub> = 282,336 m<sup>2</sup>*Cálculo de la atenuación geométrica*Attgeométrica = S<sub>d</sub>/S<sub>captura</sub>

Attgeométrica = 9107,619

**Attgeométrica (dB)= 39,594 dB****b. Atenuación por niebla**Con **V= 3,5 km**, se calcula "q" de acuerdo a la ecuación 57

$$q = \left\{ \begin{array}{ll} 1,6 & \text{si } V > 50km \\ 1,3 & \text{si } 6km < V < 50km \\ 0,16(V) + 0,34 & \text{si } 1km < V < 6km \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5km < V < 1km \end{array} \right\} \quad (57)$$

**q = 0,9**

*Cálculo de la atenuación por niebla*

$\lambda = 1550 \text{ nm}$

**$\alpha_{\text{fog}} = 1,462 \text{ dB/km}$**

Para  $d = 6,32 \text{ km}$ , la atenuación por niebla es:

$\text{Att}_{\text{niebla}} = \alpha_{\text{fog}} * d(\text{km}) = 1,462 * 6,32 \text{ km}$

**$\text{Att}_{\text{niebla}} = 9,239 \text{ dB}$**

**c. Atenuación por lluvia**

El coeficiente de lluvia se calculó con la ecuación 58:

$$\alpha_{\text{rain}} = 1,076 x R^{0,67} \quad (58)$$

Donde:

R: intensidad de lluvia en la zona = 1,5 mm/h

**$\alpha_{\text{rain}} = 1,412 \text{ dB/km}$**

*Cálculo de la atenuación por lluvia*

Para  $d = 6,32 \text{ km}$ , la atenuación por lluvia es:

$\text{Att}_{\text{lluvia}} = \alpha_{\text{rain}} * d(\text{km}) = 1,412 * 6,32 \text{ km}$

**$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 8,923 \text{ dB}$**

**d. Margen del enlace ( $M_{\text{link}}$ )**

$P_e$ : 28 dBm

$S_r$ : -34 dBm

$\text{Att}_{\text{geométrica}}$  (dB): 39,594 dB

$\text{Att}_{\text{niebla}} = 9,239 \text{ dB}$

$\text{Att}_{\text{lluvia}} = 8,923 \text{ dB}$

$L_{\text{sistema}} = 3 \text{ dB}$

Calculamos el  $M_{\text{link}}$  con la ecuación 59

$$M_{\text{link}} = P_e - |S_r| - \text{Att}_{\text{geométrica}} - \text{Att}_{\text{niebla}} - L_{\text{sistema}} - \text{Att}_{\text{lluvia}} \quad (59)$$

**$M_{\text{link}} = 1,244 \text{ dB}$**

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

### 5.1. Análisis de la línea de vista de los enlaces ópticos FSO

La línea de vista (line on sight) es una de las principales características que debe cumplir todo enlace óptico FSO.

Las figuras 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52 y 53 muestran los perfiles topográficos de los 11 enlaces ópticos desplegados en la zona de estudio, elaborados en el estudio de gabinete, empleando la herramienta informática Google Earth Pro.

El resultado de la simulación de cada enlace FSO fue obtener un trayecto de línea de vista, el cual se verificó haciendo el estudio de campo en la zona de estudio, con la finalidad de observar si existía algún obstáculo físico (árboles o edificaciones) que obstruya la línea de vista troposférica en cada uno de los enlaces ópticos.

### 5.2. Análisis de las pérdidas geométricas vs longitud del enlace

La tabla 21 muestra los valores de las pérdidas geométricas y de la longitud de cada enlace óptico FSO.

