



**unl**

Universidad  
Nacional  
de Loja

**Universidad Nacional de Loja**

**Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos  
Naturales no Renovables**

**Carrera de Telecomunicaciones**

**Diseño de un Sistema de Comunicación Óptico - Inalámbrico  
orientado al análisis comparativo entre las tecnologías Free Space  
Optics (FSO) y Radiofrecuencia (RF)**

**Trabajo de Integración Curricular  
previo a la obtención del título de  
Ingeniero en Telecomunicaciones.**

**AUTOR:**

Jhandry Sergio Torres Rojas

**DIRECTOR:**

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas Mg Sc.

**Loja – Ecuador**

**2023**

*Educamos para Transformar*

## Certificación

Loja, 29 de junio de 2023

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas Mg Sc

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

### **CERTIFICO:**

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño de un Sistema Óptico Inalámbrico orientado al Análisis Comparativo entre las Tecnologías Free Space Optics (FSO) y Radiofrecuencia (RF)**, previo a la obtención del título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, de la autoría del estudiante **Jhandry Sergio Torres Rojas**, con **cédula de identidad Nro. 1104555022**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

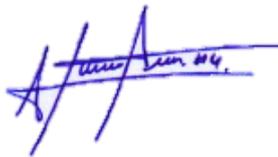


Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas Mg Sc

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## **Autoría**

Yo, **Jhandry Sergio Torres Rojas**, declaro ser el autor del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi trabajo de integración curricular en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jhandry Torres Rojas'.

**Firma**

**Cédula de Identidad:** 1104555022

**Fecha:** 5 de julio de 2023

**Correo electrónico:** [jhandry.torres@unl.edu.ec](mailto:jhandry.torres@unl.edu.ec)

**Teléfono:** 0990337861

**Carta de autorización por parte del autor, para la consulta, reproducción parcial o total, y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular.**

Yo, **Jhandry Sergio Torres Rojas**, declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño de un Sistema de Comunicación Óptico – Inalámbrico orientado al Análisis Comparativo entre las Tecnologías Free Space Optics (FSO) y Radiofrecuencia (RF)**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los cinco días de mes de julio del dos mil veintitrés



**Firma:**

**Autor:** Jhandry Sergio Torres Rojas

**Cédula:** 1104555022

**Dirección:** Loja – Caran Shyris

**Correo Electrónico:** [jhandry.torres@unl.edu.ec](mailto:jhandry.torres@unl.edu.ec)

**Teléfono:** 0990337861

**DATOS COMPLEMENTARIOS:**

**Director del Trabajo de Integración Curricular:** Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas Mg. Sc.

## **Dedicatoria**

Quiero dedicar todo mi esfuerzo reflejado en este trabajo en primer lugar a Dios y a la Virgen del Cisne, por otorgarme todas las capacidades para formarme como profesional y guiarme por el camino correcto para conseguir todos mis objetivos, pese a las dificultades que se presentaron en mi vida personal y formación profesional.

También dedico este trabajo a mis padres Nora Rojas y Ángel Torres, por todo el apoyo moral y económico que me han brindado durante mi existencia, ya que han sido las personas que me han dado la mano cuando más he necesitado y es a ellos a quien debo todo lo que soy en la vida.

A mis hermanos Camilo y Camila, por escucharme y ser mi principal motivo de superación en toda esta formación académica.

A mi abuelo José Miguel Rojas Torres, por estar conmigo ayudándome a adquirir mis primeras bases de aprendizaje y por permanecer en mi corazón durante mi formación profesional.

A mis profesores, por impulsarme cada día a ser mejor, en especial a mi director del Trabajo de Integración Curricular por haberme guiado en este trabajo de integración curricular ya que con su experiencia y sabiduría me ayudó a direccionar mis conocimientos.

***Jhandry Sergio Torres Rojas***

## **Agradecimiento**

Agradezco a Dios y a la Virgen del Cisne, por brindarme salud, sabiduría, amor y la fuerza de fe para cumplir mis metas.

Infinitas gracias a mis padres por no dejarme solo en esta etapa de mi vida y por los valores que me han inculcado desde niño, enseñándome que no hay nada más importante que el respeto, la humildad y la educación.

A toda mi familia por brindarme su apoyo incondicional durante esta etapa de mi vida a lo largo de mi formación universitaria.

A toda la planta docente de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones por enseñarme a tener un pensamiento crítico y analizar los problemas de manera más profunda, además por cada uno de los desafíos, que me hicieron ir más allá de mis límites y adquirir nuevos conocimientos.

Especialmente un profundo agradecimiento a mi director del Trabajo de Integración Curricular Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas por su paciencia y sabiduría en todo momento, ya que, gracias a su orientación, pude desarrollar mis habilidades de investigación y alcanzar un nivel de excelencia en mi trabajo de integración curricular.

A la Universidad Nacional de Loja, por abrirme las puertas para educarme y compartir momentos especiales con mis amigos y compañeros.

***Jhandry Sergio Torres Rojas***

## Índice de Contenido

<b>Portada</b> .....	<b>i</b>
<b>Certificación</b> .....	<b>ii</b>
<b>Autoría</b> .....	<b>iii</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de Contenido</b> .....	<b>vii</b>
Índice de Tablas: .....	xii
Índice de Figuras:.....	xiv
Índice de Ecuaciones: .....	xix
Índice de Anexos: .....	xx
<b>1. Título</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Resumen</b> .....	<b>2</b>
2.1 Abstract .....	3
<b>3. Introducción</b> .....	<b>4</b>
<b>4. Marco Teórico</b> .....	<b>7</b>
4.1 Origen de las Redes y Comunicaciones Inalámbricas .....	8
4.2 Free Space Optics (FSO).....	11
4.2.1 Principios.....	11
4.2.2 Componentes de la tecnología FSO .....	13
4.2.3 Tipos de configuraciones de enlaces FSO .....	16
4.2.4 Factores que afectan los Sistemas de Comunicación FSO.....	18
4.2.5 Ley de Beer .....	19
4.2.6 Absorción y Dispersión.....	20
4.2.7 Dispersión de Rayleigh .....	21
4.2.8 Dispersión de Mie .....	22
4.2.9 Modelo de Canales de FSO.....	23

4.2.10	Canal Atmosférico .....	23
4.2.11	Pérdidas en el Espacio Libre .....	24
4.2.12	Pérdidas en el Haz Divergente .....	24
4.2.13	Turbulencia Atmosférica.....	25
4.3	Radiofrecuencia (RF) .....	26
4.3.1	Principios.....	26
4.3.2	Espectro Electromagnético.....	27
4.3.3	Componentes de los sistemas RF.....	28
4.3.4	Formas de Propagación de Ondas .....	28
4.3.5	Fenómenos que se producen en la propagación .....	29
4.3.6	Modelos de Predicción de Pérdida de Trayecto .....	29
4.3.7	Ecuación de transmisión de Friis o Modelo de Espacio Libre (FSPL) .....	30
4.3.8	Modelo de Tierra Plana .....	31
4.3.9	Modelo de Okumura .....	31
4.3.10	Modelo de Equipo de Cooperativa Europea para la Investigación Científica y Técnica (COST-231).....	31
4.3.11	Modelo ECC 33.....	32
<b>5</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>33</b>
5.1	Área de Estudio .....	33
5.2	Materiales .....	34
5.3	Metodología Implementada.....	35
5.4	Fase 1: Investigación y recolección de información de FSO y RF .....	36
5.5	Fase 2: Selección de software de simulación .....	36
5.5.1	Software seleccionado para Free Space Optics.....	37
5.5.2	Software seleccionado para Radiofrecuencia.....	37
5.6	Fase 3: Estudio, Diseño y Simulación.....	38
5.6.1	Diseño y Criterios Previos para la Red FSO .....	38

5.6.2	Estudio del lugar de instalación de los equipos .....	38
5.6.3	Distancia del Enlace .....	40
5.6.4	Condiciones Climáticas en la Ciudad de Loja .....	41
5.6.5	Selección del Equipo más adecuado para la tecnología FSO .....	44
5.6.6	Diagrama de Conexión de la Interfaz Óptica .....	54
5.6.7	Locación Óptima y Aceptable.....	56
5.6.8	Simulación escenarios FSO Bajo dos Condiciones Atmosféricas .....	57
5.6.8.1.	Escenario 1 lluvia ligera (5-10 mm/hr), con una neblina ligera con atenuación de 3dB/Km.....	58
5.6.8.2.	Escenario 2 lluvias fuertes superiores a 180mm/hr, vientos, humo moderado con atenuación de 30 dB/Km. ....	61
5.6.9	Simulaciones escenario FSO con incremento de tasa de bits .....	62
5.6.9.1.	Escenario 3 FSO con una tasa de bits de 500 Mbps. ....	62
5.6.9.2.	Escenario 4 FSO con una tasa de bits de 1 Gbps. ....	63
5.6.9.3.	Escenario 5 FSO con una tasa de bits de 2.5 Gbps.....	64
5.6.10	Simulaciones escenario FSO en base al rendimiento del equipo TS5000	64
5.6.10.1.	Escenario 6 FSO con atenuación de 3dB/Km a 3 Km. ....	65
5.6.10.2.	Escenario 7 FSO con una atenuación de 5 dB/Km a 2.5 Km.....	66
5.6.10.3.	Escenario 8 FSO con una atenuación de 10 dB/Km a 1.7 Km.....	66
5.6.10.4.	Escenario 9 FSO con una atenuación de 17 dB/Km a 1.22 Km.....	67
5.6.10.5.	Escenario 10 FSO con una atenuación de 30 dB/Km a 820 m. ....	68
5.6.11	Diseño y criterios previos para la red de RF.....	68
5.6.12	Selección del equipo más adecuado para la tecnología RF.....	71
5.6.13	Simulación escenario RF.....	75
<b>6</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>81</b>
6.1	Fase 4: Análisis Técnico Sobre el Comportamiento de FSO y RF .....	81
6.1.1	Resultados simulación escenarios 1 y 2 FSO bajo dos condiciones atmosféricas.....	81

6.1.1.1. Análisis Caso 1.....	82
6.1.1.2. Análisis caso 2. ....	85
6.1.2 Resultado simulaciones escenarios FSO con incremento de tasa de bits..	86
6.1.1.1. Análisis caso 3. ....	88
6.1.1.2. Análisis caso 4. ....	90
6.1.2.3. Análisis caso 5. ....	91
6.1.3. Resultado simulaciones escenario FSO en base al rendimiento del equipo TS5000 .....	93
6.1.3.1. Análisis caso 6 .....	94
6.1.3.2. Análisis caso 7. ....	96
6.1.3.3. Análisis caso 8. ....	97
6.1.3.4. Análisis caso 9. ....	99
6.1.3.5. Análisis caso 10. ....	100
6.1.4. Resultado análisis matemático FSO.....	102
6.1.1.1. Análisis de pérdidas de canal para el escenario 1 (3 dB/Km a 4.89 Km). 102	
6.1.1.1. Análisis de pérdidas de canal en el Escenario 2 (30 dB/Km a 4.89 Km). 107	
6.1.5. Resultados simulación tecnología RF.....	108
6.1.5.1. Resultado escenario RF visto desde Google Earth. ....	113
6.1.6. Resultados análisis matemático RF.....	115
6.1.6.1. Análisis Matemático Zona de Fresnel RF.....	115
6.1.6.2. Análisis matemáticos pérdidas en el espacio libre RF.....	116
6.1.6.3. Análisis matemático potencia en el receptor RF.....	116
6.2 Análisis Comparativo Sobre los Aspectos Técnicos de Equipamiento Entre las Tecnologías FSO y RF .....	117
6.3 Fase 5: Análisis económico de las tecnologías FSO y RF.....	122
6.3.1 Análisis económico FSO.....	122

6.3.2	Análisis económico RF .....	123
6.3.3	Tabla comparativa de costos entre FSO y RF.....	125
<b>7</b>	<b>Discusión .....</b>	<b>126</b>
<b>8</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>129</b>
<b>9</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>132</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>134</b>
<b>11</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>140</b>

## Índice de Tablas:

<b>Tabla 1.</b> Ventajas y desventajas de la configuración de enlace LOS.....	16
<b>Tabla 2.</b> Ventajas y desventajas de la configuración de enlaces NLOS. ....	17
<b>Tabla 3.</b> Ventajas y desventajas de la configuración para enlaces difusos .....	17
<b>Tabla 4.</b> Ventajas y desventajas de la configuración para Enlaces Cuasi- Difusos Multihaz.....	18
<b>Tabla 5.</b> Escenarios para el estudio de FSO y RF .....	33
<b>Tabla 6.</b> Materiales y herramientas de software .....	35
<b>Tabla 7.</b> Especificaciones técnicas equipo E+ .....	46
<b>Tabla 8.</b> Especificaciones técnicas equipo M .....	46
<b>Tabla 9.</b> Especificaciones técnicas equipo SONAbeam Z.....	47
<b>Tabla 10.</b> Especificaciones técnicas equipo EL-10Gex FSO.....	49
<b>Tabla 11.</b> Especificaciones técnicas equipo FSO EL-1GL.....	49
<b>Tabla 12.</b> Especificaciones técnicas equipo FSO M1-GE-L.....	51
<b>Tabla 13.</b> Especificaciones técnicas equipo FSO M1-GE-L.....	51
<b>Tabla 14.</b> Especificaciones técnicas equipo FSO M1-30GE .....	52
<b>Tabla 15.</b> Especificaciones técnicas equipo TereScope 5000.....	53
<b>Tabla 16.</b> Especificaciones técnicas equipo TereScope 4000.....	54
<b>Tabla 17.</b> Rendimiento equipo TS5000 en base al rango de operación .....	65
<b>Tabla 18.</b> Especificaciones técnicas equipo MIMOSA N5-X20 con C5x.....	71
<b>Tabla 19.</b> Parámetros del enlace FSO .....	81
<b>Tabla 20.</b> Resultados Escenario 1 y 2 FSO.....	82
<b>Tabla 21.</b> Parámetros del enlace FSO con incremento de tasa de bits.....	87
<b>Tabla 22.</b> Resultados escenario 3,4 y 5 con incremento de tasa de bits.....	87
<b>Tabla 23.</b> Resultados escenarios en base al Rendimiento del equipo TS5000 .....	93
<b>Tabla 24.</b> Parámetros para el análisis matemático FSO.....	102
<b>Tabla 25.</b> Resumen Resultados Análisis Matemático (caso 1) .....	107
<b>Tabla 26.</b> Resumen Resultados Análisis Matemático (caso 2) .....	108
<b>Tabla 27.</b> Valores para encontrar la Potencia en el Receptor RF .....	117
<b>Tabla 28.</b> Tabla comparativa entre FSO y RF .....	118
<b>Tabla 29.</b> Representación gráfica comparativa entre FSO y RF.....	121
<b>Tabla 30.</b> Presupuesto referencial Tecnología FSO.....	122
<b>Tabla 31.</b> Precio Alquiler de torre de telecomunicaciones cerro ventanas para FSO.....	122

<b>Tabla 32.</b> Presupuesto total tecnología FSO .....	123
<b>Tabla 33.</b> Presupuesto referencial de equipos para la Tecnología RF .....	123
<b>Tabla 34.</b> Gastos montaje torre arriostrada en la parte del receptor (FEIRNNR).....	123
<b>Tabla 35.</b> Gastos alquiler de frecuencia y torre de telecomunicaciones en el cerro Ventanas .....	124
<b>Tabla 36.</b> Presupuesto referencial total para la tecnología RF.....	124
<b>Tabla 37.</b> Comparación económica entre FSO y RF .....	125

## Índice de Figuras:

<b>Figura 1.</b> Clasificación de las Redes Inalámbricas. ....	10
<b>Figura 2.</b> Sistema de Comunicación FSO. ....	11
<b>Figura 3.</b> Descripción general de FSO de haz único en ubicación estática. ....	13
<b>Figura 4.</b> Varias capas atmosféricas con sus temperaturas correspondientes.....	15
<b>Figura 5.</b> Absorción atmosférica a lo largo de un camino vertical. ....	20
<b>Figura 6.</b> Sección transversal de dispersión de Rayleigh vs longitud de onda infrarroja. .....	22
<b>Figura 7.</b> Factores atmosféricos que desafían la instalación del sistema FSO. ....	23
<b>Figura 8.</b> Pérdida debido a la Divergencia del Haz .....	24
<b>Figura 9.</b> Clasificación del: Espectro Electromagnético.....	27
<b>Figura 10.</b> Diagrama de un Sistema de RF. ....	28
<b>Figura 11.</b> Distancia y escenario para el caso de estudio y diseño FSO.....	34
<b>Figura 12.</b> Fases que se siguió para el desarrollo del siguiente Trabajo de Integración Curricular .....	35
<b>Figura 13.</b> Escenario Cerro Ventanas (Punto Transmisor).....	39
<b>Figura 14.</b> Escenario Bloque 2 FEIRNNR (Receptor) .....	39
<b>Figura 15.</b> Diagrama General Enlace FSO .....	40
<b>Figura 16.</b> Diagrama de red FSO .....	40
<b>Figura 17.</b> El tiempo por mes en la ciudad de Loja .....	41
<b>Figura 18.</b> Categorías de nubosidad en Loja.....	42
<b>Figura 19.</b> Probabilidad diaria de precipitación en Loja.....	43
<b>Figura 20.</b> Promedio mensual de lluvia en Loja .....	44
<b>Figura 21.</b> Proveedor de equipos FSONA (Optical Wireless).....	45
<b>Figura 22.</b> Equipo SONAbeam E+ .....	45
<b>Figura 23.</b> Equipo SONAbeam M .....	46
<b>Figura 24.</b> Equipo SONAbeam Z .....	47
<b>Figura 25.</b> Proveedor de equipos FSO EC SYSTEM .....	48
<b>Figura 26.</b> Equipo EL-10Gex FSO .....	48
<b>Figura 27.</b> Equipo FSO EL-1GL.....	49
<b>Figura 28.</b> Proveedor de equipos FSO Artolink .....	50
<b>Figura 29.</b> Equipo FSO M1-GE-L .....	50
<b>Figura 30.</b> Equipo FSO M1-10GE.....	51

<b>Figura 31.</b> Equipo FSO M1-30GE.....	52
<b>Figura 32.</b> Proveedor de equipos FSO MRV TereScope.....	52
<b>Figura 33.</b> Equipo TereScope 5000 modelo MRV .....	53
<b>Figura 34.</b> Equipo TereScope 4000 modelo MRV .....	53
<b>Figura 35.</b> Diagrama de conexión de los equipos FSO.....	55
<b>Figura 36.</b> Tapa de compartimiento del equipo FSO.....	55
<b>Figura 37.</b> Indicador central de la unidad óptica .....	56
<b>Figura 38.</b> Ubicación correcta de los equipos FSO .....	56
<b>Figura 39.</b> Ubicación no adecuada de los equipos FSO .....	56
<b>Figura 40.</b> Instalación FSO en Siria 3.5 Km.....	57
<b>Figura 41.</b> Escenario FSO primer caso (3dB/Km).....	58
<b>Figura 42.</b> Sección Transmisor .....	58
<b>Figura 43.</b> Configuración del generador de bits pseudoaleatorio de 150Mbps .....	59
<b>Figura 44.</b> Canal Atmosférico FSO. ....	59
<b>Figura 45.</b> Propiedades del Canal FSO primer caso .....	59
<b>Figura 46.</b> Sección Receptor.....	60
<b>Figura 47.</b> Escenario FSO segundo caso (30 dB/Km).....	61
<b>Figura 48.</b> Propiedades del canal FSO con una atenuación de 30 dB/Km .....	61
<b>Figura 49.</b> Escenario FSO - Aumento BitRate a 500 Mbps.....	62
<b>Figura 50.</b> Configuración BitRate en el Transmisor (500 Mbps).....	62
<b>Figura 51.</b> Escenario FSO- Aumento BitRate a 1 Gbps .....	63
<b>Figura 52.</b> Configuración BitRate en el Transmisor (1 Gbps).....	63
<b>Figura 53.</b> Escenario FSO - Aumento BitRate a 2.5 Gbps .....	64
<b>Figura 54.</b> Configuración BitRate en el Transmisor (2.5 Gbps).....	64
<b>Figura 55.</b> Escenario FSO con Atenuación de 3dB/Km a 3 Km (5 Gbps) .....	65
<b>Figura 56.</b> Propiedades del canal FSO considerando Pérdidas Geométricas y Atenuación de 3 dB/Km .....	65
<b>Figura 57.</b> Escenario FSO con Atenuación de 5dB/Km a 2.5 Km (5 Gbps) .....	66
<b>Figura 58.</b> Propiedades del canal FSO considerando Pérdidas Geométricas y Atenuación de 5 dB/Km .....	66
<b>Figura 59.</b> Escenario FSO con Atenuación de 10 dB/Km a 1.7 Km (5 Gbps) .....	66
<b>Figura 60.</b> Propiedades del canal FSO considerando Pérdidas Geométricas y Atenuación de 10 dB/Km .....	67
<b>Figura 61.</b> Escenario FSO con Atenuación de 17 dB/Km a 1.22 Km (5 Gbps) .....	67

<b>Figura 62.</b> Propiedades del canal FSO considerando Pérdidas Geométricas y Atenuación de 17 dB/Km .....	67
<b>Figura 63.</b> Escenario FSO con Atenuación de 30 dB/Km a 822m (5 Gbps) .....	68
<b>Figura 64.</b> Propiedades del canal FSO considerando Pérdidas Geométricas y Atenuación de 30 dB/Km .....	68
<b>Figura 65.</b> Torre Arriostrada de un Módulo y Tubo Metálico con Escalones .....	69
<b>Figura 66.</b> Diagrama General Enlace por RF .....	70
<b>Figura 67.</b> Diagrama de Red Enlace RF .....	70
<b>Figura 68.</b> Antena MIMOSA N5-X20 con C5x .....	71
<b>Figura 69.</b> Mikrotik Cloud Server CRS326 .....	72
<b>Figura 70.</b> Antena LocoM5 Ubiquiti NanoStation 13 dBi.....	73
<b>Figura 71.</b> Especificaciones Técnica Cable RG142.....	74
<b>Figura 72.</b> Datos Técnicos del conector RF.....	75
<b>Figura 73.</b> Escenario Enlace RF (vista 1) .....	75
<b>Figura 74.</b> Escenario Enlace RF (vista 2) .....	76
<b>Figura 75.</b> Lóbulos de Radiación entre Transmisor y Receptor .....	76
<b>Figura 76.</b> Coordenadas del punto medio entre TX y RX .....	76
<b>Figura 77.</b> Propiedades del Mapa .....	77
<b>Figura 78.</b> Propiedades de la Unidad Transmisor.....	77
<b>Figura 79.</b> Propiedades de la Unidad Receptor.....	78
<b>Figura 80.</b> Parámetros de la Red Enlace RF .....	78
<b>Figura 81.</b> Topología seleccionada en la red RF .....	79
<b>Figura 82.</b> Transmisor Cerro Ventanas (Máster) .....	79
<b>Figura 83.</b> Receptor FEIRNNR (Esclavo) .....	80
<b>Figura 84.</b> Sistema de la Red RF y sus parámetros .....	80
<b>Figura 85.</b> Resultado Visualizador de Dominio de Tiempo Óptico (caso 1).....	83
<b>Figura 86.</b> Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 1 .....	84
<b>Figura 87.</b> Resultado Análisis (caso 1) .....	84
<b>Figura 88.</b> Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 2) .....	85
<b>Figura 89.</b> Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 2.....	86
<b>Figura 90.</b> Resultado Análisis (caso 2) .....	86

<b>Figura 91.</b> Resultado Análisis (caso 3) .....	88
<b>Figura 92.</b> Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 3) .....	89
<b>Figura 93.</b> Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 3 .....	89
<b>Figura 94.</b> Resultado Análisis (caso 4) .....	90
<b>Figura 95.</b> Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 4) .....	90
<b>Figura 96.</b> Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 4 .....	91
<b>Figura 97.</b> Resultado Análisis (caso 5) .....	91
<b>Figura 98.</b> Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 5) .....	92
<b>Figura 99.</b> Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 5 .....	92
<b>Figura 100.</b> Resultado Análisis (caso 6) .....	95
<b>Figura 101.</b> Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 6) .....	95
<b>Figura 102.</b> Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 6 .....	96
<b>Figura 103.</b> Resultado Análisis (caso 7) .....	96
<b>Figura 104.</b> Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 7) .....	97
<b>Figura 105.</b> Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) .....	97
<b>Figura 106.</b> Resultados Análisis (caso 8) .....	98
<b>Figura 107.</b> Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 8) .....	98
<b>Figura 108.</b> Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 8 .....	99
<b>Figura 109.</b> Resultados Análisis (caso 9) .....	99
<b>Figura 110.</b> Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 9) .....	100

<b>Figura 111.</b> Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha).....	100
<b>Figura 112.</b> Resultados Análisis (caso 10).....	101
<b>Figura 113.</b> Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 10).....	101
<b>Figura 114.</b> Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha).....	102
<b>Figura 115.</b> Código de Visibilidad Internacional.....	104
<b>Figura 116.</b> Enlace RF Sección Transmisor - Receptor.....	109
<b>Figura 117.</b> Resultados obtenidos en la simulación RF.....	109
<b>Figura 118.</b> Vista del perfil del enlace RF.....	109
<b>Figura 119.</b> Resultado parámetros obtenidos RF.....	110
<b>Figura 120.</b> Comportamiento de la señal RF a 0,07 Km de su propagación.....	110
<b>Figura 121.</b> Degradación de la señal RF a 0,40 Km.....	111
<b>Figura 122.</b> Recuperación de la señal RF a 1,04 Km.....	111
<b>Figura 123.</b> Degradación de la señal RF a 2,01 Km.....	111
<b>Figura 124.</b> Perfil del terreno enlace RF.....	112
<b>Figura 125.</b> Peor Fresnel a 0,2 Km.....	112
<b>Figura 126.</b> Sistema de comunicación RF visto desde Google Earth (vista general).....	113
<b>Figura 127.</b> Sistema de comunicación RF visto desde Google Earth (vista desde el transmisor).....	113
<b>Figura 128.</b> Sistema de comunicación RF visto desde Google Earth (vista desde el receptor).....	114
<b>Figura 129.</b> Perfil topográfico del sistema de comunicación RF.....	114
<b>Figura 130.</b> Equipo FSO instalado en base aérea militar en Bagram, Afganistán....	120
<b>Figura 131.</b> Comparación del Haz de RF y FSO.....	120

## Índice de Ecuaciones:

<b>Ecuación 1.</b> Ley de Beer .....	19
<b>Ecuación 2.</b> Coeficiente de Atenuación .....	19
<b>Ecuación 3.</b> Coeficiente de Absorción .....	20
<b>Ecuación 4.</b> Ecuación de Rayleigh.....	21
<b>Ecuación 5.</b> Pérdida en el Espacio Libre.....	24
<b>Ecuación 6.</b> Potencia Óptica captada por el Receptor .....	25
<b>Ecuación 7.</b> Potencia Óptica Recibida. ....	25
<b>Ecuación 8.</b> Pérdida por Divergencia del Haz .....	25
<b>Ecuación 9.</b> Pérdida de Ruta .....	30
<b>Ecuación 10.</b> Predicción de pérdidas de trayecto entre dos antenas isotrópicas en el espacio libre .....	30
<b>Ecuación 11.</b> Pérdida de Trayecto.....	30
<b>Ecuación 12.</b> Pérdida de trayectoria para modelo de tierra plana.....	31
<b>Ecuación 13.</b> Modelo Okumura .....	31
<b>Ecuación 14.</b> Modelo COST-231 .....	32
<b>Ecuación 15.</b> Modelo ECC 33.....	32
<b>Ecuación 16.</b> Atenuación Geométrica.....	102
<b>Ecuación 17.</b> Variación del Coeficiente de Atenuación .....	104
<b>Ecuación 18.</b> Ley de Beer .....	105
<b>Ecuación 19.</b> Atenuación Atmosférica.....	105
<b>Ecuación 20.</b> Pérdidas del Sistema .....	106
<b>Ecuación 21.</b> Margen de Enlace.....	106
<b>Ecuación 22.</b> Primera Zona de Fresnel .....	115
<b>Ecuación 23.</b> Pérdidas en el Espacio Libre .....	116
<b>Ecuación 24.</b> Potencia en el Receptor RF .....	116
<b>Ecuación 25.</b> Margen de Enlace RF.....	117

## Índice de Anexos:

<b>Anexo 1.</b> Especificaciones técnicas equipo SONAbeam 1250 E+.....	140
<b>Anexo 2.</b> Especificaciones técnicas equipo SONAbeam M.....	141
<b>Anexo 3.</b> Especificaciones técnicas equipo SONAbeam Z.....	142
<b>Anexo 4.</b> Especificaciones técnicas equipo EL-10Gex .....	143
<b>Anexo 5.</b> Especificaciones técnicas equipo EL-1GL .....	143
<b>Anexo 6.</b> Especificaciones técnicas equipo FSO M1-1GE-L.....	144
<b>Anexo 7.</b> Especificaciones técnicas equipo FSO M1-10GE .....	144
<b>Anexo 8.</b> Especificaciones técnicas equipo TS5000 .....	145
<b>Anexo 9.</b> Especificaciones técnicas equipo TS4000 .....	146
<b>Anexo 10.</b> Esquema de vista frontal equipo FSO MRV TS5000 .....	147
<b>Anexo 11.</b> Esquema del panel del modelo estándar TS5000/155 .....	147
<b>Anexo 12.</b> Cable coaxial RG142 .....	148
<b>Anexo 13.</b> TereScope5000/155 F - y conexión del sistema de fusión.....	149
<b>Anexo 14.</b> Certificado Traducción Resumen.....	150

## **1. Título**

**Diseño de un Sistema de Comunicación Óptico – Inalámbrico orientado al  
Análisis Comparativo entre las Tecnologías Free Space Optics (FSO) &  
Radiofrecuencia (RF)**

## 2. Resumen

Actualmente, en los sistemas de comunicaciones inalámbricas existen varios requisitos que juegan un papel fundamental para lograr un buen rendimiento de la red. La flexibilidad y rentabilidad al momento de realizar la prestación de servicios ha ocasionado un desequilibrio conocido también como “cuello de botella de última milla”. Las comunicaciones ópticas en el espacio libre (FSO) son una de las alternativas viables y una de las soluciones más óptimas tomando en cuenta el ancho de banda, tiempo de implementación, transmisión de datos con altas velocidades, rentabilidad y seguridad.

En el presente trabajo de integración curricular se elaboró en la primera fase, una investigación acerca de la tecnología Free Space Optics, indagando desde sus orígenes hasta la actualidad, logrando recalcar los grandes beneficios, así como limitaciones de esta tecnología a comparación con otras tecnologías inalámbricas. Culminada la primera fase, se toma como referencia un escenario en la ciudad de Loja para diseñar y simular un enlace punto a punto para la tecnología FSO y para la tecnología de Radiofrecuencia (RF). Los valores de configuración de cada tecnología fueron otorgados gracias a las especificaciones técnicas de cada equipo seleccionado que se muestran en el desarrollo de este trabajo. Se ejecutó una serie de simulaciones y cálculos matemáticos en donde los resultados obtenidos permiten comprender bajo qué condiciones atmosféricas se dispone de un enlace óptimo y un enlace descaminado con fallas. Para FSO se presentan 10 escenarios ya que es el tema principal de estudio y para RF se muestra un solo escenario que ofrece varios resultados para su análisis.

Se elaboró un análisis comparativo ambas tecnologías con la finalidad de mostrar los puntos fuertes de FSO ante RF, además se detalla un análisis económico en cuanto a costos aproximados que conlleva implementar cada tecnología.

Lo que busca el presente trabajo de tesis es brindar al lector un conocimiento teórico, práctico y matemático de la tecnología FSO, para aprovechar nuevas tecnologías que son utilizadas en países desarrollados tecnológicamente, ya que en nuestra localidad se han visto aisladas y poco estudiadas.

***Palabras claves:*** *óptica en el espacio libre, ancho de banda, atenuación, longitud de onda, potencia de transmisión*

## 2.1 Abstract

In today's wireless communications systems, there are several requirements that play a key role in achieving good network performance. Flexibility and cost-effectiveness in service provisioning have led to an imbalance also known as the "last mile bottleneck". Free space optical communications (FSO) is one of the viable alternatives and one of the most optimal solutions taking into account bandwidth, implementation time, data transmission with high speeds, cost-effectiveness and security.

In this degree work, research about Free Space Optics technology was performed, investigating from its origins to the present, highlighting the great benefits as well as limitations of this technology compared to other wireless technologies. Once the first phase was completed, a scenario in the city of Loja was used as a reference to design and simulate a point-to-point link for FSO technology and Radio Frequency (RF) technology. The configuration values for each technology were given thanks to the technical specifications of each selected equipment shown in the development of this work. A series of simulations and mathematical calculations were executed where the results obtained allow understanding under which atmospheric conditions an optimal link and a misguided link with failures are available. For FSO, 10 scenarios are presented since it is the main subject of study and for RF, only one scenario is shown, which offers several results for analysis.

A comparative analysis of both technologies was made in order to show the strengths of FSO over RF, and an economic analysis is also detailed in terms of approximate costs involved in implementing each technology.

The aim of this thesis work is to provide the reader with a theoretical, practical and mathematical knowledge of FSO technology, to take advantage of new technologies that are used in technologically developed countries, since in our locality they have been isolated and little studied.

***Key words:*** *free space optics, bandwidth, attenuation, wavelength, transmission power*

### 3. Introducción

En la actualidad en el sector de las telecomunicaciones, con el crecimiento del número de usuarios, el gran aumento de aplicaciones que requieren una mayor cantidad de ancho de banda, el consumo de servicios de alta calidad en especial servicios de streaming y la demanda de la capacidad de datos obliga a que las tecnologías inalámbricas se mantengan en constante evolución. Es importante mencionar que cada año, el número de usuarios en Internet se incrementa, lo cual crea una carga y demanda adicional (Saha et al., 2019).

En primera instancia, Free Space Optics (FSO) abarca un tema de investigación importante, ya que dicha tecnología transporta mayor cantidad de datos gracias a las longitudes de onda en las que opera (700 nm hasta los 1500 nm), a diferencia de las ondas de radio (Koziol, 2021).

FSO es una tecnología que no requiere un licenciamiento del espectro para su funcionamiento, permite la transmisión de datos a elevadas velocidades e instalación de red sencilla. Además, supera ciertos problemas relacionados a costos e implementación en las plantas de fibra óptica; sin embargo, también debe afrontar ciertos fenómenos que limitan su correcto funcionamiento (Rao et al., 2021). Hoy en día, FSO ha sido aplicada en varios campos, por ejemplo para la demostración de retransmisión de comunicaciones láser (LCRD) de la NASA, en la cual se está poniendo a prueba las comunicaciones ópticas en el espacio a través de un sistema de retransmisión láser infrarrojo bidireccional en donde se pretende conseguir algunos beneficios como un mayor ancho de banda, velocidades más altas, flexibilidad y disminución de tamaño, peso, potencia y costos (Johnson, 2022).

En segunda instancia, se tiene la tecnología de Radiofrecuencia (RF) la cual es más comercializada y utilizada en la mayoría de escenarios de comunicaciones. Varios de los dispositivos como celulares, tablets, estaciones de transmisión de radio y televisión hacen uso de señales RF, los cuales operan en el espectro que comprende el conjunto del marco electromagnético que van desde los 30 Hz hasta los 30 GHz. Esta tecnología se ve limitada principalmente por el espectro radioeléctrico, además surgen problemas como competencias por el ancho de banda e incremento de canales de usuarios de Internet, generando problemas en la señal (Scarpaty, 2021).

Con lo anterior mencionado, en el presente trabajo de tesis se analiza las tecnologías FSO y RF, describiendo sus ventajas y limitaciones; analizando varios parámetros de evaluación en los cuales se presenta una simulación por cada tecnología; adicionalmente se

realizará un diseño de red para cada tecnología y finalmente se concluye con un análisis económico referencial mencionando los costos de los equipos y de implementación.

## **PROBLEMA**

Las tecnologías FSO y RF han emergido como una opción factible para las comunicaciones de banda ancha teniendo un amplio rango de aplicación potencial. Sin embargo, la tecnología FSO no ha sido popularizada por la escasa evaluación, confiabilidad y conocimiento tecnológico para poder implementarlo, a diferencia de RF que es bastante utilizada en la actualidad. La principal incertidumbre presentada se debe a que Free Space Optics (FSO) es una tecnología relativamente nueva en nuestro país y en nuestro medio, lo cual nos limita a conocer acerca de su desempeño, fiabilidad y ventajas reales de la misma. Por lo tanto, es necesario expandir el conocimiento de esta tecnología frente a las tecnologías de RF considerando parámetros técnicos y económicos.

## **JUSTIFICACIÓN**

El siguiente trabajo de tesis muestra el desarrollo de un diseño para FSO y RF; validando parámetros como rendimiento, eficiencia y disponibilidad, a través del uso de un software adecuado el cual permite simular un entorno de las tecnologías FSO y RF con la finalidad de obtener varios resultados que permita realizar la comparación entre las dos tecnologías mencionadas; adicionalmente ampliar el conocimiento a nuevas tecnologías que posibiliten mejoras significativas a las altas tasas de transmisión que permitan afrontar los desafíos de las comunicaciones en la actualidad.

En el ámbito académico, dentro de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables (FEIRNNR) perteneciente a la Universidad Nacional de Loja, esta investigación brindará un mayor conocimiento acerca de Free Space Optics (FSO), ya que existen limitados estudios y evaluaciones que aporten información para su implementación en un área geográfica específica.

## OBJETIVOS

Los objetivos planteados en el presente trabajo de tesis son:

### **Objetivo General:**

Diseñar un sistema de comunicación óptico – inalámbrico orientado al análisis comparativo entre las tecnologías Free Space Optics (FSO) y Radiofrecuencia (RF).

### **Objetivos Específicos:**

- ✚ Realizar la revisión bibliográfica acerca de las características técnicas y fundamentos de la tecnología inalámbrica de transmisión Óptica en el Espacio Libre (FSO) con la finalidad de obtener criterios comparativos en base a la tecnología de Radiofrecuencia (RF).
- ✚ Diseñar y ejecutar una simulación mediante software especializado tomando en consideración el escenario que comprende los puntos desde el Bloque 2 de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables de la Universidad Nacional de Loja hacia el Cerro Ventanas de la ciudad de Loja, con la finalidad de analizar los parámetros más importantes para la tecnología óptico-inalámbrica.
- ✚ Realizar un análisis sobre los aspectos técnicos de equipamiento de FSO y RF.
- ✚ Realizar un análisis económico costo-beneficio para ambas tecnologías.

#### 4. Marco Teórico

El siguiente espacio muestra el estado del arte en donde se menciona ciertos trabajos relacionados con el tema de investigación, además se define varios conceptos significativos acerca de Free Space Optics (FSO) y Radiofrecuencia (RF).

Free Space Optics (FSO) debe incluirse en el conjunto de soluciones para satisfacer los requisitos de ancho de banda de la internet moderna. La comunicación FSO es la alternativa más práctica para resolver el problema de la conectividad de banda ancha y problemas de cuello de botella. FSO ha sido una tecnología bastante activa con muchos desafíos fundamentales y tecnológicos para poder mejorar su rendimiento en una variedad de escenarios (Majumdar, 2015).

(Le & Pham, 2022) menciona en su artículo que Free Space Optics (FSO) se ha ganado la reputación de ser capaz de ofrecer servicios de datos de alta velocidad a largas distancias sin agotar los recursos de Radiofrecuencia (RF). La comunicación FSO se puede considerar en diferentes escenarios de red, incluidos enlaces entre satélites (espacio profundo, estaciones terrestres/vehículos, enlaces satelitales/aéreos y enlaces terrestres. Además, se espera que sea una de las tecnologías habilitadoras clave para la próxima generación de redes inalámbricas 6G. Sin embargo, a pesar del gran potencial de las comunicaciones FSO, su desempeño adolece de varias limitaciones y desafíos como son: turbulencia atmosférica, nubes, condiciones climáticas y desalineación en apuntamiento.

FSO es una tecnología en la que se crean enlaces ópticos inalámbricos mediante láser y dicha tecnología es compatible con los sistemas de comunicaciones ópticas por medio de Fibra Óptica. Según (Caizaluisa Caizaluisa, 2008) en su trabajo de tesis destaca las ventajas que presenta FSO y también hace referencia a las redes de área local (LANs) las cuales requieren de enlaces de bajo presupuesto y facilidad en su despliegue, brindando una introducción y aplicación de FSO, así como la realización de un diseño tomando en cuenta el escenario que corresponde al campus de la Escuela Politécnica Nacional.

El desarrollo de sistemas ópticos de espacio libre (FSO) es una solución para superar algunos problemas que presenta la Fibra Óptica; en el proyecto de grado escrito por (Langaroody, 2013) se diseña un sistema FSO utilizando un diodo láser con la longitud de onda de 1550 nm, mencionando que el diodo laser proporciona un haz colimado con poca divergencia, adicionalmente muestra el efecto de pérdida atmosférica y alcance en la

herramienta de software. Como dato adicional menciona ciertos problemas experimentales del diseño e implementación del sistema FSO.

Los desarrollos en el sector tecnológico están experimentando actualmente un rápido progreso, así se menciona en el artículo escrito por (Burdah et al., 2019) en el cual se realiza un análisis de desempeño de un sistema FSO y Fibra Monomodo en base al Factor de Calidad y el Error de Tasa de Bits (BER) de una señal que se realiza mediante simulaciones de sistemas ópticas con varias longitudes de onda a varias distancias respectivamente, para finalmente analizar los diagramas de ojo en cuanto a la señal de salida y comparar el Factor Q y el Error de Tasa de Bits (BER).

En el artículo de investigación, escrito por (Wang et al., 2020) se analiza el rendimiento de un sistema mixto de Radiofrecuencia (RF)/Óptico de Espacio Libre (FSO) asistido por relé de dúplex completo con auto inferencia. Los enlaces RF siguen la distribución Nakagami-m y los enlaces FSO adoptan la turbulencia atmosférica.

Como se puede evidenciar en cada uno de los trabajos y artículos que se ha mencionado, cada uno de ellos aporta información que permite entender, analizar y profundizar más acerca de FSO y en parte de RF, mostrando cómo se comporta cada tecnología en diferentes escenarios con cada modelo de canal respectivamente. Desafortunadamente en Ecuador se han realizado limitadas investigaciones acerca de Free Space Optics (FSO), por lo que se considera necesario utilizar como base dicha información, obtener y mejorar ciertos argumentos para luego aplicarlo en nuestro país en base a las condiciones climáticas y medios que limitan la transmisión de datos tanto en RF como en FSO.

#### **4.1 Origen de las Redes y Comunicaciones Inalámbricas**

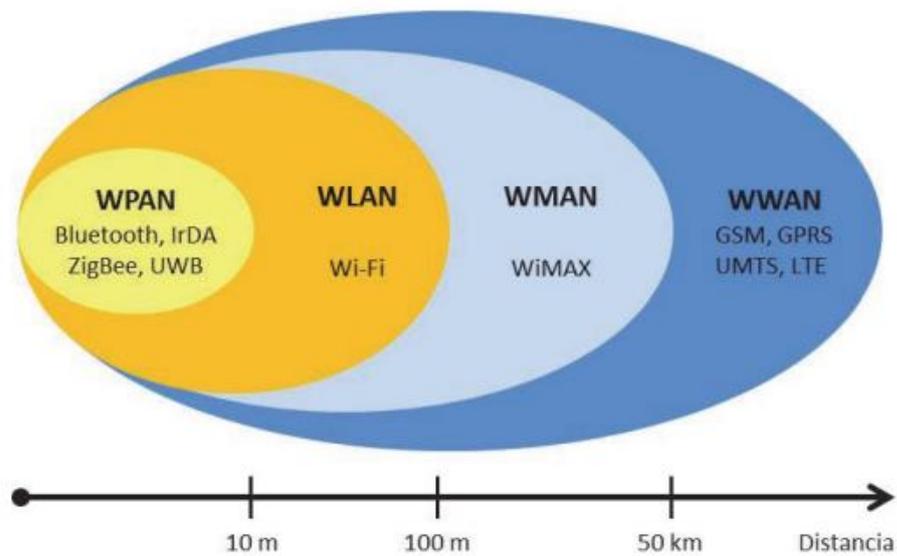
Las primeras redes inalámbricas se desarrollaron en la era preindustrial. Estos sistemas transmiten información sobre distancias de línea de visión utilizando señales de humo, señalización con antorchas, espejos intermitentes, bengalas de señales o banderas de semáforos. Se desarrolló un conjunto elaborado de combinaciones de señales para transmitir mensajes complejos con estas rudimentarias. Se construyeron estaciones de observación en las cimas de las colinas y a lo largo de las carreteras para transmitir estos mensajes a grandes distancias. Estas primeras redes de comunicación fueron reemplazadas primero por la red de telégrafos (inventada por Samuel Morse en 1838) y luego por teléfono. En 1895, Marconi demostró la primera transmisión de radio desde la Isla de Wight a un remolcador a 18 millas de distancia, y nacieron las comunicaciones por radio. La primera red basada en radio por

paquetes, ALOHANET, se desarrolló en la Universidad de Hawái en 1971. Esta red permitió que los sitios de computadoras en siete campus repartidos en cuatro islas se comunicaran con una computadora central en Qahu a través de una transmisión de radio (Seymour & Shaheen, 2011).