**Tabla 21**

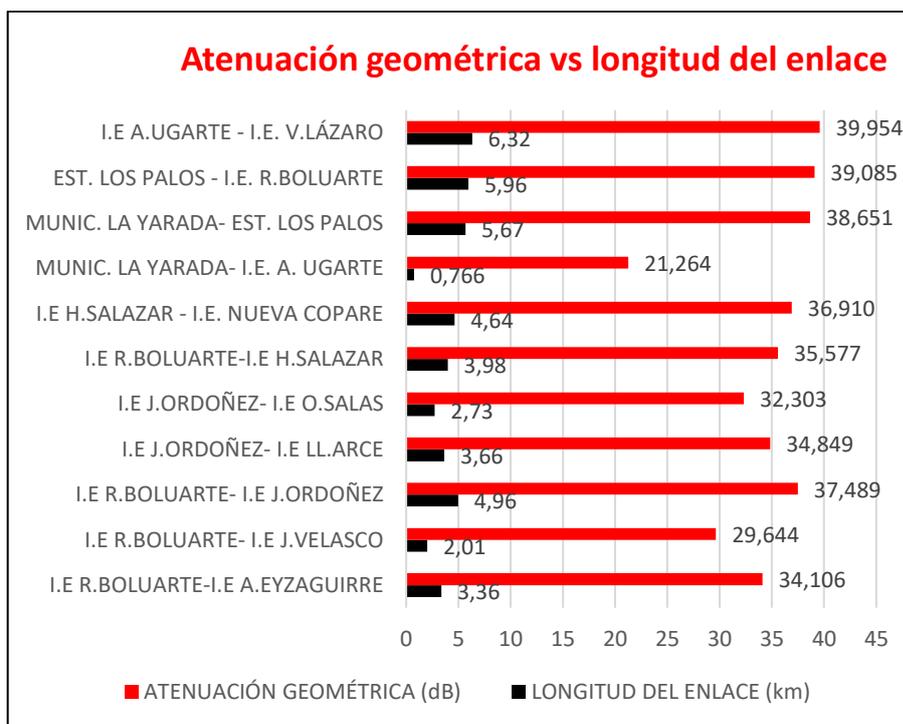
*Pérdidas geométricas en función de la longitud del enlace FSO*

Enlace FSO	Longitud del Enlace (km)	Atenuación Geométrica (dB)
I.E. R. Boluarte - I.E. A. Eyzaguirre	3,36	34,106
I.E. R. Boluarte - I.E. J. Velasco	2,01	29,644
I.E. R. Boluarte - I.E. J. Ordoñez	4,96	37,489
I.E. J. Ordoñez - I.E. Llacsa Arce	3,66	34,849
I.E. J. Ordoñez - I.E. O. Salas	2,73	32,303
I.E. R. Boluarte - I.E. H. Salazar	3,98	35,577
I.E. H. Salazar - I.E. Nuevo Copare	4,64	36,910
Munic. La Yarada - I.E. A. Ugarte	0,766	21,264
Munic. La Yarada - Est. Los Palos	5,67	38,651
Est. Los Palos - I.E. R. Boluarte	5,96	39,085
I.E. A. Ugarte - I.E. V. Lázaro	6,32	39,594

La figura 55 muestra la relación entre la longitud del enlace FSO y las pérdidas geométricas.

**Figura 55**

*Pérdidas geométricas vs longitud del enlace FSO*



### **Análisis de los resultados**

Para una divergencia del haz de 3 milirad y un diámetro de apertura de 20 cm, la longitud de los enlaces FSO variaron desde los 766 m hasta los 6,320 m. El incremento de la longitud del enlace FSO ocasionó que las pérdidas geométricas se incrementaron desde los 21,264 dB hasta los 39,594 dB.

Existe una relación directa entre las pérdidas geométricas y la longitud del enlace FSO.

### **5.3. Análisis de las pérdidas por niebla vs longitud del enlace**

La tabla 22 muestra los valores de las pérdidas por niebla y de la longitud de cada enlace óptico FSO.

**Tabla 22**

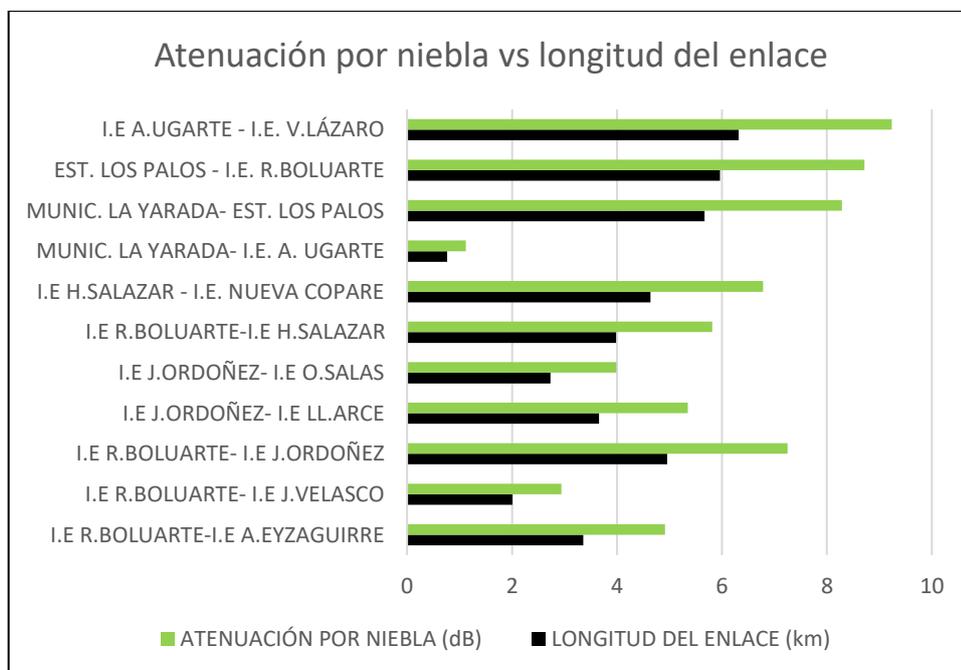
*Pérdidas por niebla en función de la longitud del enlace FSO*

Enlace FSO	Longitud del Enlace (km)	Atenuación por Niebla (dB)
I.E. R. Boluarte - I.E. A. Eyzaguirre	3,36	4,912
I.E. R. Boluarte - I.E. J. Velasco	2,01	2,938
I.E. R. Boluarte - I.E. J. Ordoñez	4,96	7,251
I.E. J. Ordoñez - I.E. Llacsá Arce	3,66	5,350
I.E. J. Ordoñez - I.E. O. Salas	2,73	3,991
I.E. R. Boluarte - I.E. H. Salazar	3,98	5,818
I.E. H. Salazar - I.E. Nuevo Copare	4,64	6,783
Munic. La Yarada - I.E. A. Ugarte	0,766	1,120
Munic. La Yarada - Est. Los Palos	5,67	8,289
Est. Los Palos - I.E. R. Boluarte	5,96	8,713
I.E. A. Ugarte - I.E. V. Lázaro	6,32	9,239

La figura 56 muestra la relación entre la longitud del enlace FSO y las pérdidas por niebla.

**Figura 56**

*Pérdidas por niebla vs longitud del enlace FSO*



## Análisis de los resultados

Para una visibilidad promedio en el distrito de La Yarada de 3,5 km y una longitud de onda de operación de 1550 nm del enlace FSO, la longitud de los enlaces FSO variaron desde los 766 m hasta los 6,320 m.

El incremento de la longitud del enlace FSO ocasionó que las pérdidas por niebla se incrementaron desde los 1,120 dB hasta los 9,239 dB,

Existe una relación directa entre las pérdidas por niebla y la longitud del enlace FSO.

### 5.4. Análisis de las pérdidas por lluvia vs longitud del enlace

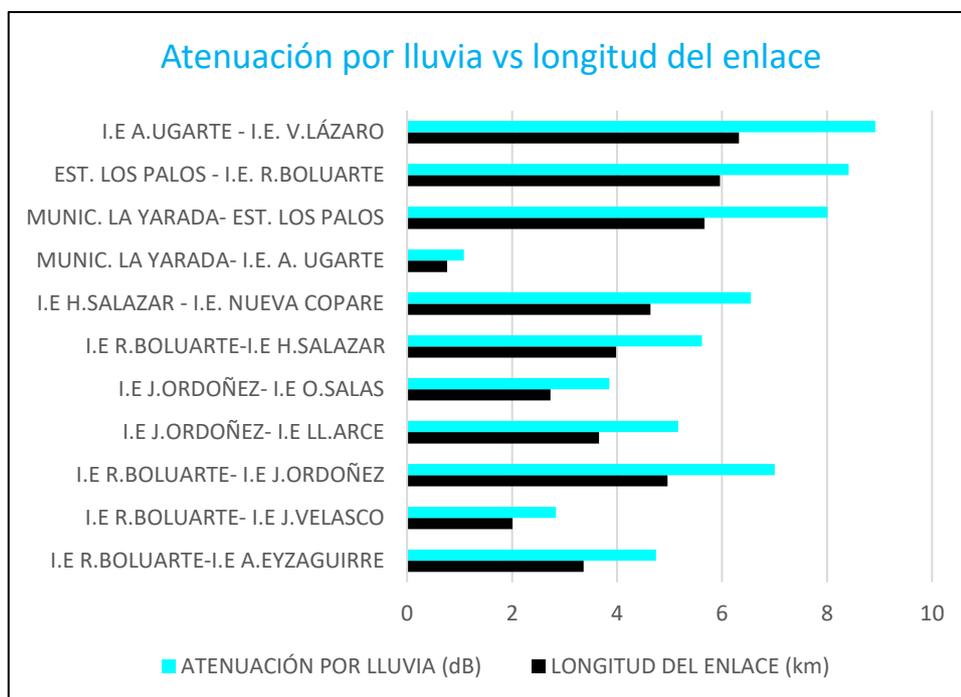
La tabla 23 muestra los valores de las pérdidas por lluvia y de la longitud de cada enlace óptico FSO.