Las comunicaciones inalámbricas aportan a muchos propósitos. En algunos casos se utilizan en sustitución a las redes cableadas, mientras que en otros casos se utilizan para proporcionar acceso a datos corporativos desde ubicaciones remotas. La infraestructura inalámbrica puede ser construida a muy bajo coste en comparación con las alternativas cableadas tradicionales; no obstante, permiten que los dispositivos remotos se conecten sin dificultad, independientemente que dichos dispositivos estén a unos metros o a varios kilómetros de distancia. Todo ello sin necesidad de estropear paredes para pasar cables o instalar conectores; esto ha permitido que el uso de esta tecnología sea muy popular, extendiéndose de forma acelerada (Salazar, 2016).

Existen algunas cuestiones relacionadas con la regulación legal del espectro electromagnético. Según (Espectro.org, 2018) se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Referido a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia. Dicha radiación sirve para identificar la sustancia de manera análoga a digital. Los espectros se pueden observar mediante espectroscopios que, además de permitir ver el espectro, permiten realizar medidas sobre el mismo, como son:

- Longitud de onda
- Frecuencia
- Intensidad de la radiación



**Figura 1.** Clasificación de las Redes Inalámbricas.

**Fuente:** Obtenido de (Salazar, 2016)

La Figura 1, indica que las redes inalámbricas se pueden clasificar en cuatro grupos específicos según el área de aplicación y el alcance de la señal.

Las transmisiones inalámbricas llevan a cabo la transmisión y la recepción por medio de antenas (Hapo, 2021).

Existen dos tipos de configuraciones: Direccional y Omnidireccional.

*Configuración Direccional:* Las antenas de emisión y recepción están perfectamente alineadas.

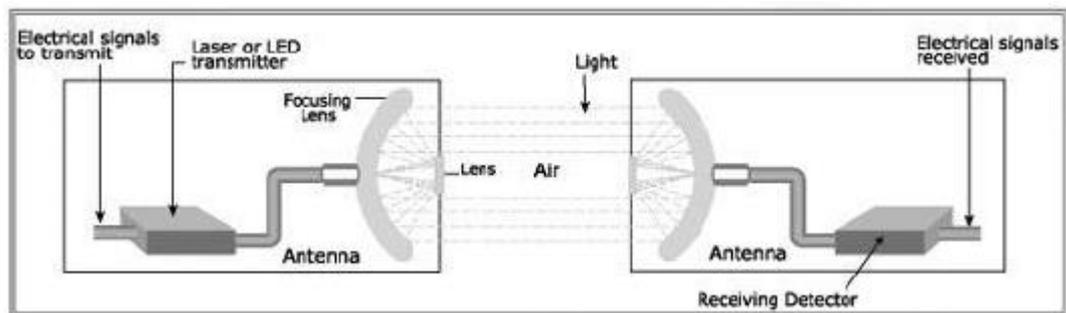
*Configuración Omnidireccional:* El diagrama de radiación de la antena es más disperso, pudiendo la señal ser recibida por varias antenas.

*Rangos:*

- Se presentan los siguientes rangos de frecuencias:
- De 2 GHz hasta 40 GHz se denomina Microondas
- De 30 MHz hasta 1 GHz se denomina Ondas de Radio
- De  $3 * 10^{-11}$  MHz hasta  $2 * 10^{14}$  MHz se denomina infrarrojos

## 4.2 Free Space Optics (FSO)

### 4.2.1 Principios



**Figura 2.** Sistema de Comunicación FSO.

**Fuente:** *Obtenido de (Saracual, 2005)*

Durante las últimas décadas, los sistemas FSO se convirtieron en un aporte importante para el desarrollo y aplicación de tecnologías por medio de sistemas ópticos y sistemas electrónicos. FSO es conocido también como fotónica sin fibra. Para obtener un canal de comunicación de banda ancha, alta frecuencia (HF) se hace uso de pulsos de luz modulados para transmitir datos a través de la atmósfera. Estos sistemas se instalan tanto en sistemas terrestres como en sistemas de transmisión de datos entre espacio – espacio, espacio – tierra y objetos marinos. Operando en el espectro de radiación infrarroja, la tecnología FSO puede proporcionar enlaces con una tasa de datos muy alta (decenas de Gigabits por segundo) entre varias plataformas que ofrecen rangos de varios kilómetros cerca del nivel del mar o incluso más de 100 Km a gran altura (Mikołajczyk et al., 2017).

A principios de la década de 1960, cuando se inventó en primer lugar el láser y poco después el láser semiconductor, los visionarios predijeron que, en poco tiempo, tales fuentes de luz coherente se utilizarían para la comunicación. Tomó más de 25 años, pero a finales de los años 80, hubo un mayor desarrollo como para que las telecomunicaciones de fibra óptica se encaminaran al medio principal del mundo de las comunicaciones terrestres de larga distancia. Los ingenieros de comunicaciones ópticas en el espacio libre asimilaron que el proceso llevaría poco tiempo, pero realmente ha llevado algunas décadas lograr una masa crítica de conceptos y tecnologías de sistemas (Boroson, 2017).

Según la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (National Aeronautics and Space Administration, 2021) en su sitio web menciona que:

Las Comunicaciones Ópticas o lasercom, es el uso de longitudes de ondas ópticas de radiación electromagnética para transmitir mensajes de forma inalámbrica entre terminales de usuario. Las Comunicaciones Ópticas son la vanguardia de las tecnologías de comunicación inalámbrica actuales para satélites pequeños, además ofrecen un mejor rendimiento que los sistemas de RF debido a los mayores anchos de banda disponibles en longitudes de onda submilimétricas. Las comunicaciones láser tienen una baja probabilidad de interceptación, son difíciles de interferir y encuentran muy poca interferencia debido a su estrecho ancho de haz. Actualmente las frecuencias ópticas no están reguladas y permiten grandes anchos de banda y un alto rendimiento del canal (National Aeronautics and Space Administration, 2021).

Los sistemas FSO se han utilizado ampliamente en sistemas de comunicaciones militares y espaciales; sin embargo, el costo de estos sistemas es prohibitivo para su implementación en comunidades rurales (Abadi et al., 2019).

Los sistemas de seguimiento mecánico para mantener la alineación óptica en los sistemas astronómicos tienen una larga historia que se remonta a finales del siglo XVII, cuando Giovanni Alfonso Borelli y sus contemporáneos desarrollaron el helióstato para seguir un punto particular en el cielo nocturno. Estas tecnologías están ampliamente implementadas en los telescopios modernos. En los últimos años, se ha sugerido el despliegue de la multiplexación por división espacial dentro de los sistemas FSO como un método interesante para aumentar el ancho de banda de comunicación en los enlaces punto a punto. Los sistemas de multiplexación por división espacial utilizan modos ópticos ortogonales o espacialmente separables para multiplexar muchos canales de datos codificados dentro de un sistema de comunicación. Dichos sistemas se han demostrado tanto en fibra multimodo, como en enlaces FSO turbulentos, en canales sumergidos y combinados con retroreflectores en plataformas móviles. Sin embargo, dichos sistemas requieren una alineación precisa entre el emisor y el receptor sin una alineación o configuración previa manual extensa; lograr esto a un costo sostenible ha sido un factor limitante en la adopción de FSO (Abadi et al., 2019).

La tecnología Free Space Optics (FSO) se basa en la transmisión de señales ópticas en el espacio (“Wireless Fiber”), formando una alternativa a otras formas de conexión de capa física, transparente al protocolo y ancho de banda. Los transmisores láser envían una señal modulada hacia los receptores de forma segura (eye-safe) y confiable (carrier class) (Saracual, 2005).

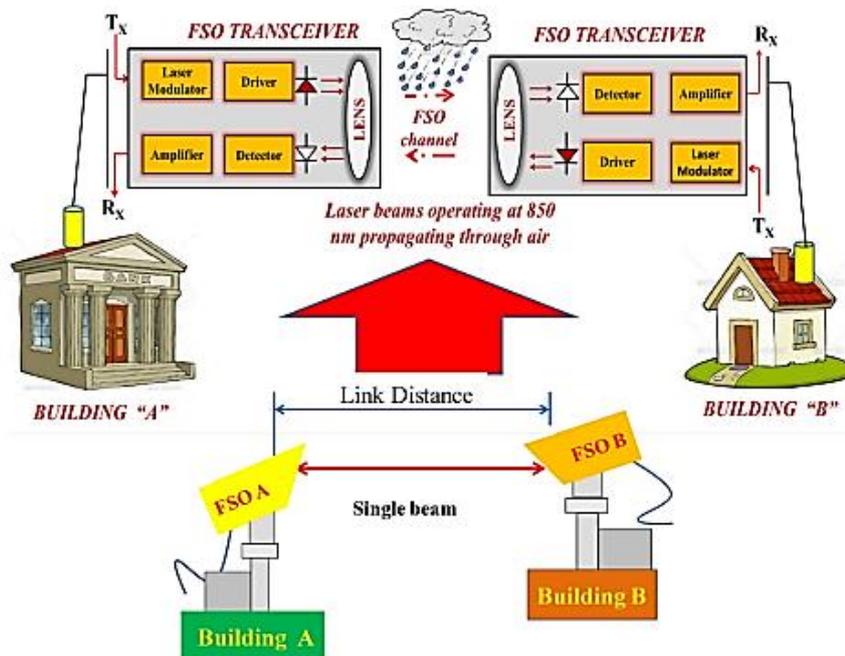
#### 4.2.2 Componentes de la tecnología FSO

La transmisión de datos del transmisor FSO al receptor FSO se realiza mediante el uso de un haz de láser óptico angosto modulado que se utiliza para transportar los datos digitales del transmisor al receptor a través de la atmósfera del espacio libre y finalmente se procesan en la estación receptora. La línea de visión simplemente significa que el transmisor y el receptor en ambas ubicaciones de red pueden verse entre sí. Debido a que los haces de IR se propagan y expanden de forma lineal, el criterio de la línea de visión es menos estricto en comparación con los sistemas de microondas que requieren una distancia de paso adicional para tener en cuenta la extensión de las zonas de Fresnel (Al-Gailani et al., 2021).

El sistema de comunicación FSO en ubicación estática se compone de tres partes principales que son:

- Transmisor
- Canal de Espacio Libre
- Receptor

Cada parte principal se subdivide en varios componentes los cuales se puede apreciar en la *Figura 3*.



**Figura 3.** Descripción general de FSO de haz único en ubicación estática.

**Fuente:** Obtenido de (Al-Gailani et al., 2021)

En la *Figura 3*, en el transmisor, una señal eléctrica se convierte en una señal óptica al modular el rayo láser. El transmisor incluye cuatro elementos básicos que son:

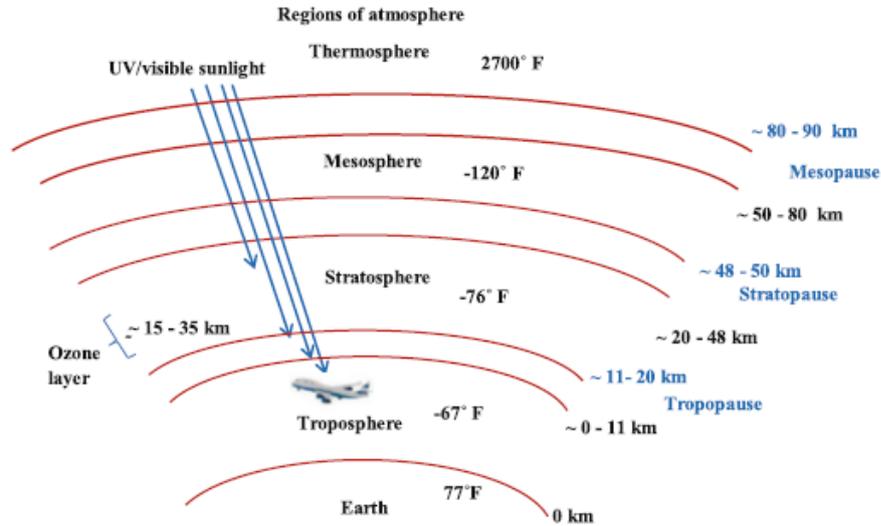
- Modulador láser
- Controlador
- Fuente de láser óptica
- Telescopio transmisor

Se hace uso de un láser de modulación directa para poder imprimir la información digital de la fuente sobre la portadora óptica, para luego poder convertir el flujo de datos digitales en una señal óptica analógica la cual debe viajar por el canal hacia el receptor.

La siguiente porción del sistema después del transmisor es el canal, donde el medio de propagación para el sistema FSO es la atmósfera terrestre. Se ha demostrado que este medio tiene una serie de capas de gases concéntricos en todo el universo. Existen tres capas primarias dentro del hemisferio, que son: la tropósfera, la estratosfera y la mesosfera. Estas capas se distinguen según los respectivos gradientes de temperatura en relación con las altitudes. Entre las capas, el canal de comunicación FSO transmite dentro de la tropósfera (Al-Gailani et al., 2021).

### **Tropósfera:**

La capa llamada tropósfera obtiene su nombre del clima, el cual cambia constantemente y mezcla los gases en esta parte de la atmósfera; tiene entre 8 y 14 kilómetros de espesor, dependiendo el punto en donde se encuentre la Tierra. El aire es más denso en esta capa que en otras capas, el cual está compuesto del 78% de nitrógeno, el 21% de oxígeno y el 1 % restante de argón, vapor de agua y dióxido de carbono (The National Aeronautics and Space Administration, 2022).



**Figura 4.** Varias capas atmosféricas con sus temperaturas correspondientes

**Fuente:** Obtenido de (Networks & Mukherjee, 2002)

En la *Figura 4*, se puede observar que la tropósfera se encuentra entre el rango de 0 a 20 Km con una temperatura de  $-67^{\circ}\text{F}$ , lo cual equivale a  $-55^{\circ}\text{C}$ .

Después de la propagación de la señal a través del canal FSO, se utiliza un receptor óptico para recibir y procesar la señal. El receptor óptico se compone de cinco componentes básicos que son:

- Telescopio receptor
- Filtro
- Amplificador
- Detector
- Demodulador

El telescopio se usa para recolectar y enfocar la luz óptica entrante desde el canal hacia el fotodetector (PD). La apertura del telescopio detector grande es muy necesaria para recibir múltiples radiaciones no correlacionadas y, posteriormente, realizar un promedio y enfocar la radiación en la PD. La señal promediada luego se acopla en filtros ópticos para filtrar los componentes de longitud de onda no deseados y minimizar significativamente la iluminación solar (Forrest, 1986).

En general, los receptores FSO se pueden diseñar con amplificadores para muchos beneficios de la siguiente manera:

Aumentar la intensidad óptica de la señal, que se atenúa principalmente por diversas condiciones atmosféricas, superar las restricciones de límite de visión en la potencia del láser transmitido y suprimir el efecto limitante del ruido térmico del receptor generado con el amplificador electrónico, mejorando así la sensibilidad del receptor de manera efectiva.

El demodulador está diseñado de acuerdo con el conjunto de símbolos utilizado por el modulador. Su función es determinar la fase de la señal recibida y mapearla de nuevo al símbolo que representa, y en el proceso se recuperarán los datos originales. Sin embargo, el proceso requiere que el receptor pueda comparar la fase de la señal recibida con una señal de referencia (Al-Gailani et al., 2021).

#### 4.2.3 Tipos de configuraciones de enlaces FSO

Existe principalmente cuatro tipos de configuración de enlace, los cuales son:

- **Línea de Vista Directa (LOS):** En este tipo de enlace, el ángulo de haz del transmisor, así como el campo de visión o mejor conocido por sus siglas en inglés como Field of View (FOV) del receptor son muy estrechos. El transmisor y el receptor están dirigidos una hacia otra. Esta configuración es buena para enlaces punto a punto (Networks & Mukherjee, 2002).

**Tabla 1.** Ventajas y desventajas de la configuración de enlace LOS.

Ventajas	Desventajas
Eficiencia energética mejorada, ya que la pérdida de ruta es mínima	Los enlaces son muy susceptibles al bloqueo, por lo que no puede proporcionar movilidad en un entorno interior típico
Distorsión multitrayecto reducida	Flexibilidad reducida ya que no es compatible con la transmisión punto a multipunto
Presupuesto de enlace mejorado	Se requiere una alineación estrecha entre el transmisor y el receptor para que sea menos conveniente para ciertas aplicaciones

Obtenido de: (Networks & Mukherjee, 2002)

- **Línea de Vista no Directa (NLOS):** Para este caso donde se dispone de una línea de vista no directa, el ángulo de haz del transmisor y FOV del detector tienen una gran amplitud para concentrar la mayor parte de la señal en todo el ambiente interior. Es

mayormente aplicado en enlaces punto a multipunto, ya que proporciona un alto grado de movilidad (Networks & Mukherjee, 2002).

**Tabla 2.** Ventajas y desventajas de la configuración de enlaces NLOS.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Permite una alta movilidad del usuario y mayor robustez contra el sombreado	La señal recibida sufre una distorsión de trayectos múltiples a medida que el haz se vuelve reflejado en las paredes u otros objetos en la habitación debido a la mayor divergencia del haz. En ambientes externos los enlaces que disponen de NLOS se ven mucho más afectados, debido a que se encuentran obstruidos por grandes obstáculos físicos y condiciones atmosféricas, por ello se utiliza mayormente en interiores.
Muy adecuado para aplicaciones de transmisión de punto a multipunto	Menos eficiencia energética

Obtenido de: (Networks & Mukherjee, 2002)

- **Enlaces Difusos:** En este tipo de enlace, el transmisor mira hacia el techo/techo y emite un amplio haz de energía IR hacia el techo. La señal IR después de sufrir múltiples reflejos de las paredes o los objetos de la habitación es recolectada por un receptor colocado en el suelo con un campo de visión más amplio (Networks & Mukherjee, 2002).

**Tabla 3.** Ventajas y desventajas de la configuración para enlaces difusos

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
No hay ningún requisito de alineación entre el transmisor y el receptor, ya que la señal óptica se distribuye uniformemente dentro de la habitación haciendo uso de las propiedades reflectantes de las paredes y los techos	Distorsión severa de trayectos múltiples
Este enlace es más robusto y flexible ya que es menos propenso a bloqueos y sombras	Alta pérdida de trayecto óptico, normalmente de 50 a 70 dB para un rango de enlace de 5 m.

Obtenido de: (Networks & Mukherjee, 2002)

- **Enlaces Cuasi – Difusos Multihaz:** En este tipo de enlace, un transmisor difuso de haz ancho único se reemplaza por un transmisor multihaz, también conocido como transmisor cuasi difuso. Los múltiples haces estrechos apuntan hacia afuera en diferentes direcciones, Estas señales ópticas son recogidas por un receptor de diversidad angular colocado en el suelo (Networks & Mukherjee, 2002).

**Tabla 4.** Ventajas y desventajas de la configuración para Enlaces Cuasi- Difusos Multihaz.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Efecto reducido de la fuente de luz ambiental	Complejo de implementar
Reducción de la distorsión de trayectos múltiples y la interferencia cocanal	Elevados costos

Obtenido de: (Networks & Mukherjee, 2002)

#### **4.2.4 Factores que afectan los Sistemas de Comunicación FSO**

Los sistemas FSO pueden ser una excelente salida para algunos requisitos de redes de banda ancha, debido a muchas ventajas, pero existen algunas restricciones que limitan su rendimiento. Por lo tanto, es importante tener en cuenta varios parámetros del sistema FSO, como los parámetros internos y externos (Al-Gailani et al., 2021).

Los parámetros externos más importantes que deterioran la ruta de transmisión y disminuyen el rendimiento de los enlaces son:

- Lluvia
- Polvo
- Nieve
- Niebla o Smog

Estos cambios ambientales son inevitables y deben tenerse en cuenta al diseñar un sistema FSO.

Los parámetros internos están relacionados con:

- Potencia óptica
- Ancho de banda de transmisión
- Angulo de divergencia
- Pérdida óptica en el lado del transmisor

- BER
- Diámetro de la lente
- Campo de visión, por sus siglas en inglés Field of View (FOV) del receptor

Es importante comprender que muchos de estos parámetros no son independientes, sino que están vinculados entre sí para especificar el rendimiento general del sistema. Por ejemplo, la disponibilidad del sistema es una función no solo de la distancia de despliegue sino también del clima local y el diseño del transceptor. Además, un sistema optimizado para un rendimiento de largo alcance (> 1 Km) puede no estar óptimamente diseñado para un rendimiento de corto alcance de alta disponibilidad (>99.9%). En general, el diseño óptimo del sistema FSO depende en gran medida de la aplicación prevista, la disponibilidad requerida y el costo (Bloom et al., 2003).

#### 4.2.5 Ley de Beer

La ley de Beer describe la atenuación de la luz que viaja a través de la atmósfera debido tanto a la absorción como a la dispersión. En general, la transmisión  $\tau$ , de la radiación en la atmósfera en función de la distancia  $x$ , viene dada por la ley de Beer como:

$$\frac{I_R}{I_o} = \tau = \exp(-\gamma x)$$

**Ecuación 1.** Ley de Beer

Donde  $\frac{I_R}{I_o}$  es la relación entre la intensidad  $I_R$  detectada en la ubicación  $x$  y la intensidad  $I_o$  lanzada inicialmente, y  $\gamma$  es el coeficiente de atenuación.

El coeficiente de atenuación es la suma de cuatro parámetros individuales: coeficientes de dispersión molecular y de aerosol  $\alpha$  y coeficientes de absorción molecular y de aerosol  $\beta$ , cada uno de los cuales es una función de la longitud de onda.

El coeficiente de atenuación viene dado por:

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a$$

**Ecuación 2.** Coeficiente de Atenuación

La ecuación muestra que la atenuación total, representada por el coeficiente de atenuación  $\gamma$ , resulta de la superposición de varios procesos de dispersión y absorción.

#### 4.2.6 Absorción y Dispersión

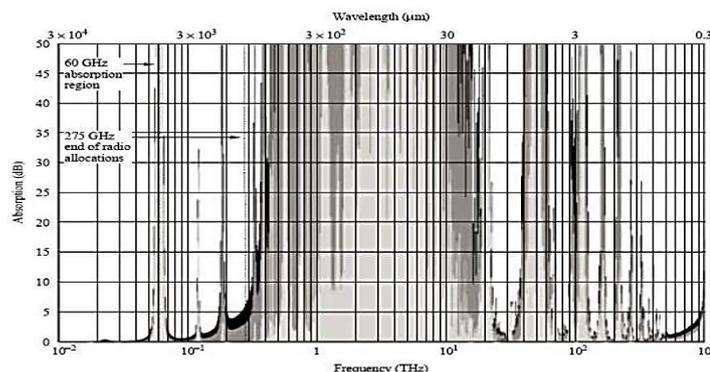
La atmosfera se define como la envoltura gaseosa que rodea la Tierra. La absorción ocurre cuando las moléculas de agua suspendidas y los aerosoles en la atmósfera terrestre extinguen los fotones. Por lo tanto, la potencia del láser disminuye gradualmente a través del canal FSO y directamente afecta la disponibilidad del sistema FSO. El uso de la potencia adecuada, dependiendo de las condiciones atmosféricas, junto con la diversidad espacial ayuda a mantener el nivel de disponibilidad requerido. La absorción por los gases atmosféricos define las ventanas atmosféricas, mientras que las ondas milimétricas están definidas por la absorción de  $H_2O$  y  $O_2$  (Jia et al., 2006).

Los átomos y las moléculas se caracterizan por su índice de refracción. La parte imaginaria del índice de refracción  $k$ , está relacionada con el coeficiente de absorción  $\alpha$  por la siguiente expresión (Willebrand & Ghuman, 2002):

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a N_a$$

**Ecuación 3.** Coeficiente de Absorción

Donde  $\sigma_a$  es la sección transversal de absorción y  $N_a$  es la concentración de las partículas absorbentes. En otras palabras, el coeficiente de absorción es una función de la fuerza de absorción de una determinada especie de partícula, así como una función de la densidad de la partícula.



**Figura 5.** Absorción atmosférica a lo largo de un camino vertical.

**Fuente.** Obtenido de (Jia et al, 2006)

La Figura 5, ilustra la dependencia de la frecuencia de la absorción atmosférica. El área sombreada en gris claro ilustra la absorción relativamente baja, asociada con un sitio ubicado a 5 Km sobre el nivel del mar en un área de baja humedad. El área gris más oscura muestra la

absorción atmosférica adicional que ocurriría en un sitio ubicado a 2 Km sobre el nivel del mar. Las regiones negras muestran el impacto adicional de la absorción atmosférica para un sitio ubicado al nivel del mar y que transmite a través de una atmósfera estándar. Adicionalmente, la figura nos muestra que la atmósfera, excepto en algún lugar seco a gran altitud, es opaca a la energía electromagnética en casi todas las frecuencias entre aproximadamente 1 THz y 10 THz (300  $\mu\text{m}$  y 30  $\mu\text{m}$ ). Por encima de 10 THz, las características de absorción de la atmósfera vuelven a ser favorables a la propagación de la energía electromagnética entre la superficie de la Tierra y el espacio. La absorción ocurre más fácilmente en algunas longitudes de onda especiales como 690 nm, 78 nm, 850 nm, 1.06 $\mu\text{m}$ , 1600 $\mu\text{m}$ , 1550 $\mu\text{m}$  y 10.6 $\mu\text{m}$  (Jia et al., 2006).

La dispersión se define generalmente como la redirección de la energía por parte de las partículas presentes a lo largo del camino de propagación. La dispersión por la luz se clasifica en tres tipos:

- Dispersión de Rayleigh
- Dispersión de Mie
- Dispersión no Selectiva

#### 4.2.7 *Dispersión de Rayleigh*

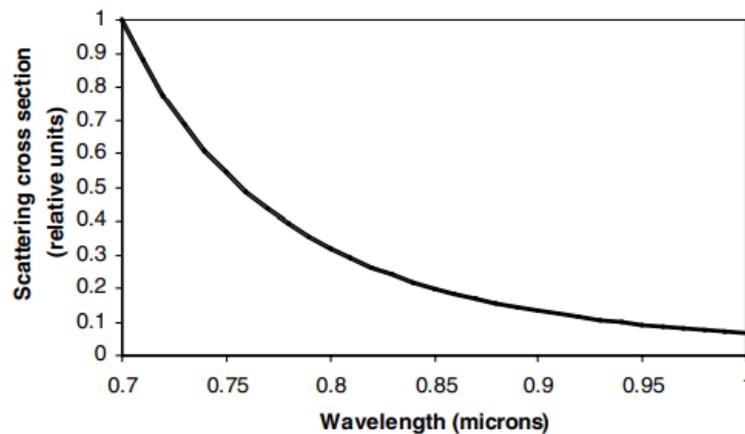
Una radiación incidente sobre los electrones enlazados de un átomo o molécula induce un desequilibrio de carga o dipolo que oscila a la frecuencia de la radiación incidente. Los electrones oscilantes vuelven a irradiar la luz en forma de onda dispersa. La ecuación clásica de Rayleigh para la sección transversal de dispersión es:

$$\sigma_s = \frac{f e^4 \lambda_0^4}{6 \pi \epsilon_0^2 m^2 c^4} \frac{1}{\lambda^4}$$

**Ecuación 4.** Ecuación de Rayleigh

Donde  $f$  es la fuerza del oscilador,  $e$  es la carga de un electrón,  $\lambda_0$  es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia natural  $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$ ,  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica,  $c$  es la velocidad de la luz y  $m$  es la masa de la entidad oscilante. La dependencia de  $\lambda^4$  y el tamaño de las partículas que se encuentran en la atmósfera implican que las longitudes de onda más cortas se dispersan mucho más que las longitudes de onda más largas. La dispersión de Rayleigh es la razón por la cual el cielo aparece azul en condiciones de clima soleado. Sin embargo, para los sistemas FSO que operan en el rango de longitud de onda más larga, el

impacto de la dispersión de Rayleigh en la señal de transmisión puede despreciarse (Willebrand & Ghuman, 2002, pg.50).



**Figura 6.** Sección transversal de dispersión de Rayleigh vs longitud de onda infrarroja.

**Fuente.** Obtenido de (Willebrand & Ghuman, 2002)

En la *Figura 6*, se aprecia la dependencia de la longitud de onda de la sección transversal de dispersión de Rayleigh en el rango espectral infrarrojo.

#### 4.2.8 *Dispersión de Mie*

El régimen de dispersión de Mie ocurre para partículas del tamaño de la longitud de onda. Por lo tanto, en el rango de longitud de onda del infrarrojo cercano, las partículas de niebla, neblina y contaminación (aerosoles) son los principales contribuyentes al proceso de dispersión de Mie. Debido a que la absorción domina la mayor parte del espectro, los datos deben recolectarse en rangos de longitud de onda que ocurren en una ventana atmosférica, suponiendo que solo se está produciendo dispersión. Además, se deben conocer las distribuciones de partículas. Para los aerosoles, esta distribución depende de la ubicación, el tiempo, la humedad relativa, la velocidad del viento, etc. (Willebrand & Ghuman, 2002, p. 50).

A continuación, se muestra el coeficiente de atenuación debido a la dispersión de Mie:

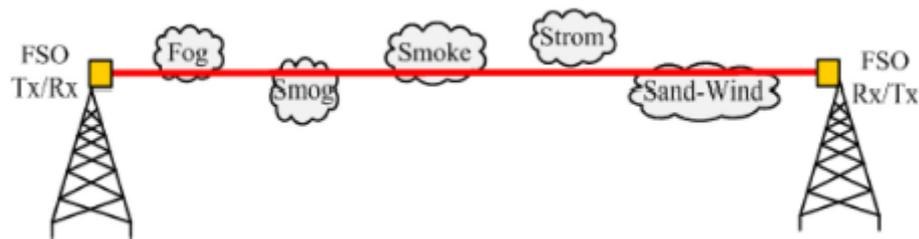
$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta}, \text{ donde } \delta = 0.585(v)^{1/3} \text{ para } V < 6 \text{ Km}$$

$$\delta = 1.6 \quad \text{para } V > 50 \text{ Km}$$

$$\delta = 1.3 \quad \text{para } 6 \text{ Km} < 50 \text{ Km}$$

En esta ecuación,  $V$  corresponde a la visibilidad y  $\lambda$  es la longitud de onda de transmisión. Sin embargo, esta ecuación ha sido cuestionada recientemente por la comunidad de investigación de FSO. La conclusión general que se puede derivar de la observación empírica es que la dispersión de Mie causada por la niebla caracteriza la fuente principal de atenuación del haz y que este efecto se acentúa geoméricamente a medida que aumenta la distancia (Willebrand & Ghuman, 2002, p. 51).

#### 4.2.9 Modelo de Canales de FSO



**Figura 7.** Factores atmosféricos que desafían la instalación del sistema FSO.

**Fuente.** Obtenido de (Majumder, 2019)

#### 4.2.10 Canal Atmosférico

Las capas concéntricas alrededor de la superficie de la Tierra se clasifican ampliamente en dos regiones las cuales son: homosfera y heterosfera. La homosfera cubre capas inferiores que van desde 0 a 90 Km. La heterosfera se encuentra por encima de la homosfera por encima de los 90 Km. La región homosférica de la atmosfera está compuesta por varios gases, vapores de agua, contaminantes y otras sustancias químicas. La concentración máxima de estas partículas se encuentra cerca de la superficie terrestre en la troposfera, la cual se extiende hasta 20 Km. La densidad de partículas disminuye con la altitud a través de la ionósfera (región de la atmósfera superior que se extiende desde unos 90 a 600 Km y contiene electrones ionizados debido a las radiaciones solares). Estos electrones ionizados forman un cinturón de radiación alrededor de la superficie de la Tierra. Estas partículas atmosféricas interactúan con todas las señales que se propagan a través del cinturón de radiación y conducen al deterioro de la señal recibida debido a la absorción y la dispersión (Kaushal et al., 2017; p.2).

La condición atmosférica en el canal FSO se puede clasificar en términos generales en tres categorías, a saber, tiempo despejado, nubes y lluvia. Las condiciones meteorológicas nubladas van desde neblina hasta nubes densas y se caracterizan por baja visibilidad, alta humedad y gran atenuación. La lluvia se caracteriza por la presencia de gotas de lluvia de

tamaños variables y puede producir efectos severos dependiendo de la tasa de precipitación (Kaushal et al., 2017; p. 3).

#### 4.2.11 Pérdidas en el Espacio Libre

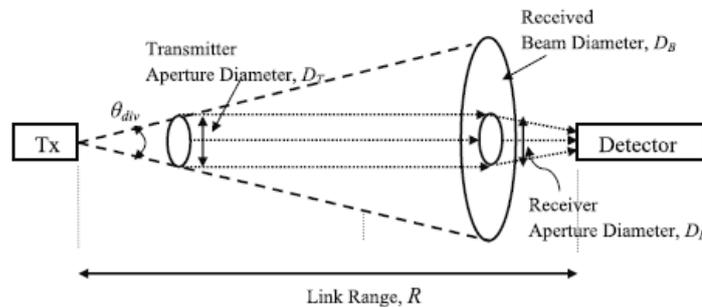
En los sistemas de comunicación FSO, la mayor pérdida generalmente se debe a la “pérdida de espacio”, es decir, la pérdida en la intensidad de la señal mientras se propaga a través del espacio libre. El factor de pérdida de espacio está dado por:

$$L_S = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$$

**Ecuación 5.** Pérdida en el Espacio Libre

Donde R es el rango del enlace. Debido a la dependencia de la longitud de onda, la pérdida en el espacio libre que sufre un sistema óptico es mucho mayor (es decir, el factor L<sub>s</sub> es mucho menor) que en un sistema RF (Kaushal et al., 2017; pg. 8).

#### 4.2.12 Pérdidas en el Haz Divergente



**Figura 8.** Pérdida debido a la Divergencia del Haz

**Fuente.** Obtenido de (Kaushal et al, 2017)

A medida que el haz óptico se propaga a través de la atmosfera, se dispersa debido a la difracción. Puede dar lugar a una situación en la que la apertura del receptor no sea capaz de recoger una fracción del haz transmitido y provocar una pérdida por divergencia del haz. Un sistema FSO típico transmite un haz óptico de 5 a 8 cm de diámetro en el transmisor. Este haz se propaga a aproximadamente 1 a 5 m de diámetro después de propagarse a una distancia de 1 Km. Sin embargo, el receptor FSO tiene un campo de visión estrecho (FOV) y no es capaz de recolectar toda la potencia transmitida, lo que resulta en la pérdida por energía. La potencia óptica captada por el receptor viene dada por (Kaushal et al., 2017; p. 8):

$$P_R = P_T G_T G_R L_P$$

**Ecuación 6.** *Potencia Óptica captada por el Receptor*

Donde  $P_T$  es la potencia transmitida,  $L_P$  es la pérdida por trayectoria en el espacio libre y  $G_T$  y  $G_R$  es la ganancia de antena efectiva del transmisor y el receptor, respectivamente. La ecuación 7 también puede ser representada de la siguiente manera:

$$P_R \approx P_T \left( \frac{D_T D_R}{\lambda R} \right)^2 \approx P_T \left( \frac{4}{\pi} \right)^2 \left( \frac{A_T A_R}{\lambda^2 R^2} \right)$$

**Ecuación 7.** *Potencia Óptica Recibida.*

Por lo tanto, la pérdida por divergencia del haz limitada por difracción/pérdida geométrica expresada en dB se da como:

$$L_G (\text{Pérdida Geométrica}) = -10 \left[ 2 \log \left( \frac{4}{\pi} \right)^2 + \log \left( \frac{A_T A_R}{\lambda^2 R^2} \right) \right]$$

**Ecuación 8.** *Pérdida por Divergencia del Haz*

En general, es preferible una fuente óptica con divergencia de haz estrecho. Pero la divergencia del haz estrecho hace que el enlace falle si hay una ligera desalineación entre los transceptores (Kaushal et al., 2017).

#### 4.2.13 *Turbulencia Atmosférica*

Cuando un rayo láser se transmite a lo largo de la trayectoria de la atmósfera turbulenta, las características del rayo láser varían con el tiempo y el espacio. Está relacionado con el diámetro del haz  $d_B$  y el tamaño de la celda del remolino turbulento  $I$ . Dado que el tamaño de la celda es mucho mayor que el diámetro del haz ( $d_B/I < 1$ ), la desviación del haz se produce en el plano del receptor y todo el haz se curva. Para  $d_B/I \approx 1$ , el frente de onda del haz se desvía casualmente y eso da como resultado la fluctuación del ángulo de llegada en el plano del receptor y el brillo de la imagen en el plano focal de la lente convergente. Hay muchos remolinos turbulentos incluidos en la sección transversal del haz porque el diámetro del haz es mucho mayor que el tamaño del remolino. Cada remolino dispersa y refracta la luz que incide sobre él respectivamente. Esto provocó el fenómeno de centelleo en el que la intensidad del haz fluctúa con el tiempo y el espacio. De todos los efectos inducidos por la atmósfera turbulenta, el centelleo es el que más perjudica la calidad del rayo láser y el rendimiento de FSO (Xu et al., 2004).

Dentro de los escenarios donde hay presencia de climas cálidos y secos, la turbulencia puede causar problemas con la transmisión. A medida que el suelo se calienta con el sol, el aire

también se calienta. Algunas celdas de aire o bolsas de aire se calientan más que otras. Esto provoca cambios en el índice de refracción, que a su vez cambia el camino que toma la luz mientras se propaga por el aire. Debido a que estas bolsas no son estables en el tiempo ni en el espacio, el cambio del índice de refracción parece seguir un movimiento aleatorio. Para el observador externo, esto parece como un comportamiento turbulento (Willebrand & Ghuman, 2002, p. 53).

En los enlaces FSO, las turbulencias atmosféricas provocan fluctuaciones tanto en la intensidad como en la fase de la señal luminosa recibida, lo cual afecta al rendimiento del enlace. Cuando el receptor solo conoce las estadísticas marginales del desvanecimiento, se puede hacer uso de un detector ML símbolo a símbolo para poder mejorar el rendimiento de la detección. Si el receptor conoce las estadísticas temporales conjuntas del desvanecimiento, se puede emplear la detección de secuencia de máxima verosimilitud (MLSD), lo que mejora aún más el rendimiento, aunque se tiene una complejidad más elevada. La recepción por diversidad espacial con múltiples receptores permite corregir el desvanecimiento inducido por turbulencias (Zhu & Kahn, 2002). Se debe mencionar que la turbulencia está presente en el canal de los enlaces FSO.

### **4.3 Radiofrecuencia (RF)**

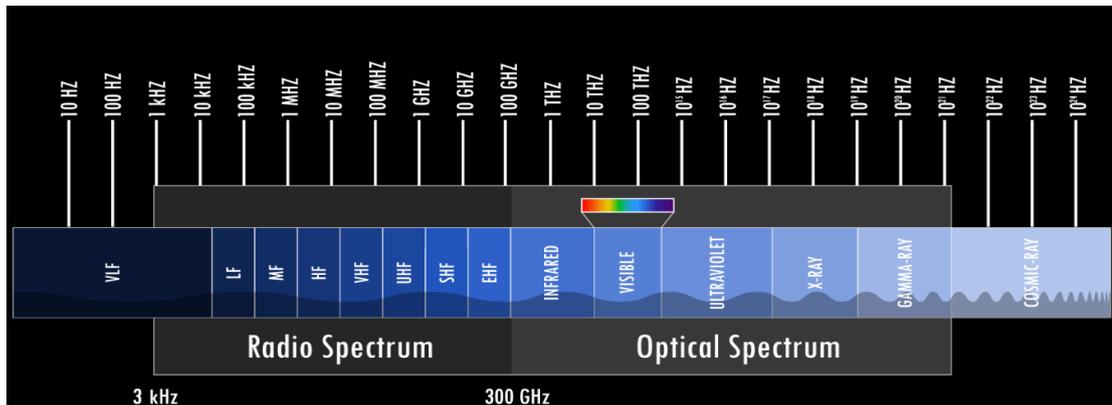
#### **4.3.1 Principios**

La comunicación por medio de Radiofrecuencia tiene lugar cuando una señal, en el rango de 30 KHz a 300 GHz, se propaga de transmisor a receptor. Entre estos últimos no siempre existe lo que se conoce como línea de vista LOS (Line-of-Sight) y la señal sufre diversos efectos antes de llegar a su destino. Principalmente se dice que existe una línea de vista cuando no existen obstáculos entre el transmisor y el receptor en una ruta directa. Al no existir LOS, la transmisión es de tipo multitrayecto. En una transmisión de este tipo la señal sufre efectos como difracción, refracción, reflexión y dispersión, los cuales provocan que la comunicación entre transmisor y receptor se complete por diferentes trayectorias (Rivera Chávez, 2021).

En las redes de comunicación, las ondas electromagnéticas se irradian a través de los canales de comunicación espacial. En general, las ondas electromagnéticas transmitidas, el principal portador de la información, se propagan a través de las antenas transmisoras y receptoras, empleando diferentes mecanismos de propagación como dispersión, difracción, reflexión y refracción. Estos ocurren cuando todas las formas de obstáculos naturales y hechos

por el hombre impiden las vías y amplitudes de comunicación. Los efectos resultantes de estos bloqueos naturales y provocados por el hombre son una alta atenuación, un deterioro lento/rápido y pérdidas constantes en las intensidades de las ondas transmitidas en el espacio (Isabona et al., 2022).

### 4.3.2 Espectro Electromagnético



**Figura 9.** Clasificación del: Espectro Electromagnético.

**Fuente.** Obtenido de (Manning, 2018)

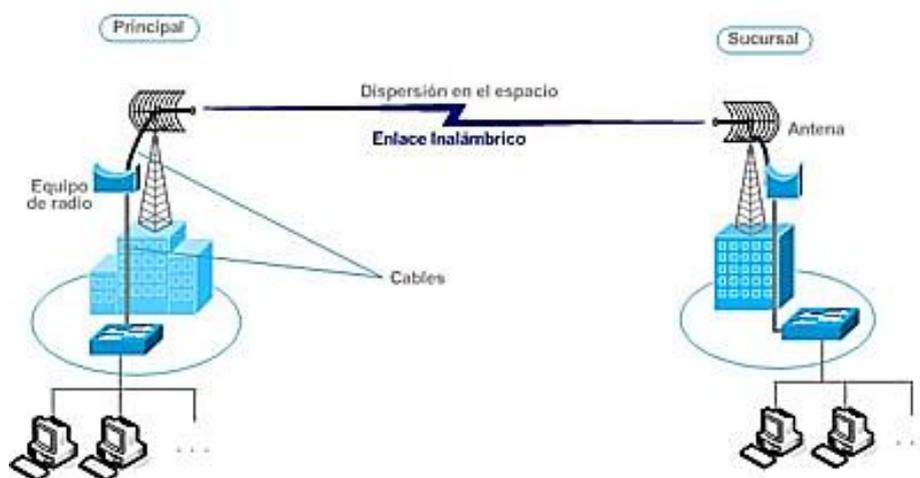
El espectro electromagnético está compuesto por todas las frecuencias de radiación electromagnética que propagan energía y viajan por el espacio en forma de ondas. Las longitudes de ondas más largas con frecuencias más bajas forman el espectro de radio. Las longitudes de onda más cortas con frecuencias más altas forman el espectro óptico. La porción del espectro que podemos observar se llama espectro visible (The National Aeronautics and Space Administration, 2018).

El componente básico de las comunicaciones por radio es una onda de radio. Las ondas de radio tienen las longitudes de onda más largas del espectro electromagnético. Como las ondas en un estanque, una onda de radio es una serie de picos y valles que se repiten. El patrón completo de una onda, antes de que se repita, se llama ciclo. El número de ciclos, o veces que una onda se repite en un segundo, se llama frecuencia. Una onda de radio es generada por un transmisor y luego detectada por un receptor. Una antena permite que un transmisor de radio envíe energía al espacio y que un receptor recoja energía del espacio. Los transmisores y receptores suelen estar diseñados para operar en un rango limitado de frecuencias (Manning, 2018).

### 4.3.3 Componentes de los sistemas RF

Un sistema de RF está compuesto por los siguientes elementos esenciales:

- **El radiotransmisor o transceptor:** Aquí se inicia el proceso de comunicación construyendo un mensaje y enviándolo a un receptor, éste a su vez analiza la información y reconstruye el mensaje a la luz de sus propios antecedentes y experiencias, los cuales sirven para sintetizar la información recibida (Melvin & Rivera, 2013).
- **Canal de Transmisión:** Es el medio que soporta la propagación de señales acústicas, electromagnéticas, de luz u ondas (Melvin & Rivera, 2013).
- **El receptor:** Analiza y reconstruye los significados del mensaje, sintetiza y construye significados y se convierte en un emisor al responder el mensaje que fue enviado (Melvin & Rivera, 2013).



**Figura 10.** Diagrama de un Sistema de RF.

**Fuente.** Obtenido de (Souto Pérez, 2018)

### 4.3.4 Formas de Propagación de Ondas

- a) **Ondas de Tierra:** Las ondas se transmiten y viajan cercanas a la superficie terrestre de diferentes modos. Este tipo de transmisión sólo es posible para un poco más de 100 Km sobre la superficie de la tierra (Molina Sierra, 2013).
- b) **Onda Superficial:** Este tipo de ondas se propagan en contacto con la superficie de la tierra, pueden propagarse a distancias mayores a los 160 Km (Molina Sierra, 2013).