**Tabla 23**

*Pérdidas por lluvia en función de la longitud del enlace FSO*

Enlace FSO	Longitud del Enlace (km)	Atenuación por Lluvia (dB)
I.E. R. Boluarte - I.E. A. Eyzaguirre	3,36	4,744
I.E. R. Boluarte - I.E. J. Velasco	2,01	2,838
I.E. R. Boluarte - I.E. J. Ordoñez	4,96	7,003
I.E. J. Ordoñez - I.E. Llacsá Arce	3,66	5,167
I.E. J. Ordoñez - I.E. O. Salas	2,73	3,854
I.E. R. Boluarte - I.E. H. Salazar	3,98	5,619
I.E. H. Salazar - I.E. Nuevo Copare	4,64	6,551
Munic. La Yarada - I.E. A. Ugarte	0,766	1,081
Munic. La Yarada – Est. Los Palos	5,67	8,005
Est. Los Palos - I.E. R. Boluarte	5,96	8,415
I.E. A. Ugarte - I.E. V. Lázaro	6,32	8,923

La figura 57 muestra la relación entre la longitud del enlace FSO y las pérdidas por lluvia.

**Figura 57***Pérdidas por lluvia vs longitud del enlace FSO***Análisis de los resultados**

Para una intensidad de lluvia promedio de 1,5 mm/h en el distrito de La Yarada, la longitud de los enlaces FSO variaron desde los 766 m hasta los 6,320 m.

El incremento de la longitud del enlace FSO ocasionó que las pérdidas por lluvia se incrementaron desde los 1,081 dB hasta los 8,923 dB.

Existe una relación directa entre las pérdidas por niebla y la longitud del enlace FSO.

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

La tabla 24 muestra los valores del margen del enlace y de la longitud de cada enlace óptico FSO.

**Tabla 24**

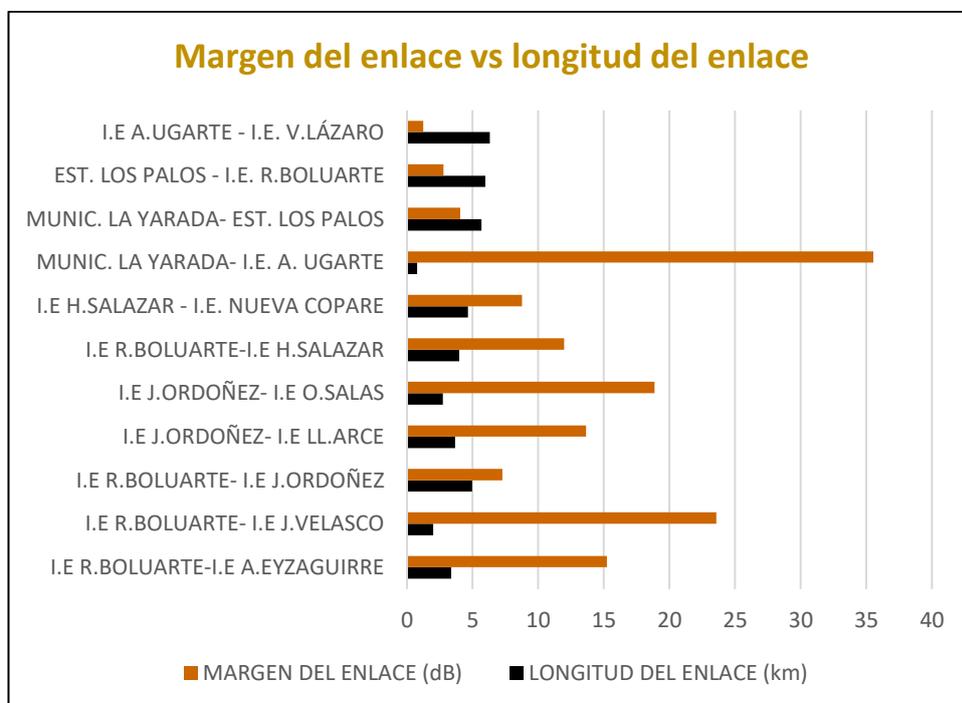
*Margen del enlace en función de la longitud del enlace FSO*

Enlace FSO	Longitud del Enlace (km)	Margen del Enlace (dB)
I.E. R. Boluarte - I.E. A. Eyzaguirre	3,36	15,238
I.E. R. Boluarte - I.E. J. Velasco	2,01	23,580
I.E. R. Boluarte - I.E. J. Ordoñez	4,96	7,257
I.E. J. Ordoñez - I.E. Llacsá Arce	3,66	13,633
I.E. J. Ordoñez - I.E. O. Salas	2,73	18,852
I.E. R. Boluarte - I.E. H. Salazar	3,98	11,985
I.E. H. Salazar - I.E. Nuevo Copare	4,64	8,756
Munic. La Yarada - I.E. A. Ugarte	0,766	35,534
Munic. La Yarada - Est. Los Palos	5,67	4,055
Est. Los Palos - I.E. R. Boluarte	5,96	2,788
I.E. A. Ugarte - I.E. V. Lázaro	6,32	1,244

La figura 58 muestra la relación entre la longitud del enlace FSO y el margen del enlace.

**Figura 58**

*Margen del enlace vs longitud del enlace FSO*



### **Análisis de los resultados**

Para una potencia de emisión de 28 dBm y una sensibilidad de recepción de -34 dBm, la longitud de los enlaces varió desde los 766 m hasta los 6,320 m.

El incremento de la longitud del enlace FSO ocasionó que el margen del enlace se redujera desde los 35,534 dB hasta los 1,244 dB,

Existe una relación inversa entre el margen del enlace y la longitud del enlace FSO. A mayor longitud del enlace FSO menor es el margen del enlace.

Se observó que todos los valores obtenidos del margen del enlace son mayores a 0 dB, lo que indica que en las condiciones planteadas para la red de enlaces FSO del proyecto, todos los enlaces pueden operar. Sin embargo, para garantizar la operatividad 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 5,85 km.

## CONCLUSIONES

La propuesta de una red óptica inalámbrica basado en la tecnología FSO en la presente investigación, permitió dar cobertura a 10 instituciones educativas del distrito La Yarada de la región de Tacna, a través de una plataforma tecnológica de banda ancha de protocolo Gigabit Ethernet.

Para el despliegue de la red de enlaces FSO en la zona de estudio, se utilizó la configuración Punto a Multipunto y Multipunto a Punto, empleando conexiones de banda ancha de 1.5 Gbps.

En el diseño de la red de Enlaces FSO, se calculó el Margen del Enlace (Mlink) para cada enlace óptico FSO. De los valores obtenidos del Mlink, se puede concluir que los 11 enlaces ópticos FSO se encuentran disponibles en la zona de estudio, dado que el Mlink obtenido para cada enlace fue mayor a 0 dB ( $Mlink > 0 \text{ dB}$ )

Considerando que en el distrito de La Yarada la intensidad de lluvia promedio anual es de 1,5 mm/h (considerada como lluvia ligera) y que la visibilidad se encuentra entre 1 km a 6 km, las pérdidas obtenidas por la actividad atmosférica en la zona de estudio (lluvia y niebla), tienen poca incidencia en la operatividad de los enlaces ópticos FSO. Sin embargo, los valores altos de las pérdidas geométricas tienen una fuerte incidencia en la operatividad de los enlaces ópticos FSO cuando mayor es la longitud del enlace.

## RECOMENDACIONES

No se recomienda el empleo de enlaces ópticos inalámbricos en zonas de alta actividad atmosférica: zonas de precipitaciones de lluvias intensas, zonas de presencia de niebla espesa con visibilidades menores a 100 metros y zonas con precipitaciones de nieve.