- c) **Ondas de Espacio:** Este tipo de ondas constituyen la superposición de todos los tipos de señales que pueden llegar a un receptor (Molina Sierra, 2013).

#### **4.3.5 Fenómenos que se producen en la propagación**

##### ***Reflexión***

La señal golpea sobre un objeto cuyas dimensiones son mucho más grandes que la longitud de onda de la señal electromagnética y que tiene diferentes propiedades eléctricas (Molina Sierra, 2013).

##### ***Difracción***

Es la curva que hacen las señales alrededor de un objeto, la cual provoca un cambio de dirección de la señal (Molina Sierra, 2013).

##### ***Dispersión***

Es el fenómeno que ocurre cuando una señal de radio golpea contra una superficie rugosa o áspera y la energía reflejada es difundida o reflejada en varias direcciones (Molina Sierra, 2013).

##### ***Refracción***

Es el cambio de dirección o curvatura de una señal electromagnética cuando ésta se transmite de un medio a otro (Molina Sierra, 2013).

Adicionalmente, existen factores que afectan a la recepción como:

- Factores atmosférico-meteorológicos que afectan un radio enlace
- Las auroras boreales, la luna, las masas de aire caliente, las nieblas, la tropósfera, etc.
- Distancias considerables
- Altura

#### **4.3.6 Modelos de Predicción de Pérdida de Trayecto**

La pérdida de trayecto en RF es la atenuación de la intensidad de la señal que resulta de la influencia del terreno y los componentes atmosféricos en el canal de comunicación (Akinbolati & Ajewole, 2020).

La pérdida de trayecto también se puede definir como la medida de la atenuación promedio de Radiofrecuencia (RF) que sufre una señal transmitida cuando llega al receptor después de atravesar una ruta de varias longitudes de onda, la cual se da como (Salazar-palma & Bonneau, 2003):

$$Pl(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r}$$

**Ecuación 9. Pérdida de Ruta**

Donde  $P_t$  y  $P_r$  son la potencia transmitida y recibida respectivamente. La pérdida de ruta se utiliza en el cálculo del balance de enlace de los sistemas de comunicación. Se utiliza para la predicción y optimización de áreas de cobertura. También se puede utilizar para predecir espacios en blanco espaciales de TV para usuarios secundarios (Faruk et al., 2013).

#### 4.3.7 Ecuación de transmisión de Friis o Modelo de Espacio Libre (FSPL)

La ecuación de transmisión de Friis es un modelo de predicción de pérdida de trayecto simplificado que se utiliza en la propagación de ondas de radio. Los ingenieros de radio y antenas utilizan la siguiente ecuación simplificada para la predicción de pérdidas de trayecto entre dos antenas isotrópicas en el espacio libre (Salazar-palma & Bonneau, 2003):

$$L = 20 \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda}$$

**Ecuación 10. Predicción de pérdidas de trayecto entre dos antenas isotrópicas en el espacio libre**

Donde  $d$ , es la distancia (Línea de Vista, LOS) desde el transmisor en metros,  $\lambda$  es la longitud de onda de la onda en metros.

La pérdida de trayecto, que representa la atenuación que sufre la señal a medida que viaja a través del canal inalámbrico, está dada por la diferencia de potencia transmitida y recibida en dB y se expresa como (Faruk et al., 2013):

$$L = 10 \log \frac{P_t}{P_r}$$

**Ecuación 11. Pérdida de Trayecto**

#### 4.3.8 Modelo de Tierra Plana

Este modelo incorpora la altura del aparato emisor y receptor, la distancia de separación y el coeficiente de reflexión de la tierra. La ecuación de pérdida de trayectoria para el modelo de tierra plana está dada por (Ranvier, 2004):

$$L_{PE} = 40\log_{10}(d) - 20\log_{10}(h_1) - 20\log_{10}(h_2)$$

**Ecuación 12.** Pérdida de trayectoria para modelo de tierra plana

Donde  $d$ , es la distancia entre el transmisor y el receptor en Km,  $h_1$  y  $h_2$  en m, representan la altura de la estación base de transmisión y antena de recepción respectivamente.

#### 4.3.9 Modelo de Okumura

El modelo de Okumura es uno de los modelos de propagación macroscópica más utilizados. Fue desarrollado en 1968 a partir del resultado de estudios a gran escala realizados en Tokio, Japón y sus alrededores. El modelo fue diseñado para su uso en el rango de frecuencia de 200 a 1920 MHz y principalmente en un entorno de propagación urbana. El modelo de Okumura supone que la pérdida de trayecto entre el transmisor y el receptor en el entorno de propagación terrestre se puede expresar como (Mawira, 1992):

$$L_{50\%} = L_{FSL} + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA}$$

**Ecuación 13.** Modelo Okumura

Donde:

- $L_{50\%}$  es el valor mediano (es decir, el percentil 50) de la pérdida del trayecto de propagación expresado en dB.
- $L_{FSL}$  es la pérdida de propagación en el espacio libre en dB.
- $A_{mu}(f, d)$  es la atenuación media básica relativa al espacio libre en dB.
- $G(h_{te})$  y  $G(h_{re})$  son el factor de corrección de ganancia de altura de la estación base y la antena receptora en dB respectivamente.
- $G_{AREA}$  es la ganancia en dB debido al tipo de entorno

#### 4.3.10 Modelo de Equipo de Cooperativa Europea para la Investigación Científica y Técnica (COST-231)

Este modelo es una extensión del modelo Okumura – Hata desarrollado para cubrir una amplia gama de frecuencias entre (0,5 -2 GHz) y se usa para ciudades medianas y pequeñas. La expresión del modelo es (Abhayawardhana et al., 2005):

$$L_{(dB)} = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_t) + [44.9 - 6.55 \log_{10}(h_t)] \log_{10}(d) - \alpha(h_r) + C_m$$

**Ecuación 14. Modelo COST-231**

$\alpha(h_r)$  factor de corrección de la altura de la antena del receptor, mientras que  $C_m=0$  dB para ciudades medianas y áreas suburbanas y 3dB para áreas urbanas.

#### **4.3.11 Modelo ECC 33**

Este modelo fue desarrollado por el Comité de Comunicación Electrónica (ECC). Fue extrapolado de las medidas originales por Okumura y modificado de manera que pueda representar de cerca un sistema de acceso inalámbrico fijo. Es un modelo apropiado para la banda de Ultra Alta Frecuencia (UHF), y según recomendaciones recientes de ITU-R, se puede utilizar hasta 3.5GHz. Está dado por (Abhayawardhana et al., 2005):

$$L_{dB} = L_{FS} + L_{bm} - G_t - G_r$$

**Ecuación 15. Modelo ECC 33**

Donde  $L_{FS}$ ,  $L_{bm}$ ,  $G_t$ ,  $G_r$  todo en dB, representa la atenuación en el espacio libre, la pérdida de trayecto media básica, el factor de ganancia de altura del transmisor y el factor de ganancia de altura del receptor, respectivamente, que se definen como:

$$L_{FS} = 92.4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f)$$

$$L_{bm} = 20.41 + 9.83 \log_{10}(d) + 7.89 \log_{10}(f) + 9.56 [\log_{10}(f)]^2$$

$$G_t = \log_{10}\left(\frac{h_t}{200}\right) \{13.98 + 5.8 [\log_{10}(d)]^2\}$$

**Para ciudades de tamaño mediano tenemos:**

$$G_r = [42.57 + 13.7 \log_{10}(f)] [\log_{10}(h_m) - 0.585]$$

**Para ciudades amplias tenemos:**

$$G_r = 0.759 h_m - 1.862$$

**Donde f es en GHz, d en Km,  $h_t$  y  $h_m$  es en metros.**

## 5 Metodología

En el siguiente trabajo de tesis se ha estructurado la metodología en varios ítems, los cuales se describen a continuación:

### 5.1 Área de Estudio

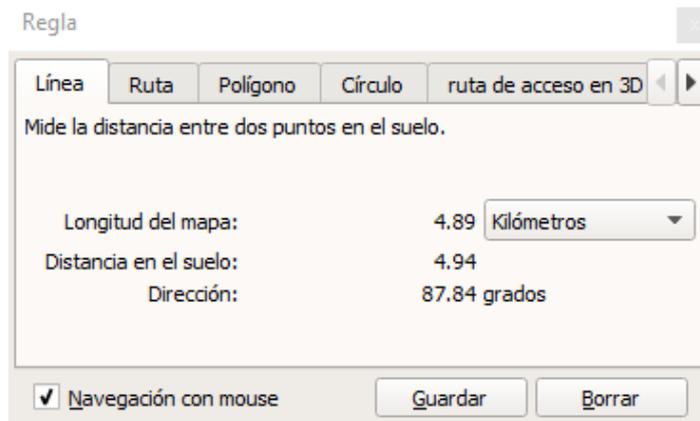
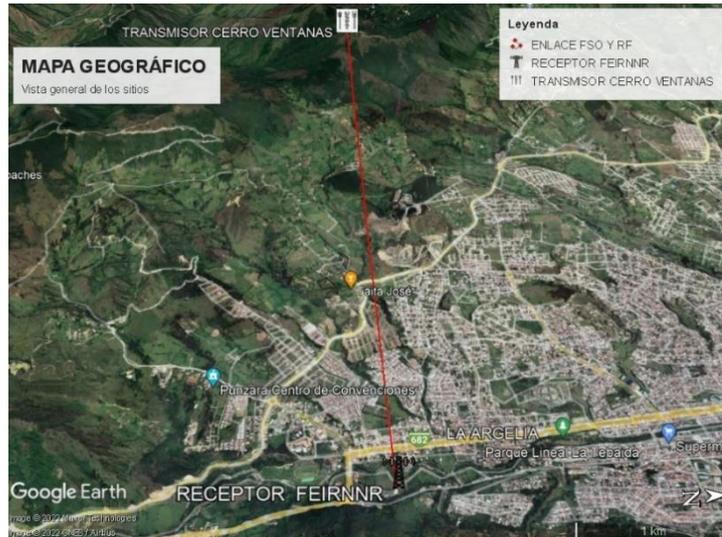
Para elaborar el estudio y diseño planteado en el presente trabajo de tesis, se ha tomado como referencia los siguientes sitios:

**Tabla 5.** Escenarios para el estudio de FSO y RF

Escenarios	Coordenadas	Descripción
Bloque 2 Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables	Latitud: 4° 1' 47.61" S Longitud: 79°11'59.28"O	Ubicado específicamente al Sur de la ciudad de Loja, el bloque 2 cuenta con una elevación de 20 m.
Cerro Ventanas	Latitud: 4°26'29.69"S Longitud: 79°27'33.95"O	Ubicado específicamente al Suroeste de la ciudad de Loja, mayormente se encuentran torres de telecomunicaciones de radiodifusión.

Obtenido de: Elaborado por el autor

Los sitios indican la ubicación en donde pueden ser ubicados tanto el transmisor como el receptor, si en un futuro se decidiría implementar esta tecnología.



**Figura 11.** Distancia y escenario para el caso de estudio y diseño FSO

**Fuente.** Elaborado por el autor.

En la *Figura 11*, se muestra el mapa geográfico con la ubicación del transmisor y receptor, además de la distancia del enlace, la cual es de 4.89 Km.

## 5.2 Materiales

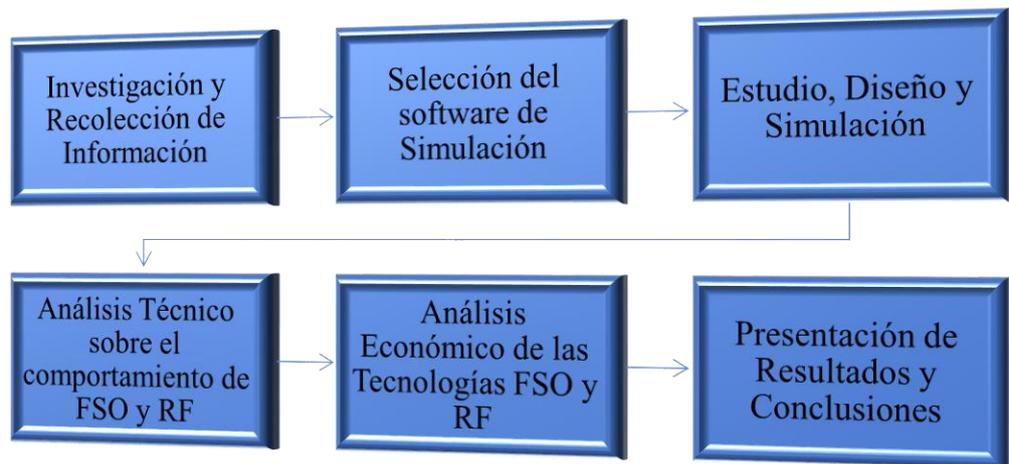
En este apartado se muestra los materiales y herramientas de software que se han utilizado, los cuales aportan al desarrollo del documento, diseño y simulación de este trabajo de tesis:

**Tabla 6.** Materiales y herramientas de software

Materiales y Herramientas de Software	Descripción
Computador Portátil hp	Máquina donde se almacenó toda la información de la parte de diseño, simulación y redacción del documento para su presentación.
Software Optisystem 7.0 	Software de diseño integral que permite realizar simulaciones de diseños de fibra óptica con ciertos parámetros.
Software Radio Mobile V 11.6.7 	Permite el cálculo de radio enlaces de larga distancia en diferentes tipos de terrenos.
Software Draw.io 	Útil para diseñar los diagramas de red
Software Google Earth Pro 	Muestra imágenes satelitales y aéreas en 3D de los lugares requeridos.

Obtenido de: Elaborado por el autor.

### 5.3 Metodología Implementada



**Figura 12.** Fases que se siguió para el desarrollo del siguiente Trabajo de Integración Curricular

**Fuente.** Elaborado por el autor.

El siguiente trabajo de tesis, busca analizar la tecnología Free Space Optics (FSO), para posteriormente elaborar un estudio y diseño de dicha tecnología y finalmente realizar una comparativa con la tecnología de Radiofrecuencia (RF).

Para ello se hace uso del paradigma Empírico-Analítico, ya que se analiza un tema específico (Free Space Optics) mediante la correlación de varios parámetros, para lograr obtener una respuesta concreta y verificable respecto a lo que se ha planteado anteriormente.

Adicionalmente, se hace uso del método cualitativo que permite recopilar información teórica e interpretar la información que cada documento o sitio web proporciona; y también cuantitativo, ya que se hace uso de ciertas expresiones y modelos matemáticos que permiten evaluar cada tecnología óptico-inalámbrica. Además, la investigación de este trabajo es de tipo no experimental ya que no se manipulan las variables y no existe una influencia directa con FSO y RF.

La metodología se encuentra estructurada en las siguientes fases:

#### **5.4 Fase 1: Investigación y recolección de información de FSO y RF**

En la primera fase, se realizó una investigación y recolección de información acerca de la tecnología FSO, la cual permitió entender su modo de operación y funcionamiento, además de las principales limitaciones que presenta FSO, ya que es una tecnología que no ha sido estudiada y evaluada de manera detallada en nuestro entorno.

Este trabajo permitirá conocer más sobre FSO, algunos de los ítems que se han destacado son:

- Evolución
- Definición y principios
- Factores que afectan el rendimiento
- Ventajas que proporcionan
- Modelos de canal

#### **5.5 Fase 2: Selección de software de simulación**

En la segunda fase, se realizó una investigación y selección del software más adecuado que permita realizar la simulación de cada tecnología y analizar los resultados que se logre con esta actividad. Se considera importante mencionar que se puede usar dos softwares diferentes

para cada tecnología, uno que enfoque su análisis en RF y otro que enfoque su análisis en FSO, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Permita simular redes ópticas y de microondas
- Los resultados obtenidos sean claros para su análisis
- Permita el análisis de varios parámetros importantes

### **5.5.1 Software seleccionado para Free Space Optics**

El software seleccionado para realizar la simulación de la tecnología Free Space Optics (FSO) es **Optisystem V 7.0**, el cual se acoge a los requerimientos para el análisis de esta tecnología.

Algunas de las aplicaciones que menciona Optiwave en su página web acerca de **Optisystem V 7.0** son:

- Diseños de redes ópticas que incluyen OTDM, anillos SONET/SDH, SWDM, DWDM, PON, cable, OCDMA.
- Transmisión monomodo, multimodo
- Óptica de espacio libre (FSO), Radio sobre Fibra (ROF), OFDM (directa, coherente)
- Amplificadores y láseres (EDFA, SOA, Raman, híbrido, optimización GFF, láseres de fibra)
- Procesamiento de señales (eléctrico, digital, totalmente óptico)
- Diseño de subsistemas de transmisor y receptor (directo / coherente)
- Formatos de modulación (RZ, NRZ, CSRZ, DB, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64)
- Análisis de rendimiento del sistema (diagrama de ojo, factor Q/VER, potencia de señal/OSNR, estados de polarización, diagramas de constelación, penalizaciones lineales y no lineales)

### **5.5.2 Software seleccionado para Radiofrecuencia**

El software que se ha seleccionado para simular el entorno de Radiofrecuencia (RF) es **Radio Mobile V 11.6.7**, el cual permite hacer uso de perfiles geográficos que se desea simular, además de mostrar varios parámetros para su evaluación.

Entre las aplicaciones que menciona el sitio web de la estación EA4FSI acerca de Radio Mobile, tenemos:

- Predicción del rendimiento de sistemas radio
- Análisis de la cobertura de un sistema sin necesidad de realizar mediciones sobre el terreno
- Evaluación de emplazamientos óptimos para la instalación de repetidores fijos o móviles
- Visualización 2D y 3D de modelos digitales del terreno.
- Extracción del perfil topográfico del vano de un radioenlace
- Interfaz con Global Positioning System (GPS)
- Interfaz con Automatic Position Reporting System (ARPS)

## **5.6 Fase 3: Estudio, Diseño y Simulación**

### **5.6.1 *Diseño y Criterios Previos para la Red FSO***

El diseño que se plantea en la red óptico inalámbrica es un enlace entre dos puntos, definiendo una línea de vista entre ellos, es necesario elaborar una valoración en cuanto a los equipos que sean necesarios proyectar, así como realizar valoraciones acerca del medio ambiente, distancia del enlace y condiciones atmosféricas.

Como menciona (Caizaluisa Caizaluisa, 2008) los puntos más importantes en los sistemas FSO al momento de realizar un adecuado diseño del sistema son:

- Estudio de los sitios donde se realiza la instalación
- Armado de los equipos
- Alineamiento de los sistemas
- Validación del enlace

### **5.6.2 *Estudio del lugar de instalación de los equipos***

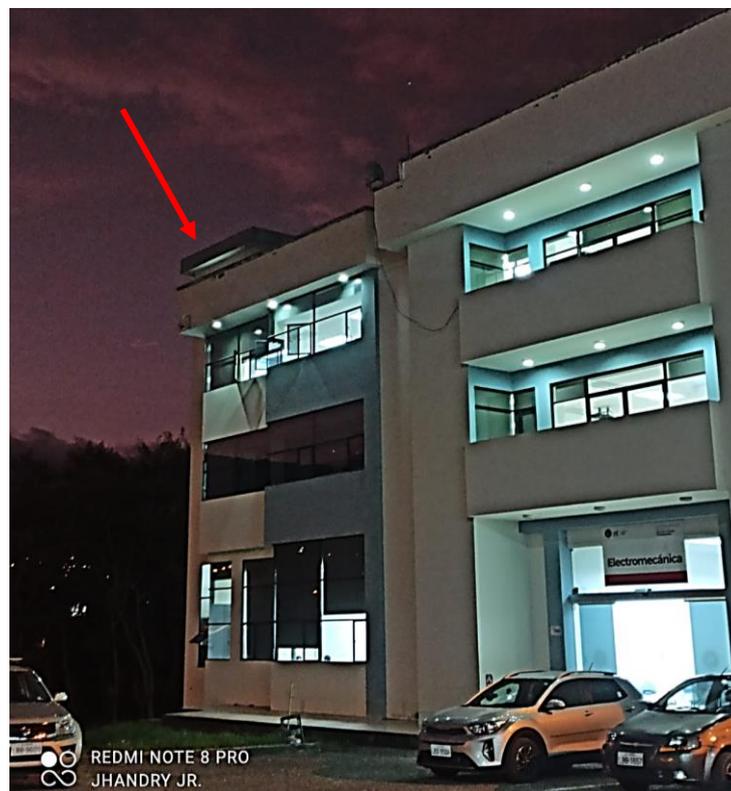
Para la ubicación de los equipos FSO se ha seleccionado en la parte del transmisor una torre arriostrada ubicada en el Cerro Ventanas, en la cual se puede montar el equipo FSO transmisor sin ningún inconveniente, de igual manera en la parte del receptor se ha seleccionado la parte más alta de la terraza del bloque 2 de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables mencionando que existe línea de vista entre transmisor y receptor. La altura de la torre en el cerro Ventanas es de 30 metros mientras que el bloque 2 de la FEIRNNR tiene una altura de 20 metros.



**Figura 13.** *Escenario Cerro Ventanas (Punto Transmisor)*

**Fuente.** *Elaborado por el autor*

En la *Figura 13*, se puede observar el escenario del punto transmisor que corresponde al cerro Ventanas, el óvalo rojo indica la torre arriostrada que se ha tomado como referencia para este caso de estudio en donde se puede ubicar el equipo transmisor de FSO.

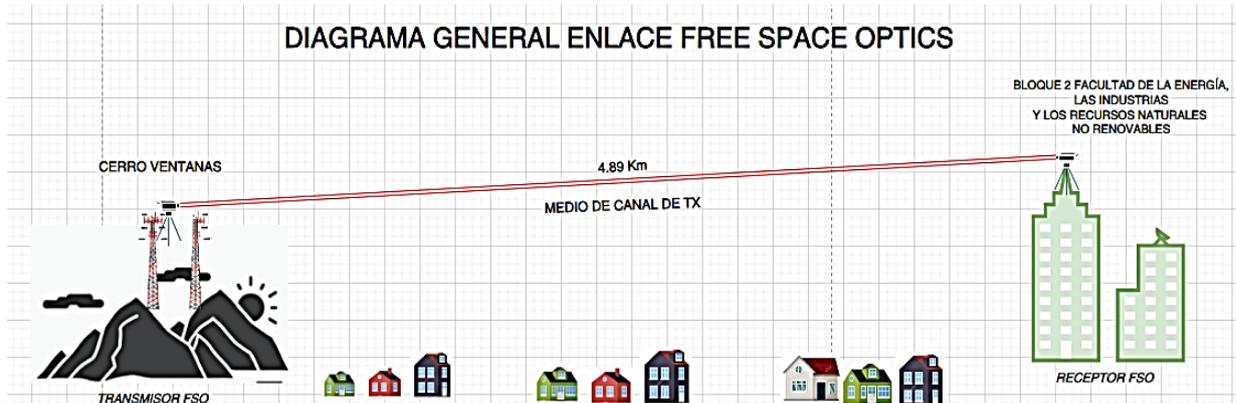


**Figura 14.** *Escenario Bloque 2 FEIRNNR (Receptor)*

**Fuente.** *Elaborado por el autor*

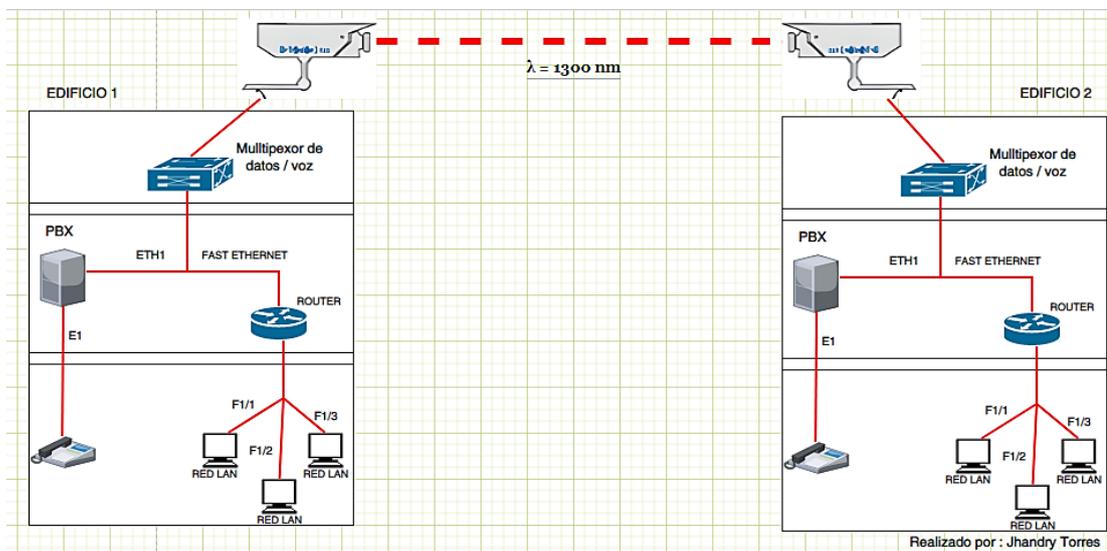
En la *Figura 14*, se puede observar el escenario del punto receptor, la flecha roja indica donde puede ir ubicado el equipo FSO receptor, garantizando una línea de vista entre el transmisor y el receptor.

A continuación, se muestra el diagrama general del enlace y el diagrama de red de conexiones entre edificios:



**Figura 15.** Diagrama General Enlace FSO

Fuente. Elaborado por el autor



**Figura 16.** Diagrama de red FSO

Fuente. Elaborado por el autor

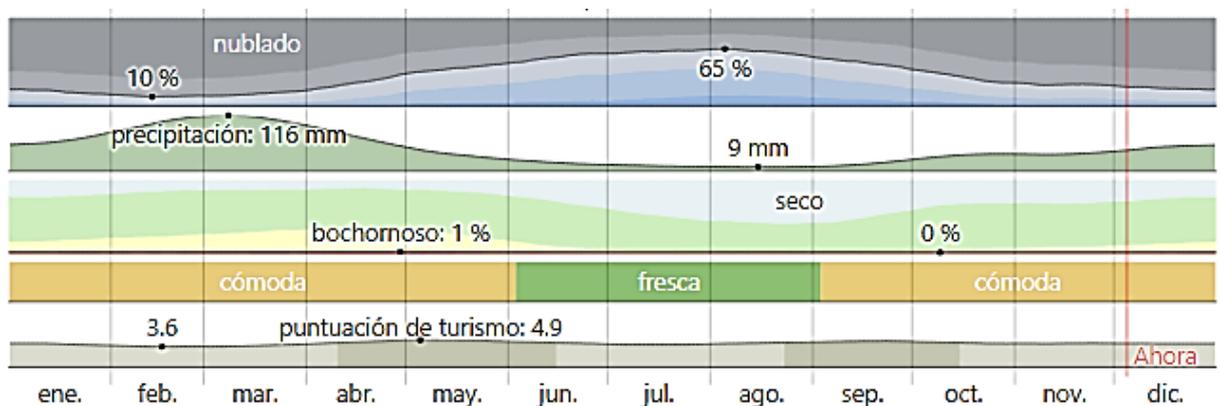
### 5.6.3 Distancia del Enlace

Los enlaces típicos de los sistemas FSO están entre 300 m y 5 Km, aunque se pueden implementar distancias más amplias, como de 8 a 11 km, dependiendo de la velocidad y la disponibilidad requerida, además de las características y alcance del equipo (Alkholidi et al.,

2014). En este caso la distancia del enlace es de 4.89 Km, la cual se puede ver limitada por diferentes cambios climáticos, niebla densa presente en la ciudad de Loja, cambiando de manera drástica la disponibilidad del sistema FSO. Es recomendable aplicar la tecnología FSO cuando tenemos distancias que se encuentren dentro del rango de 20 m a 5 Km; ya que, si las distancias son extensas, el enlace presentará inconvenientes debido a la reducción del margen del enlace.

#### 5.6.4 Condiciones Climáticas en la Ciudad de Loja

En la ciudad de Loja, la temporada de lluvia es cómoda y nublada y la temporada seca es fresca y parcialmente nublada. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 9°C a 21°C y rara vez baja a menos de 7°C o sube a más de 23°C (Weather Spark, 2022).

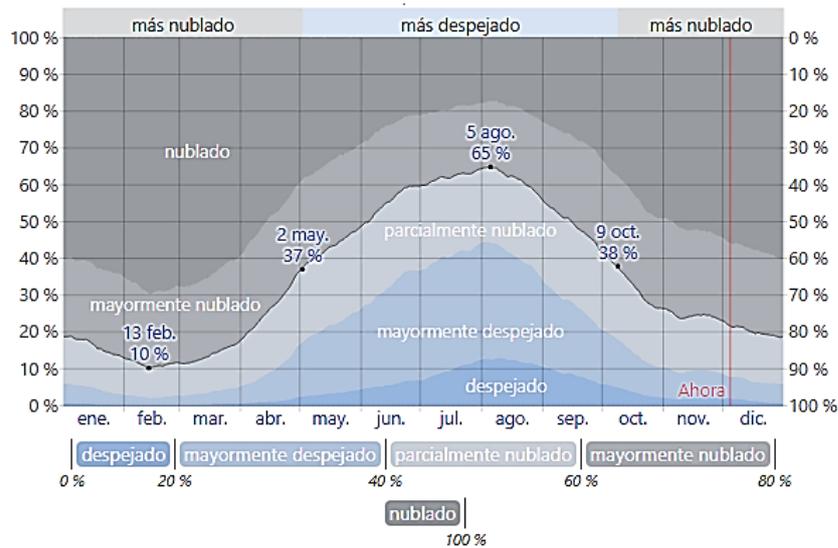


**Figura 17.** El tiempo por mes en la ciudad de Loja

**Fuente.** Obtenido de (Weather Spark, 2022)

#### Nubes:

En Loja, el promedio del cielo cubierto con nubes varía extremadamente en el transcurso del año. La parte más despejada del año es julio, durante el cual en promedio el cielo está despejado, mayormente despejado o parcialmente nublado el 62% del tiempo; la parte más nublada del año comienza aproximadamente el 9 de octubre, dura 6,8 meses y se termina aproximadamente el 2 de mayo; el mes más nublado es febrero, durante el cual en promedio el cielo está nublado o mayormente nublado en 89% del tiempo (Weather Spark, 2022).



Fracción	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Más nublado	84 %	89 %	86 %	73 %	57 %	44 %	38 %	39 %	51 %	67 %	76 %	80 %
Más despejado	16 %	11 %	14 %	27 %	43 %	56 %	62 %	61 %	49 %	33 %	24 %	20 %

**Figura 18.** Categorías de nubosidad en Loja

**Fuente.** Obtenido de (Weather Spark, 2022)

La *Figura 18*, muestra el porcentaje de tiempo pasado en cada banda de cobertura de nubes, categorizado según el porcentaje del cielo cubierto de nubes.

### **Precipitación:**

En la ciudad de Loja, la temporada más mojada dura 4,6 meses, desde el 13 de diciembre al 1 de mayo, con una probabilidad de más del 30% de que cierto día será un día mojado. El mes con más días mojados es marzo, con un promedio de 15,5 días con al menos 1 milímetro de precipitación. Entre los días mojados, se distingue entre los que tienen solamente lluvia, nieve o una combinación de ambas. El mes con más días de lluvia es marzo, con un promedio de 15,5 días; el tipo más común de precipitación durante el año es solo lluvia, con una probabilidad máxima del 52% el 3 de marzo (Weather Spark, 2022).



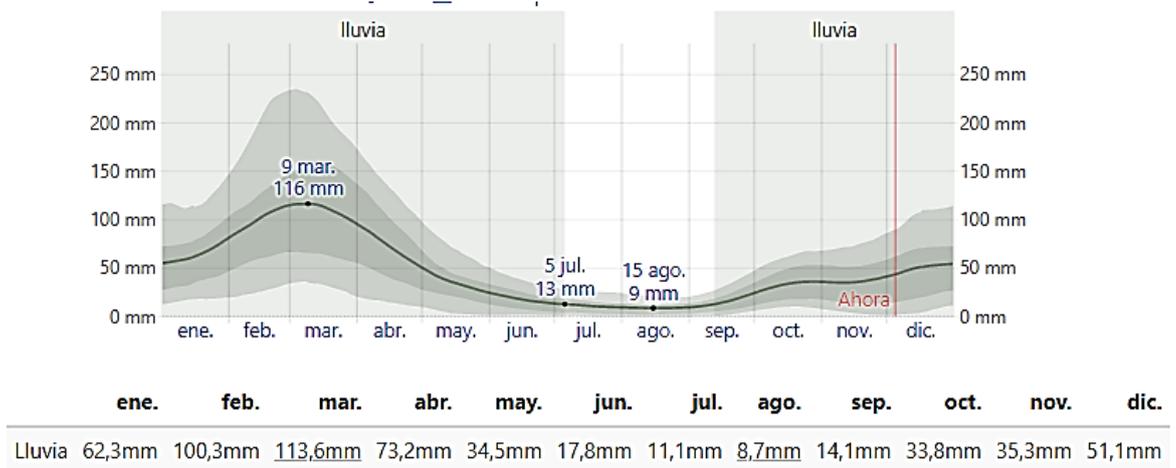
**Figura 19.** Probabilidad diaria de precipitación en Loja

**Fuente.** Obtenido de (Weather Spark, 2022)

La *Figura 19*, muestra el porcentaje de días en las que se observan los diferentes tipos de precipitación, excluidas las cantidades ínfimas: solo lluvia, solo nieve, mezcla (llovió y nevó el mismo día).

### **Lluvia:**

La temporada de lluvia dura 9,8 meses, del 12 de septiembre al 5 de julio, con un intervalo móvil de 31 días de lluvia por lo menos 13 milímetros. El mes con más lluvia en Loja es marzo, con un promedio de 114 milímetros de lluvia. El periodo de año sin lluvia dura 2,2 meses, del 5 de julio al 12 de septiembre, el mes con menos lluvia en Loja es agosto, con un promedio de 9 milímetros de lluvia (Weather Spark, 2022).



**Figura 20.** Promedio mensual de lluvia en Loja

**Fuente.** Obtenido de (Weather Spark, 2022)

### 5.6.5 Selección del Equipo más adecuado para la tecnología FSO

En la actualidad existen varios distribuidores de equipos FSO, sin embargo, en Ecuador no se dispone de un proveedor que distribuya dichos equipos. Se debe considerar que el equipo seleccionado debe cumplir con ciertas características para tolerar:

- Niveles de tráfico
- Distancias de enlace
- Velocidades de transmisión de los datos

Además, debe garantizar:

- Solución integrada de extremo a extremo
- Rendimiento con un elevado ancho de banda
- Comunicación confiable
- Respaldo de radio
- Seguridad

A continuación, se mencionan algunos fabricantes y distribuidores de equipos FSO:

#### a) FSONA (Optical Wireless):



**Figura 21.** Proveedor de equipos FSONA (Optical Wireless)

**Fuente.** Obtenido de [FSONA (wireless communication), 2022]

La empresa FSONA se ha encargado de reunir un equipo de comunicaciones láser superlativos, cuya profundidad y amplitud de conocimiento no tiene rival en el sector privado. En su sede de investigación y desarrollo en Richmond, BC, se continua ampliando los límites de la tecnología de óptica de espacio libre para desarrollar la próxima generación de soluciones de comunicaciones de banda ancha de corta distancia para una amplia gama de mercados y aplicaciones [FSONA (wireless communication), 2022].

Algunos de los equipos que ofrece FSONA son:

**SONAbeam 1250-E+:**



**Figura 22.** Equipo SONAbeam E+

**Fuente.** Obtenido de (FSONA (wireless communication), 2022)

La serie SONAbeam E es extremadamente versátil (*ver anexo 1*), dispone de una carcasa de aluminio compacta, pero resistente, la cual le da comodidad al aire libre en condiciones meteorológicas adversas (FSONA (wireless communication), 2022).

Sus especificaciones técnicas son:

**Tabla 7.** Especificaciones técnicas equipo E+

<b>Equipo SONAbeam +</b>	
<b>Tasas de transmisión</b>	1,25 Gbps, dúplex completo
<b>Rango operacional</b>	3 dB/Km aire despejado: 500 m a 3600 m 10 dB/Km lluvia externa: 500 m a 1750 m
<b>Potencia de salida del láser</b>	Pico de 800mW (2x400mW)
<b>Longitud de onda del espacio libre</b>	1550 nm
<b>Apertura de recepción</b>	10 cm de diámetro
<b>Opciones de interfaz</b>	1000-Base.SX (850 nm) 1000-Base.LX (1300 nm)

Obtenido de: (fSONA, 2023)

### **SONAbeam 155-M:**



**Figura 23.** Equipo SONAbeam M

**Fuente.** Obtenido de (FSONA (wireless communication), 2022)

La serie SONAbeam M está diseñada teniendo en cuenta las necesidades de los operadores (*ver anexo 2*). Dispone de una carcasa resistente, de aluminio fundido, hermética al medio ambiente y hasta 50 veces más potente que los productos de la competencia, además es el sistema más resistente y potente del mercado actual.

Sus especificaciones técnicas son:

**Tabla 8.** Especificaciones técnicas equipo M

<b>Equipo SONAbeam M</b>	
<b>Tasas de transmisión</b>	Fast Ethernet: 125 Mbps, full dúplex; OC-3/STM-1: 155 Mbps, full dúplex

<b>Rango operacional</b>	3 dB/Km aire despejado: 300 m a 5400 m 10 dB/Km lluvia externa: 300 m a 2400 m
<b>Potencia de salida del láser</b>	640 mW (4 transmisores a 160 mW)
<b>Longitud de onda del espacio libre</b>	1550 nm
<b>Apertura de recepción</b>	20 cm de diámetro
<b>Opciones de interfaz</b>	1 - 1000-Base.SX (850 nm)

Obtenido de: (fSONA, 2023)

### SONAbeam 2500-Z:



**Figura 24.** Equipo SONAbeam Z

**Fuente.** Obtenido de (FSONA (wireless communication), 2022)

La serie Z, en los equipos SONAbeam, fue la última incorporación que ofrece hasta 2,5 Gbps de ancho de banda dúplex completo (ver anexo 3). Mientras que otras soluciones inalámbricas de 2,5 Gbps emparejan dos sistemas a un costo adicional, SONAbeam 2500-Z ofrece la conexión inalámbrica de mayor capacidad en una solución económica de enlace único (FSONA (wireless communication), 2022).

Sus especificaciones técnicas son:

**Tabla 9.** Especificaciones técnicas equipo SONAbeam Z

<b>Equipo SONAbeam Z</b>	
<b>Velocidad de datos / protocolo</b>	OC48/STM16, 2.5 Gbps, full dúplex Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps, full dúplex CPRI 2/ CPRI3
<b>Rango operacional</b>	3 dB/Km aire despejado: 50 m a 500 m 10 dB/Km lluvia externa: 50 m a 350 m
<b>Potencia de salida del láser</b>	160 mW

<b>Longitud de onda del espacio libre</b>	1550 nm
<b>Apertura de recepción</b>	50 mm de diámetro
<b>Opciones de interfaz</b>	SFP de 2.5Gbps (1310 nm)

Obtenido de: (fSONA, 2023)

**b) EC SYSTEM:**



**Figura 25.** Proveedor de equipos FSO EC SYSTEM

**Fuente.** Obtenido de (ec system, 2023)

La empresa EC System destaca como proveedor mundial de soluciones inalámbricas para operadores de telecomunicaciones, la cual ofrece una cartera completa de soluciones punto a punto inalámbricas ópticas basadas en equipo ópticos de espacio libre y equipos de banda ancha inalámbrica de alta capacidad para redes punto a punto y multipunto (ec system, 2023).

Algunos de sus equipos son:

**EL-10Gex:**



**Figura 26.** Equipo EL-10Gex FSO

**Fuente.** Obtenido de (ec system, 2023)

Brinda un rendimiento neto de hasta 30 Gbps/s. es la única solución inalámbrica óptica cableada para proporcionar una conexión de datos tan grande con baja latencia y sin posibilidad de interceptación a través del aire (ver anexo 4).

Sus especificaciones técnicas son:

**Tabla 10.** Especificaciones técnicas equipo EL-10Gex FSO

<b>Equipo EL-10Gex FSO</b>	
<b>Tasas de transmisión</b>	Rendimiento de 10 Gbps con opción de actualización paso a paso hasta 30 Gbps
<b>Rango operacional</b>	1300 m
<b>Potencia de salida del láser</b>	27 dBm
<b>Longitud de onda del espacio libre</b>	1535 - 1560 nm
<b>Divergencia de radiación (haz) del canal de información principal (1550 nm)</b>	0,15 mrad

Obtenido de: (ec system, 2023)

**EL-1GL:**



**Figura 27.** Equipo FSO EL-1GL

**Fuente.** Obtenido de (ec system, 2023)

El equipo de FSO con un rendimiento de 1 Gigabit en Full Dúplex es un enlace punto a punto óptico inalámbrico para proporcionar las opciones más efectivas para sistemas de seguridad y protección, backhails y conexiones punto a punto inalámbricas que requieren transferencia de datos de alta velocidad y a la vez alta seguridad de comunicación (ver anexo 5).

Algunas de sus especificaciones técnicas son:

**Tabla 11.** Especificaciones técnicas equipo FSO EL-1GL

<b>Equipo FSO EL-1GL</b>	
<b>Tasas de transmisión</b>	1 Gbps con un ancho de banda de 1250 Mbps full dúplex
<b>Rango operacional</b>	Alcance de hasta 4400 m
<b>Longitud de onda del espacio libre</b>	1550 nm

<b>Opciones de interfaz</b>	Interfaces básicas de 10/100/1000 BASE-TX SFP: 1000Mbps
<b>Margen de desvanecimiento</b>	44 dB a una distancia de 1 Km
<b>Sistema</b>	Sistema con seguimiento automático

Obtenido de: (ec system, 2023)

**c) ARTOLINK:**



**Figura 28.** Proveedor de equipos FSO Artolink

**Fuente.** Obtenido de (Artolink, 2023)

Artolink es una marca registrada de productos avanzados fabricados con la tecnología Free Space Optics. El concepto de producto Artolink es superar las expectativas de los usuarios y sorprenderlos durante el uso de sus equipos. La familia de productos Artolink cumple con todos los requisitos del mercado y ofrece un modelo con velocidades de transferencia de datos de 1 Gbps, 10 Gbps y 30 Gbps. Las distancias para la comunicación van desde los 0 a 7 Km (Artolink, 2023).

Algunos de los equipos disponibles son:

**M1-GE-L:**



**Figura 29.** Equipo FSO M1-GE-L

**Fuente.** Obtenido de (Artolink, 2023)

Este modelo puede transmitir datos con una velocidad de 1 Gbps a distancias de hasta 4400 m (ver anexo 6). A continuación, se muestra algunas de sus especificaciones técnicas:

**Tabla 12.** Especificaciones técnicas equipo FSO M1-GE-L

<b>Equipo FSO M1-GE-L</b>	
<b>Interfaces básicas</b>	2 x 10/100/1000 Base-TX + 1 x 1000Base-SX (SFP)
<b>Enlaces distancias por disponibilidad 0.997</b>	4400 m
<b>Ancho de banda</b>	1250 Mbps dúplex completo
<b>Longitud de onda del espacio libre</b>	1550 nm
<b>Margen de desvanecimiento a una distancia de 1 Km</b>	40 dB

Obtenido de: (Artolink, 2023)

### **M1-10GE:**



**Figura 30.** Equipo FSO M1-10GE

**Fuente.** Obtenido de (Artolink, 2023)

El modelo M1-10GE es el único sistema de comunicación inalámbrica en el mercado mundial que puede transferir datos a una velocidad de 10 Gbps en modo full-dúplex a distancias de hasta 1500m (*ver anexo 7*). A continuación, se muestran algunas de sus especificaciones técnicas:

**Tabla 13.** Especificaciones técnicas equipo FSO M1-GE-L

<b>Equipo FSO M1-GE-L</b>	
<b>Interfaces básicas</b>	1 puerto 10G SFP+
<b>Enlaces distancias por disponibilidad 0.997</b>	1500 m
<b>Ancho de banda</b>	10312,5 Mbps dúplex completo
<b>Longitud de onda del espacio libre</b>	1550 nm
<b>Margen de desvanecimiento a una distancia de 1 Km</b>	22 dB

Obtenido de: (Artolink, 2023)

## M1-30GE:



**Figura 31.** Equipo FSO M1-30GE

**Fuente.** Obtenido de (Artolink, 2023)

Es uno de los últimos productos que ofrece Artolink en su catálogo, el cual presenta las siguientes especificaciones técnicas:

**Tabla 14.** Especificaciones técnicas equipo FSO M1-30GE

Equipo FSO M1-30GE	
<b>Interfaces básicas</b>	3 puertos 10G SFP+
<b>Enlaces distancias por disponibilidad</b> <b>0.997</b>	1300 m
<b>Ancho de banda</b>	10312,5 – 30937,5 Mbps dúplex completo
<b>Longitud de onda del espacio libre</b>	1550 nm
<b>Margen de desvanecimiento a una distancia de 1 Km</b>	18 dB

Obtenido de: (Artolink, 2023)

## d) MRV TereScope:



**Figura 32.** Proveedor de equipos FSO MRV TereScope

**Fuente.** Obtenido de (Comprehensive et al., 2005)

MRV es líder en óptica de espacio libre mediante su línea de productos TereScope, un sistema de transmisión inalámbrica óptica de datos, voz y video. Los sistemas TereScope de MRV proporcionan las soluciones inalámbricas FSO más completas, desde distancias cortas y largas, ancho de banda estrecho a ancho de banda ultra elevado (Comprehensive et al., 2005).