A fin de garantizar la operatividad de los enlaces ópticos FSO, se recomienda que los valores del margen del enlace sean mayores a 10 dB ( $M_{link} > 10$  dB).

Siendo primordial la existencia de línea de vista troposférica, es recomendable que durante el diseño de la red de enlaces FSO, se realice visitas de campo en la zona de estudio a fin de verificar la no presencia de obstáculos en la trayectoria de los enlaces, como árboles o nuevas edificaciones.

Se recomienda la instalación de los equipos FSO en puntos altos (como edificios o torres de comunicaciones), que sean estables y seguros. Los equipos deberán fijarse a la superficie, a fin de evitar el incremento de las pérdidas por desalineamiento del enlace óptico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**APA (2019)** Guía de Norma APA, 7ª Edición.

Disponible en: <https://cutt.ly/9YEcpC3>

**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 Vol. 4, No. 8, september 2009.

Disponible en: <https://cutt.ly/ONe1BYL>

**Borwankar, S. y Shah, D. (2020).** *Effect of weather conditions on FSO link*. Disponible

en: <https://cutt.ly/iXwrv34>

**Cuenca, Ch., y 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*. [Tesis de Título, Escuela Politécnica Nacional], Ecuador.

Disponible en: <https://cutt.ly/5XweBQA>

**Domeño, D. y Medrano, J. (2008).** *Redes de banda ancha: Free Space Optics (FSO)*.

Disponible en: <https://cutt.ly/5NyjKjW>

**Gebhart, M, Leitgeb, E., Sheikh Muhammad S., Flecker, B., Chlestil, C., Al Naboulsi, M., de Fornel, F. and H. Sizun (2005)** *“Measurement of Light attenuation in dense fog conditions for FSO applications”*, Proc. SPIE 5891, Atmospheric Optical Modeling, Measurement, and Simulation.

Disponible en: <https://cutt.ly/GNeV3cS>

**Gallegos, C. (2009).** *“Diseño De Una Red Óptica Inalámbrica Para El Envío De Voz Y Datos En Áreas No Urbanas”*. [Tesis de Título, Pontificia Universidad Católica del Perú], Lima- Perú.

Disponible en: <https://cutt.ly/bNe4XUM>

**Hassnain, Khan & Amjad (2022).** *“Hybrid FSO/RF networks: A review of practical constraints, applications and challenges”*. ScienceDirect: Optical Switching and Networking, Vol. 47, Article 100697.

Disponible en: <https://cutt.ly/6Ne8cUx>

**Khan, M. (2012).** *FSO Channel Characterization for Continental Fog Environments.*

[Tesis de doctorado, Graz University of Technology, Austria]. Disponible en:

<https://cutt.ly/IXwrjw8>

**Quesquén, L. (2019).** “Diseño y Configuración de un Sistema de Comunicaciones basado en transmisión óptica en el espacio libre - FSO y redundancia con Enlace Wireless Punto A Punto de 5.8 GHz para Sedes Empresariales en la Ciudad de Lima”. [Tesis de Título, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur], Lima-Perú.