Entre los equipos que ofrece este proveedor tenemos:

### **TereScope 5000:**



**Figura 33.** Equipo TereScope 5000 modelo MRV

**Fuente.** Obtenido de (Ford & Ralph, 2005)

### **Especificaciones Técnicas (ver anexo 8):**

**Tabla 15.** Especificaciones técnicas equipo TereScope 5000

<b>Equipo TereScope 5000</b>	
<b>Protocolos y redes</b>	Redes de 1 a 155 Mbps, para protocolos como E3/T3, Fast Ethernet, FDDI, OC-3, ATM y STM-1
<b>Distancias</b>	Cubre distancias de hasta 6.5 Km dependiendo las condiciones atmosféricas
<b>Licencia</b>	No requiere licencia
<b>Longitud de onda del espacio libre</b>	850 -1300 nm
<b>Resistencia del equipo</b>	Resistente a la intemperie IP66

Obtenido de: (Comprehensive et al., 2005)

### **TereScope 4000:**



**Figura 34.** Equipo TereScope 4000 modelo MRV

**Fuente.** Obtenido de (Ford & Ralph, 2005)

## Especificaciones técnicas (ver anexo 9):

**Tabla 16.** Especificaciones técnicas equipo TereScope 4000

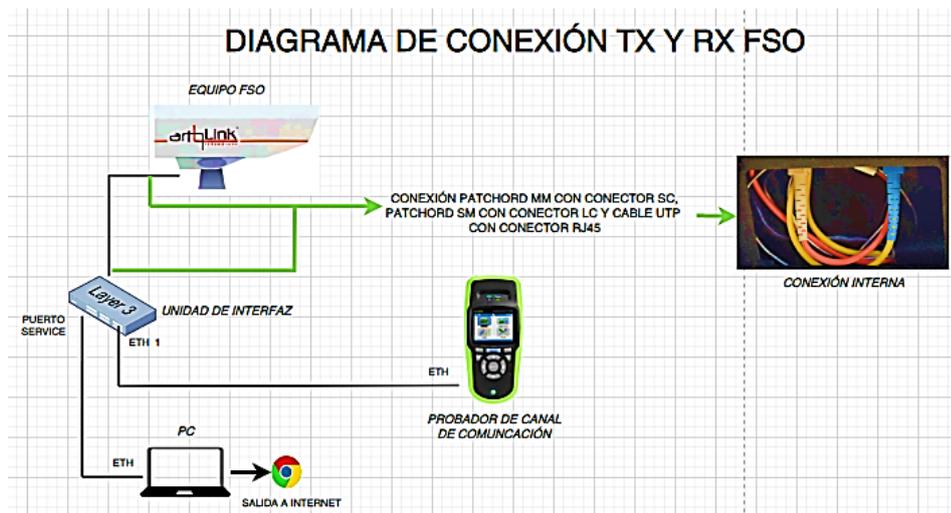
<b>Equipo TereScope 4000</b>	
<b>Protocolos y redes</b>	Redes de 1 a 155 Mbps, para protocolos como E1/T1, Ethernet 4xE1/T1, 34 Mbps, Fast Ethernet, ATM
<b>Distancias</b>	Cubre distancias de hasta 5.2 Km dependiendo las condiciones atmosféricas
<b>Licencia</b>	No requiere licencia
<b>Longitud de onda del espacio libre</b>	850 -1300 nm
<b>Resistencia del equipo</b>	Resistente a la intemperie IP66

Obtenido de: (Comprehensive et al., 2005)

El modelo de equipo que ha sido seleccionado en base al escenario, condiciones climáticas y factores atmosféricos es el TS5000 el cual corresponde a la marca MRV de la serie TereScope. Como se menciona en la hoja de catálogo del equipo, el TS5000 utiliza una tecnología de apertura de transmisión múltiple (3 transmisores) para garantizar un alto rendimiento en condiciones meteorológicas adversas, además cuenta con un diámetro de 8” para superar el centelleo y otros ruidos atmosféricos que se puedan producir en las diferentes condiciones climáticas de la ciudad de Loja, ya sea climas cálidos o fríos (ver anexo 10).

### 5.6.6 Diagrama de Conexión de la Interfaz Óptica

A continuación, se muestra el diagrama de conexión de los equipos FSO tanto para el transmisor como para el receptor:



**Figura 35.** Diagrama de conexión de los equipos FSO

**Fuente.** Elaborado por el autor

En la *Figura 35*, se puede observar las diferentes conexiones que se debe realizar para el correcto funcionamiento de la unidad óptica.

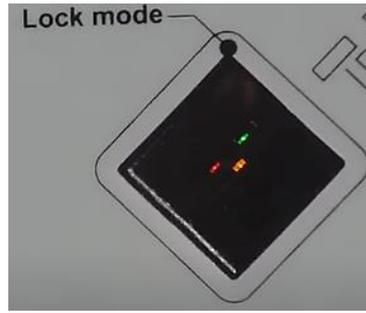
En primer lugar, se debe abrir la tapa del compartimiento de conmutación y quitar el tapón de una de las aberturas:



**Figura 36.** Tapa de compartimiento del equipo FSO

**Fuente.** Obtenido de (Moctkom AO, 2019)

Luego se debe preparar el cable de interfaz y realizamos las conexiones como se aprecia en la *Figura 36*, los equipos tienen ensamblado un esquema de conexión, lo cual facilita el trabajo; además el criterio para un correcto guiado es el buen parpadeo del indicador central de la Unidad Óptica y el funcionamiento del motor del sistema de guiado que está definido por su sonido (ver anexo 11). Luego de apuntar el canal, es necesario esperar hasta 10 minutos antes de que se complete el ajuste automático del terminal para la distancia establecida (Moctkom AO, 2019).

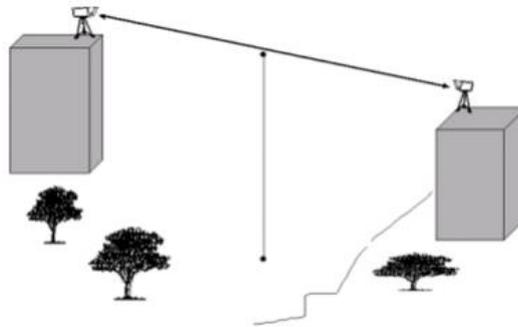


**Figura 37.** *Indicador central de la unidad óptica*

**Fuente.** *Obtenido de (Moctkom AO, 2019)*

### 5.6.7 *Locación Óptima y Aceptable*

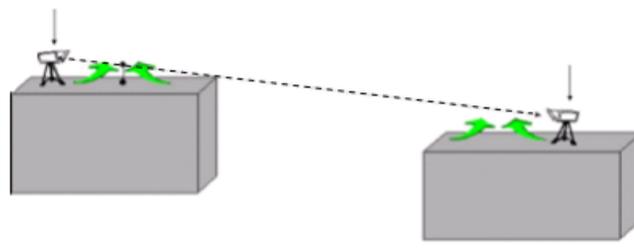
La ubicación de los equipos FSO es un factor importante que se debe tener en cuenta al momento de su instalación, hay que considerar que no exista presencia de edificios, árboles que obstruyan la línea de vista entre el transmisor y el receptor.



**Figura 38.** *Ubicación correcta de los equipos FSO*

**Fuente.** *Obtenido de (Carlos & Ron, 2008; p. 162)*

En la *Figura 38*, se puede apreciar la ubicación adecuada de los equipos FSO, en donde se puede observar que no existe algún obstáculo entre los dos edificios, además la altura de cada edificación es adecuada.



**Figura 39.** *Ubicación no adecuada de los equipos FSO*

**Fuente.** *Obtenido de (Carlos & Ron, 2008; pág.162)*

En la *Figura 39*, se puede observar la ubicación incorrecta de los equipos FSO sobre dos edificaciones en donde se puede observar que la luz que se transmite es obstruida por el vértice de uno de los edificios.

Los equipos FSO también pueden ser montados sobre torres de telecomunicaciones, así como podemos apreciar en la *Figura 40*:



**Figura 40.** *Instalación FSO en Siria 3.5 Km*

**Fuente.** *Obtenido de(Artolink, n.d.)*

#### **5.6.8 Simulación escenarios FSO Bajo dos Condiciones Atmosféricas**

A continuación, para el siguiente punto se realiza la simulación del enlace óptico-inalámbrico en cuanto a la tecnología FSO, haciendo uso del software seleccionado *Optisystem 7.0*.

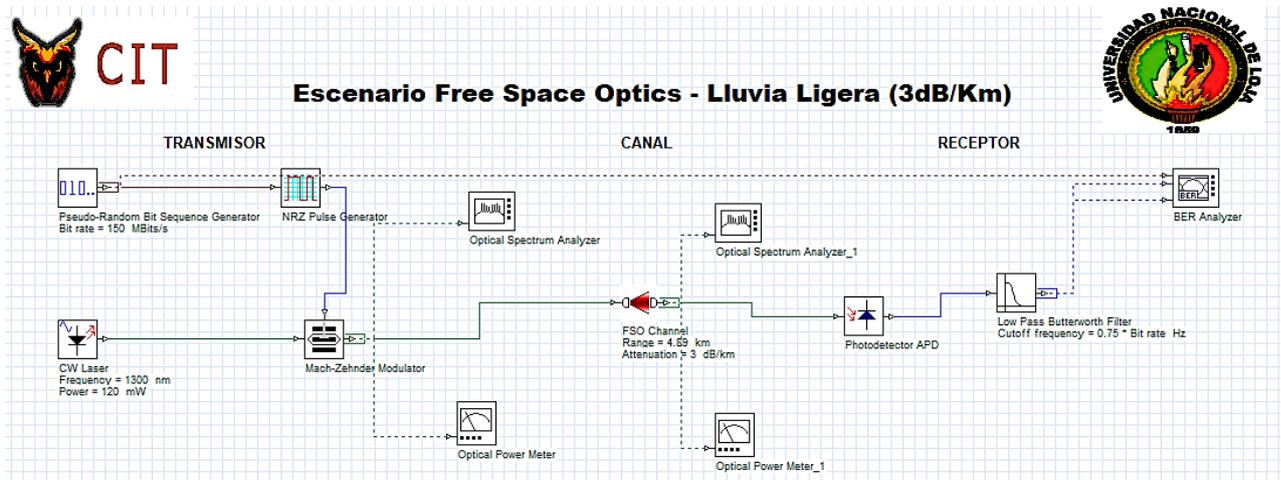
Para iniciar, primero se realiza las simulaciones tomando en cuenta la distancia entre el Bloque 2 de la FEIRNNR (transmisor) y el cerro Ventanas (receptor) la cual es de 4.89 Km bajo dos condiciones atmosféricas:

- ❖ 3dB/Km = Lluvia ligera (5 – 10 mm/hr), con una neblina ligera
- ❖ 30 dB/Km = Lluvias altas que superan los 180 mm/hr, vientos, humo moderado

Adicionalmente, se toma en cuenta el rango de operación del equipo seleccionado.

Cada escenario consta de tres partes principales, las cuales son: sección de transmisor, canal atmosférico y sección de receptor.

**5.6.8.1. Escenario 1 lluvia ligera (5-10 mm/hr), con una neblina ligera con atenuación de 3dB/Km.**

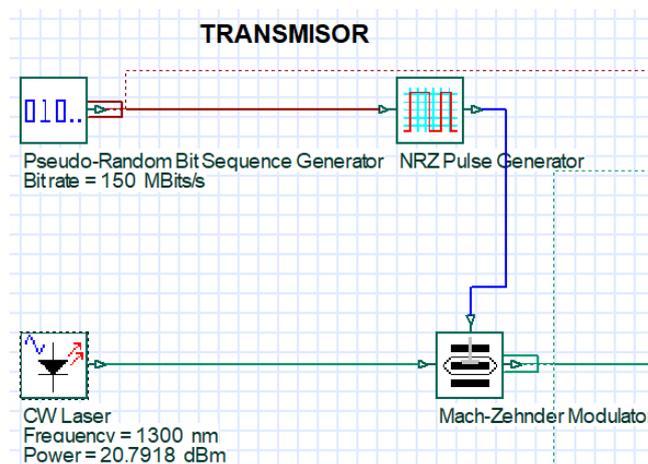


**Figura 41.** Escenario FSO primer caso (3dB/Km)

Fuente. Elaborado por el autor

**Explicación General:**

▪ **Sección Transmisor:**



**Figura 42.** Sección Transmisor

Fuente. Elaborado por el autor

El transmisor se encuentra conformado por un generador de secuencia de bits pseudoaleatorios, en este caso el enlace transmite una tasa de 150 Mbps, ya que es una característica previa del equipo seleccionado, el mismo va conectado a un generador de pulsos NRZ que permite generar una señal eléctrica codificada sin retorno a cero (NRZ) que a la vez se encuentra codificada por una entrada de señal digital. Luego tenemos un MZM o modulador mach zehnder el cual controla y modula la amplitud de la señal generada y finalmente tenemos

al CW Láser el cual trabaja a una frecuencia de 1300 nm con una potencia de 120 mW (20.79 dBm) en base a las características del equipo seleccionado (TereScope 5000G).

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Bit rate	150	Mbits/s	Normal
<input type="checkbox"/>	Operation mode	Order		Normal
<input type="checkbox"/>	Order	$\log(\text{Sequence length})/\log(5)$		Script
<input type="checkbox"/>	Mark probability	0.5		Normal
<input type="checkbox"/>	Number of leading zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script
<input type="checkbox"/>	Number of trailing zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script

Figura 43. Configuración del generador de bits pseudoaleatorio de 150Mbps

Fuente. Elaborado por el autor

- Canal Atmosférico:

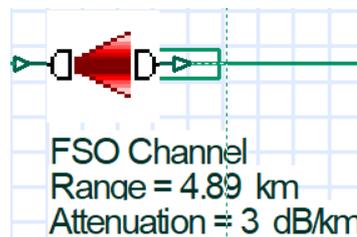


Figura 44. Canal Atmosférico FSO.

Fuente. Elaborado por el autor

El canal atmosférico FSO ha sido configurado para una distancia de 4.89 Km, ya que es la distancia que abarca el escenario planteado, con una atenuación de 3 dB/Km para el primer caso que comprende lluvias y neblinas ligeras.

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Range	4.89	km	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	3	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Geometrical loss	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter aperture dia	5	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver aperture diamet	20	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Beam divergence	2	mrاد	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Additional losses	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Propagation delay	0	ps/km	Normal

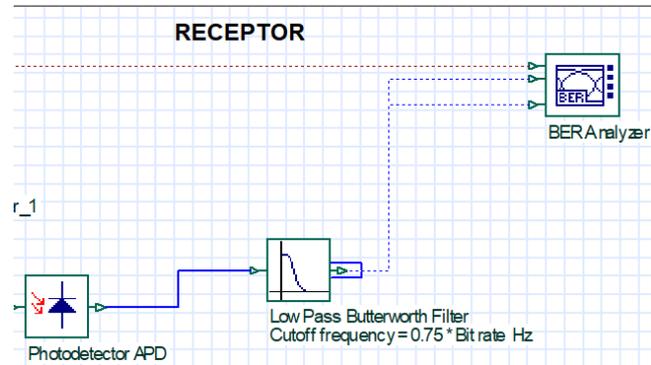
Figura 45. Propiedades del Canal FSO primer caso

Fuente. Elaborado por el autor

En la Figura 45, se puede observar las configuraciones del canal FSO, hay que recalcar que se consideran pérdidas geométricas las cuales disponen de una apertura de diámetro de 5 cm en el transmisor y 20 cm en el receptor, además de un haz de divergencia de 2 mrad. Estos parámetros se configuran de acuerdo al datasheet del equipo que se ha seleccionado; no se

consideran pérdidas de transmisión, pérdidas de recepción, pérdidas adicionales ni retardo de propagación.

- **Sección Receptor:**



**Figura 46.** *Sección Receptor*

**Fuente.** *Elaborado por el autor*

Finalmente, en la sección receptor se ha ubicado un Fotodetector APD (Avalanche PhotoDetector) el cuál posee una alta sensibilidad que aprovecha el efecto fotoeléctrico para convertir la señal óptica en una señal eléctrica conectado a un Filtro Bessel Paso Bajo el cual tiene una frecuencia de corte equivalente al 75% de la tasa de bits ingresada en la parte del transmisor.

***Componentes de medición utilizados:***

Los componentes que se utiliza para medir los diferentes parámetros son:

- Visualizador óptico en el dominio del tiempo
- Analizador óptico del espectro en el transmisor y receptor
- Medidor de potencia óptica en el transmisor y receptor
- Analizador BER (Bit Error Rate)

5.6.8.2. Escenario 2 lluvias fuertes superiores a 180mm/hr, vientos, humo moderado con atenuación de 30 dB/Km.

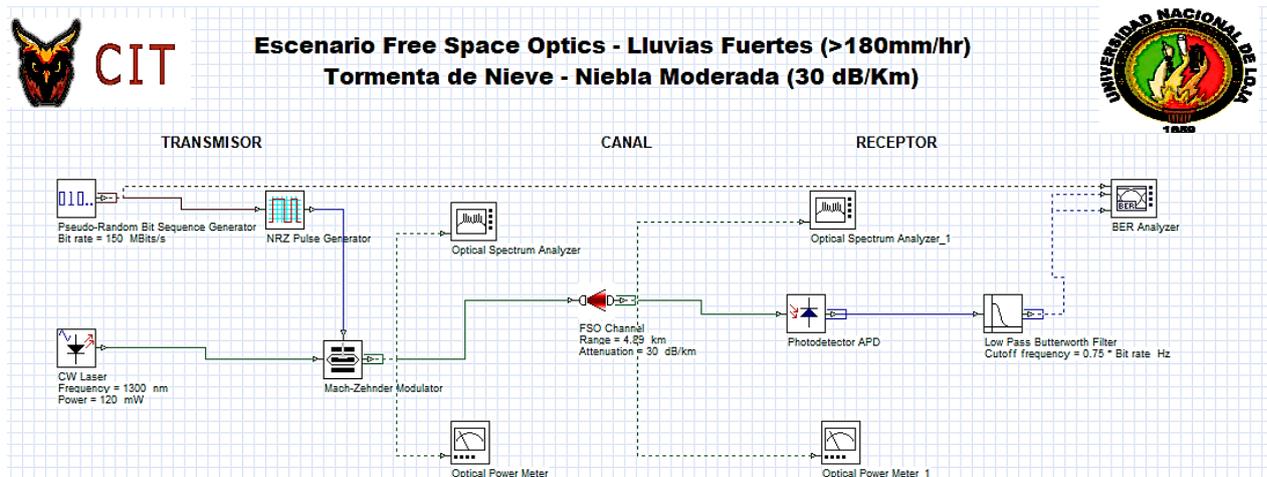


Figura 47. Escenario FSO segundo caso (30 dB/Km)

Fuente. Elaborado por el autor

Para este segundo escenario, se presenta atenuación por lluvias fuertes que superan los 180 mm/hr, además de tormentas de nieve, niebla y humo moderado con una atenuación de 30 dB/Km. Este tipo de condiciones climáticas se dan en la ciudad de Loja entre los meses de febrero y marzo, en donde se tiene presencia de días lluviosos y con una elevada precipitación.

Las configuraciones en el transmisor se mantienen, ya que se transmite la misma potencia de salida, frecuencia y tasa de bits del caso anterior; no obstante, ahora se dispone de una atenuación de 30 dB/Km.

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Range	4.89	km	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	30	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Geometrical loss	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter aperture dia	5	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver aperture diamet	20	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Beam divergence	2	mrad	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Additional losses	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Propagation delay	0	ps/km	Normal

Figura 48. Propiedades del canal FSO con una atenuación de 30 dB/Km

Fuente. Elaborado por el autor

### 5.6.9 Simulaciones escenario FSO con incremento de tasa de bits

Como segundo punto, ahora se aumenta la tasa de bits (BitRate) a transmitir, tomando en cuenta una atenuación de 3 dB/Km y la distancia del enlace planteado previamente (4.89 Km); para de esta manera observar el comportamiento del enlace bajo varias tasas de bits.

#### 5.6.9.1. Escenario 3 FSO con una tasa de bits de 500 Mbps.

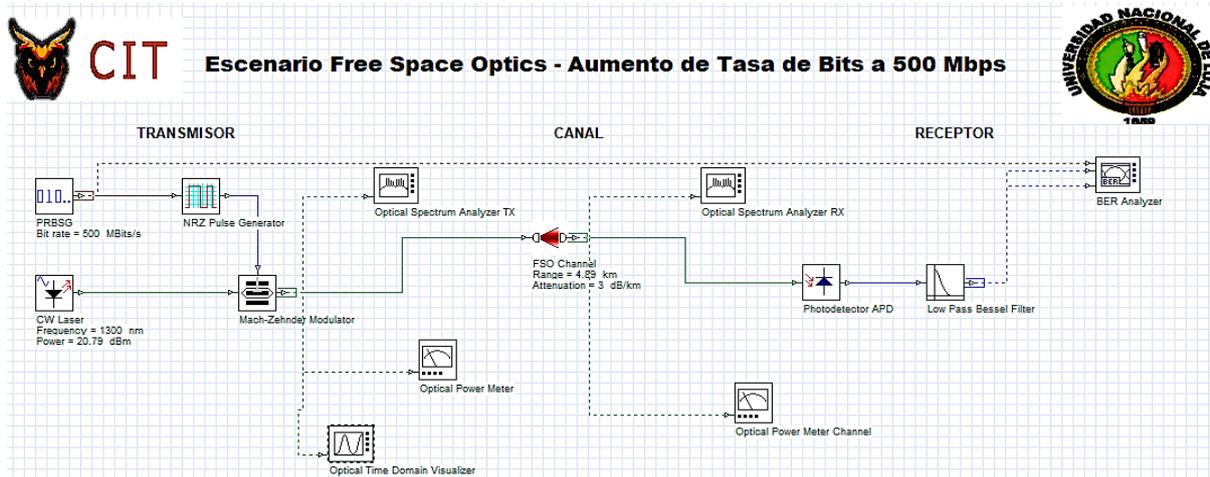


Figura 49. Escenario FSO - Aumento BitRate a 500 Mbps

Fuente. Elaborado por el autor

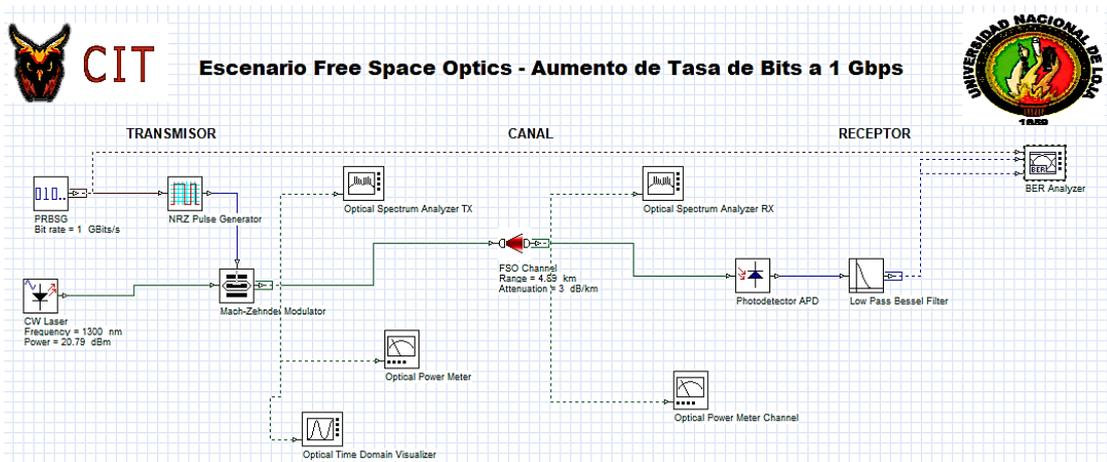
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Bit rate	500	MBits/s	Normal
<input type="checkbox"/>	Operation mode	Order		Normal
<input type="checkbox"/>	Order	$\log(\text{Sequence length})/\log(5)$		Script
<input type="checkbox"/>	Mark probability	0.5		Normal
<input type="checkbox"/>	Number of leading zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script
<input type="checkbox"/>	Number of trailing zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script

Figura 50. Configuración BitRate en el Transmisor (500 Mbps)

Fuente. Elaborado por el autor

La Figura 49, muestra de manera general el escenario 3 y la Figura 50, muestra la configuración de la secuencia binaria con un incremento en el BitRate de 500 Mbps.

### 5.6.9.2. Escenario 4 FSO con una tasa de bits de 1 Gbps.



**Figura 51.** Escenario FSO- Aumento BitRate a 1 Gbps

Fuente. Elaborado por el autor

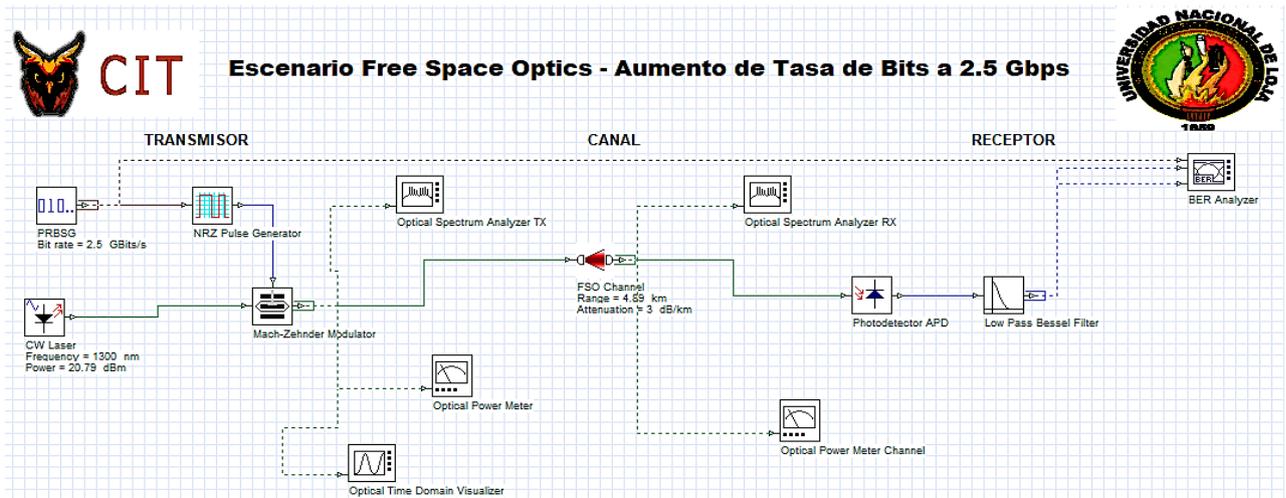
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Bit rate	1	GBits/s	Normal
<input type="checkbox"/>	Operation mode	Order		Normal
<input type="checkbox"/>	Order	$\log(\text{Sequence length})/\log(5)$		Script
<input type="checkbox"/>	Mark probability	0.5		Normal
<input type="checkbox"/>	Number of leading zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script
<input type="checkbox"/>	Number of trailing zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script

**Figura 52.** Configuración BitRate en el Transmisor (1 Gbps)

Fuente. Elaborado por el autor

La Figura 52, muestra el incremento de BitRate a 1 Gbps en la sección del transmisor. El resto de parámetros en el canal FSO y en el receptor se mantienen con la misma configuración del caso anterior.

### 5.6.9.3. Escenario 5 FSO con una tasa de bits de 2.5 Gbps.



**Figura 53.** Escenario FSO - Aumento BitRate a 2.5 Gbps

Fuente. Elaborado por el autor

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Bit rate	2.5	GBits/s	Normal
<input type="checkbox"/>	Operation mode	Order		Normal
<input type="checkbox"/>	Order	$\log(\text{Sequence length})/\log(5)$		Script
<input type="checkbox"/>	Mark probability	0.5		Normal
<input type="checkbox"/>	Number of leading zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script
<input type="checkbox"/>	Number of trailing zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * 5$		Script

**Figura 54.** Configuración BitRate en el Transmisor (2.5 Gbps)

Fuente. Elaborado por el autor

### 5.6.10 Simulaciones escenario FSO en base al rendimiento del equipo TS5000

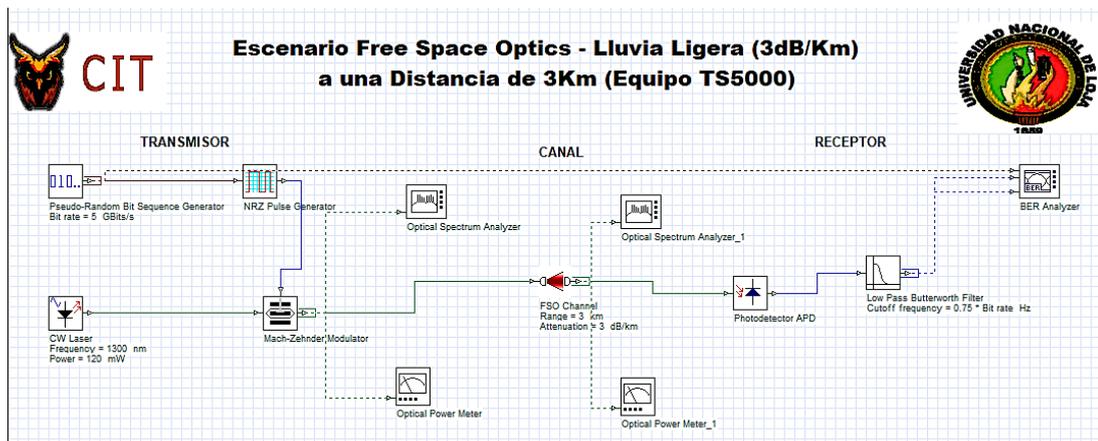
Como tercer punto, se ejecuta las simulaciones tomando en cuenta la sensibilidad, la tasa de rendimiento y el rango de operación del equipo que ha sido seleccionado (TS5000) bajo diferentes condiciones atmosféricas.

**Tabla 17.** Rendimiento equipo TS5000 en base al rango de operación

Rango	Atenuación	Condiciones Atmosféricas	Sensibilidad	Tasa de Bits
3000 m	3 dB/Km	Lluvias Ligeras	-33 dBm	5 Gbps
2500 m	5 dB/Km	Lluvias Ligeras a Medias	-33 dBm	5 Gbps
1700 m	10 dB/Km	Lluvias Medias a Fuertes	-33 dBm	5 Gbps
1220 m	17 dB/Km	Chubascos, Media Nieve y Niebla Ligera	-33 dBm	5 Gbps
820 m	30 dB/Km	Tormentas de Lluvia, Tormentas de Nieve y Niebla Moderada	-33 dBm	5 Gbps

Obtenido de: Elaborado por el autor.

**5.6.10.1. Escenario 6 FSO con atenuación de 3dB/Km a 3 Km.**



**Figura 55.** Escenario FSO con Atenuación de 3dB/Km a 3 Km (5 Gbps)

Fuente. Elaborado por el autor

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Range		3 km	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation		3 dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Geometrical loss	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter aperture dia		5 cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver aperture diamet		20 cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Beam divergence		2 mrad	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter loss		0 dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver loss		0 dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Additional losses		0 dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Propagation delay		0 ps/km	Normal

**Figura 56.** Propiedades del canal FSO considerando Pérdidas Geométricas y Atenuación de 3 dB/Km

Fuente. Elaborado por el autor

### 5.6.10.2. Escenario 7 FSO con una atenuación de 5 dB/Km a 2.5 Km.

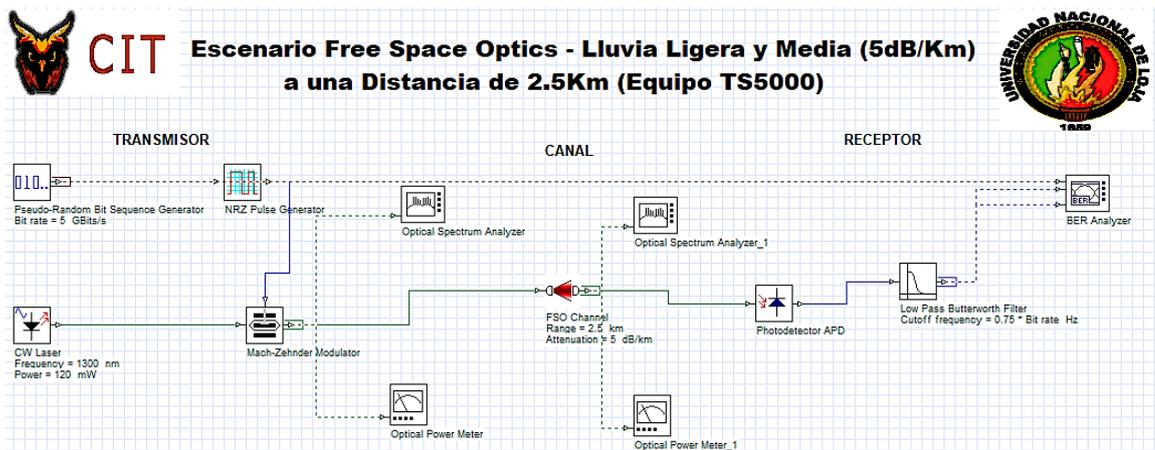


Figura 57. Escenario FSO con Atenuación de 5dB/Km a 2.5 Km (5 Gbps)

Fuente. Elaborado por el autor

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Range	2.5	km	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	5	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Geometrical loss	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter aperture dia	5	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver aperture diamet	20	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Beam divergence	2	mrاد	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Additional losses	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Propagation delay	0	ps/km	Normal

Figura 58. Propiedades del canal FSO considerando Pérdidas Geométricas y Atenuación de 5 dB/Km

Fuente. Elaborado por el autor

### 5.6.10.3. Escenario 8 FSO con una atenuación de 10 dB/Km a 1.7 Km.

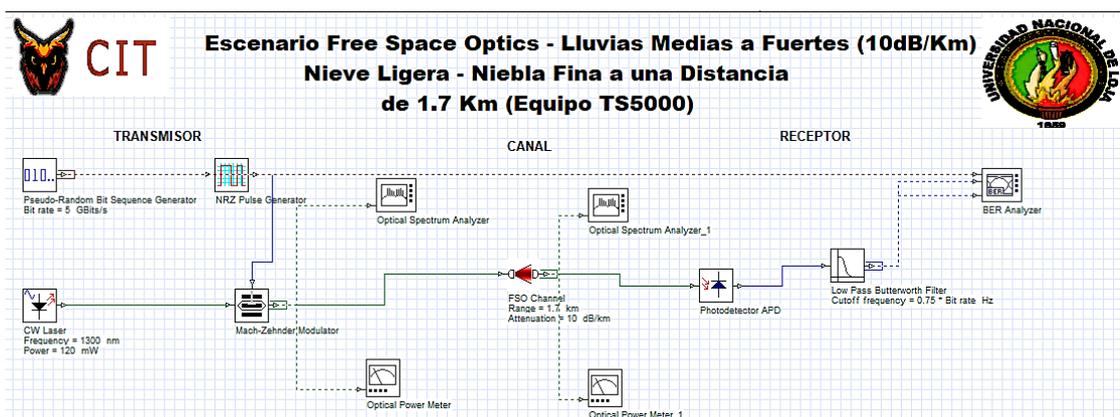


Figura 59. Escenario FSO con Atenuación de 10 dB/Km a 1.7 Km (5 Gbps)

Fuente. Elaborado por el autor

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Range	1.7	km	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	10	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Geometrical loss	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter aperture dia	5	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver aperture diamet	20	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Beam divergence	2	mrاد	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Additional losses	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Propagation delay	0	ps/km	Normal

Figura 60. Propiedades del canal FSO considerando Pérdidas Geométricas y Atenuación de 10 dB/Km

Fuente. Elaborado por el autor

#### 5.6.10.4. Escenario 9 FSO con una atenuación de 17 dB/Km a 1.22 Km.

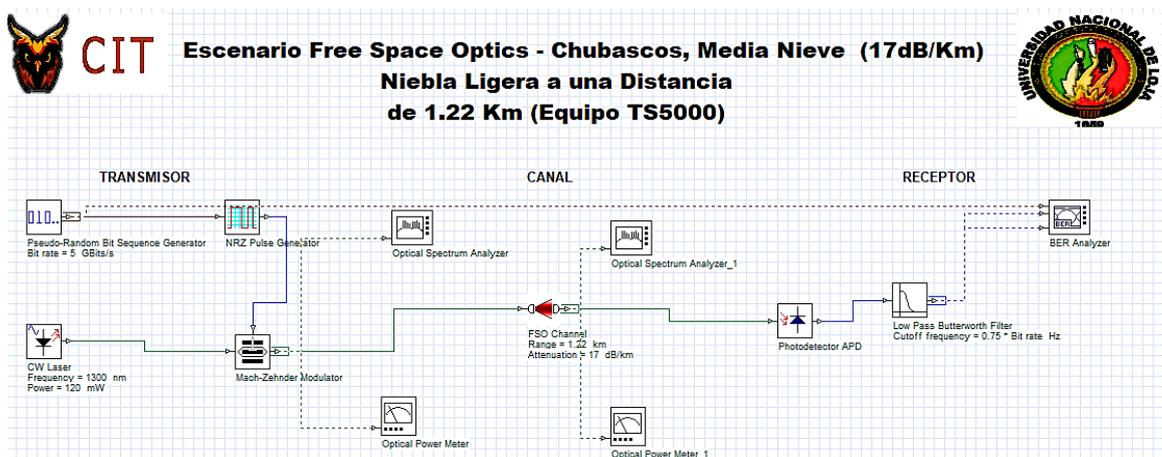


Figura 61. Escenario FSO con Atenuación de 17 dB/Km a 1.22 Km (5 Gbps)

Fuente. Elaborado por el autor

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Range	1.22	km	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	17	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Geometrical loss	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter aperture dia	5	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver aperture diamet	20	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Beam divergence	2	mrاد	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Additional losses	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Propagation delay	0	ps/km	Normal

Figura 62. Propiedades del canal FSO considerando Pérdidas Geométricas y Atenuación de 17 dB/Km

Fuente. Elaborado por el autor

### 5.6.10.5. Escenario 10 FSO con una atenuación de 30 dB/Km a 820 m.

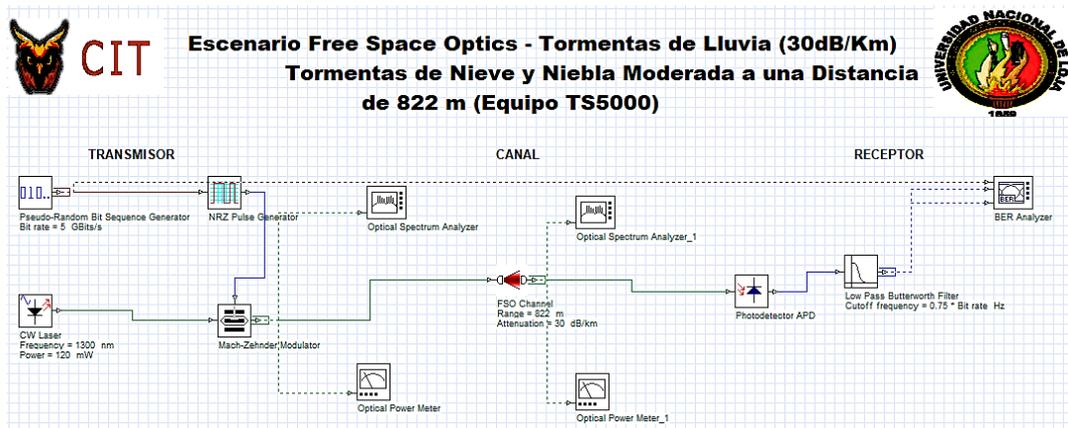


Figura 63. Escenario FSO con Atenuación de 30 dB/Km a 822m (5 Gbps)

Fuente. Elaborado por el autor

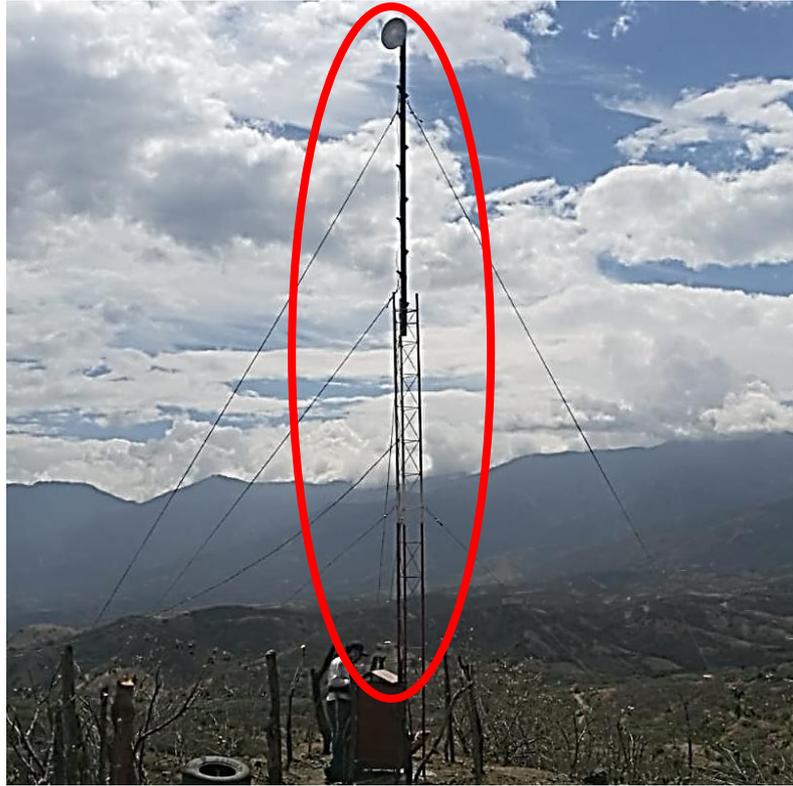
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Range	822	m	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	30	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Geometrical loss	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter aperture dia	5	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver aperture diamet	20	cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Beam divergence	2	mrad	Normal
<input type="checkbox"/>	Transmitter loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Receiver loss	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Additional losses	0	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Propagation delay	0	ps/km	Normal

Figura 64. Propiedades del canal FSO considerando Pérdidas Geométricas y Atenuación de 30 dB/Km

Fuente. Elaborado por el autor

### 5.6.11 Diseño y criterios previos para la red de RF

En este caso, para el diseño de la red de Radiofrecuencia (RF) se hace uso del mismo escenario que se empleó en la tecnología FSO, el único cambio se lleva a cabo en la parte del receptor, ya que debido a la ausencia de una estructura artificial para la ubicación de los equipos RF se plantea ubicar un módulo de una torre arriostrada de 3 metros de altura junto con un tubo metálico de 2.5 metros con escalones.

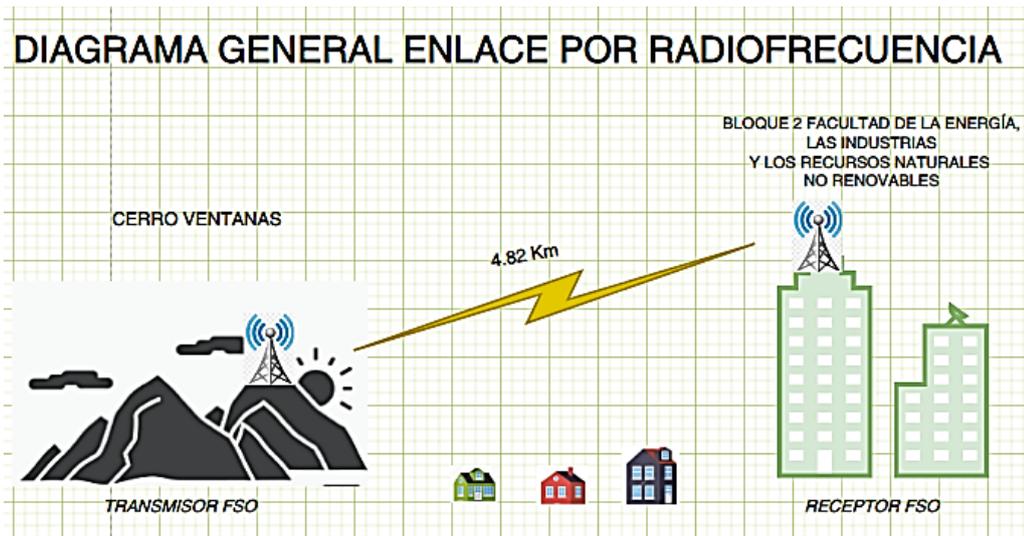


**Figura 65.** Torre Arriostrada de un Módulo y Tubo Metálico con Escalones

**Fuente.** Elaborado por el autor

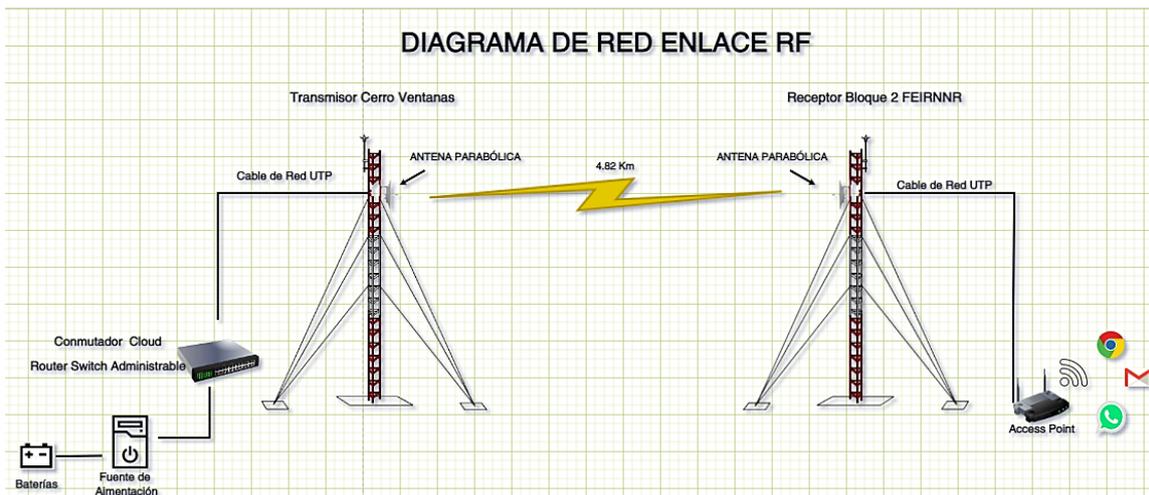
En la *Figura 65*, se muestra una torre ubicada en el pueblo de Opoluca que pertenece al cantón Paltas de la provincia de Loja, la cual ha sido utilizada a base de ejemplo y como referencia para este caso de estudio. Debido a la altura del edificio (*ver Figura 14*) se puede recomendar utilizar solo el módulo de la torre arriostrada, la cual puede ser suficiente para ubicar las antenas de Radiofrecuencia.

A continuación, se muestra el diagrama general de la red RF:



**Figura 66.** Diagrama General Enlace por RF

Fuente. Elaborado por el autor



**Figura 67.** Diagrama de Red Enlace RF

Fuente. Elaborado por el autor

En la *Figura 67*, se muestra el diagrama de red del enlace RF, en el cual se puede apreciar en la parte del transmisor la antena parabólica que emite la señal, luego se conecta por medio de un cable de red UTP (Unshielded Twisted Pair) hacia el conmutador administrable para luego conectarse a una fuente de alimentación con las baterías de respaldo en caso de corte de energía eléctrica. En la parte del receptor, la antena parabólica recibe la señal la cual por medio cable de red UTP se conecta al Access Point del usuario final para tener acceso a la web.

### 5.6.12 Selección del equipo más adecuado para la tecnología RF

En este caso se ha seleccionado el modelo de equipo N5-X20 de la marca MIMOSA la cual es ideal para enlaces punto a punto (PTP) o punto multipunto (PTMP).



Figura 68. Antena MIMOSA N5-X20 con C5x

Fuente. Obtenido de (Airsparn, 2023)

#### Especificaciones Técnicas:

Tabla 18. Especificaciones técnicas equipo MIMOSA N5-X20 con C5x

MIMOSA N5-X20 con C5x	
<b>Máximo rendimiento</b>	Enlaces Punto - Punto: 700 Mbps IP (866 PHY)
	Enlaces Punto - Multipunto: 500 Mbps IP (866 PHY)
<b>Radio</b>	<b>MIMO y Modulación:</b> 2x2; 2 MIMO OFDM hasta 256 QAM
	<b>Ancho de Banda:</b> Canales de 20/40/80 MHz, ajustable a 5 MHz
	<b>Rango de frecuencia:</b> PTP/PTMP: 4900 – 6400 MHz (restringido por el país de operación)
	<b>Sensibilidad (MSC0):</b> -87 dBm @ 80 MHz, -90 dBm @ 40 MHz, -93 dBm @ 20 MHz
<b>Potencia de salida</b>	27 dBm

<b>Consumo de energía</b>	<b>Máximo consumo de potencia:</b> 9.2 W promedio, 12.9 W máximo <b>Método de alimentación del sistema:</b> Power Over Ethernet [PoE (24 – 56 VDC)]
---------------------------	--

Obtenido de: (Airspan, 2023)

**Router Mikrotik Cloud Server CRS326 – 24G – 2S + RM – CONMUTADOR de Capa 3 Gestionado – 24x 10/100/1000 + 2x SFP**



**Figura 69.** Mikrotik Cloud Server CRS326

**Fuente.** Obtenido de (Telalca, 2023)

**Especificaciones Técnicas:**

- Switcheo de capa 2 sin bloqueo
- IEEE 802.1Q VLAN
- Soporte hasta para 4K VLANs simultáneas
- Mikrotik neighbor discovery
- SNMP v1
- Interfaz gráfica basada en Web
- Arquitectura: ARM 32 bit
- RAM: 512 MB
- Almacenamiento: 16 MB – Memoria Flash
- Puertos: 24 10/100/1000
- SFP+: 2 Puertos
- Consumo máximo de potencia: 24 W
- Extras: Puerto Serial RJ45
- Alimentación 9-30V
- Sistema operativo: SwitchOS/RouterOS (Dual boot)

**Antena LocoM5 Ubiquiti Modelo NanoStation 13 dBi AirMAX M5 AP CPE:**



**Figura 70.** Antena LocoM5 Ubiquiti NanoStation 13 dBi

**Fuente.** Obtenido de (sincables, 2023)

### **Especificaciones Técnicas:**

- Modelo: LocoM5
- Tipo procesador: Atheros MIPS 4KC, 400 MHz.
- Memoria. 32 MB SDRAM, 8MB Flash
- Interfaz de red: 1x10/100 BASE-TX (Cat.5, RJ-45) Ethernet Interface
- Alcance: Hasta 10 Km dependiendo el WISP, % de LoS y el entorno
- Antena: Antena direccional doble polarización MIMO integrada de 13 dBi
- Fuente de alimentación: 24V 0.5A inyector incluido PoE pasivo (pines 4-5 +, 7-8-)

### **Tipo de cable y conectores:**

En este caso se toma en cuenta el tipo de cable para saber la pérdida que nos otorga el mismo para los parámetros necesarios del enlace RF (*ver anexo 12*).

Se ha optado por trabajar con el cable RG142 COAXIAL / 50Ω. A continuación, se muestra su ficha técnica:

---

Flexible RG142 Coax Cable Double Shielded with Tan FEP Jacket

<b>Configuration</b>	
Inner Conductor Material and Plating	Copper Clad Steel, Silver
Dielectric Type	PTFE
Shield Materials	Silver Plated Copper Braid, Silver Plated Copper Braid
Jacket Material and Color	FEP, Tan
<b>Electrical Specifications</b>	
Impedance, Ohms	50
Velocity of Propagation, %	69.2
Maximum Operating Frequency, GHz	8
RF Shielding, dB	90
Capacitance, pF/ft [pF/m]	29.4 [96.46]
Maximum Operating Voltage, Volts	1,900
<b>Electrical Specifications by Frequency</b>	
<b>Frequency 1</b>	
Frequency, MHz	100
Attenuation, dB/100ft [dB/100m]	3.9 [12.8]
<b>Frequency 2</b>	
Frequency, MHz	1000
Attenuation, dB/100ft [dB/100m]	13 [42.65]
<b>Frequency 3</b>	
Frequency, GHz	3
Attenuation, dB/100ft [dB/100m]	23.8 [78.08]
<b>Frequency 4</b>	
Frequency, GHz	5
Attenuation, dB/100ft [dB/100m]	36 [118.11]
<b>Mechanical Specifications</b>	
<b>Temperature</b>	
Operating Range, deg C	-55 to +200
<b>Inner Conductor</b>	
Number of Strands	1
Material	Copper Clad Steel
Plating	Silver
Diameter, in [mm]	0.037 [0.94]

**Figura 71.** Especificaciones Técnica Cable RG142

**Fuente.** *Obtenido de* (Specifications & Specifications, 2023)

El tipo de conectores que se ha seleccionado pertenece a la marca HUBER-Sunher modelo 21N-50-3-5/133N, el cual es compatible con el tipo de cable seleccionado previamente y dispone de una impedancia de  $50 \Omega$  (*ver anexo 13*). A continuación, se muestra sus datos técnicos:

<b>Electrical Data</b>			
Impedance	50 Ω		
Interface frequency max.	18 GHz		
Frequency range	DC to 4 GHz	4 to 10 GHz	10 to 12.4 GHz
Return loss	26 dB	21 dB	19 dB
<b>Mechanical Data</b>			
Centre contact	soldered		
Outer contact	clamped		
Weight	0.0321 kg		
<b>Environmental Data</b>			
Operating temperature	-65 °C to 165 °C		
2011/65/EU (RoHS - including 2015/863 and 2017/2102)	compliant		
<b>Material Data</b>			
Piece Parts	Material	Surface Plating	
Centre contact	Brass	Gold Plating (Nickel underplated)	
Outer contact	Brass	SUCOPLATE (R) Plating	
Body	Brass	SUCOPLATE (R) Plating	
Insulator	PFA / PTFE		
Coupling nut	Brass	SUCOPLATE (R) Plating	
Gasket	VMQ (Silicone rubber)		

**Figura 72.** Datos Técnicos del conector RF

Fuente. Obtenido de (Pcr & Kit, 2012)

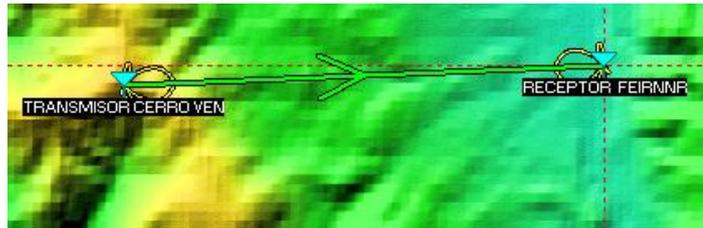
### 5.6.13 Simulación escenario RF

A continuación, se ha realizado la parte de simulación en la cual se toma en cuenta las características técnicas de los equipos seleccionados para RF:



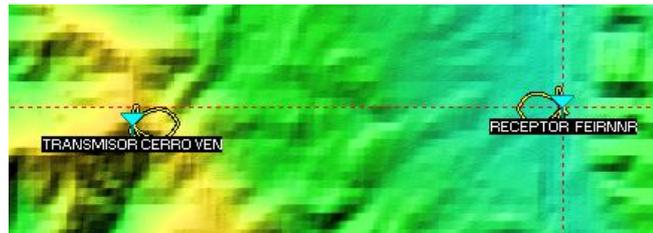
**Figura 73.** Escenario Enlace RF (vista 1)

Fuente. Elaborado por el autor



**Figura 74.** Escenario Enlace RF (vista 2)

**Fuente.** Elaborado por el autor



**Figura 75.** Lóbulos de Radiación entre Transmisor y Receptor

**Fuente.** Elaborado por el autor

En primer lugar, se ingresa un punto medio entre el transmisor y receptor, con la finalidad de lograr una mejor ubicación en el mapa entre estos dos puntos:

**Coordenadas** ✕

Latitud  °  '  "

Longitud  °  '  "

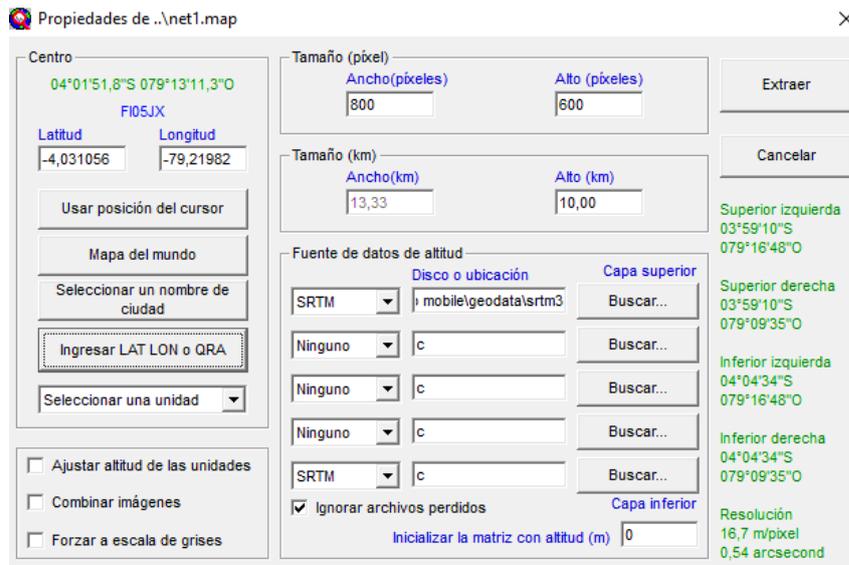
Latitud

Longitud

QRA

**Figura 76.** Coordenadas del punto medio entre TX y RX

**Fuente.** Elaborado por el autor

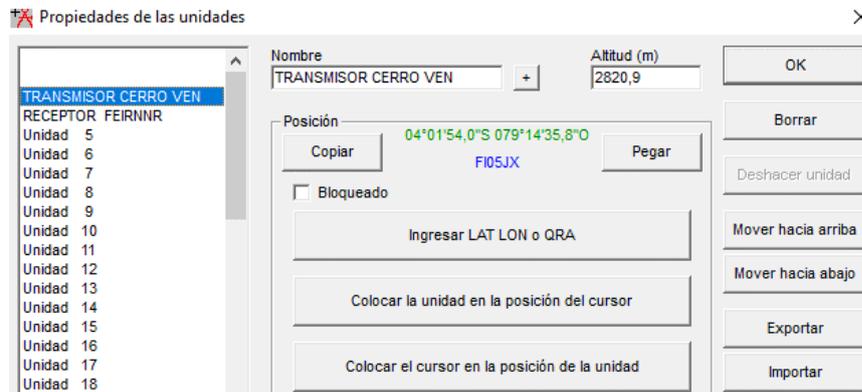


**Figura 77. Propiedades del Mapa**

**Fuente.** Elaborado por el autor

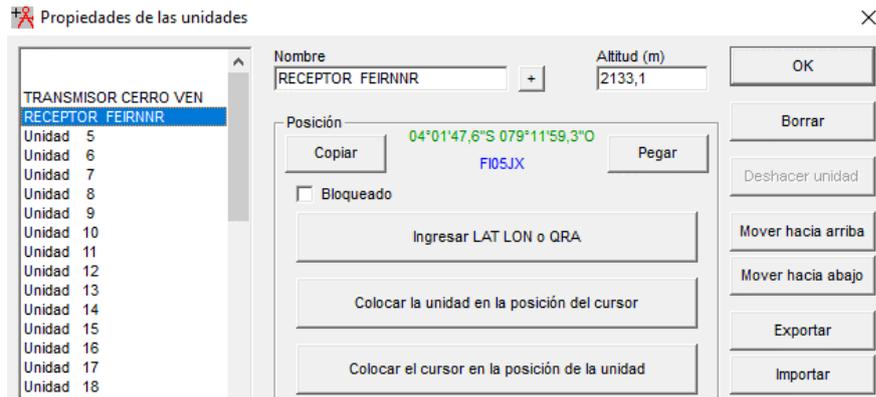
En la *Figura 76* y *Figura 77*, se puede observar las coordenadas del punto medio entre el transmisor y receptor, además de ciertas características como altura del mapa y tamaño de píxeles.

Posteriormente, se ingresa las coordenadas del transmisor y receptor en la sección de propiedades de las unidades:



**Figura 78. Propiedades de la Unidad Transmisor**

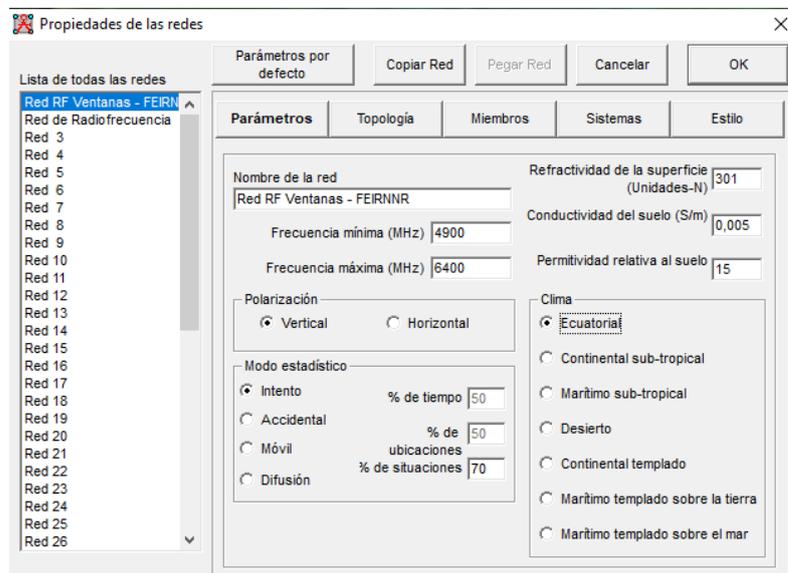
**Fuente.** Elaborado por el autor



**Figura 79.** *Propiedades de la Unidad Receptor*

**Fuente.** *Elaborado por el autor*

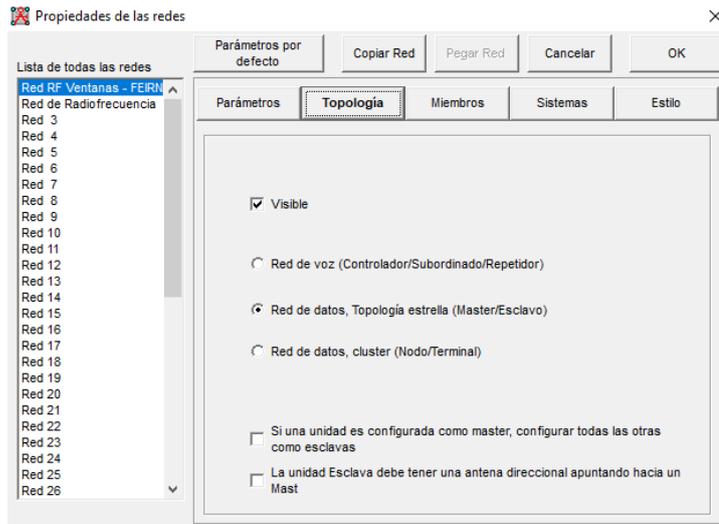
Luego se configura los parámetros de la red, de la siguiente manera:



**Figura 80.** *Parámetros de la Red Enlace RF*

**Fuente.** *Elaborado por el autor*

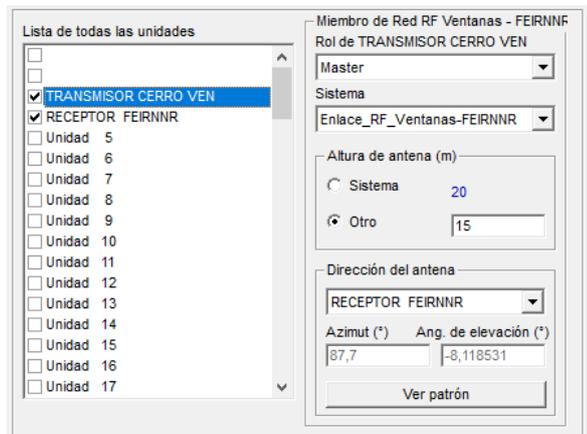
En la *Figura 80*, se puede observar la pestaña de propiedades de las redes, en la cual se ha ubicado la frecuencia máxima (MHz) y frecuencia mínima (MHz) a la cuál opera la antena seleccionada (*ver Figura 68*), en este caso la polarización que se ha seleccionado es de tipo vertical, tomando en cuenta que la antena trabaja en doble polarización y se ha ubicado un clima ecuatorial, ya que según (Varela & Ron, 2022) este tipo de clima es muy húmedo en zonas de transición hacia el litoral y Amazonía, templado semihúmedo en la zona interandina, cálido y seco en los valles interandinos y frío de alta montaña en los páramos.



**Figura 81.** Topología seleccionada en la red RF

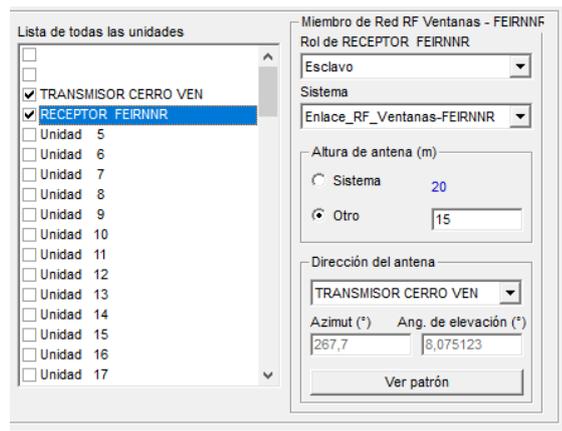
**Fuente.** Elaborado por el autor

En cuanto a la topología, se ha seleccionado la red de datos, topología estrella en donde se tiene (Mater/Esclavo), ya que nuestro Máster es el transmisor y el Esclavo es el receptor respectivamente.



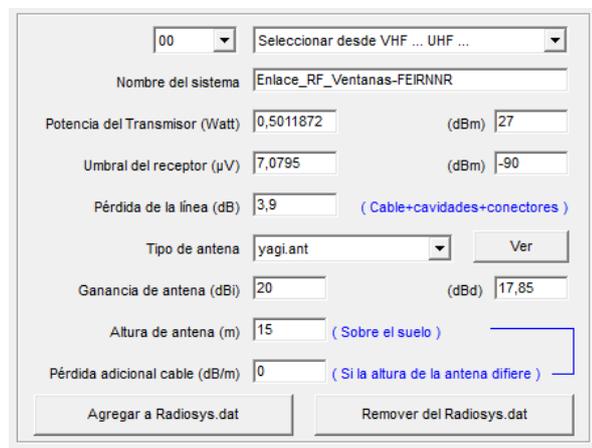
**Figura 82.** Transmisor Cerro Ventanas (Máster)

**Fuente.** Elaborado por el autor



**Figura 83.** Receptor FEIRNNR (Esclavo)

**Fuente.** Elaborado por el autor



**Figura 84.** Sistema de la Red RF y sus parámetros

**Fuente.** Elaborado por el autor

La *Figura 84*, muestra ciertos parámetros que han sido tomados en cuenta en base a las características de la antena como:

- Potencia del transmisor
- Umbral del receptor
- Pérdida de la línea
- Tipo de antena
- Ganancia de la antena
- Altura de la antena

## 6 Resultados

### 6.1 Fase 4: Análisis Técnico Sobre el Comportamiento de FSO y RF

Una vez ejecutadas las simulaciones de ambas tecnologías (FSO y RF) en primer lugar se procede a analizar los resultados obtenidos de FSO y posteriormente los de RF.

En la siguiente tabla, se muestra los parámetros del enlace FSO:

Tabla 19. Parámetros del enlace FSO

Parámetros del enlace FSO								
Potencia del Láser (dBm)	Longitud de Onda (nm)	Distancia del Enlace (Km)	Velocidad de los Datos (Mbps)	Diámetro de Apertura del Transmisor (cm)	Diámetro de Apertura del Receptor (cm)	Divergencia del Haz (mrad)	Tipo de Fotodetector	Sensibilidad
20.79	1300	4.89	150	5	20	2	APD	-46dBm

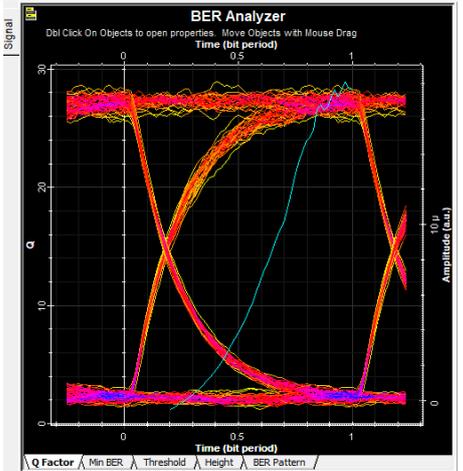
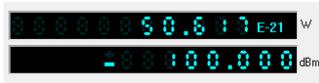
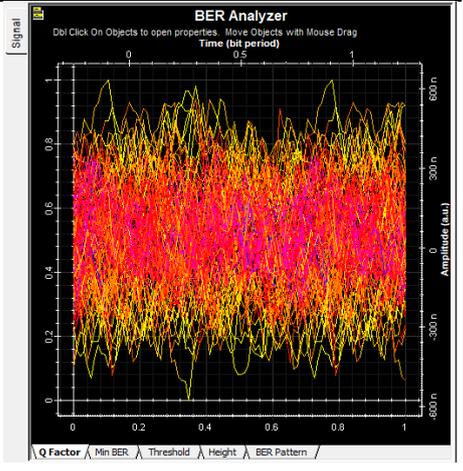
Obtenido de: Elaborado por el autor.

Como primera instancia se analiza los resultados teniendo en cuenta los dos casos de la sección 5.6.8.1 y 5.6.8.2:

#### 6.1.1 Resultados simulación escenarios 1 y 2 FSO bajo dos condiciones atmosféricas

En la siguiente tabla se muestra los resultados principales de ambos casos:

Tabla 20. Resultados Escenario 1 y 2 FSO

	Potencia Salida del Transmisor	Potencia Entrada al Receptor	Diagrama BER
Resultados Caso 1			
Resultados Caso 2			

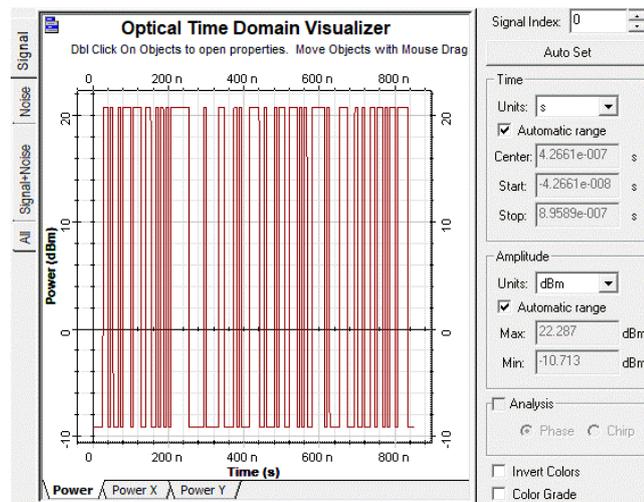
Obtenido de: Elaborado por el autor.

### 6.1.1.1. Análisis Caso 1.

Como se puede observar en la Tabla 20, para el primer caso se transmite una tasa de bits de 150 Mbps a una distancia de 4.89 Km, en el cual se puede observar que desde el transmisor se tiene una potencia de salida de 17.644 dBm. La potencia configurada en el láser es de 20.79 dBm, por lo cual existe una pérdida de potencia desde el transmisor, esto debido a todos los procesos que se llevan a cabo antes de que la señal sea transmitida. Luego de que la señal atraviesa el canal atmosférico con la atenuación establecida (3 dB/Km), se obtiene en el receptor una potencia de -30.857 dBm, la cual se encuentra dentro del valor de sensibilidad la cual es de -46 dBm, es decir el equipo en el receptor puede identificar y procesar la señal sin problema. Finalmente, se observa el diagrama de ojo obtenido para este primer caso, se puede observar que la apertura de ojo se encuentra limpia, aunque existe algo de ruido en la parte superior del mismo (one level); los valores que se obtiene del factor Q el cual es de 28.9312

indica un óptimo rendimiento, ya que como mínimo se debe obtener un factor Q superior a 6; por otro lado, tenemos la mínima tasa de bits errados o BER, el cual es de  $2.307e-184$ ; el equipo en base a sus especificaciones indica que el BER que se debe obtener debe ser menor a  $1e-12$  y el valor que se ha obtenido efectivamente es menor, esto quiere decir que tenemos menos bits errados en la señal, con una tasa baja de pérdida de energía; además, se puede estimar que no existe desfases, jitter, interferencia entre símbolos garantizando un rendimiento excelente en el sistema de comunicaciones.

Adicionalmente, se muestra el visualizador de la señal óptica en el dominio del tiempo:

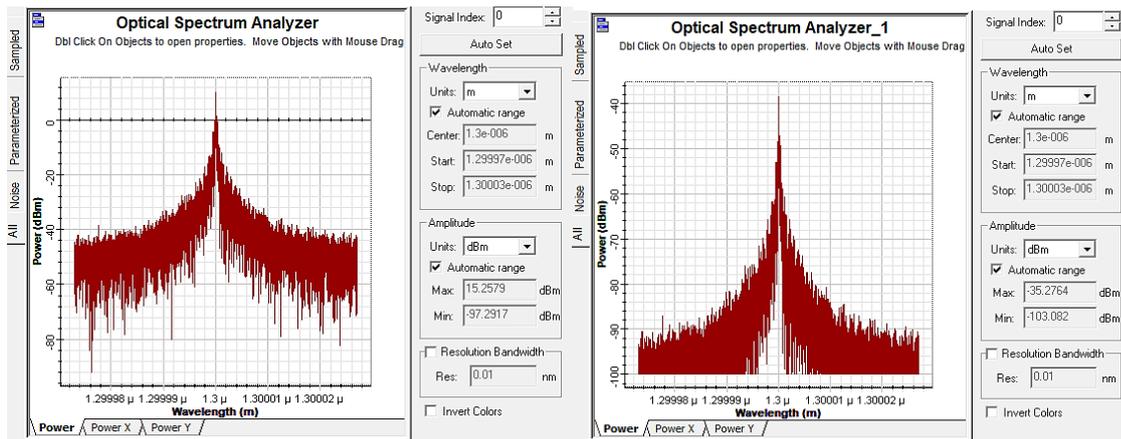


**Figura 85.** Resultado Visualizador de Dominio de Tiempo Óptico (caso 1)

**Fuente.** Elaborado por el autor

La *Figura 85*, muestra la señal a transmitir con una amplitud de 20.79 dBm, la cual se ha generado gracias al generador de pulsos NRZ y al generados de secuencia de bits.

Ahora se observa el analizador de espectro en la parte del transmisor:



**Figura 86.** Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 1

**Fuente.** Elaborado por el autor

El analizador de espectro es un dispositivo de medición que muestra la dispersión de potencia de una fuente óptica sobre un valor previamente establecido de longitud de onda.

En la *Figura 86*, se puede observar el analizador de espectro en el transmisor (izquierda), el cual traza la potencia en la escala vertical y la longitud de onda en la escala horizontal. Se tiene un pico máximo de potencia de emisión de 15.2579 dBm y un mínimo de -97.2917 dBm. En la parte derecha se observa el analizador de espectro en el receptor, donde hay una reducción de amplitud en la señal, es decir una pérdida de potencia en el pico de la señal, pero gracias al haz de divergencia que el equipo otorga (2 mrad) la señal es adecuada; es importante mencionar que, si se dispone de un haz de divergencia más alto, la señal ilustraría una mayor reducción de potencia.

Analysis	
Max. Q Factor	28.9312
Min. BER	2.30732e-184
Eye Height	1.49576e-005
Threshold	6.1884e-006
Decision Inst.	0.96875

**Figura 87.** Resultado Análisis (caso 1)

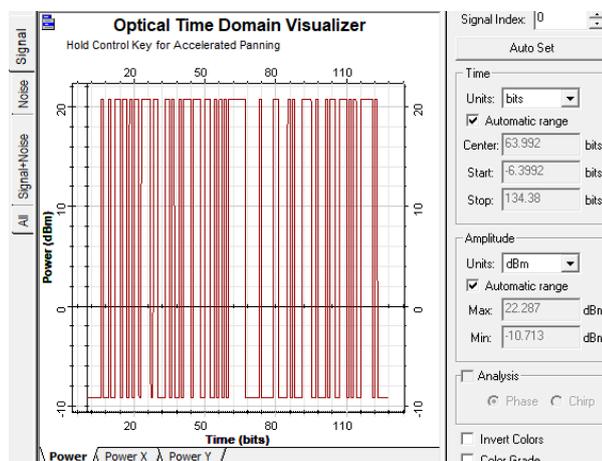
**Fuente.** Elaborado por el autor

La *Figura 87*, muestra los valores obtenidos de factor Q, mínimo BER, así como características del diagrama de ojo.

### 6.1.1.2. Análisis caso 2.

Para el segundo caso, se presenta un escenario en donde las condiciones atmosféricas presentan una atenuación de 30dB/Km, cuando se tiene tormentas de nieve, niebla moderada y lluvias fuertes superiores a 180mm. La potencia emitida desde el transmisor es de 17.573 dBm, al igual que en el caso 1 se tiene una pérdida antes de que la señal sea emitida a través del canal atmosférico; en este caso se puede apreciar que la potencia que llega al receptor es de -100 dBm, es decir un valor erróneo, ya que sobrepasa el umbral de sensibilidad (-46 dBm) e indica que la señal transmitida se ha visto gravemente afectada por el canal atmosférico en donde se tiene pérdida de información y el receptor no ha podido procesar la señal de manera correcta. Ahora si se observa el diagrama de ojo, se interpreta que no tiene apertura y la señal se encuentra bastante degradada, en donde no se dispone de un factor de calidad y todos los bits han sido receptados incorrectamente dando como resultado un enlace que no opera correctamente. Además de las condiciones atmosféricas, otro factor que afecta en este punto al sistema de comunicación es la distancia, ya que, si tenemos una distancia y una atenuación alta, el enlace no garantizará un buen rendimiento.

A continuación, se observa la señal emitida desde el transmisor:

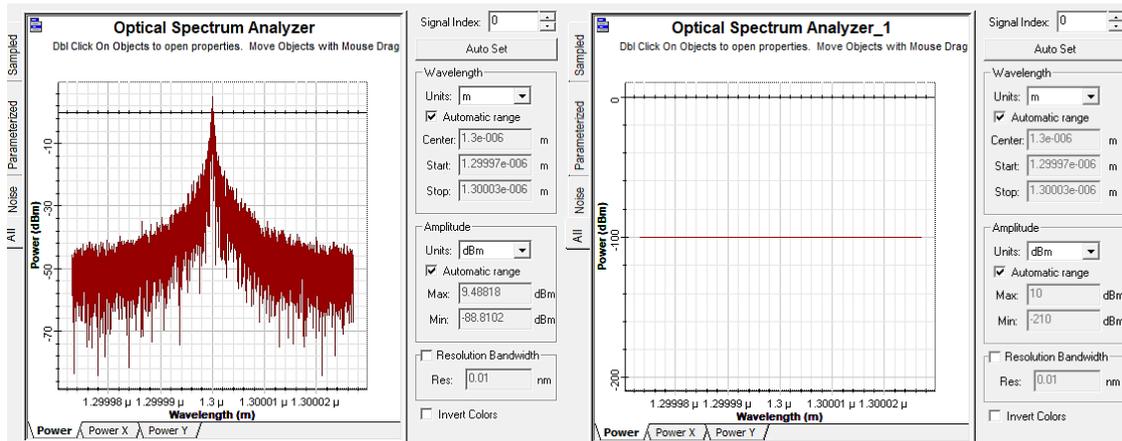


**Figura 88.** Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 2)

**Fuente.** Elaborado por el autor

En la *Figura 88*, se observa la señal a transmitir bajo los mismos parámetros previos de longitud de onda y potencia.

Ahora se observa el analizador de espectro óptico de la señal y la potencia en el transmisor.



**Figura 89.** Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 2

**Fuente.** Elaborado por el autor

La Figura 89, muestra la señal a transmitir (izquierda) la cual tiene un pico de amplitud máximo de 9.488 dBm y mínimo de -88.81 dBm, en la parte derecha se observa que el receptor no ha sido capaz de recibir la señal emitida desde el transmisor, por esta razón solo se muestra una línea horizontal a la altura de -100 dBm superando la sensibilidad permitida por el equipo.

Analysis	
Max. Q Factor	0
Min. BER	1
Eye Height	0
Threshold	0
Decision Inst.	0

**Figura 90.** Resultado Análisis (caso 2)

**Fuente.** Elaborado por el autor

### 6.1.2 Resultado simulaciones escenarios FSO con incremento de tasa de bits

Ahora, se analiza el comportamiento del sistema FSO cuando se incrementa la tasa de bits en el transmisor, tomando en cuenta los siguientes parámetros:

**Tabla 21.** Parámetros del enlace FSO con incremento de tasa de bits

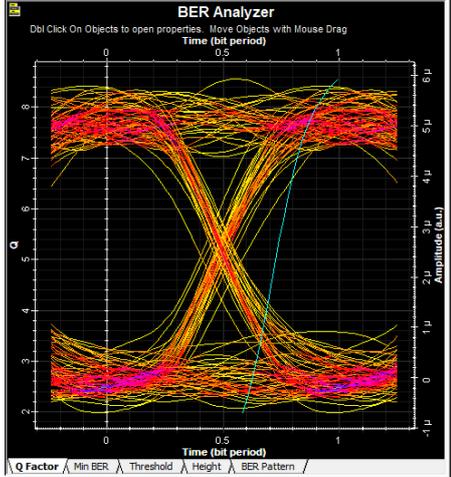
**Parámetros del enlace FSO con incremento de Tasa de Bits**

Potencia del Láser (dBm)	Longitud de Onda (nm)	Distancia del Enlace (Km)	Velocidad de los Datos	Diámetro de Apertura del Transmisor (cm)	Diámetro de Apertura del Receptor (cm)	Divergencia del Haz (mrad)	Tipo de Fotodetector	Sensibilidad
20.79	1300	4.89	500Mbps 1Gbps 2.5Gbps	5	20	2	APD	-46dBm

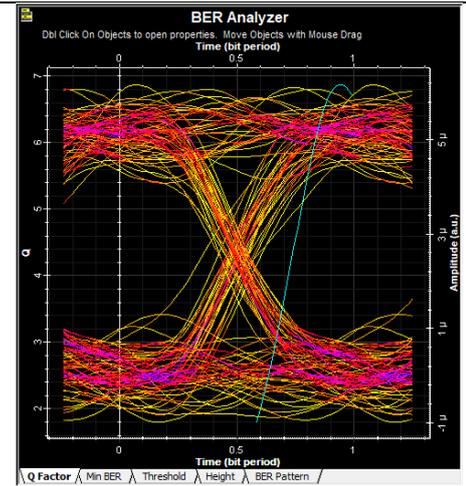
Obtenido de: Elaborado por el autor.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

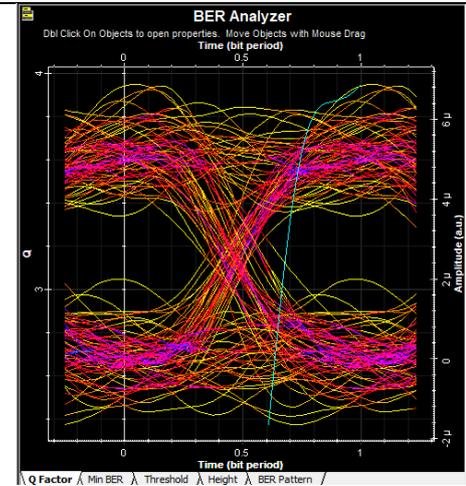
**Tabla 22.** Resultados escenario 3,4 y 5 con incremento de tasa de bits

Escenarios	Potencia Emitida por el Transmisor	Potencia Recibida en el Receptor	Diagrama BER
Caso 3 con una tasa de 500 Mbps			

Caso 4 con una tasa de 1 Gbps



Caso 5 con una tasa de 2.5 Gbps



Obtenido de: Elaborado por el autor.

### 6.1.1.1. Análisis caso 3.

En el tercer caso, se puede apreciar que la potencia que sale del transmisor es de 17.642 dBm, luego la potencia que el receptor recibe es de -30.857 dBm; se debe tener en cuenta que la potencia que llega al receptor no debe sobrepasar el umbral de recepción, el cual es de -46 dBm. Analizando el diagrama de ojo, los resultados que arroja son los siguientes:

Analysis	
Max. Q Factor	8.55888
Min. BER	5.69823e-018
Eye Height	3.31851e-006
Threshold	2.56823e-006
Decision Inst.	0.994737

Figura 91. Resultado Análisis (caso 3)

Fuente. Elaborado por el autor

Se tiene un factor Q de 8.55888 el cual es un valor regular, ya que en concordancia con las recomendaciones ITU-T de la serie G, el valor mínimo que se permite para el factor Q es de 6, el cual equivale a una BER de  $10e-9$ ; se tiene además un mínimo BER de  $5.69e-018$  el cual es un valor bajo e indica que se ha errado poca cantidad de bits que más adelante deben ser reenviados. En el diagrama de ojo también podemos visualizar que existe ruido en el nivel uno y nivel cero y un desfase en las señales en la amplitud de cruce, aunque la apertura del ojo aún es visible.

Adicional, se observa la señal óptica en el dominio del tiempo:

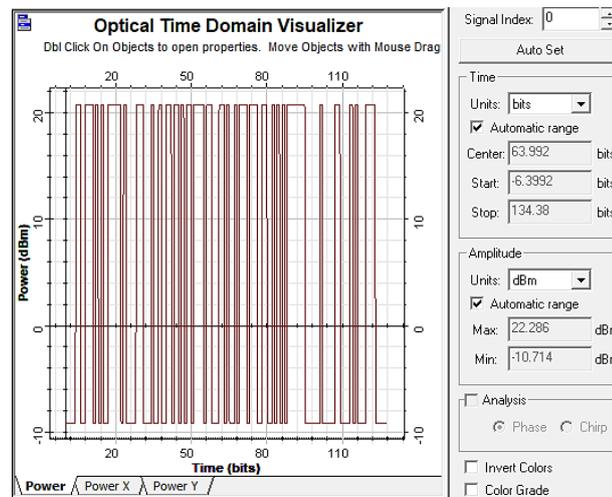


Figura 92. Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 3)

Fuente. Elaborado por el autor

También, se observa el analizador de espectro de la señal óptica a la salida del transmisor y llegada al receptor, en donde se puede apreciar una reducción de energía en la señal recibida con un pico de amplitud máxima de  $-33.79$  dBm.

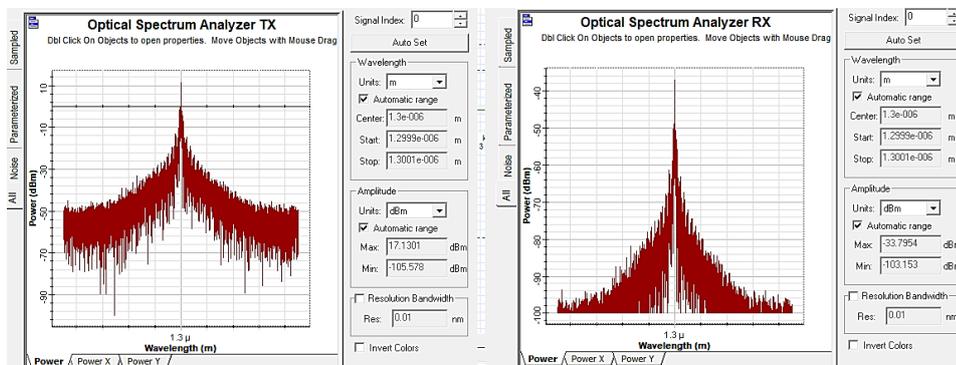


Figura 93. Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 3

Fuente. Elaborado por el autor

#### 6.1.1.2. Análisis caso 4.

En el cuarto caso, se ha aumentado la tasa de 150 Mbps a 1 Gbps con lo cual se puede observar en la Tabla 22 que, para este caso la potencia de salida del transmisor es de 17.572 dBm y a la salida del receptor se obtiene una potencia de -30.928 dBm. No existe una variación alta con el caso anterior en donde se aumentó la tasa a 500 Mbps. Analizando el diagrama de ojo, se obtiene los siguientes resultados:

Analysis	
Max. Q Factor	6.8683
Min. BER	3.24743e-012
Eye Height	2.84747e-006
Threshold	2.76197e-006
Decision Inst.	0.947368

Figura 94. Resultado Análisis (caso 4)

Fuente. Elaborado por el autor

Como se puede observar el factor Q se reduce al transmitir una tasa de bits más alta, aunque se encuentra en el valor permitido que es de mínimo 6, se tiene además un mínimo BER con más bits errados que en el caso anterior. Observando el diagrama de ojo se puede observar la distorsión y el ruido que existe, aunque la apertura del ojo es aceptable, ya que no se tiene señales que obstruyan las regiones del ojo; esto quiere decir que el rendimiento del sistema de comunicación con una tasa de 1 Gbps será regular, ya que los valores obtenidos se encuentran dentro de los valores adecuados para que el enlace funcione.