Disponible en: <https://cutt.ly/nNe2jSX>

**ANEXOS**

### ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLE DE ESTUDIO	DIMENSIÓN	INSTRUMENTO
<p><b>1. INTERROGANTE PRINCIPAL</b> ¿En qué medida, la propuesta de un sistema de comunicación óptica de espacio libre (FSO) como tecnología complementaria, permitirá dar soporte de los servicios de banda ancha en situaciones temporales, a una red de radiocomunicación (RF) de las Instituciones Educativas del distrito de La Yarada Los Palos, región Tacna, en el año 2022?</p> <p><b>2. INTERROGANTES ESPECÍFICAS</b> ¿En qué medida la capacidad de transmisión del sistema de comunicación óptica FSO propuesto, dependerá de la arquitectura seleccionada para dar cobertura a las instituciones educativas de la zona de estudio?</p> <p>¿En qué medida los resultados obtenidos para el margen del enlace (Mlink) para los enlaces ópticos del sistema de comunicación FSO en la zona de estudio, garantizarán su disponibilidad?</p> <p>¿En qué medida el cálculo de las pérdidas obtenidas por la actividad atmosférica en la zona de estudio, incidirá en la operatividad de los enlaces ópticos inalámbricos (FSO)?</p>	<p><b>1. OBJETIVO GENERAL</b> Proponer un sistema de comunicación óptica de espacio libre (FSO) como tecnología complementaria, que permita dar soporte de los servicios de banda ancha en situaciones temporales, a una red de radiocomunicación (RF) de las Instituciones Educativas del distrito de La Yarada Los Palos, región Tacna, en el año 2022.</p> <p><b>2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> Determinar la capacidad de transmisión del sistema de comunicación óptica FSO propuesto, tomando en cuenta la arquitectura seleccionada para dar cobertura a las instituciones educativas de la zona de estudio.</p> <p>Determinar la disponibilidad de los enlaces ópticos del sistema de comunicación FSO propuesto en la zona de estudio, utilizando los resultados obtenidos para el margen del enlace (Mlink).</p> <p>Calcular las pérdidas obtenidas por la actividad atmosférica en la zona de estudio, para determinar su incidencia en la operatividad de los enlaces ópticos inalámbricos (FSO)</p>	<p>Sistema de comunicación óptica en el espacio libre (FSO), como tecnología complementaria a una red de radiocomunicación (RF) de las instituciones educativas del distrito La Yarada</p>	<p><b>Operatividad del sistema</b></p> <p style="text-align: center;"><b>INDICADORES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud del enlace (km)</li> <li>• Longitud de onda de operación (nanómetro)</li> <li>• Margen del enlace óptico (dB)</li> </ul>	<p>Recomendación UIT-R P.1817-1</p> <p>Sistema Escale del Ministerio de Educación</p> <p>Modelo de predicción de lluvia</p>

## ANEXO 2: EQUIPAMIENTO ÓPTICO

**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

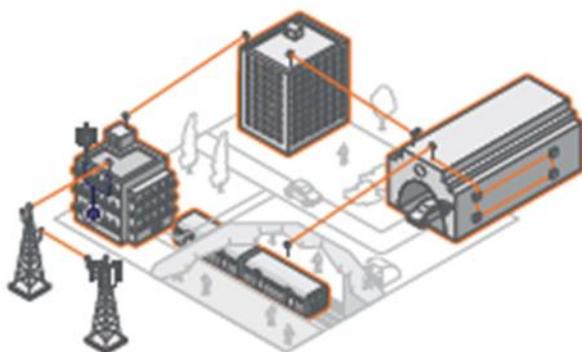
3G/4G/LTE Backhaul  
Backhaul Redundancy  
Remote Antenna Extension

#### 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



Free-Space Optical		155-M <sup>1</sup>	1250-M <sup>1</sup>
<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		