También se observa el visualizador de la señal óptica en el dominio del tiempo:

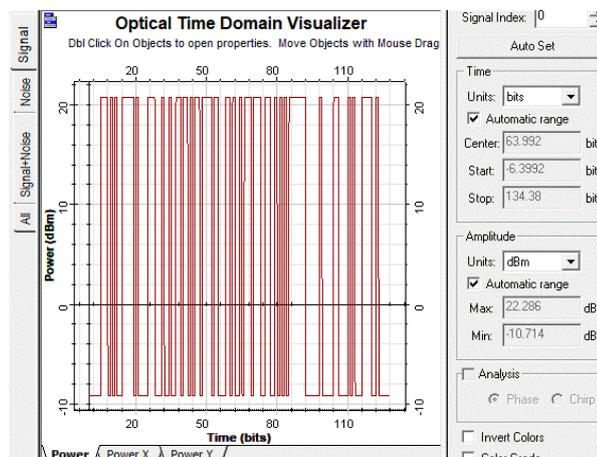
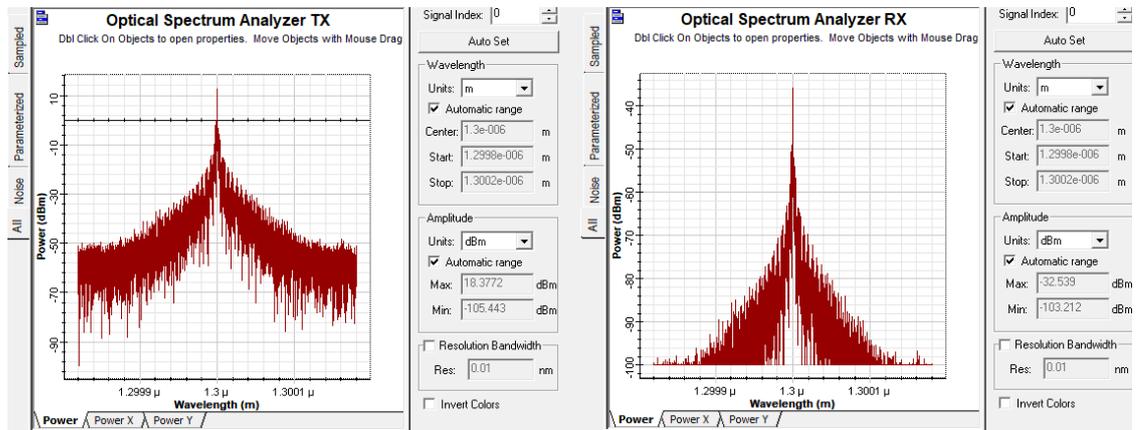


Figura 95. Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 4)

Fuente. Elaborado por el autor

De igual manera, se observa el analizador de espectro de la señal tanto en el transmisor como en el receptor:



**Figura 96.** Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 4

**Fuente.** Elaborado por el autor

A continuación, se analiza el caso 5, en donde la tasa de bits es de 2.5 Gbps, obteniendo los siguientes resultados:

### 6.1.2.3. Análisis caso 5.

En este escenario, se transmite una tasa de 2.5 Gbps en donde se puede apreciar en la Tabla 22, que la potencia de emisión del transmisor es de 17.572 dBm y a la salida del receptor se tiene una potencia de -30.928 dBm; además, en cuanto a valores de potencia se tienen los mismos resultados que el caso 4, ahora analicemos los valores obtenidos gracias al diagrama de ojo:

Analysis	
Max. Q Factor	3.95009
Min. BER	3.90083e-005
Eye Height	1.21755e-006
Threshold	2.55393e-006
Decision Inst.	1

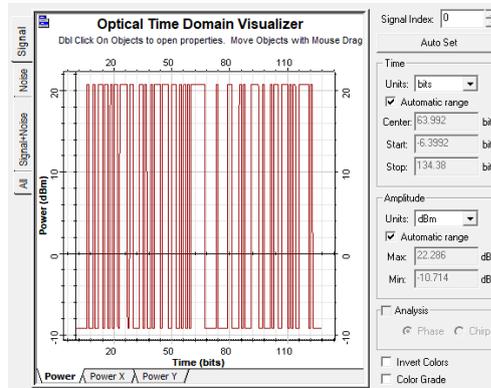
**Figura 97.** Resultado Análisis (caso 5)

**Fuente.** Elaborado por el autor

La Figura 97, muestra un factor Q de 3.95009 el cual es un valor bastante bajo, es decir se tiene una tasa alta de pérdida de energía y una tasa de bits errados bastante alta. También, se observa que el diagrama de ojo presenta mucho ruido en las regiones de nivel uno y nivel cero,

así como un jitter elevado. De esta manera se puede mencionar que el enlace no tiene un buen rendimiento en base a los parámetros establecidos.

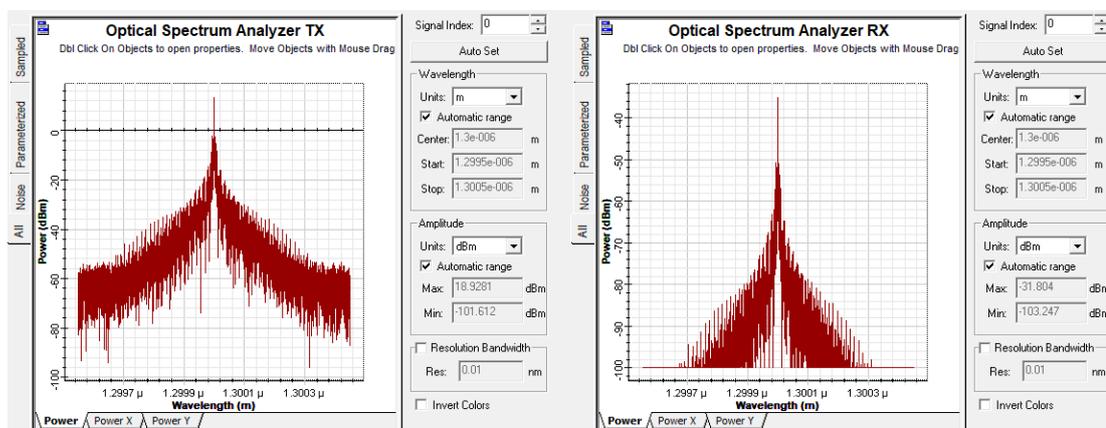
A continuación, se observa el visualizador de la señal óptica en el dominio del tiempo:



**Figura 98.** Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 5)

**Fuente.** Elaborado por el autor

De la misma manera, se visualiza el analizador de espectro de la señal a la salida del transmisor y la señal recibida en el receptor:



**Figura 99.** Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 5

**Fuente.** Elaborado por el autor

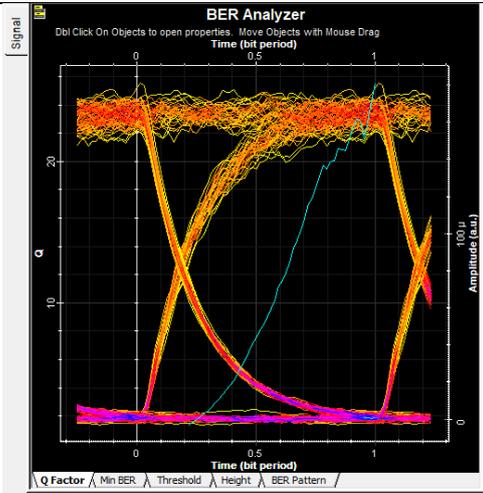
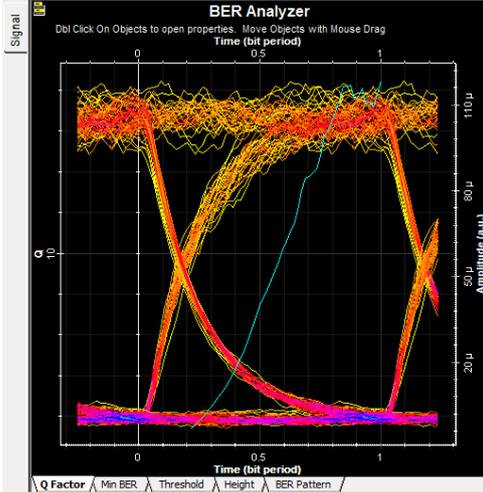
Se puede observar en la *Figura 99*, que existe una reducción de energía en la señal, esto debido a las condiciones atmosféricas que deterioran la señal en el canal FSO al momento de ser transmitida.

### 6.1.3. Resultado simulaciones escenario FSO en base al rendimiento del equipo TS5000

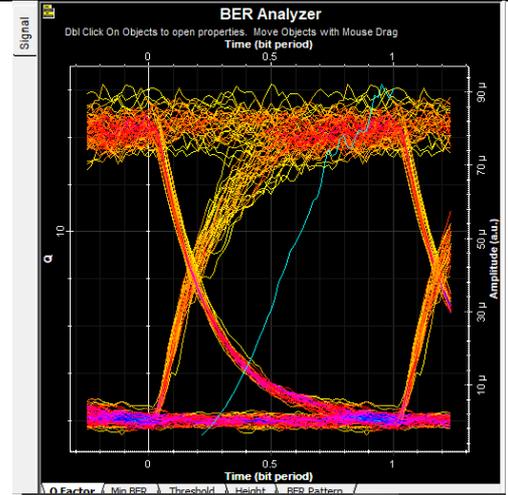
Posteriormente, se analiza los resultados obtenidos en base a los parámetros ilustrados en la Tabla 23, los cuales han sido establecidos por el fabricante MRV, con una tasa de 5 Gbps y una sensibilidad de -33 dBm.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

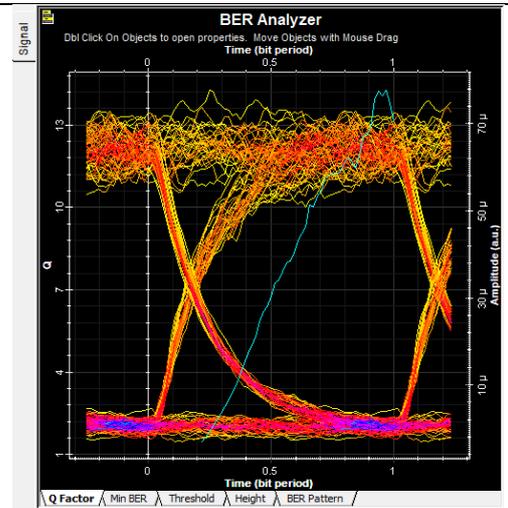
**Tabla 23.** Resultados escenarios en base al Rendimiento del equipo TS5000

Escenarios	Potencia Emitida por el Transmisor	Potencia Recibida en el Receptor	Diagrama BER
Caso 6 con atenuación de 3dB/Km a 3 Km			
Caso 7 con atenuación de 5dB/Km a 2.5 Km			

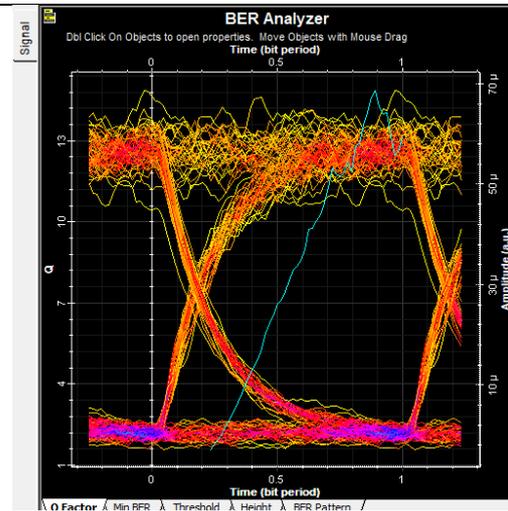
Caso 8 con  
atenuación  
de  
10dB/Km  
a 1.7 Km



Caso 9 con  
atenuación  
de  
17dB/Km  
a 1.22 Km



Caso 10  
con  
atenuación  
de  
30dB/Km  
a 822 m



Obtenido de: Elaborado por el autor.

### 6.1.3.1. Análisis caso 6

Al igual que en los casos que se han analizado anteriormente, la potencia establecida en el láser es de 20.79 dBm, con lo cual desde el transmisor se emite una potencia de 17.644 dBm y se tiene una pérdida de 3.14 dBm en el transmisor, luego en el receptor se tiene una

potencia recibida de  $-20.971$  dBm luego de atravesar el canal atmosférico; comparando este valor con la sensibilidad, se puede apreciar que se encuentra dentro del umbral permitido y el receptor logra interpretar la señal sin problema. Ahora se analiza el diagrama de ojo en el cual de obtiene los siguientes resultados:

Analysis	
Max. Q Factor	25.5369
Min. BER	3.19106e-144
Eye Height	0.000143774
Threshold	3.56405e-005
Decision Inst.	1

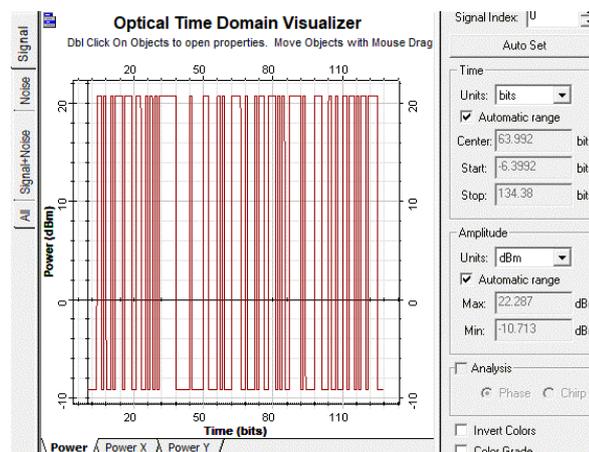
**Figura 100.** Resultado Análisis (caso 6)

**Fuente.** Elaborado por el autor

Como se puede observar en la *Figura 100*, se obtiene un factor Q de 25.5369, el cual es un valor adecuado y óptimo, mostrando un mínimo BER bastante bajo que indica que se tiene menos cantidad de bits errados. Se puede observar que existe un poco distorsión y ruido en el nivel uno del diagrama de ojo, por otro lado, apertura es excelente en este caso, no se presenta jitter ni cruces de amplitud. No existen señales que obstruyan las regiones 1 y 2 del diagrama de ojo y de esta manera se evita que existan problemas de sincronismo en los pulsos enviados desde el transmisor.

De esta manera se comprueba que, para este caso, el rendimiento del enlace será adecuado.

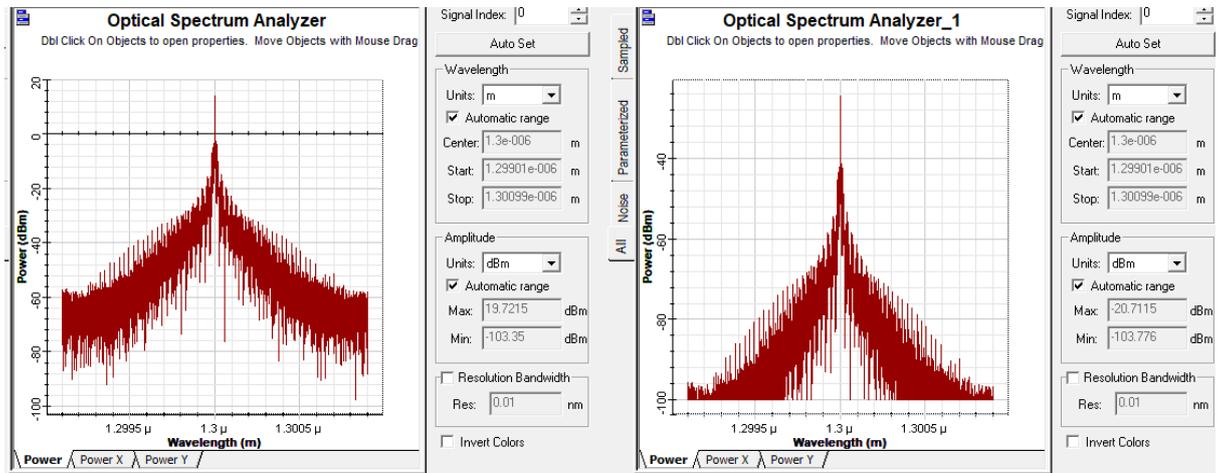
A continuación, se observa el visualizador de la señal en el dominio del tiempo:



**Figura 101.** Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 6)

**Fuente.** Elaborado por el autor

Adicionalmente, tenemos el analizador de espectro de la señal tanto en el transmisor como en el receptor:



**Figura 102.** Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 6

**Fuente.** Elaborado por el autor

En la *Figura 102*, se puede apreciar la pérdida de energía en el receptor, pasando de un pico máximo de amplitud de 19.72 dBm a -20.71 dBm.

### 6.1.3.2. Análisis caso 7.

En el caso 7, se transmite 5 Gbps a una distancia de 2.5Km que es lo que el equipo establece. La potencia de transmisión es de 17.644 dBm y en el receptor se obtiene una potencia de -22.901 dBm. Observando el diagrama de ojo se obtiene los siguientes resultados:

Analysis	
Max. Q Factor	18.4489
Min. BER	2.19676e-076
Eye Height	8.78473e-005
Threshold	2.25603e-005
Decision Inst.	1

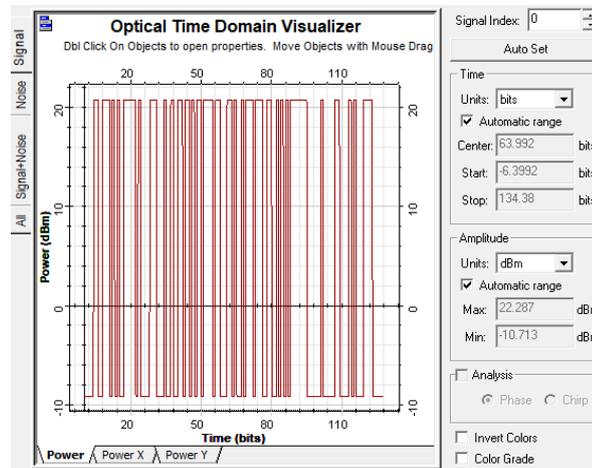
**Figura 103.** Resultado Análisis (caso 7)

**Fuente.** Elaborado por el autor

El factor Q que el diagrama de ojo tiene es de 18.4489 con un mínimo BER de 2.19e-076. Ambos valores indican que el rendimiento del sistema de comunicación es adecuado y el equipo receptor puede interpretar la señal emitida con la mínima cantidad de errores posibles. A diferencia de los casos anteriores, se percibe que el factor Q disminuye y el ruido en la zona

uno del diagrama de ojo se incrementa, esto se debe a que la atenuación se incrementa y las condiciones atmosféricas afectan al enlace, sin embargo, el enlace no deja de ser óptimo.

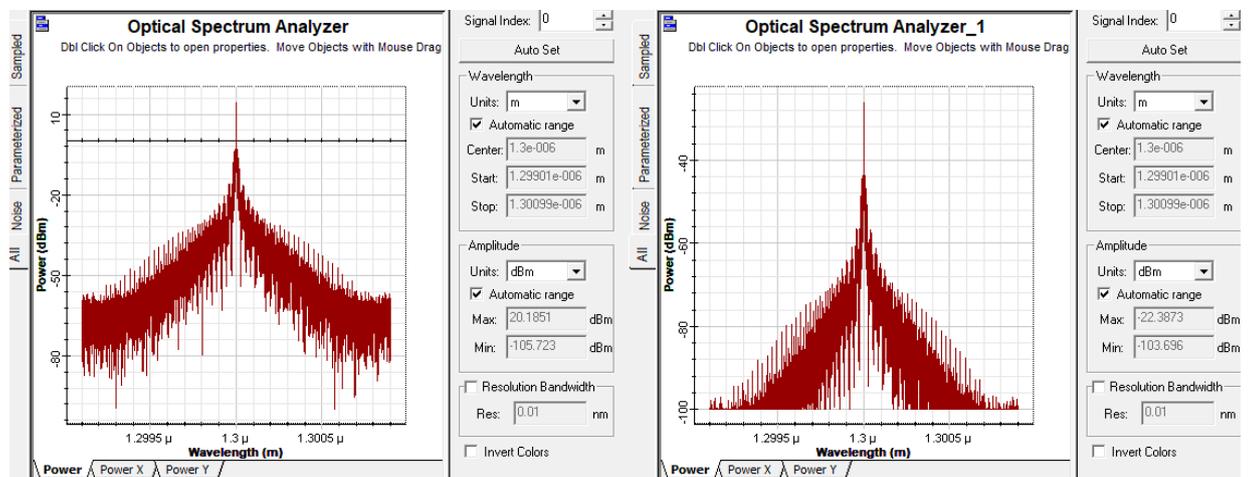
En la *Figura 104*, se muestra el visualizador de la señal en el dominio del tiempo:



**Figura 104.** Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 7)

**Fuente.** Elaborado por el autor

En la *Figura 105*, se muestra el analizador de espectro de la señal para este caso, tanto en el transmisor como el receptor:



**Figura 105.** Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha)

**Fuente.** Elaborado por el autor

### 6.1.3.3. Análisis caso 8.

En el caso 8, la potencia que llega al receptor es -24.162 dBm el cual se encuentra dentro del umbral de sensibilidad; los valores que se obtienen del diagrama de ojo son:

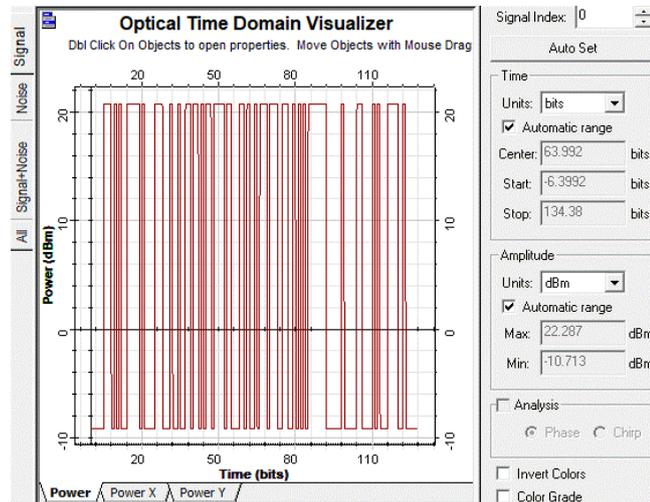
Analysis	
Max. Q Factor	16.2424
Min. BER	1.12156e-059
Eye Height	6.51785e-005
Threshold	2.25296e-005
Decision Inst.	0.953125

**Figura 106.** Resultados Análisis (caso 8)

**Fuente.** Elaborado por el autor

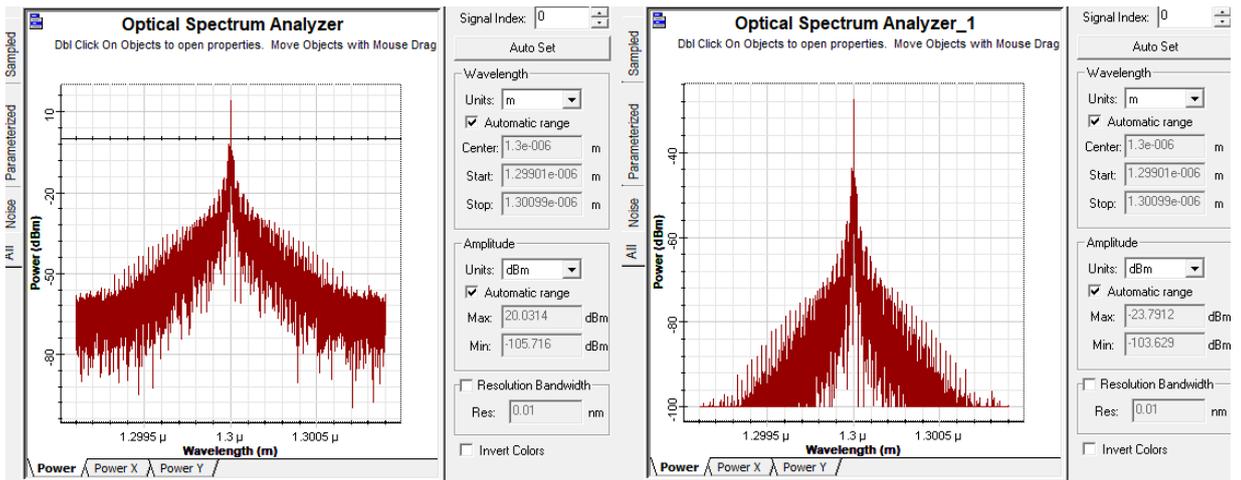
Se tiene un factor Q de 16.2424 con un mínimo BER de 1.12e-059. Se observa que en el diagrama de ojo hay presencia de ruido y un poco de desfase en el cruce de amplitud. Sin embargo, el sistema de comunicación es adecuado y su funcionamiento será correcto.

Se observa a continuación, la señal en el dominio del tiempo:



**Figura 107.** Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 8)

**Fuente.** Elaborado por el autor



**Figura 108.** Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha) CASO 8

**Fuente.** Elaborado por el autor

Al igual que en los casos anteriores, el analizador de espectro óptico muestra la señal en el espectro óptico tanto en el transmisor y receptor, además se observa la reducción de energía en el receptor pasando de un pico máximo de amplitud de 20.03 dBm a -23.79 dBm.

#### 6.1.3.4. Análisis caso 9.

En este caso, la atenuación corresponde un valor de 17dB/Km, en donde se tiene como resultado una potencia de recepción de -24.998 dBm y el diagrama de ojo nos presenta los siguientes resultados:

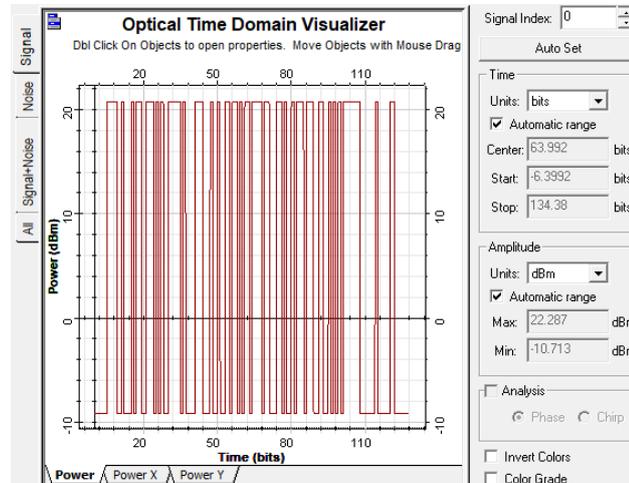
Analysis	
Max. Q Factor	14.2723
Min. BER	1.42695e-046
Eye Height	5.02708e-005
Threshold	1.67922e-005
Decision Inst.	0.96875

**Figura 109.** Resultados Análisis (caso 9)

**Fuente.** Elaborado por el autor

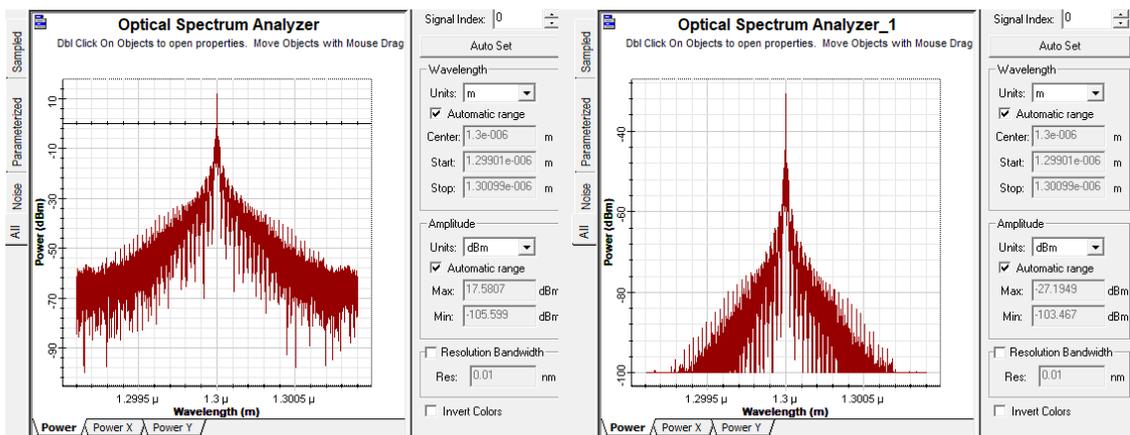
El diagrama de ojo muestra un factor Q de 14.2723, lo que indica que la tasa de bits errados es baja. El diagrama de ojo muestra una apertura adecuada en su máscara central, pero se aprecia que en la zona uno, existe ruido, sin embargo, en el cruce de amplitud no existe jitter ni desfases de los pulsos enviados. El ruido puede ser provocado por los efectos atmosféricos que atenúan la señal en el canal. En base a los resultados obtenidos, el sistema de comunicación opera de manera adecuada bajo los parámetros establecidos en este caso.

A continuación, se observa la señal en el dominio del tiempo y el analizador del espectro de la señal tanto en el transmisor como en el receptor:



**Figura 110.** Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 9)

Fuente. Elaborado por el autor



**Figura 111.** Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha)

Fuente. Elaborado por el autor

### 6.1.3.5. Análisis caso 10.

Como último caso, para la tecnología FSO se tiene un escenario con una atenuación de 30 dB/Km a una distancia de 822 m, obteniendo los siguientes resultados:

La potencia que llega al receptor es -25.644 dBm la cual es adecuada, aunque se tiene pérdidas debido a las condiciones atmosféricas del medio; el diagrama BER muestra los siguientes resultados:

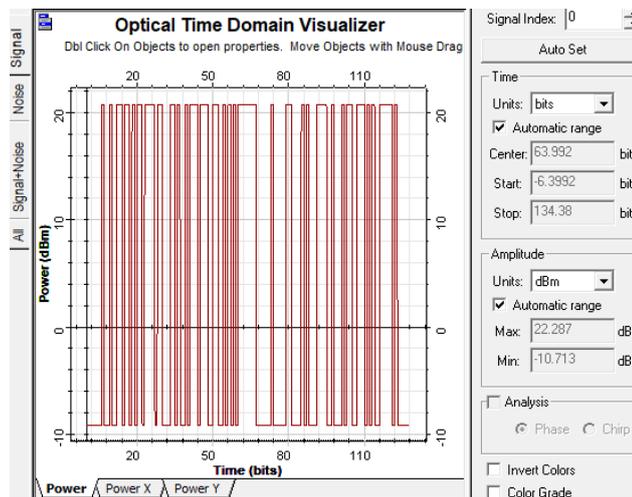
Analysis	
Max. Q Factor	14.8549
Min. BER	2.96646e-050
Eye Height	4.44066e-005
Threshold	1.7909e-005
Decision Inst.	0.890625

**Figura 112.** Resultados Análisis (caso 10)

**Fuente.** Elaborado por el autor

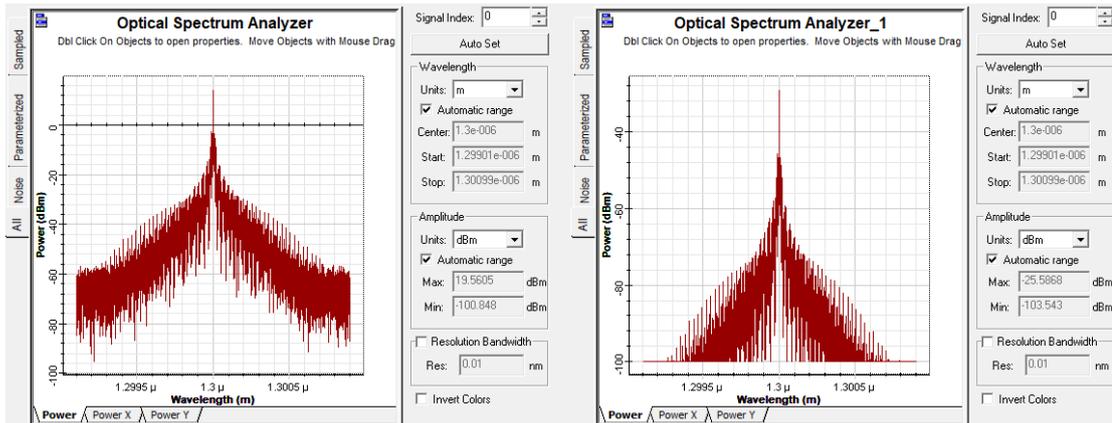
Se tiene un factor Q de 14.8549 que desde el sexto caso ha venido disminuyendo debido a que se ha variado la atenuación y la distancia. Al igual que en los casos anteriores el valor obtenido en el mínimo BER es correcto ya que no sobrepasa el valor establecido por el equipo ( $10e-9$ ), es decir la tasa de bits con errores es baja. Observando el diagrama de ojo, se puede apreciar que, en el canal de transmisión, las señales que se propagan siempre estarán expuestas a atenuación, sin embargo, la señal que se recepta es aún aceptable y el receptor fácilmente puede recuperar la información del reloj y sincronizarse con el transmisor, adicionalmente seguir manteniendo la baja tasa de bits errados en el receptor.

En la *Figura 113* y *Figura 114*, se aprecia la señal en el dominio del tiempo y el analizador de espectro óptico de la señal tanto en el transmisor como en el receptor, respectivamente:



**Figura 113.** Resultado Visualizador de la Señal en el Dominio del Tiempo Óptico (caso 10)

**Fuente.** Elaborado por el autor



**Figura 114.** Analizador de Espectro Óptico en el Transmisor (izquierda), Analizador de Espectro Óptico en el Receptor (derecha)

**Fuente.** Elaborado por el autor

#### 6.1.4. Resultado análisis matemático FSO

En este punto se realiza los cálculos matemáticos tomando en cuenta los dos primeros escenarios (ver sección 5.6.8.1 y 5.6.8.2) en base a los siguientes parámetros:

**Tabla 24.** Parámetros para el análisis matemático FSO

Parámetros para realizar el cálculo matemático FSO				
Potencia Transmisor (dBm)	Divergencia del Haz (mrad)	Área de Captura en el Receptor ( $m^2$ )	Distancia del Enlace (m)	Sensibilidad (dBm)
17.644	2	0.025	4890	-46

Obtenido de: Elaborado por el autor.

##### 6.1.1.1. Análisis de pérdidas de canal para el escenario 1 (3 dB/Km a 4.89 Km).

La potencia de transmisión que se ha tomado en este caso, es la que la simulación nos muestra.

En primer lugar, se calcula el valor de atenuación geométrica con la siguiente ecuación:

$$A_{ffGEO} = \frac{S_d}{S_{CAPTURA}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d \times \theta)^2}{S_{CAPTURA}}$$

**Ecuación 16.** Atenuación Geométrica

Teniendo en cuenta que:

- $\theta$ = Divergencia del Haz
- $d$ = distancia del enlace

- $S_{CAPTURA}$  = Área de captura en el receptor
- $S_d$  = Área del Haz a cierta distancia

Reemplazando los valores en la ecuación se tiene:

$$A_{ffGEO} = \frac{S_d}{S_{CAPTURA}} = \frac{\frac{\pi}{4}(4890 \times 0.002)^2}{0.025}$$

$$A_{ffGEO} = \frac{\frac{\pi}{4}(95.65)}{0.025}$$

$$A_{ffGEO} = \frac{75.12}{0.025}$$

$$A_{ffGEO} = 3004.93$$

Ahora, al resultado que se obtiene se lo convierte a unidad de dB, obteniendo el siguiente resultado:

$$A_{ffGEO} = 10\text{Log}_{10}(3004.93)$$

$$A_{ffGEO} = \mathbf{34.78 \text{ dB}}$$

Como se puede observar, se ha obtenido un valor de atenuación geométrica igual a 34.78 dB el cual nos será útil más adelante.

En segundo lugar, se realizan los cálculos para el primer escenario en el cual se presentan condiciones atmosféricas con lluvias ligeras a medias (2.5mm/hr) – neblinas ligeras con una atenuación de 3dB/Km; también es necesario conocer el valor de visibilidad, el cual se puede obtener de la siguiente figura:

International visibility code				
Weather conditions	Precipitation		Visibility (m)	Attenuation (dB/km)
	mm/h			
Dense fog			0	
Thick fog			50	315
Moderate fog			200	75
Light fog			500	28.9
Very light fog	Storm	100	770	18.3
			1 000	13.8
Light mist	Strong rain	25	1 900	6.9
			2 000	6.6
Very light mist	Average rain	12.5	2 800	4.6
			4 000	3.1
Clear air	Light rain	2.5	5 900	2
			10 000	1.1
Very clear air	Drizzle	0.25	18 100	0.6
			20 000	0.54
			23 000	0.47
			50 000	0.19

**Figura 115.** Código de Visibilidad Internacional

**Fuente.** Obtenido de (Recommendation ITU-R P.1817-1, 2012)

Para este caso, la visibilidad será de 5.9 Km:

Teniendo todos los valores necesarios, encontramos la variación del coeficiente de atenuación con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \beta_n = \frac{3,912}{V} \left( \frac{\lambda_{nm}}{550} \right)^{-q}$$

**Ecuación 17.** Variación del Coeficiente de Atenuación

Donde:

$q = 1.6$  si  $V > 50$  Km |  $1.3$  si  $6\text{Km} < V < 50$  Km |  $0.16(V) + 0.34$  si  $1\text{Km} < V < 6\text{Km}$  |  $V - 0.5$  si  $0.5\text{Km} < V < 1\text{Km}$

como se menciona anteriormente, se tiene una visibilidad de 5.9 Km entonces el valor de  $q$  será igual a:

$$q = 0.16(V) + 0.34$$

$$q = 0.16(5.9) + 0.34$$

$$\mathbf{q = 1.284}$$

y se procede a reemplazar en la ecuación 17:

$$\sigma = \beta_n = \frac{3,912}{5,9} \left(\frac{1300}{550}\right)^{-1.284}$$

$$\mathbf{\sigma = 0,219}$$

de esta manera se obtiene una variación de coeficiente de atenuación de 0,219.

Como tercer paso, se aplica la ley de Beer para encontrar la atenuación de la luz que viaja a través de la atmósfera, con la siguiente ecuación:

$$\tau(d) = e^{-\sigma d}$$

**Ecuación 18.** *Ley de Beer*

Reemplazando los valores en la ecuación 18, se obtiene:

$$\tau = e^{-0.219 \times 4.89}$$

$$\mathbf{\tau = 0.342}$$

Como cuarto paso, se calcula la atenuación atmosférica, con la siguiente ecuación:

$$A_{ffATM} = 10 \log\left(\frac{1}{\tau(d)}\right)$$

**Ecuación 19.** *Atenuación Atmosférica*

Reemplazando los valores, se obtiene:

$$A_{ffATM} = 10 \log\left(\frac{1}{0.342}\right)$$

$$\mathbf{A_{ffATM} = 4.67 \text{ dB}}$$

Como quinto paso, se calcula el margen de enlace del sistema de comunicación para el primer escenario; previamente se debe calcular las pérdidas del sistema aplicando la siguiente ecuación:

$$L_{sis} = L_{equipo} + L_{conectores} + L_{fibra \text{ óptica}} + L_{desalineamiento}$$

**Ecuación 20. Pérdidas del Sistema**

En donde:

- $L_{equipo} = 1 \text{ dB}$
- $L_{conectores} = 0.7 \text{ dB}$
- $L_{fibra \text{ óptica}} = 0 \text{ dB}$
- $L_{desalineamiento} = 1 \text{ dB}$

Reemplazando en la ecuación 20, se obtiene:

$$L_{sis} = 1dB + 0.7dB + 0dB + 1dB$$

$$L_{sis} = 2.7dB$$

Obteniendo las pérdidas del sistema, se procede a calcular el margen de enlace con la siguiente ecuación:

$$M_{Link} = P_e + |S_r| - A_{ffGEO} - A_{FFATM} - L_{sis}$$

**Ecuación 21. Margen de Enlace**

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 21, se obtiene:

$$M_{Link} = 17.644 + |46| - 34.77 - 4.67 - 2.7$$

$$M_{Link} = 21.504 \text{ dB}$$

Finalmente se obtiene el margen de enlace, el cual es un valor que representa la potencia disponible que se encuentra por encima de la sensibilidad del receptor, es decir que el sistema de comunicación puede tolerar 21.504 dB adicionales de atenuación entre el transmisor y receptor. Para este primer caso el margen de enlace encontrado es excelente, ya que mientras más alto sea este valor, permitirá que con el tiempo si la señal se degrada debido a factores atmosféricos, la señal que se reciba no será tan deficiente y se pueda enganchar nuevamente en el enlace.

A continuación, se muestra el resumen de resultados obtenidos para el primer caso:

**Tabla 25.** Resumen Resultados Análisis Matemático (caso 1)

<b>Resultados Análisis Matemático Caso 1</b>					
Atenuación Geométrica	Variación del coeficiente de Atenuación	Atenuación de la Luz (Ley de Beer)	Atenuación Atmosférica	Pérdidas en el Sistema	Margen de Enlace
34.77 dB	0.219	0.342	4.67 dB	2.7 dB	21.504 dB

Obtenido de: Elaborado por el autor.

#### **6.1.1.1. Análisis de pérdidas de canal en el Escenario 2 (30 dB/Km a 4.89 Km).**

Ahora se realiza los cálculos matemáticos para el caso 2, en donde se tiene tormentas de lluvias que supera los 100 mm/hr, además de vientos fuertes y niebla moderada.

En base a la Figura 117, cuando se tiene precipitaciones superiores o iguales a 100 mm/hr, la visibilidad es de 770 m., conociendo este valor, se halla el valor de  $q$  necesario para encontrar la variación de coeficiente de atenuación:

$$q = V - 0.5$$

$$q = 0.770 - 0.5$$

$$\mathbf{q = 0.27}$$

Por consiguiente, se aplica la ecuación 17 y se encuentra la variación del coeficiente de atenuación:

$$\sigma = \beta_n = \frac{3,912}{0.770} \left( \frac{1300}{550} \right)^{-0.27}$$

$$\mathbf{\sigma = \beta_n = 4,027}$$

Como siguiente paso, se aplica la ecuación 18 para encontrar la atenuación de la luz que se encuentra viajando a través de la atmósfera en este escenario:

$$\tau(d) = e^{-4.027(4.89)}$$

$$\mathbf{\tau(d) = 2.80 \times 10^{-9}}$$

Luego, aplicando la ecuación 19, se halla el valor de atenuación atmosférica:

$$A_{ffATM} = 10 \log \left( \frac{1}{2.80 \times 10^{-9}} \right)$$

$$\mathbf{A_{ffATM} = 85.52 \text{ dB}}$$

Es importante mencionar que el valor de pérdidas en el sistema será igual al caso anterior (**2.7dB**), además se ha tomado la potencia emitida por el transmisor de la Tabla 21, caso 2.

Finalmente, se calcula el margen de enlace aplicando la ecuación 21:

$$M_{Link} = P_e + |S_r| - A_{ffGEO} - A_{FFATM} - L_{sis}$$

$$M_{Link} = 17.573 + |46| - 34.77 - 85.52 - 2.7$$

$$\mathbf{M_{Link} = -59.417 dB}$$

Analizando el resultado del margen de enlace, se aprecia que el valor obtenido es una cantidad negativa lo cual indica un margen bastante bajo, es decir, si el sistema de comunicación se ve afectado por el clima o condiciones atmosféricas, el receptor no tendrá la capacidad de recuperar la señal y en enlace dejará de funcionar, por lo que se recomienda tener un margen de enlace alto. Realizando una similitud con los resultados obtenidos en la simulación se puede determinar que el sistema de comunicación bajo estos parámetros no puede operar.

A continuación, se muestra una tabla con los resultados obtenidos para el caso 2:

**Tabla 26.** Resumen Resultados Análisis Matemático (caso 2)

**Resultados Análisis Matemático Caso 2**

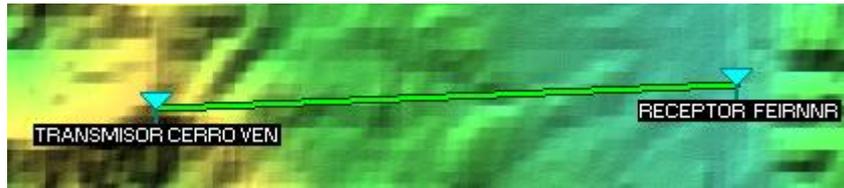
Atenuación Geométrica	Variación del coeficiente de Atenuación	Atenuación de la Luz (Ley de Beer)	Atenuación Atmosférica	Pérdidas en el Sistema	Margen de Enlace
34.77 dB	4.027	$2.80 \times 10^{-9}$	85.52 dB	2.7 dB	-59.417 dB

Obtenido de: Elaborado por el autor.

**6.1.5. Resultados simulación tecnología RF**

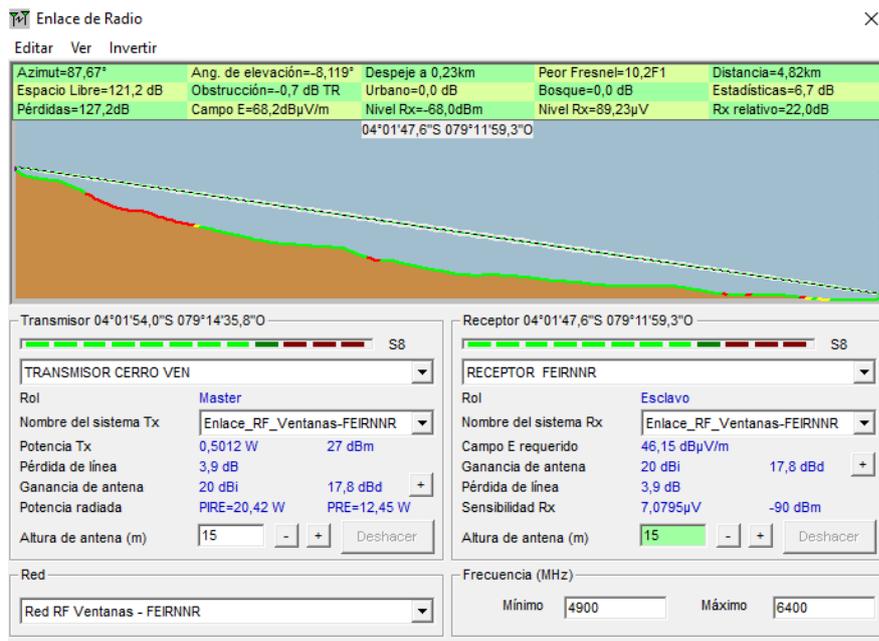
En esta sección se analiza los resultados que se obtiene en base a la simulación realizada y posteriormente, se realiza el análisis matemático acerca de RF.