## TereScope® - The Most Comprehensive Free Space Optics Wireless solution

### TereScope® 5000 - Technical Specifications

Part number	TSS000/4E1/V *or TSS000/4T1/V *	TSS000/ETH/V *	TSS000/XYZ/V **or TSS000/XYZ/F **	TSS000G/XYZ/V** or TSS000G/XYZ/F**	
Model	TSS000/4E1 or TSS000/4T1 *	TSS000/ETH	TSS000/1SS **or TSS000/1SS-F **	TSS000/G or TSS000/G-F	
Standard P.N. Applications/ Data Protocol	TSS000/4E1/V5 4E1:4x2.048 Mbps or 4T1:4x1.55 Mbp G.703/G.704	TSS000/ETH/V5 Ethernet (10 Mbps)	TSS000/M3C/V15 Fast Ethernet, ATM, OC3, STM1, SMPTE, E3, T3, OC1/ STM0 & Open Protocol	TSS000G/MBC/V15 Gigabit Ethernet Escon, 622 Mbps, Fibre channel and others between 100 and 1500 Mbps	
Performance	Rate	10Mbps	1-155 Mbps	100-1500 Mbps	
	Range <sup>1</sup>			Not attenuated, (3TXs)	
	@ 3 dB/km	6700 m	6700 m	3500 m	3100 m
	@ 5 dB/km	5000 m	5000 m	4080 m	2750 m
	@10 dB/km	3200 m	3200 m	2650 m	1850 m
	@17 dB/km	2170 m	2170 m	1820 m	1300 m
	@30 dB/km	1400 m	1400 m	1185 m	850 m
Minimum Range	400m	400m	450 m	700 m	
BER error rate	Less than 1E - 9 (unfaded)	Less than 1E - 9 (unfaded)	Less than 1E - 12 (unfaded)	Less than 1E - 12 (unfaded)	
MTEF			10 years		
Transmitter	Light source		5 x Lasers		
	Wavelength		830 - 860 nm		
	Total Output power		85 mW	70 - 120 mW	
	Beam divergence		2 mrad		
Receiver	Detector		APD		
	Field of view		2 mrad		
	Sensitivity	-55 dBm	-55 dBm	-46 dBm	-33 dBm
Interface	Type	Electrical: E1:75 Ohm or 120 Ohm, T1: 100 Ohm	Copper 10 BaseT	Fiber Optic Transceiver - Multimode (Singlemode available upon request)	
	Connectors	Universal Connector	RMS	SC (other connectors available)	
	Impedance	E1: 75 Ohm or 120 Ohm			
	Cable	Coax or STP	STP		
	Cable loss	Supports Short and Long haul trunks			
	Wavelength			1310 nm (other wavelength available)	850 nm (other wavelength available)
	Output power			-17 ± 3 dBm	-4 to -8.5 dBm
	TX operating range			-14 to -30 dBm	0 to -17 dBm
	Power Supply			Factory set: 100-240 VAC, @ 50/60 Hz or 35-60 VDC (V3 and F3 versions)	
	Power consumption			30 W	
Environmental Information	Operating temperature		-30° C to +60° C		
	Storage temperature		-50° C to +70° C		
	Humidity		95% non-condensing		
	Housing		Weatherproofing: IP66		
	Eye safety Class		1M		
Mechanical Design	Dimensions (mm)		790 x 390 x 556 (AO-5000: 250x353x432)		
	Weight	Unit	14 kg		
	Accessories		21.5 kg		
Modularity		Modular Power supply	Modular Power supply, Modular Interface Redundant Power supply - optional		
Diagnostics	Indicators	AirLink Flag, Sync E1 Ports: LED per port Receive Signal Strength (Digital Display) Laser status (3 LEDs)	AirLink Flag, Data, 10 BaseT Flag Data Receive Signal Strength (Digital Display), Laser status (3 LEDs)	AirLink Flag, Sync, Fiber Optic Flag, Sync, Alignment, Loopback, Fusion: Enabled/Active, Heating status (if exists), Control mode: Hardware mode or software mode. Power supply status, Heating active, Receive Signal Strength (Digital Display), Lasers status (3 LEDs), SNMP TX and RX	
	Selectors	Termination, Electrical receive sensitivity, Line Incooding L/LB, IP Address setting	IP address setting	Data Rate, Alignment, Loopback (local), Remote loopback, Loopback selection, Remote loopback, Fusion activation, Signal attenuation, for Short distance	

# EL-1GL



- ✓ Throughput 10/100/1000 Mbit/s Full Duplex
- ✓ Double channel technology with backup supply voltage 48V DC
- ✓ Built-in service channel
- ✓ Systems of autotracking (targeting and aiming)
- ✓ IP monitoring
- ✓ Backup channel equipment (MW 72-75GHz) option
- ✓ 19" indoor units with power supply (AC 220V/DC 48V)



Basic interfaces	10/100/1000 BASE-TX SFP-1000 BASE-SX
Throughput	RJ-45: 10/100/1000 Mbit/s SFP: 1000 Mbit/s
Wavelength, nm	1550
Bandwidth, Mbit/s	1250 Full duplex
Fade margin at a distance of 1 km, dB	44
Latency of optical channel, ms	< 0.125
Links distances	4400
Alignment	Autotracking system
Dynamic range of angle deviation processing (position keeping angle), mrad (grade)	65 (3.7)
Speed of autotracking adjustment, mrad/s	8
Power supply, V	AC 100-242 DC 48 ± 12%
Power consumption, W	40 - 67 (with heated optics)
Operating temperature of the outdoor units, °C	-40 ... +50
Dimensions, mm	
Optical unit	480x300x285
Interface unit	445x300x45 (19" 1U)
Radio unit	245x225x70
Weight, kg	
Optical unit	9
Interface unit	2
Radio unit	1
Cables length, m	< 100
Management, monitoring	UDP (firmware) SNMP traps



**EC SYSTEM**