En primer lugar, se observa el indicador de la línea que une el transmisor con el receptor, la cual se muestra de color verde, es decir, el enlace está operando correctamente con los valores que se han asignado a simple vista, por el contrario, si la línea se mostrara en color rojo, se debe revisar los parámetros y configuraciones que se han ingresado.



**Figura 116.** Enlace RF Sección Transmisor - Receptor

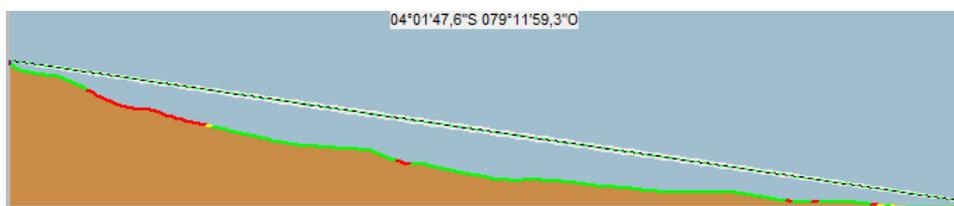
**Fuente.** Elaborado por el autor



**Figura 117.** Resultados obtenidos en la simulación RF

**Fuente.** Elaborado por el autor

La *Figura 117*, muestra cada parámetro con los resultados obtenidos, los cuales se analizan a continuación:



**Figura 118.** Vista del perfil del enlace RF

**Fuente.** Elaborado por el autor

Como se puede apreciar en la *Figura 118*, existe línea de vista entre el transmisor y el receptor a una distancia de 4.82 Km. La distancia inicial es de 4.89 Km, pero debido a la

ubicación de la torre en la parte del transmisor ha variado un poco, las antenas han sido ubicadas a una altura de 15 m y se observa que no existe presencia de obstáculos.

Ahora analicemos los resultados numéricos obtenidos:

Azimut=87,67°	Ang. de elevación=-8,119°	Despeje a 0,23km	Peor Fresnel=10,2F1	Distancia=4,82km
Espacio Libre=121,2 dB	Obstrucción=-0,7 dB TR	Urbano=0,0 dB	Bosque=0,0 dB	Estadísticas=6,7 dB
Pérdidas=127,2dB	Campo E=68,2dBμV/m	Nivel Rx=-68,0dBm	Nivel Rx=89,23μV	Rx relativo=22,0dB

**Figura 119.** Resultado parámetros obtenidos RF

**Fuente.** Elaborado por el autor

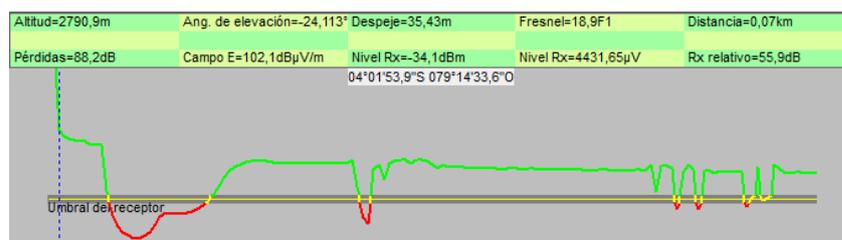
Como se puede apreciar en la *Figura 119*, el nivel de recepción de la señal será de -68,0 dBm, es decir; la potencia que llega al receptor desde el transmisor, el cual emite una potencia inicial de 27 dBm.

Como se menciona en el estándar general, para que el diseño de un radioenlace sea aceptable, la primera zona de Fresnel debe estar despejada en un 60% (0,6) a lo largo de toda su extensión; en este caso, el valor que se obtiene para el enlace es de 10,2F1, lo cual me indica que se encuentra por encima del valor establecido y que no se tendrá ningún inconveniente.

El valor que se obtiene del Rx Relativo es de 22,00 dB, lo cual permite saber el margen respecto de la sensibilidad del sistema receptor con que llega la potencia de la señal. En este caso el Rx Relativo es adecuado, ya que garantiza que la señal llegue sin problemas y si se obtiene un valor aún más alto será mucho mejor. Es importante mencionar que este valor no puede estar en color rojo ya que esto me indicaría que al receptor llega menos señal de la que realmente se necesita.

El campo E es igual a 68,2dBμV/m lo cual me indica el campo eléctrico en un punto. Ahora, la *Figura 120*, muestra cómo se comporta la señal a lo largo del medio, variando el campo eléctrico y el valor de Rx Relativo:

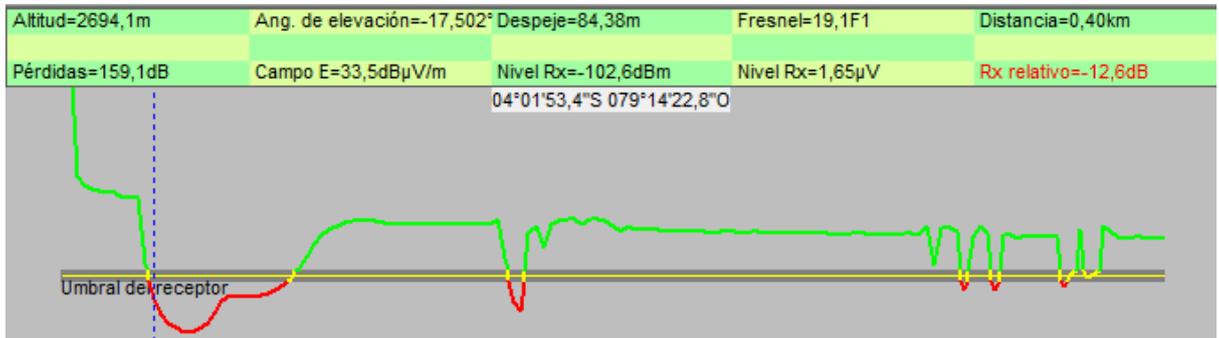
### Comportamiento de la señal durante su propagación:



**Figura 120.** Comportamiento de la señal RF a 0,07 Km de su propagación

**Fuente.** Elaborado por el autor

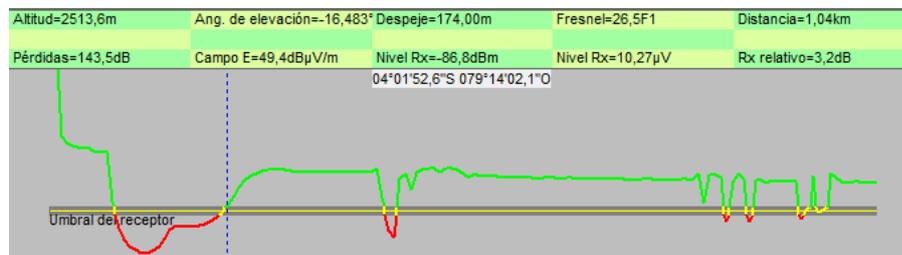
La línea verde, muestra la evolución que va teniendo la señal desde que sale del transmisor hasta llegar al receptor.



**Figura 121.** Degradación de la señal RF a 0,40 Km

**Fuente.** Elaborado por el autor

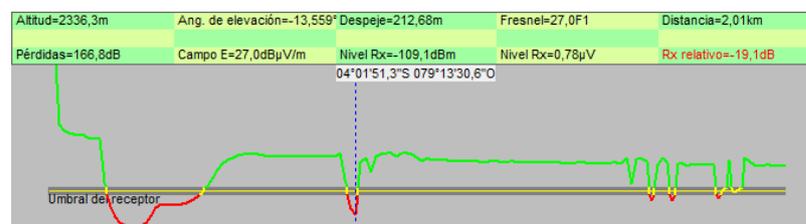
Observemos en la *Figura 121*, cómo la señal a una distancia de 0,40 Km se degrada y cae por debajo del umbral de recepción, provocando un Rx Relativo de -12,6 dB, lo cual refleja una degradación en la señal, esto se debe a que hay presencia de algún obstáculo que dificulta el paso de la señal, provocando además una reducción del campo E a 33,5 dB $\mu$ V/m.



**Figura 122.** Recuperación de la señal RF a 1,04 Km

**Fuente.** Elaborado por el autor

Se puede observar que a una distancia de 1,04 Km la señal nuevamente se incrementa y vuelve a tomar valores estables, ubicándose por encima del umbral del receptor.



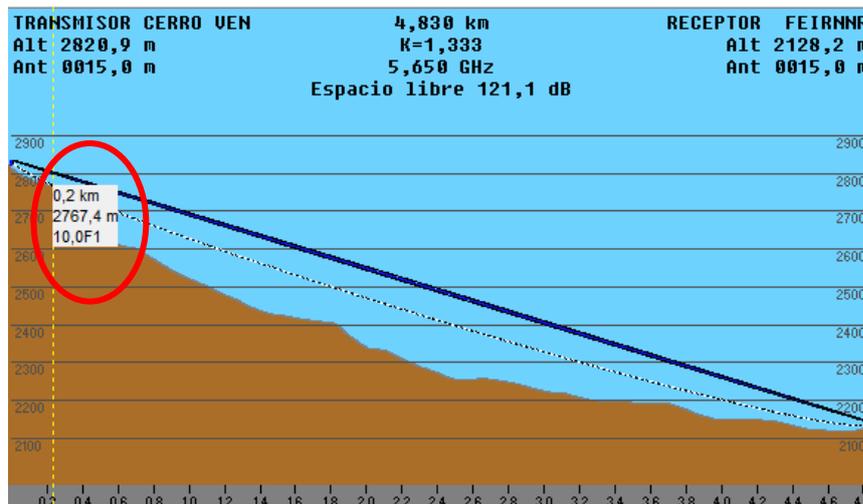
**Figura 123.** Degradación de la señal RF a 2,01 Km

**Fuente.** Elaborado por el autor

A una distancia de 2,01 Km la señal vuelve a caer por debajo del umbral del receptor, provocando degradación de la señal nuevamente, pero como se observa en la *Figura 123*, inmediatamente la señal se recupera y vuelve a ubicarse dentro del rango de transmisión hasta los 4,82 Km donde se encuentra el receptor.

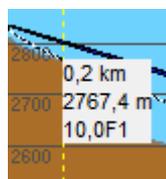
La caída de la señal que se encuentra por debajo del umbral del receptor se debe a que el perfil del terreno es irregular los primeros 2,01 Km, partiendo desde el transmisor; para solucionar este problema se puede aumentar la altura de la antena transmisora o cambiar la ubicación de la antena, aunque en este caso no es necesario, ya que la mayor parte de la señal se encuentra por encima del umbral de recepción.

A continuación, se puede observar de mejor manera el perfil del terreno, en donde se observa la altitud tanto del transmisor como del receptor, así como la altura de ambas antenas:



**Figura 124.** Perfil del terreno enlace RF

**Fuente.** Elaborado por el autor



**Figura 125.** Peor Fresnel a 0,2 Km

**Fuente.** Elaborado por el autor

Adicionalmente, se observa el punto en donde se encuentra el peor Fresnel a 0,2 Km.

También se puede apreciar que se tiene una pérdida en el espacio libre de 121,1 dB, lo cual indica la pérdida de la señal dentro del espacio entre las dos antenas del sistema de comunicación.

#### 6.1.5.1. Resultado escenario RF visto desde Google Earth.

En esta sección se puede apreciar el sistema de comunicación RF desde el software especializado Google Earth:



Figura 126. Sistema de comunicación RF visto desde Google Earth (vista general)

Fuente. Elaborado por el autor

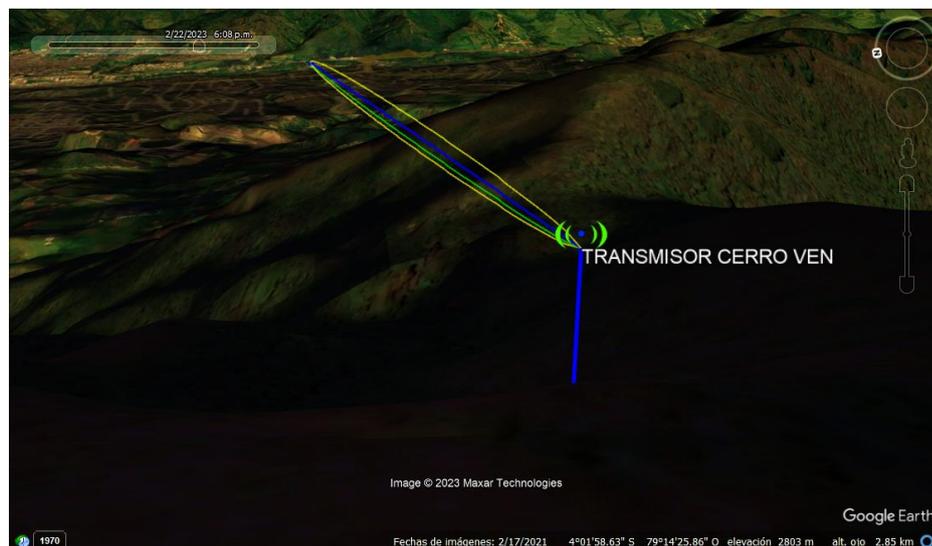
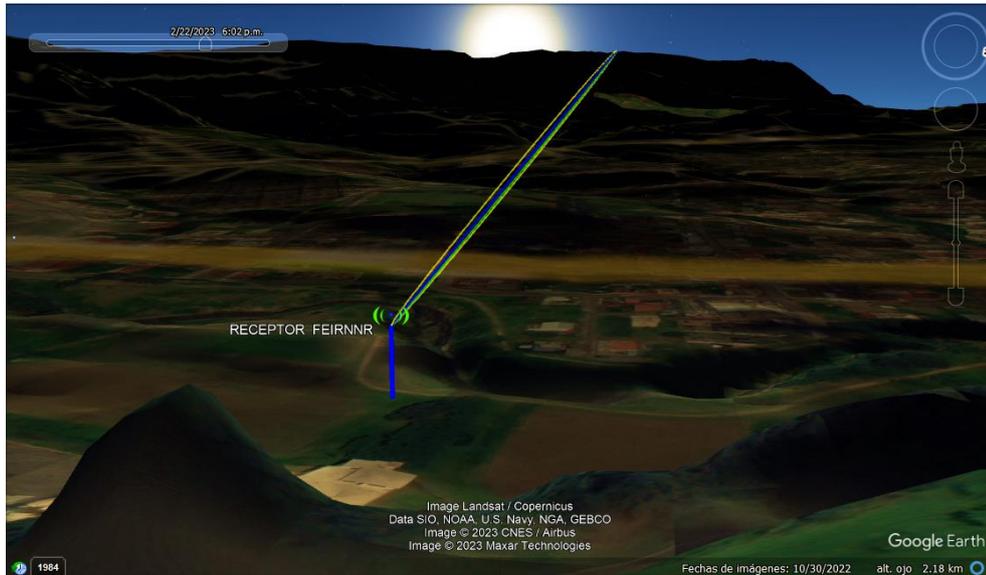


Figura 127. Sistema de comunicación RF visto desde Google Earth (vista desde el transmisor)

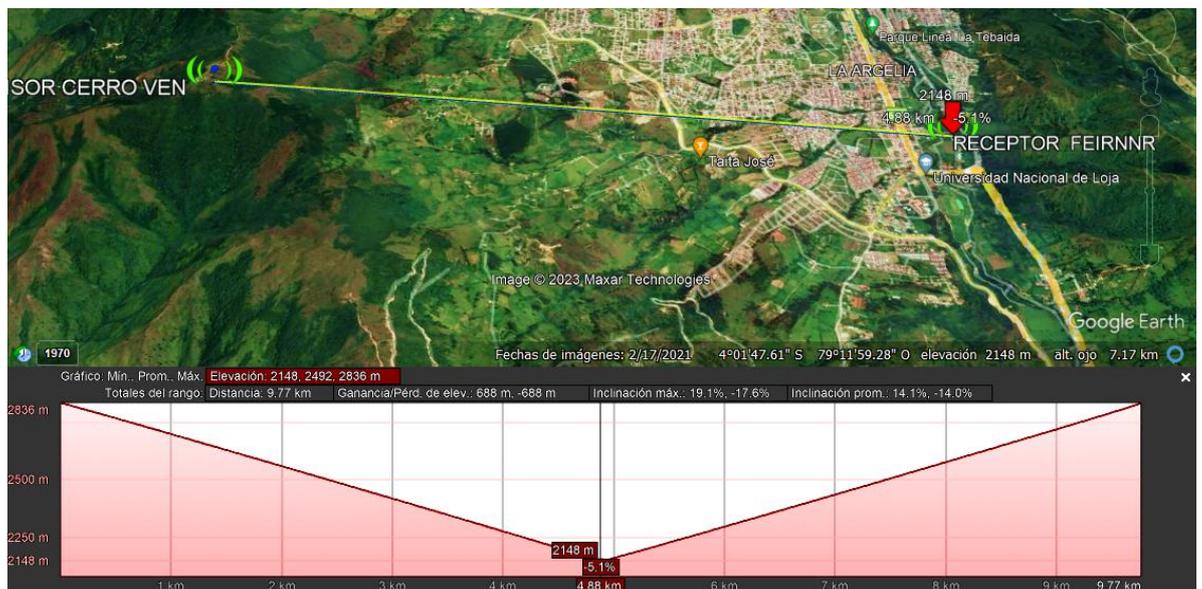
Fuente. Elaborado por el autor



**Figura 128.** Sistema de comunicación RF visto desde Google Earth (vista desde el receptor)

**Fuente.** Elaborado por el autor

Google Earth también permite observar el perfil topográfico del sistema de comunicación, así como se lo aprecia en la siguiente figura:



**Figura 129.** Perfil topográfico del sistema de comunicación RF

**Fuente.** Elaborado por el autor

En base a los resultados obtenidos bajo las condiciones climáticas y por cuestiones de difracción al propagarse la señal, se determina que el enlace tendrá un buen rendimiento y en base a las características del equipo se puede transmitir máximo hasta 700 Mbps en el enlace punto a punto. Es importante mencionar que la tasa de bits que se transmite puede disminuir

debido a ciertos factores que pueden desorientar la antena transmisora como receptora y perder la línea de vista del enlace.

### 6.1.6. Resultados análisis matemático RF

En esta sección, se realiza la parte matemática, para verificar los resultados obtenidos en la simulación sean adecuados aplicando las ecuaciones necesarias.

#### 6.1.6.1. Análisis Matemático Zona de Fresnel RF.

En primer lugar, se calcula la primera zona de Fresnel para el sistema de comunicación, aplicando la siguiente ecuación:

$$F1 = 8.656 \sqrt{\frac{D(Km)}{f(GHz)}}$$

**Ecuación 22.** Primera Zona de Fresnel

En donde:

- D = indica la distancia del enlace en Km
- f = indica la frecuencia a la que se trabaja en GHz

para este caso, la distancia del enlace es de 4.82 Km y la frecuencia de la antena que se ha configurado se encuentra entre 4900 – 6400 MHz. Para este caso la frecuencia promedio que se utiliza es de 5650 MHz.

Una vez conocido todos los valores, reemplazamos en la ecuación 22 y se obtiene:

$$F1 = 8.656 \sqrt{\frac{4.82}{5.65}}$$

$$F1 = 7,99 F1$$

Como se mencionó anteriormente, la primera zona de Fresnel debe ser igual o superior a 0.6 para tener un enlace aceptable; en este caso el valor que se obtiene es de 7.99 y, además se aprecia que el valor calculado difiere un tanto con el valor que muestra la simulación en la *Figura 119*, el cual da un valor de 10,2F1; esto puede presentarse debido a que el software toma una frecuencia dentro del rango mencionado, sin embargo, ambos valores son adecuados ya que no se encuentran por debajo del valor estándar que es -0,3F1.

A continuación, se calcula los parámetros de propagación del enlace, los cuales son:

- Pérdidas en el espacio libre
- Potencia de recepción

### 6.1.6.2. Análisis matemáticos pérdidas en el espacio libre RF.

Para encontrar las pérdidas en el espacio libre, se aplica la siguiente ecuación:

$$L_{FSL} = 92.45 + 20\log(f_{GHz}) + 20\log(D_{Km})$$

**Ecuación 23.** *Pérdidas en el Espacio Libre*

En donde:

- f = frecuencia en GHz
- D = distancia del enlace en Km

Reemplazamos los valores en la ecuación 23, en donde se obtiene:

$$L_{FSL} = 92.45 + 20\log(5.65) + 20\log(4.82)$$

$$L_{FSL} = 121.15 \text{ dB}$$

Como resultado se tiene un valor de 121.15 dB como pérdidas en el espacio libre dentro del área de propagación entre el transmisor y receptor, además si se compara el valor obtenido matemáticamente con el valor que se obtiene en la simulación (*ver Figura 119*) el cual es equivalente.

### 6.1.6.3. Análisis matemático potencia en el receptor RF.

Para calcular la potencia que llega al receptor, se aplica la siguiente ecuación:

$$P_{rx} = P_{Tx} + G_{TX} - L_{TX} + G_{rx} - L_{rx} - L_{FSL}$$

**Ecuación 24.** *Potencia en el Receptor RF*

Donde:

- $P_{rx}$  indica la potencia en el receptor en dBm
- $P_{Tx}$  indica la potencia emitida desde el transmisor en dBm
- $G_{TX}$  indica la ganancia del transmisor en dBi
- $L_{TX}$  indica las pérdidas del cable en el transmisor en dB
- $G_{rx}$  indica la ganancia que se obtiene en el receptor en dBi
- $L_{rx}$  indica las pérdidas del cable en el receptor en dB
- $L_{FSL}$  indica las pérdidas en el espacio libre en dB

En la siguiente tabla, se puede apreciar los valores necesarios para realizar el cálculo:

**Tabla 27.** Valores para encontrar la Potencia en el Receptor RF

<b>Parámetros necesarios para realizar el cálculo</b>					
<b>Potencia en el Transmisor</b>	<b>Ganancia en el Transmisor</b>	<b>Pérdidas del cable en el Transmisor</b>	<b>Ganancia en el Receptor</b>	<b>Pérdidas del cable en el Receptor</b>	<b>Pérdidas de propagación en el espacio libre</b>
27 dBm	20 dBi	3.9 dB	20 dBi	3.9 dB	121.15 dB

Obtenido de: Elaborado por el autor.

Conociendo los valores, se reemplaza en la ecuación 24 y se obtiene:

$$P_{rx} = 27 \text{ dBm} + 20 \text{ dBi} - 3.9 \text{ dB} + 20 \text{ dBi} - 3.9 \text{ dB} - 121.15 \text{ dB}$$

$$P_{rx} = -61.95 \text{ dBm}$$

El resultado da una potencia de recepción de -61.95 dBm, es superior a la sensibilidad del equipo que es de -90 dBm, es decir se tiene a la salida del receptor una señal adecuada, además se puede apreciar que el valor obtenido varía con el valor que el software de simulación muestra (*ver Figura 119*), pero ambos valores indican un nivel de señal suficiente.

Finalmente, se calcula el margen de enlace del sistema RF, en donde la ecuación 25, muestra que se necesita el valor de potencia de recepción y la sensibilidad en el receptor:

$$M_{link} = P_{rx} - S_{rx}$$

**Ecuación 25.** Margen de Enlace RF

$$M_{link} = -61.95 - (-90)$$

$$M_{link} = 28.05 \text{ dB}$$

Obtenemos un margen de enlace de 28.05 dB lo cual indica que el sistema estará operando con 28.05 dB adicional, ya que este valor es mayor a la sensibilidad del equipo; es decir tenemos un enlace robusto y de esta manera la señal no se verá demasiado afectada por degradaciones.

## **6.2 Análisis Comparativo Sobre los Aspectos Técnicos de Equipamiento Entre las Tecnologías FSO y RF**

Previamente se realizó las simulaciones para ambas tecnologías, en donde se pudo validar que, en el escenario presentado FSO y RF muestran un rendimiento adecuado, pero

difieren en ciertos valores como potencia de transmisión, frecuencia, sensibilidad y tasa de bits que se transmite.

A continuación, se presenta una tabla comparativa para lo cual se ha tomado en cuenta los parámetros del equipo MRV TS5000 para FSO y MIMOSA C5x para RF.

**Tabla 28.** Tabla comparativa entre FSO y RF

<b>Análisis Comparativo FSO y RF</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Free Space Optics (TS5000)</b>	<b>Radiofrecuencia (C5x)</b>
Tasa de Datos	Mayor a 5Gbps	Hasta 700 Mbps
Alcance	20m a 4.8 Km	4.8 Km o superior
Frecuencia	230.6 THz	4900 – 6400 MHz (restringido por el país de operación)
Uso de Bandas Licenciadas	No	Si
Potencia de Transmisión	20.79 dBm	27 dBm
Seguridad	Alta	Baja
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condiciones atmosféricas</li> <li>• Línea de Vista</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espectro Electromagnético</li> <li>• Distancia</li> <li>• Condiciones atmosféricas</li> </ul>
Instalación	Sencilla	Compleja
Máximo Consumo de Potencia	Depende del equipo y la tasa de datos de transmisión; para este caso 20 W	9.2W promedio, 12.9 W máximo
Alineamiento	Complejo y frágil	Sencillo y más eficiente

Obtenido de: Elaborado por el autor.

Como se puede apreciar en la Tabla 28 en FSO la tasa de datos que se transmite en un periodo de tiempo determinado es superior a la de RF. FSO permite para este caso transmitir 5 Gbps a 4.8 Km en climas regulares donde las lluvias y nieblas sean ligeras. En RF solo se puede transmitir hasta 700 Mbps de los cuales la tasa de datos puede disminuir debido a la distancia y factores atmosféricos. La frecuencia en la cual opera los sistemas de comunicación FSO se encuentran en el orden de los THz y no requiere el uso de bandas licenciadas para su funcionamiento, a diferencia de RF el cual no puede proporcionar recursos como los de FSO

debido al limitado rango de espectro que se le autoriza; en este caso el equipo que se ha seleccionado trabaja en un rango de frecuencia de 4.9GHz a 6.4GHz el cual se encuentra restringido por cada país en donde opere. La potencia de transmisión de FSO es menor a la potencia utilizada en RF, además, si en RF se desea alcanzar distancias más largas y tasas de datos altas, se debe incrementar la potencia, lo cual no es recomendable debido a que se puede saturar el equipo receptor e incluso deteriorar el equipo. En cuanto a máximo consumo de potencia, para el equipo RF se tiene un consumo máximo de 12 W y promedio de 9.2 W; en cambio para el equipo FSO el consumo de potencia depende de la tasa de datos a transmitir; para este caso el TS5000 requiere un consumo de 20W, pero si se desea transmitir a una distancia más corta (entre los 700m) se puede utilizar un equipo que consume máximo 6W.

La seguridad de los datos es importante dentro de los sistemas de comunicación; FSO presenta un nivel alto de seguridad, ya que gracias a su estrecho ángulo de apertura que se propaga en el canal hace que sea complicado la interrupción del haz de láser; detectar la señal FSO y decodificarlas conlleva un proceso mucho más complejo, además en la mayoría de casos se trabaja con luz no visible haciendo más difícil la detección. Como menciona (Rodríguez, 2013), la elevada potencia y amplitud de la señal que emiten los sistemas RF muestran las razones de la preocupación a nivel de seguridad de datos ya que se puede interceptar con facilidad la señal. Se han usado protocolos de seguridad para evitar este problema, aunque algunos de ellos son vulnerables. La tecnología FSO gracias a la seguridad que otorga es usada en países como Rusia, Afganistán por las fuerzas militares, ya que asegura que la transmisión de datos e información no sea alterada por intrusos.

En cuanto al alineamiento, en FSO conlleva un proceso más complejo ya que se debe aplicar un mecanismo de alineación fina y debe manejarse con cuidado debido a que el telescopio es frágil. En RF la alineación es más sencilla, ya que solo se debe orientar la antena en la torre y fijarla a un brazo con vista al receptor.



**Figura 130.** Equipo FSO instalado en base aérea militar en Bagram, Afganistán

**Fuente.** Obtenido de (fSONA Networks)

La instalación en FSO es mucho más sencilla y rápida que en RF, ya que los equipos son ubicados en terrazas, balcones o ventanas de edificios sin problema, a diferencia de RF que se requiere el montaje de torres de telecomunicaciones para ubicar las antenas provocando mayor complejidad y tiempo al momento de instalar y configurar los equipos.

En cuanto a las limitaciones en FSO y RF, ambas tecnologías se ven afectadas por las condiciones atmosféricas lo cual provoca una degradación en la señal; RF por su parte se encuentra limitado por el espectro y distancia; FSO se ve limitada por la visibilidad, ya que, si no existe una visibilidad y apuntamiento entre el transmisor y receptor, se incrementará la BER y no existirá un buen rendimiento en el sistema.



**Figura 131.** Comparación del Haz de RF y FSO

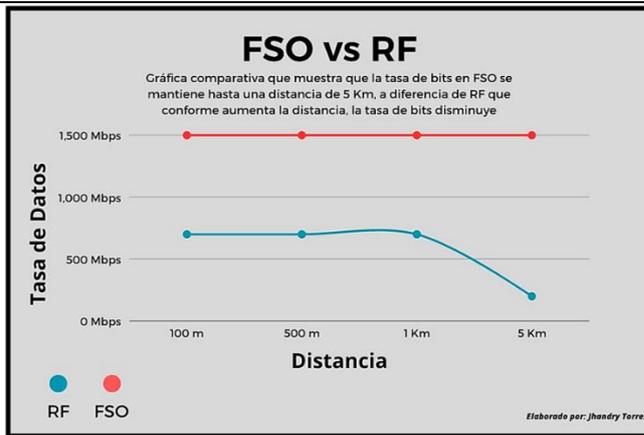
**Fuente.** Obtenido de (National Aeronautics and Space Administration, 2021)

En la *Figura 133*, se puede apreciar la diferencia que existe entre el haz que se propaga en RF (representado con color blanco) en donde se puede observar un desperdicio de energía y el haz de FSO (representado con color rojo). El haz de FSO es mucho más estrecho por lo que es más complicado interceptar, aunque también implica limitaciones ya que algún obstáculo puede interceptar la señal y causar problemas en el sistema.

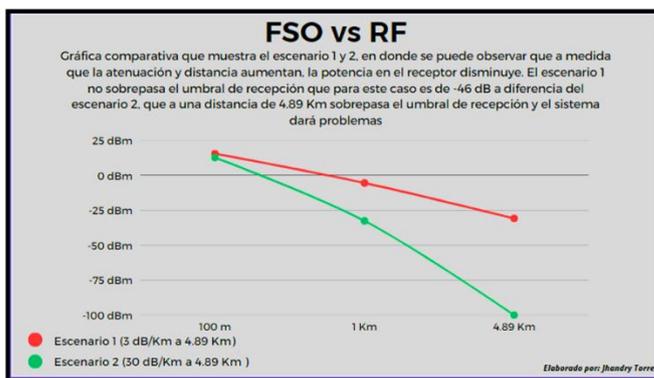
A continuación, se presenta una serie de gráficas representativas de FSO en base a lo realizado en este trabajo de integración curricular:

**Tabla 29.** Representación gráfica comparativa entre FSO y RF

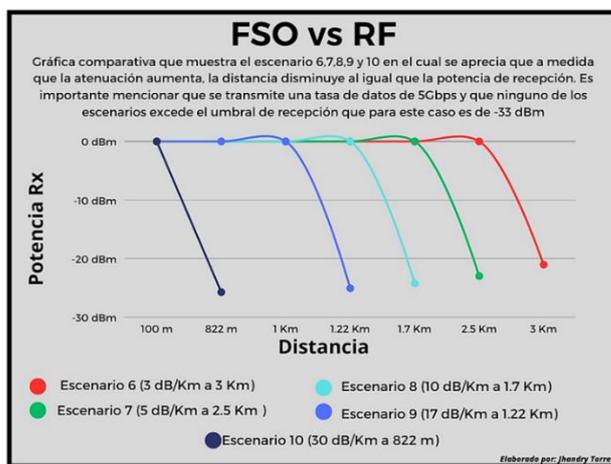
**Representación Gráfica comparativa entre FSO y RF**



Gráfica Comparativa que muestra que la tasa de bits en FSO se mantiene hasta una distancia de 5 Km, a diferencia de RF que conforme aumenta la distancia, la tasa de bits disminuye.



Gráfica comparativa que muestra el escenario 1 y escenario 2, en donde se puede observar que a medida que la atenuación y distancia aumentan, la potencia en el receptor disminuye. El escenario 1 no sobrepasa el umbral de recepción que para este caso es de -46dBm a diferencia del escenario 2 que a una distancia de 4.89 Km sobrepasa el umbral de recepción y el sistema dará problemas.



Gráfica comparativa que muestra el escenario 6,7,8,9 y 10 en el cual se aprecia que a medida que la atenuación aumenta, la distancia disminuye al igual que la potencia de recepción. Es importante mencionar que se transmite una tasa de datos de 5 Gbps y que ninguno de los escenarios excede el umbral de recepción el cual es de -33dB.

Obtenido de: Elaborado por el autor.

### 6.3 Fase 5: Análisis económico de las tecnologías FSO y RF

En esta fase se realiza un análisis económico tomando en cuenta los referenciales para cada tecnología; posteriormente se presenta una comparación económica entre FSO y RF en cuanto a los valores obtenidos, para determinar cuál es más conveniente en cuanto a costo beneficio para los usuarios. Cabe recalcar que los precios mostrados son referenciales, por esta razón se muestra un presupuesto aproximado para cada tecnología.

#### 6.3.1 Análisis económico FSO

Para el diseño que se ha planteado en este trabajo de tesis, se tiene un enlace PTP el cual requiere de un equipo transmisor y un equipo receptor. En la siguiente tabla, se muestra el presupuesto referencial requeridos para FSO:

**Tabla 30.** Presupuesto referencial Tecnología FSO

<b>Presupuesto Equipos Tecnología FSO</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
Equipo Marca MRV TS5000	u	2	\$ 14.300,00	\$ 28.600,00
Switch capa 3 Mikrotik	u	2	\$ 369.99	\$ 739.98
Binoculares	u	1	\$ 10.98	\$ 10.98
OTDR	u	1	\$ 550,00	\$ 550,00
Cable UTP	m	305	\$45,00	\$ 45,00
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 29.945,96</b>

Obtenido de: Elaborado por el autor.

Otra de las inversiones que se debe hacer en FSO para la parte del transmisor es el alquiler de la torre de telecomunicaciones para ubicar el telescopio o equipo; para la parte del receptor no es necesario, ya que se puede hacer uso del trípode de 1.30 m con base sostenible para el equipo. En el transmisor no se puede usar el trípode, ya que se requiere mayor altura para que exista una línea de vista entre el transmisor y receptor:

**Tabla 31.** Precio Alquiler de torre de telecomunicaciones cerro ventanas para FSO

<b>Presupuesto Referencial Alquiler de Torre de Telecomunicaciones para FSO</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Precio Unitario x mes</b>	<b>Precio Total Anual</b>
Renta de torre en el cerro ventanas	\$ 90,00	\$1.080,00
<b>TOTAL</b>		<b>\$1.080,00</b>

Obtenido de: Elaborado por el autor.

En la Tabla 31, se puede apreciar el presupuesto referencial total para la tecnología FSO:

**Tabla 32.** Presupuesto total tecnología FSO

<b>Presupuesto Total Tecnología FSO</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Precio Total</b>
Costo referencial tomando en cuenta equipos para FSO	<b>\$ 29.945,96</b>
Costo total arrendamiento de torre de telecomunicaciones en el transmisor (cerro ventanas)	<b>\$1.080,00</b>
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 31.025,96</b>

Obtenido de: Elaborado por el autor.

### 6.3.2 *Análisis económico RF*

Ahora, se realiza el presupuesto referencial de la tecnología RF, obteniendo:

**Tabla 33.** Presupuesto referencial de equipos para la Tecnología RF

<b>Presupuesto Referencial Equipos Tecnología RF</b>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
Router L3 Mikrotik	u	2	\$ 199,00	\$ 398,00
Baterías	u	2	\$ 167,00	\$ 334,00
Antena Mimosa c5X	u	2	\$ 569,99	\$ 1139,98
NanoLoco m5	u	1	\$ 35,00	\$ 35,00
Cable UTP	m	305	\$45,00	\$ 45,00
Inversor	u	1	\$ 300,00	\$ 300,00
Bobina de cable coaxial	m	305	\$ 55,00	\$55,00
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 2.306,98</b>

Obtenido de: Elaborado por el autor.

Como se sabe en RF los equipos principales deben estar ubicados en torres de telecomunicaciones; a continuación, se muestra los gastos que conlleva la ubicación de una torre arriostrada de 6 metros en la parte del receptor ubicado en la FEIRNNR y además en la parte del transmisor se muestran los gastos por arrendamiento de una de las torres ubicadas en el cerro ventanas.

**Tabla 34.** Gastos montaje torre arriostrada en la parte del receptor (FEIRNNR)

<b>Presupuesto Referencial Montaje de Torre de Telecomunicaciones en el Receptor</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Total</b>

Torre arriostrada de 6 metros de altura	2	\$ 300,00
Tensores de acero	5	\$ 175,00
Bobina de Cable de acero	1	\$180,00
Pararrayo Ionizante	1	\$1.500,00
<b>TOTAL</b>		<b>\$2.155,00</b>

Obtenido de: Elaborado por el autor.

Como se mencionó previamente, en la parte del transmisor para ubicar la antena se recomienda rentar una de las torres, ya que, si se decide montar una torre individual, se deberá pagar un valor más alto y además se deberá cancelar arriendo por el sitio donde se la va a ubicar. Así pues, se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 35.** Gastos alquiler de frecuencia y torre de telecomunicaciones en el cerro Ventanas

<b>Presupuesto Referencial Alquiler de Torre de Telecomunicaciones y Frecuencias para RF</b>		
Descripción	Precio Unitario x mes	Precio Total Anual
Renta de Torre en el cerro ventanas	\$ 90,00	\$1.080,00
Renta de Frecuencias a ARCOTEL	-----	\$472,00
<b>TOTAL</b>		<b>\$1.552,00</b>

Obtenido de: Elaborado por el autor.

En la Tabla 35, se aprecia el costo tentativo del arrendamiento de la torre de telecomunicaciones en el cerro ventanas y el arrendamiento de la frecuencia necesaria para operar. Es importante mencionar que el pago por frecuencia se lo realiza una vez al año y tiene una vigencia de hasta un año. Para ello se debe presentar una serie de requisitos obligatorios y requisitos especiales además de una serie de formatos dirigidos hacia ARCOTEL.

**Tabla 36.** Presupuesto referencial total para la tecnología RF

<b>Presupuesto Total Tecnología RF</b>	
Descripción	Precio Unitario
Costo total tomando en cuenta equipos para la instalación	\$2.306,98
Costo total montaje torre de telecomunicaciones en el receptor (FEIRNNR)	\$2.155,00
Costo total renta de frecuencia y torre de telecomunicaciones en el transmisor	\$1.552,00
<b>TOTAL</b>	
<b>\$6.013,98</b>	

Obtenido de: Elaborado por el autor.

### 6.3.3 Tabla comparativa de costos entre FSO y RF

**Tabla 37.** Comparación económica entre FSO y RF

<b>Tecnología</b>	<b>Inversión</b>
Free Space Optics	<b>\$31.025,96</b>
Radiofrecuencia	<b>\$6.013,98</b>

Obtenido de: Elaborado por el autor.

Claramente, se puede apreciar en la Tabla 37, que RF cuesta el 21% de lo que cuesta FSO, en donde se puede evidenciar una desventaja clara para la tecnología óptica. En FSO el costo de los equipos es bastante alto; en cambio en RF se puede mencionar que el montaje de las torres requiere un elevado costo, aunque el precio puede aumentar debido a que se debe pagar mensualmente el arrendamiento de la misma y las frecuencias asignadas por ARCOTEL.

En tiempo de vida del enlace, FSO saca una gran ventaja, ya que no se requiere dar mantenimiento cada cierto periodo de tiempo, a diferencia de RF en donde el equipo es más sensible y delicado, por lo que, si se desorienta o sufre algún golpe, se debería cambiar y abarcaría un aumento de gastos por mantenimiento.

El armazón de los equipos FSO son elaborados con aluminio fundido el cual mantiene al equipo blindado, volviéndolo más robusto al momento de instalarlo, ya que si alguien llegase a manipularlo no pueda dañarlo (Caizaluisa Caizaluisa, 2008, p. 44). Por otro lado, las antenas de RF no presentan esta confiabilidad y sus equipos tienden a sufrir daños comúnmente.

El cliente puede optar por implementar la tecnología FSO en un enlace entre edificios que no superen los 2 Km, de esta manera resulta rentable su inversión, ya que, en base al estudio realizado, dispondrán de una alta velocidad de conexión gracias a la alta tasa de datos que permite transmitir por medio de la luz óptica. Otro beneficio por parte de las organizaciones o empresas públicas es poder utilizar ambas tecnologías, en donde FSO funcionaría como una red backup o viceversa; ya que, como se pudo apreciar, algunos equipos FSO permiten transmitir señales RF a bajas tasas de datos, garantizando estabilidad en el servicio.

## 7 Discusión

El presente trabajo de integración curricular se ha enfocado desde un inicio al conocimiento y enfoque de la tecnología FSO, además de entender su funcionamiento, factores que limitan al sistema de comunicación y principales ventajas. La idea surge debido a que existe limitada información y estudios acerca de FSO, limitando a conocer nuevas formas de transmisión de datos a altas velocidades. En Ecuador aún no se ha implementado un sistema de comunicación FSO. Se realiza además una comparativa con la tecnología RF la cual es bastante conocida y utilizada desde hace varios años en nuestro entorno.

Cuando se ejecutaron las simulaciones se aumentó la tasa de datos a transmitir desde 500 Mbps hasta 2.5 Gbps a una distancia de 4.89 Km con atenuación de 3dB/Km, en donde se valida que el sistema soporta hasta una tasa de transmisión de 1 Gbps; a 2.5 Gbps aún se puede recibir datos, pero el sistema de comunicación tendrá un factor de calidad por debajo de los valores mínimos.

Es importante destacar que, pese a que se toma una distancia bastante amplia (4.89 Km), el enlace logra un buen rendimiento transmitiendo hasta 1 Gbps, ya que la mayoría de equipos FSO permiten transmitir una tasa de datos alta hasta 2 Km máximo.

Se decidió además verificar el rendimiento del equipo seleccionado en base a sus especificaciones técnicas con las simulaciones, en donde se pudo determinar que, bajo atenuaciones de 3, 5, 10, 17 y 30dB/Km a distancias de 3 Km, 2.5 Km, 1.7 Km, 1.22 Km y 820 m respectivamente, se puede transmitir hasta una tasa de datos máxima de 5 Gbps.

Del trabajo realizado por (Caizaluisa Caizaluisa, 2008) menciona que FSO se ve afectado por las condiciones atmosféricas presentadas en el medio, lo cual se ha logrado comprobar en base a las simulaciones que se ha desarrollado para varios escenarios bajo diferentes valores de atenuación.

En el estudio y diseño del enlace FSO realizado por (Vinicio, 2011) muestra un análisis matemático para FSO y se resalta que difiere en la distancia de los enlaces y parámetros como potencia de transmisión, divergencia del haz, sensibilidad y longitud de onda; ya que para el caso nuestro, se ha utilizado otro equipo con diferentes parámetros, aunque el aporte de cierta ecuaciones permitió obtener varios resultados importantes para determinar el análisis técnico de FSO. Adicional, en el presente trabajo de integración curricular se añade el análisis de comportamiento del canal y simulación para RF.

En otro de los estudios realizados por (Suarez & Gino, 2017) se ejecuta una simulación de FSO en el cual se hace uso de amplificadores ópticos para amplificar la señal y obtener un mejor rendimiento a la salida del receptor a una distancia de 35 Km con una atenuación de 0.43 dB/Km; aquí se difiere de nuestras simulaciones ya que no se hace uso de amplificadores ópticos con el objetivo de mostrar resultados más reales con valores de atenuación más altos. Además, se realiza un estudio en base a las condiciones climáticas de la ciudad de Loja para lograr obtener resultados más precisos. Aunque se logra validar que, si se tiene una distancia bastante amplia con una atenuación alta, el enlace FSO no funcionará y se tendrá una alta tasa de bits errados.

Se analiza varios modelos de equipos FSO, con la finalidad de poder determinar cual tiene un mejor rendimiento en el escenario planteado. Para ello se usó como base el proyecto de investigación de (Gohil, 2019) el cual brinda información acerca de ciertos competidores notables en el campo de la óptica en el espacio libre y también de socios clave para la distribución de este tipo de sistemas. De allí se determina que el equipo TS5000 ofrece grandes ventajas para poder operar sin problema en el enlace propuesto.

En el análisis económico realizado, causó sorpresa el precio de los equipos FSO, ya que son bastante caros y complicados al momento de adquirirlos, pero son equipos bastante robustos y con excelente rendimiento lo cual compensa su elevado precio. Como se menciona previamente, en Ecuador no existe un distribuidor de equipo FSO por lo que se debe recurrir a tiendas online de Rusia, República Checa, Afganistán, entre otros.

Las comunicaciones inalámbricas transmitidas por RF se encuentran limitadas por una baja tasa de datos, así lo menciona (Goyas Gutiérrez et al., 2013) en su trabajo de tesis. Además, en base a los resultados que se han obtenido en el presente trabajo, se logra validar que FSO permite integrar altas tasas de transmisión y se comparte la opinión del autor que menciona “La mayor parte del espectro RF se encuentra ocupado y se encuentra regulado”.

A diferencia de la mayoría de investigaciones que se ha realizado de FSO, la mayoría no utiliza escenarios reales en los cuales el sistema de comunicación pueda operar, sino que más bien se describe de forma general su funcionamiento. Los resultados que se ha obtenido en el presente trabajo de integración curricular han sido evaluados elaborando previamente un análisis del clima en la ciudad de Loja, también un estudio de los sitios en donde se realiza el diseño para ambas tecnologías y utilizando valores reales ofrecidos por los diferentes distribuidores de equipos para FSO y RF.

El aporte que ofrece el siguiente trabajo de integración curricular es el conocer los beneficios que nos brindan las comunicaciones ópticas en el espacio libre en nuestro medio, además de entender los factores adversos que afectan a un sistema de comunicación óptico inalámbrico y poder comparar con más tecnologías que se usan actualmente para la transmisión de datos; en este caso la comparativa se ha realizado con RF.

## 8 Conclusiones

Para concluir el presente trabajo de integración curricular, se menciona que cada uno de los objetivos planteados en la introducción se cumplieron con éxito, así mismo se han completado cada una de las fases planteadas dentro de la metodología.

Con esto en mente, se ha encontrado útil articular las siguientes conclusiones en base a los objetivos específicos planteados para el diseño y análisis comparativo de las tecnologías FSO y RF:

Se realizó la revisión bibliográfica acerca de las características técnicas y fundamentos de FSO con la finalidad de poder obtener criterios comparativos con RF, en donde se determinó parámetros comparativos como:

- Potencia de transmisión
- Frecuencia a la que opera cada tecnología
- Sensibilidad de los equipos
- Uso de bandas licenciadas
- Tasa de datos o capacidad
- Nivel de seguridad de los datos

También, se elaboró el diseño del escenario para ambas tecnologías en donde se destaca las condiciones climáticas del sitios así como la selección y ubicación de los equipos tanto en la parte del transmisor como receptor y distancia del enlace; además se hizo uso del software Optisystem el cual permitió ejecutar la simulación FSO a diferentes tasas de datos y diferentes valores de atenuación tomando en cuenta pérdidas geométricas en el sistema de comunicación, en donde se pudo determinar que es posible transmitir una tasa de datos de 500 Mbps a una distancia de 4.89Km teniendo un escenario de lluvias y nieblas ligeras, así mismo se logró validar que a la misma distancia con un valor de atenuación de 30dB/Km el enlace no funcionará.

Para RF se hizo uso del software Radio Mobile que otorgó los resultados expuestos anteriormente, en donde se analizó parámetros como zonal de Fresnel, perdidas por propagación en el espacio libre, umbral de recepción y su respectiva comprobación con el análisis matemático.

Atendiendo a lo planteado se realizó el análisis técnico de equipamiento para FSO y RF, además en esta sección se decidió plantear un análisis matemático en base a ciertas

ecuaciones obtenidas gracias al primer objetivo específico planteado, donde se aplicó la ley de Beer, además de encontrar valores de atenuación geométrica, atenuación atmosférica, coeficiente de atenuación, pérdidas en los sistemas FSO y finalmente el margen de enlace en donde se determinó que a una atenuación de 3 dB/Km con una distancia de 4.89 Km el enlace es óptimo y tendrá un buen rendimiento, en cambio a 30 dB/Km a una distancia de 4.89 Km el enlace presenta problemas para interpretar la señal que recibió desde el transmisor.

Finalmente, se presentó el análisis económico para cada tecnología tomando en cuenta los costos referenciales de equipos y montaje de torres de telecomunicaciones si en un futuro se decide implementar la tecnología FSO.

En vista de todo lo que se ha mencionado, se concluye que la tecnología FSO presenta una serie de ventajas superiores que RF; los resultados obtenidos muestran que los sistemas de comunicación FSO permiten transmitir tasas de datos superiores a las que RF permite, además que FSO dispone de un amplio espectro de bandas de frecuencia y no se ve limitado como es el caso de RF.

Por un lado, RF es uno de los mejores métodos de comunicación cuando se transmite bajas velocidades de datos a distancias cortas; sin embargo, FSO a distancias cortas puede llegar a alcanzar velocidades de transmisión de hasta 10 Gbps en condiciones climáticas regulares.

Por otro lado, la tecnología FSO garantiza la seguridad de los datos que se propagan en el espacio libre gracias a la estrecha apertura del haz que aumenta una vez que atraviesa el canal; así como la seguridad de los equipos, los cuales tienen una interfaz robusta y son ubicados en partes altas de edificios.

Como dato adicional, en base al trabajo realizado se puede optar por usar ambas tecnologías (FSO y RF) como una sola red, es decir, si se dispone de un sistema de comunicación FSO en un medio el cual se ve afectado por cualquier irrupción, se realice una conmutación con la tecnología RF manteniendo el enlace en funcionamiento, pero con una reducción de tasa de datos transmitidos hasta que se pueda restablecer el sistema FSO (*ver anexo 13*).

En cuanto a temas económicos, se aprecia que FSO conlleva mayores gastos a diferencia de RF, pero con la ventaja de que su implementación será más sencilla al igual que

su despliegue y el sistema de comunicación óptico inalámbrico no requerirá pagos por arriendo de torres o de frecuencias lo que puede incrementar los gastos en RF.

## 9 Recomendaciones

Para finalizar el siguiente trabajo de integración curricular, en base a lo expuesto previamente se presentan las siguientes recomendaciones que es importante tener en cuenta si en un futuro se desea ampliar los conocimientos y realizar la implementación en base a FSO.

- Como primer punto, se recomienda o sugiere poder analizar a profundidad la tecnología FSO para poder entender cada elemento que permite el funcionamiento de la misma, ya una vez que se tenga una visión clara, se puede proponer como una alternativa a posibles soluciones para la transmisión de datos seguros.
- Como segundo punto antes de realizar la simulación es necesario hacer una investigación para encontrar el software adecuado que muestre los resultados que se desea obtener.
- Como tercer punto, se recomienda investigar cada uno de los valores como potencia de transmisión, longitudes de onda, sensibilidad, etc. a ingresar en el escenario que se simulará para poder sustentar porque razón se usan dichos valores.
- Una vez que se tiene armado el escenario FSO a simular, es necesario poder entender para que funciona y que función cumple cada componente que se está utilizando.
- Si en FSO se desea transmitir a una distancia que supere los 5 Km con altas tasas de atenuación, se puede recomendar hacer uso de repetidores para lograr cubrir la distancia total. Desde el punto de vista del autor de este trabajo, no se recomienda hacer uso de amplificadores ópticos debido a que requieren de un cableado de fibra óptica para amplificar la señal y no tendría sentido, ya que se busca que el enlace sea netamente propagado por el espacio libre sin necesidad de usar algún tipo de cableado.
- Como cuarto punto, si al momento de ejecutar la simulación se observa que el diagrama de ojo muestra un factor de calidad superior a 100 y un mínimo BER de 0, se recomienda aumentar valores de atenuación y pérdidas en el canal FSO, ya que en un escenario real siempre habrá cualquier tipo de obstrucción que degrade la señal por más mínimo que sea.
- Un criterio importante para analizar, es la diferencia de potencia que se obtiene al transmitir y recibir la señal. Para ello se recomienda verificar que los valores de potencia obtenidos en el receptor no superen el valor de sensibilidad ni el margen de enlace del equipo, debido a que se estaría determinando que el enlace no está siendo manejado de manera correcta si este valor se encuentra por encima de los mismos.

- Adicionalmente, se puede plantear más temas de investigación en el cual se realice un diseño de backup utilizando la tecnología FSO para la Universidad Nacional de Loja.
- Finalmente, se recomienda mantenerse actualizado en cuanto a los avances de FSO ya que las tecnologías de la información y la comunicación se encuentran en constante actualización.

## 10 Bibliografía

- Abadi, M. M., Cox, M. A., Alsaigh, R. E., Viola, S., Forbes, A., & Lavery, M. P. J. (2019). A space division multiplexed free-space-optical communication system that can auto-locate and fully self align with a remote transceiver. *Scientific Reports 2019 9:1*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55670-1>
- Abhayawardhana, V. S., Wassell, I. J., Crosby, D., Sellars, M. P., & Brown, M. G. (2005). Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 61(1), 73–77. <https://doi.org/10.1109/vetecs.2005.1543252>
- Airspan. (2023). *Antenna Mimoso C5x Datasheet*. 4. <https://mimoso.co/uploads/Mimoso-Datasheet-C5x-DS-0016-16.pdf>
- Akinbolati, A., & Ajewole, M. O. (2020). Investigation of path loss and modeling for digital terrestrial television over Nigeria. *Heliyon*, 6(6), e04101. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04101>
- Al-Gailani, S. A., Mohd Salleh, M. F., Salem, A. A., Shaddad, R. Q., Sheikh, U. U., Algeelani, N. A., & Almohamad, T. A. (2021). A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks. *IEEE Access*, 9, 7353–7373. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3048049>
- Alkholidi, A. G., Altowij, K. S., Alkholidi, A. G., & Altowij, K. S. (2014). Free Space Optical Communications — Theory and Practices. *Contemporary Issues in Wireless Communications*. <https://doi.org/10.5772/58884>
- Artolink. (n.d.). *Artolink, FSO technology*. Retrieved January 4, 2022, from <http://artolink.com/page/what/>
- Artolink. (2023). *Artolink Products*. [www.Artolink.Com](http://www.artolink.com/). <http://artolink.com/>
- Bloom, S., Korevaar, E., Schuster, J., & Willebrand, H. (2003). Understanding the performance of free-space optics [Invited]. *Journal of Optical Networking*, 2(6), 178. <https://doi.org/10.1364/jon.2.000178>
- Borson, M. (2017). *Free-Space Optical Communications Comes of Age*. [Photonics.Com](https://www.photonics.com/Articles/Free-Space_Optical_Communications_Comes_of_Age/a61909). [https://www.photonics.com/Articles/Free-Space\\_Optical\\_Communications\\_Comes\\_of\\_Age/a61909](https://www.photonics.com/Articles/Free-Space_Optical_Communications_Comes_of_Age/a61909)

- Burdah, S., Alamtaha, R., Samijayani, O. N., Rahmatia, S., & Syahriar, A. (2019). Performance analysis of Q factor optical communication in free space optics and single mode fiber. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 6(3), 167–175. <https://doi.org/10.13189/ujeee.2019.060311>
- Caizaluisa Caizaluisa, E. J. (2008). *Diseño de una Red con Tecnología Láser Free Space Optics (FSO), Para el Campus de la ESPE y Su Comparación con la Fibra Óptica* [Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4232/1/CD-1619.pdf>
- Carlos, R., & Ron, V. (2008). *Inalámbrica Óptica Basada En La Tecnología Fso ( Free Space Optical )*,. 190.
- Comprehensive, T. M., Space, F., & Wireless, O. (2005). *TereScope ® Series*.  
ec system. (2023). *Products of EC SYSTEM*. [Www.Ecosystem.Cz. http://www.ecsystem.cz/en/about/company-profile](http://www.ecsystem.cz/en/about/company-profile)
- Espectro.org. (2018). *El Espectro Electromagnético*. <https://espectro.org.br/es/content/el-espectro-eletromagnético>
- Faruk, N., Ayeni, A. a., & Adediran, Y. a. (2013). On the study of empirical path loss models. *Progress In Electromagnetics Research B*, 49(February), 155–176.
- Ford, B., & Ralph, S. (2005). *Optical Access*. 44(0), 0–1. <https://doi.org/10.1201/9781420030662.ch5>
- Forrest, S. (1986). *Optical detectors: Three contenders: Depending on the application, the photoconductor, p-i-n diode, or avalanche photodiode may prove the best choice | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore*. IEEE SPECTRUM. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6370907>
- fSONA. (2023). *fSONA: free Space Optical Networking Architecture*. Fsona.Com. <http://www.fsona.com/>
- fSONA (wireless communication). (2022). *fSONA: La Empresa*. <http://www.fsona.com/company.php>
- Gohil, A. (2019). *Free Space Optical Communication Senior Project Final Definition Report*.
- Goyas Gutiérrez, M. A., Jhonny, & Vargas Cruz, D. (2013). *Escuela Superior Politécnica Del Litoral Facultad De Ingeniería En Electricidad Y Computación*.

- Hapo. (2021). *Tecnología Inalámbrica*. <https://bighardware.es/tecnologia-inalambrica-definicion-ejemplos/>
- Isabona, J., Imoize, A. L., Ojo, S., Lee, C. C., & Li, C. T. (2022). Atmospheric Propagation Modelling for Terrestrial Radio Frequency Communication Links in a Tropical Wet and Dry Savanna Climate. *Information (Switzerland)*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/info13030141>
- Jia, Z., Zhu, Q., & Ao, F. (2006). Atmospheric attenuation analysis in the FSO link. *International Conference on Communication Technology Proceedings, ICCT*. <https://doi.org/10.1109/ICCT.2006.341919>
- Johnson, S. (2022). *The era of infrared laser comms for space is upon us | Laser Focus World*. Laser Focus World. <https://www.laserfocusworld.com/optics/article/14285327/the-era-of-infrared-laser-comms-for-space-is-upon-us>
- Kaushal, H., Jain, V. K., & Kar, S. (2017). *Free-Space Optical Channel Models* (Issue February 2018). [https://doi.org/10.1007/978-81-322-3691-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-81-322-3691-7_2)
- Koziol, M. (2021). Duke University and Facebook's Connectivity Lab Bring Better Optical Communications to Light The technique could eventually lead to terabit per second laser links. *IEEE SPECTRUM*. <https://spectrum.ieee.org/duke-university-and-facebooks-connectivity-lab-develop-plasmonics-antenna-for-optical-communications>
- Langaroody, M. H. (2013). *DESIGN AND PERFORMANCE OF A 1550NM FREE SPACE OPTICAL COMMUNICATIONS LINK* (Vol. 27037, Issue December). CALIFORNIA STATE UNIVERSITY, NORTHRIDGE.
- Le, H. D., & Pham, A. T. (2022). Link-Layer Retransmission-Based Error-Control Protocols in FSO Communications: A Survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 24(3), 1602–1633. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3175509>
- Majumdar, A. (2015). *Advanced Free Space Optics (FSO) A system Approach* (2015a ed.). Septiembre, 2014. [https://books.google.com.ec/books?id=b7h\\_BAAAQBAJ&printsec=copyright&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=b7h_BAAAQBAJ&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Manning, C. (2018). *Radio Spectrum*. [http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/spectrum/radio\\_spectrum](http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/spectrum/radio_spectrum)

- Mawira, A. (1992). Models for the spatial correlation functions of the (Log)-Normal component of the variability of vhf/uhf field strength in Urban environment. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 436–440. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.1992.279892>
- Melvin, A., & Rivera, R. (2013). *Diseño de interconexión para enlace de microondas punto a punto entre las comunidades de San Carlos y el archipiélago de Solentiname*. 1–81.
- Mikołajczyk, J., Bielecki, Z., Bugajski, M., Piotrowski, J., Wojtas, J., Gawron, W., Szabra, D., & Prokopiuk, A. (2017). Analysis of free-space optics development. *Metrology and Measurement Systems*, 24(4), 653–674. <https://doi.org/10.1515/mms-2017-0060>
- Mocckom AO. (2019). *ARTOLINK Field Test*. Youtube. [https://www.youtube.com/watch?v=ccwiRu\\_7S7Y](https://www.youtube.com/watch?v=ccwiRu_7S7Y)
- Molina Sierra, P. (2013). *Radiocomunicaciones*. SlideShare. <https://es.slideshare.net/SamyYamy/radiocomunicaciones-28136022>
- National Aeronautics and Space Administration. (2021). *9.0 Communications / NASA*. NASA. <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/communications#9.6>
- Networks, O., & Mukherjee, B. (2002). Free space optical communication. In *LIA Today* (Vol. 10, Issue 1). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813365-1.00008-4>
- Pcr, A., & Kit, L. (2012). Data Sheet Data Sheet. *고생물학회지*, 31402(September 2004), 0–1. [http://www.papersearch.net/view/detail.asp?detail\\_key=10000715](http://www.papersearch.net/view/detail.asp?detail_key=10000715)
- Ranvier, S. (2004). *Path loss models: S-72.333 Physical layer...* - Google Scholar. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Path loss models%2C S-72.333 Physical layer methods in wireless communication systems&author=S. Ranvier&publication\\_year=2004](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Path+loss+models%2C+S-72.333+Physical+layer+methods+in+wireless+communication+systems&author=S.+Ranvier&publication_year=2004)
- Rao, S., Digge, J., & Rindhe, B. U. (2021). Free Space Optics for 5G and beyond. *2021 6th International Conference for Convergence in Technology, I2CT 2021*, 21–25. <https://doi.org/10.1109/I2CT51068.2021.9418147>
- Recommendation ITU-R P.1817-1. (2012). *Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links Policy on Intellectual Property Right (IPR)*. 1, 17. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1817-1-201202-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1817-1-201202-I!!PDF-E.pdf)

- Rivera Chávez, V. H. (2021). Conceptos de Radiofrecuencia. In *Fundamentos de RF* (p. 147). [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/nocedal\\_d\\_jm/capitulo1.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/nocedal_d_jm/capitulo1.pdf)
- Rodriguez, A. (2013). *La Seguridad en la Tecnología FSO*. Seguridadprofesionalhoy. <https://www.seguridadprofesionalhoy.com/la-seguridad-en-la-tecnologia-fso/#:~:text=Los niveles de seguridad se,cableado como en tecnología inalámbricas.>
- Saha, D., Roy, J., Fiaboe, K. F., & Kumar, P. (2019). Design and analysis of FSO (Free Space Optics) link at high bit rate. *Proceedings of the 3rd International Conference on Inventive Systems and Control, ICISC 2019, Icisc*, 62–66. <https://doi.org/10.1109/ICISC44355.2019.9036358>
- Salazar-palma, M., & Bonneau, R. J. (2003). *A survey*.
- Salazar, J. (2016). *Redes Inalámbricas*. 40. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01\\_R\\_ES.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01_R_ES.pdf)
- Saracual, R. (2005). *Free Space Optics*. <https://www.oocities.org/es/lobatonmm/tempresa/FSO.htm>
- Scarpaty, J. (2021). *Radiofrequency (RF)*. SearchNetworking. [https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/radio-frequency#:~:text=Radio frequency \(RF\) is a,as 9 kilohertz \(kHz\).](https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/radio-frequency#:~:text=Radio frequency (RF) is a,as 9 kilohertz (kHz).)
- Seymour, T., & Shaheen, A. (2011). History of Wireless Communication. *Review of Business Information Systems (RBIS)*, 15(2), 37–42. <https://doi.org/10.19030/rbis.v15i2.4202>
- sincables. (2023). *Características Ubiquiti NanoStation LocoM5 13dBi airMAX M5 5GHz Antena AP CPE*. Sincables.Ec. <https://www.sincables.com.ec/product/ubiquiti-nanostation-locom5-antena-5ghz-outdoor/>
- Specifications, E., & Specifications, M. (2023). Flexible RG214 Coax Cable Double Shielded with Black PVC Jacket RG214 / U Flexible RG214 Coax Cable Double Shielded with Black PVC Jacket. *Pasternak*, 1–3.
- Suarez, M., & Gino, A. (2017). *Estudio y simulación de un sistema de comunicaciones usando la tecnología FSO*.
- The National Aeronautics and Space Administration. (2018). *Radio Spectrum | NASA*. [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/spectrum/radio\\_spectrum/](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/spectrum/radio_spectrum/)

- The National Aeronautics and Space Administration. (2022). *Troposphere / NASA Space Place – NASA Science for Kids*. Spaceplane.Nasa.Gov. <https://spaceplace.nasa.gov/troposphere/sp/>
- Varela, A., & Ron, S. (2022). *Geografía y Clima del Ecuador*. BioWeb Ecuador. <https://bioweb.bio/faunaweb/mammaliaweb/GeografiaClima/>
- Vinicio, S. B. (2011). *Departamento De Eléctrica Y Electrónica Carrera De Ingeniería En Electrónica Y Ingeniería “ Estudio Y Diseño De Un Enlace Mediante Un Sistema De Comunicación Óptica ( Fso ) En El Espacio Libre Los Laboratorios Del Departamento De Eléctrica Y Electrónica*. 122. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/4527>
- Wang, Z., Shi, W., Liu, W., Zhao, Y., & Kang, K. (2020). Performance analysis of full duplex relay assisted mixed RF/FSO system. *Optics Communications*, 474, 126170. <https://doi.org/10.1016/J.OPTCOM.2020.126170>
- Weather Spark. (2022). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Loja*. Weatherspark. <https://es.weatherspark.com/y/19339/Clima-promedio-en-Loja-Ecuador-durante-todo-el-año#Sections-Precipitation>
- Willebrand, H., & Ghuman, B. S. (2002). *Heinz\_Willebrand\_Baksheesh\_Ghuman\_Free\_Space\_OpBookFi*. 278.
- Xu, G., Zhang, X., Wei, J., & Fu, X. (2004). Influence of atmospheric turbulence on FSO link performance. *Optical Transmission, Switching, and Subsystems*, 5281, 816. <https://doi.org/10.1117/12.523470>

## 11 Anexos

### Anexo 1. Especificaciones técnicas equipo SONAbeam 1250 E+

#### Free-Space Optical

---

Transmission rates	1.25 Gbps, full duplex
Operational range	3 dB/km clear air: 500m to 3600m (1640ft to 2.25mi)  10 dB/km extreme rain: 500 m to 1750m (1640ft to 1mi)
Laser output power	800 mW peak (2 x 400 mW)
Free-space wavelength	1550 nm
Receive aperture	10 cm (4 in) diameter
Interface options	1000-Base-SX (850 nm) 1000-Base-LX (1300 nm)

#### Mechanical / Electrical / Environmental

---

Operating temperature	-40°C to 50°C (-40°F to 122°F)
Pointing stability	120 km/h (75 mp/h) operating, >160 km/h (100 mp/h) survival
Environmental seal	Water-tight, IP66 and NEMA-4 certified
Dimensions (W*H*D)	25 x 33 x 46 cm; 10 x 13 x 18 in
Weight	8 kg (18lbs)
Input voltage	-48 VDC or PoE
Power consumption (electronics & heater)	40 watts max (w/ heater)

#### Carrier-Class Reliability and Durability

---

Window heating	Prevents fogging, snow/sleet accumulation
Laser cooling	Active solid state cooling to 35°C (95°F)
Power supply	Telco grade, >550,000 hour
Structure	Aluminum housing/steel mount

## Anexo 2. Especificaciones técnicas equipo SONAbeam M

### Free-Space Optical

---

<b>Transmission rates</b>	Fast Ethernet: 125 Mbps, full duplex; OC-3/STM-1: 155 Mbps, full duplex
<b>Operational range</b>	3 dB/km: clear air: 300m to 5400m (980ft to 3.4mi) 10 dB/km extreme rain: 300m to 2400m (980ft to 1.5mi)
<b>Laser output power</b>	640 mW (4 transmitters at 160 mW)
<b>Free-space wavelength</b>	1550 nm
<b>Receive aperture</b>	20 cm (8 in) diameter

### Interface Option 1 - 1000-Base-SX (850 nm)

---

<b>Data physical interface</b>	Multimode fiber, LC
<b>Fiber xmtr/rcvr wavelength</b>	850 nm nominal
<b>Fiber xmtr output power</b>	-9 dBm (min), -3 dBm (max)
<b>Fiber rcvr input power</b>	0 dBm (min), -17 dBm (max)

### Interface Option 2 - 1000-Base-LX (1310 nm)

---

<b>Data physical interface</b>	Singlemode fiber, LC
<b>Fiber xmtr/rcvr wavelength</b>	1310 nm nominal
<b>Fiber xmtr output power</b>	-11 dBm (min), -3 dBm (max)
<b>Fiber rcvr input power</b>	-20 dBm (min), -3 dBm (max)

### Mechanical / Electrical / Environmental

---

<b>Operating temperature</b>	-40 to 60°C (-40 to 140°F)
<b>Solar filters</b>	2 spatial, 2 spectral
<b>Pointing stability</b>	120 km/h (75 mp/h) operating, >160 km/h (100 mp/h) survivability

### Anexo 3. Especificaciones técnicas equipo SONAbeam Z

#### Free-Space Optical

---

<b>Datarate/protocol</b>	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
<b>Operational range</b>	3 dB/km clear air: 50m to 500m (160ft to 0.3mi) 10 dB/km extreme rain: 50m to 350m (160ft to 0.2mi)
<b>Laser output power</b>	160 mW
<b>Free-space wavelength</b>	1550 nm
<b>Receive aperture</b>	50 mm (2 in) diameter

#### Interface Option 1 - 1000-Base-SX (850 nm)

---

<b>Data physical interface</b>	Multimode fiber, LC
<b>Fiber xmtr/rcvr wavelength</b>	850 nm nominal
<b>Fiber xmtr output power</b>	-9 dBm (min), -3 dBm (max)
<b>Fiber rcvr input power</b>	0 dBm (min), -17 dBm (max)

#### Interface Option 2 - 1000-Base-LX (1310 nm)

---

<b>Data physical interface</b>	Singlemode fiber, LC
<b>Fiber xmtr/rcvr wavelength</b>	1310 nm nominal
<b>Fiber xmtr output power</b>	-11 dBm (min), -3 dBm (max)
<b>Fiber rcvr input power</b>	-20 dBm (min), -3 dBm (max)

#### Mechanical / Electrical / Environmental

---

<b>Operating temperature</b>	40°C to 60°C (-40°F to 140°F)
<b>Pointing stability</b>	120 km/h (75 mp/h) operating, >160 km/h (100 mp/h) survivability
<b>Environmental seal</b>	Water-tight, IP66 and NEMA-4 Certified
<b>Dimensions (W*H*D)</b>	25 x 33 x 46 cm; 10 x 13 x 18 in
<b>Weight</b>	10 kg (22 lbs);
<b>Input voltage</b>	-48 VDC (-40 V to -57 V) or 100-240 VAC
<b>Power consumption</b>	25 watts (no heater)

**Anexo 4. Especificaciones técnicas equipo EL-10Gex**

Bandwidth, Mbit/s	10312,5-30937,5 Full Duplex
Wavelength, nm	1550
Basic interfaces	3 ports 10G SFP+
Fade margin at a distance of 1 km,dB	18
Latency time of optical channel, ms	< 0,005
Links distance, m for availability 0,997	1300
Method of keep link direction	Autotracking system
Laser safety IEC 80625	1M
Power supply	AC 100-242, 50-60 GHz
	DC 48+- 12V
Category temperature range of outdoor units, C	-40...+50
Dimensions, mm	
optical unit	480x285x300
interface unit	445x220x45 (19'',1U)
Weight, kg	
optical unit	9,4
interface unit	2,15
interface cable	4,5
Cables lenght, m	< 50
Management, monitoring	UDP (firm software), SNMP traps, MIB file
OU indication	3 indicators: Power, link signals, link direction
Service connection	10/100 Base-TX, RJ45

**Anexo 5. Especificaciones técnicas equipo EL-IGL**

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

**Anexo 6. Especificaciones técnicas equipo FSO M1-1GE-L**

## **1 Gbit/s ARTOLINK models**

For 1 Gbit/s links is proposed Artolink model M1-GE-L. These model can transmit data with speed 1 Gbit/s at distances up to 4400 m.

- Autotracking
- Narrow beams of emission – secure data
- Wavelength 1550 nm
- Special interface optimized for transmission in the atmosphere
- Double channel technology with backup supply
- Automatic emitting control
- Built-in service channel
- Built-in telescope for easy targeting
- Built-in defroster
- Active link loss forwarding (ALLF) system
- IP monitoring
- SNMP alerts

**Anexo 7. Especificaciones técnicas equipo FSO M1-10GE**

## **10 Gbit/s ARTOLINK model**

Only one wireless communication system on the world market which can transfer data with speed 10 Gbit/s in the full-duplex mode at distances up to 1500m !

- Autotracking
- Narrow beams of emission – secure data
- Wavelength 1550 nm
- Special interface optimized for transmission in the atmosphere
- Autoswitching backup equipment power supply
- Automatic emitting control
- Built-in service channel
- Built-in telescope for easy targeting
- Built-in defroster
- IP monitoring
- SNMP alerts

Anexo 8. Especificaciones técnicas equipo TS5000

MODEL/ PROD CODE		TS8/G/4E1/VS or TS8/G/4T1/VS TS5000/4E1 or TS5000/4T1	TS10/G/ETH/VS TS5000/ETH	TS155/G/XXX/VS or TS155/G/XXX/FS TS5000/155 or TS5000/155-F Std. model: TS155/G M3C/VS	TS1000/G/XYZ/V* TS5000/G Standard model TS1000/G/M8C/VS
Applications/ Data Protocol		4E1:4x2.048Mbps or 4T1:4x1.55Mbps G.703/G.704	Ethernet (10Mbps)	Fast Ethernet, ATM, OC3, STM1, E3,T3, OC1/STM0 & Open Protocol	Gigabit Ethernet
Performance	Rate		10Mbps	1-155Mbps	100-1500Mbps
	Range <sup>(1)</sup> @ 3 dB/km	8700 m	8700 m	5200 m	3000 m
	@ 5 dB/km	5000 m	5000 m	4000 m	2500 m
	@10 dB/km	3200 m	3200 m	2540 m	1700 m
	@17 dB/km	2170 m	2170 m	1760 m	1220 m
	@30 dB/km	1400m	1400m	1150 m	820 m
	Minimum Range	400m	400m	600 m	500 m
Bit error rate	Less than 1E - 9 (unfaded)	Less than 1E - 9 (unfaded)	Less than 1E - 12 (unfaded)	Less than 1E - 12 (unfaded)	
MTBF	10 years				
Transmitter	Light source	3 x Lasers			
	Wavelength	830 - 860 nm			
	Total Output power	85 mW			120 mW
Receiver	Beam divergence	2 mrad			
	Detector	APD			
	Field of view	2 mrad			
Interface	Sensitivity	-55 dBm	-55 dBm	-46 dBm	-33 dBm
	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	RJ45	SC (other connectors available)	
	Impedance	E1: 75 Ohm or 120 Ohm			
	Cable	Coax or STP			
	Cable loss	Supports Short and Long haul trunks			
	Wavelength			1300 nm (other wavelength available)	850 nm (other wavelength available)
	Output power			-17 ± 3 dBm	-4 ± 9.5 dBm
Power Supply	Receiver operating range			-14 to - 30 dBm	0 to - 17 dBm
	Voltage range	Factory set: 100-240 VAC @ 35/60 Hz or 35-60 VDC (V3)			
Environmental Information	Power consumption	22 W			
	Operating temperature	-30° C to +50° C			-30° C to +50° C
	Storage temperature	-50° C to +70° C			
	Humidity	95% non-condensing			
	Housing	Weatherproofing: IP68			
Mechanical Design	Eye safety Class	1M			
	Dimensions (mm)	790 x 390 x 556 (AD-5000: 250x353x432)			
	Weight	Unit	18 kg		
Accessories		20 kg			

Anexo 9. Especificaciones técnicas equipo TS4000

MODEL/ PROD CODE		TS2/E2/E1/V/S or TS2/E2/T1/V/S TS4000/E1 or TS4000/T1	TS8/E2/4E1/V/S or TS8/E2/4T1/V/S TS4000/4E1 or TS4000/4T1	TS10/E2/ETH/V/S TS4000/ETH	TS34/E2/KYZA* TS4000/34	TS155/E2/XXX/V* or TS155/E2XXX/F* TS4000/155 or TS4000/155-F
Applications/ Data Protocol		E1: 2.048 Mbps or T1: 1.55Mbps G.703/G.704	4E1: 4x2.048 Mbps or 4T1: 4x1.55 Mbps G.703/G.704	Ethernet	Open Protocol, F/O	Fast Ethernet, ATM, OC3, STM1, E3, T3, OC1/STMO & Open Protocol
Performance	Rate			10Mbps	1-34Mbps	1-155Mbps
	Range <sup>n</sup> @ 3dB/km	5200m	4700 m	4700 m	4200 m	3000 m
	@ 5dB/km	4000 m	3600 m	3600 m	3300 m	2450 m
	@ 10dB/km	2550 m	2350 m	2350 m	2150 m	1650 m
	@ 17dB/km	1790 m	1640m	1640 m	1520 m	1200 m
	@ 30dB/km	1170m	1090m	1090m	1000 m	810 m
	Minimum Range	200m	200m	200m	200 m	200 m
Bit error rate	Less than 1E - 9 (unfaded)					
MTBF	10 years					
Transmitter	Light source	3 x VCSELs				
	Wavelength	830 - 860 nm				
	Total Output power	21 mW				
	Beam divergence	2 mrad				
Receiver	Detector	Si PIN	Silicon Photodiode	Silicon Photodiode	Si PIN	Silicon Photodiode
	Field of view	5 mrad				
	Sensitivity	-50 dBm	-47 dBm	-47 dBm	-44 dBm	-36 dBm
Interface	Type	Electrical	Electrical	Copper 10 BaseT	Fiber Optic Transceiver - Multimode (Singlemode available upon request)	Fiber Optic Transceiver - Multimode (Singlemode available upon request)
	Connectors	BNC and RJ48 (STP)	Universal Connector	RJ45	ST other connectors available	SC other connectors available
	Impedance	E1: 75 Ohm or 120 Ohm T1: 100 ohm				
	Cable	Coax or STP			STP	
	Cable loss	Supports short and Long haul trunks				
	Wavelength				850nm (other wavelengths available)	1300 nm (other wavelength available)
	Output power				-17 ± 2 dBm (measured with a 62.5 micro fiber)	-17 ± 3 dBm
	Receiver operating range				-14 to - 27 dBm	-14 to - 30 dBm
	Power Supply	Voltage range	Factory set: 100-240 VAC @ 50/60 Hz or 24-60 VDC			
Power consumption		22 W				
Environmental Information	Operating temperature	-50° C to +50° 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				

Anexo 10. Esquema de vista frontal equipo FSO MRV TS5000

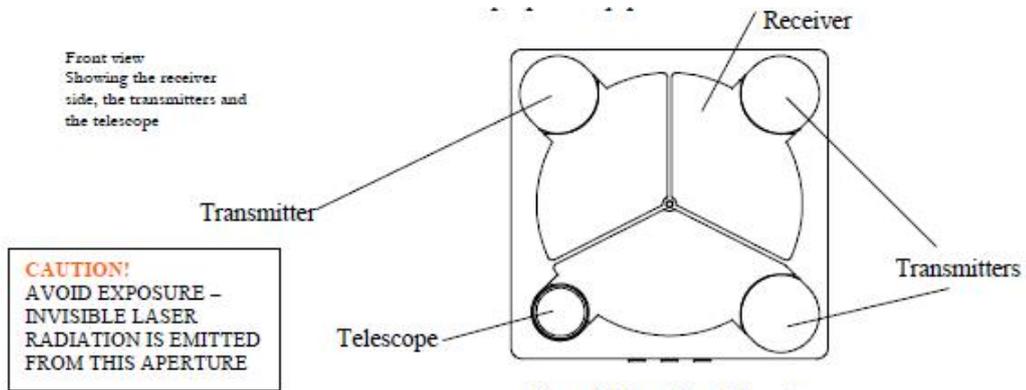
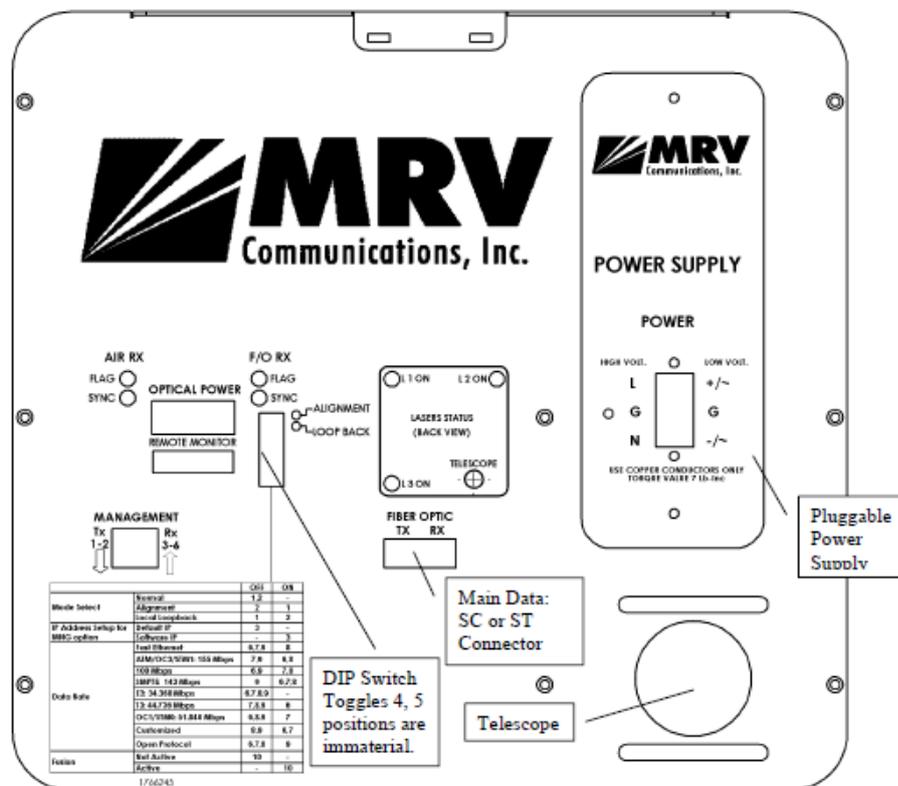


Figure 1.1: Front View Schematic

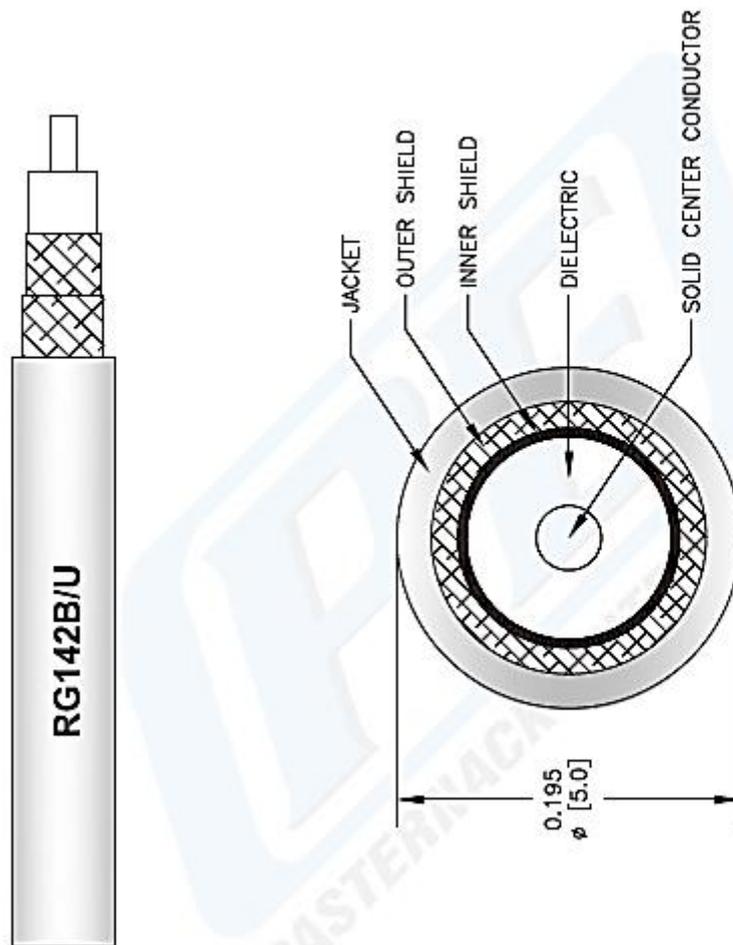


Figure 1.2: Front View

Anexo 11. Esquema del panel del modelo estándar TS5000/155



Anexo 12. Cable coaxial RG142



Anexo 13. TereScope5000/155 F - y conexión del sistema de fusión

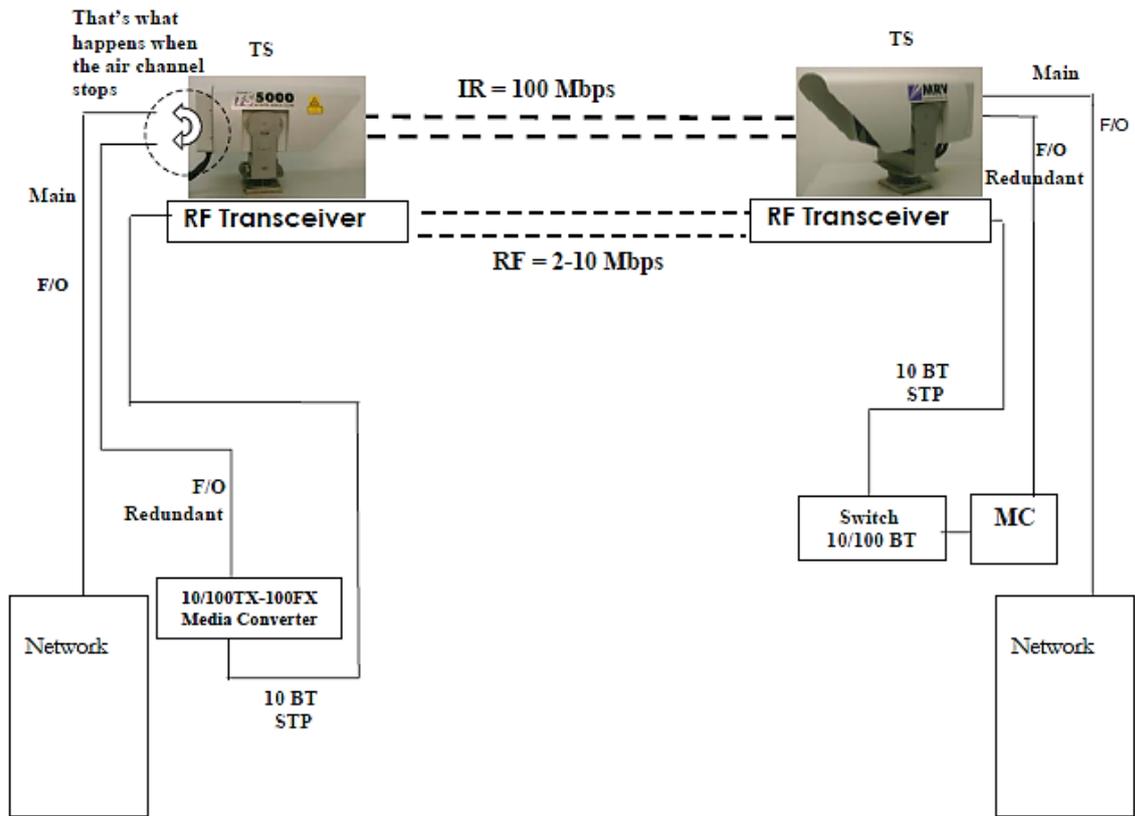


Figure 1.5a: TereScope5000/155 F - & Fusion System Connection

For Description of the Back Panel and all the functions see Paragraph B, Figure 1.4 – TS5000 with Fusion model, page 6.

Anexo 14. *Certificado Traducción Resumen*



**BRYAN DARIO RUIZ QUEZADA – PERITO ACREDITADO POR EL CONSEJO DE LA  
JUDICATURA PARA EL IDIOMA INGLÉS**



Loja 4 de Julio de 2023

A quien corresponda. –

Yo, Bryan Darío Ruiz Quezada, con numero de cedula 1104343064, en mi calidad de Perito Acreditado por el Consejo de la Judicatura para el idioma Inglés, certifico que he traducido el resumen del trabajo de investigación denominado **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTIMO INALÀMBRICO ORIENTADO AL ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS TECNOLOGIAS FREE SPACE OPTICS (FSO) Y RADIOFRECUENCIA (RF) ”**, perteneciente a la Sr. **Jhandry Sergio Torres Rojas**, con número de cédula **1104555022**, estudiante de la carrera de **Telecomunicaciones** de la Universidad Nacional de Loja.

Además, dejo sentado que, de ser necesario, puedo ser contactado posteriormente en caso de necesitar cualquier aclaración respecto del presente documento.

Atentamente:



---

Ing. Mgs. Bryan Ruiz Q.  
**PERITO ACREDITADO**  
**CALIFICACION N° 1258631**

**Telf: 0993740174–2109667**

**email: bryan\_d1990@hotmail.com**