

Pontificia Universidad
Católica del Ecuador

FACULTAD DE INGENIERÍA
COORDINACIÓN DE POSGRADO



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA**

Trabajo de Titulación como requisito previo para la obtención del título de
Magíster en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de TI

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL FRONTHAULING ÓPTICO DE UNA RED 5G PARA
PROVEER SERVICIOS MÓVILES DE BANDA ULTRA ANCHA EN UN SECTOR
URBANO CON ALTA DENSIDAD DE USUARIOS**

Autor: Vanessa Katherine Guevara Balarezo

Director: Dr. Germán Arévalo B, PhD.

Quito, 2022

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **VANESSA KATHERINE GUEVARA BALAREZO**, con C.I. 17155503544, autor del trabajo de titulación titulado: **“DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL FRONTHAULING ÓPTICO DE UNA RED 5G PARA PROVEER SERVICIOS MÓVILES DE BANDA ULTRA ANCHA EN UN SECTOR URBANO CON ALTA DENSIDAD DE USUARIOS”** previo para la obtención del título de Magíster en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de TI.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENECYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a difundir a través del sitio web de la Biblioteca de la PUCE el referido trabajo de titulación, respetando las políticas de propiedad intelectual de la Universidad.

Vanessa Katherine Guevara Balarezo

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi carácter de Director (a) – Tutor (a) del Trabajo de Posgrado Titulado: “Diseño y Simulación del Fronthauling Óptico de una Red 5G para proveer Servicios Móviles de Banda Ultra Ancha en un Sector Urbano con Alta Densidad de Usuarios”, presentado por el maestrante Vanessa Katherine Guevara Balarezo, titular de la Cédula de Identidad N° 1715503544 para optar al Grado de Magíster en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de TI, considero que dicho Trabajo de Investigación reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación por parte de los Lectores – Evaluadores que se designen para tal fin por parte de las autoridades de la Facultad de Ingeniería.

En la ciudad de Quito, a los 05 días de septiembre de 2022

Germán Vicente Arévalo Bermeo C.I. 0103152500

garevalo893@puce.edu.ec

NRO TELEFONO: 0991572515

NOTA:

Se comunica que en el servicio de análisis Turnitin, el referido trabajo de titulación alcanzó el siguiente resultado: 5 % índice de similitud con otras fuentes.

TURNITIN: INCLUIR HOJA DEL INFORME CON EL PORCENTAJE

final_de_titulaci_n_proyecto_de_desarrollo_-
_Vanessa_Guevara.pdf

INFORME DE ORIGINALIDAD

| | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 5% INDICE DE SIMILITUD | 2% FUENTES DE INTERNET | 0% PUBLICACIONES | 3% TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Submitted to Servicios Educcionales Martim Cerere Trabajo del estudiante | 3% |
| 2 | dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet | 2% |

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Vanessa Katherine Guevara Balarezo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador – PUCE, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Vanessa Katherine Guevara Balarezo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 9 |
| CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 10 |
| 1.1. Formulación del problema | 10 |
| 1.2. Objetivos de la Investigación | 11 |
| Objetivo General | 11 |
| Objetivos Específicos..... | 11 |
| 1.3. Justificación de la Investigación | 11 |
| CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA..... | 13 |
| 2.1. Antecedentes de la Investigación | 13 |
| 2.2. Marco Teórico | 14 |
| 2.2.1. Redes Móviles 5G | 14 |
| ➤ Espectro y frecuencia para 5G | 14 |
| ➤ Tipo de celdas | 16 |
| 2.2.2. Arquitectura Centralized RAN (C-RAN) | 17 |
| 2.2.3. Fronthaul | 17 |
| ➤ Tecnologías de Transporte de Fronthaul | 19 |
| ➤ Fronthaul 5G | 20 |
| 2.2.4. Arquitectura de un sistema de radio sobre fibra (RoF) | 21 |
| ➤ Transmisor Óptico | 22 |
| ➤ Receptor Óptico | 24 |
| CAPÍTULO III: METODOLOGÍA | 26 |
| 3.1. Desarrollo de la metodología | 26 |
| 3.2. Diseño del sistema | 26 |
| 3.2.1. Requerimientos del fronthauling óptico de una red 5G | 27 |
| 3.2.2. Diseño del enlace descendente | 27 |
| 3.2.3. Diseño del enlace ascendente | 31 |
| CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 35 |
| 4.1 Simulación enlace descendente | 35 |
| 4.1.1 Comportamiento del enlace descendente frente al aumento de atenuación | 38 |
| 4.2 Simulación enlace ascendente | 44 |
| 4.2.1 Comportamiento del enlace ascendente frente al aumento de atenuación | 46 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 53 |
| 5.1 Conclusiones | 53 |
| 5.2 Recomendaciones | 54 |
| REFERENCIAS..... | 56 |
| ANEXOS | 60 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2. 1. Características Tecnologías de Transporte Fronthaul | 19 |
| Tabla 3. 1. Características del sistema de transmisión CO | 29 |
| Tabla 3. 2. Características del canal óptico..... | 30 |
| Tabla 3. 3. Características del sistema de recepción BS | 31 |
| Tabla 3. 4. Características del sistema de transmisión BS | 32 |
| Tabla 3. 5. Características del canal óptico..... | 33 |
| Tabla 3. 6. Características del sistema de recepción CO | 34 |
| Tabla 4. 1. Parámetros de simulación | 35 |
| Tabla 4. 2. BER, Factor Q y Potencia Óptica frente a la atenuación para el enlace descendente..... | 42 |
| Tabla 4. 3. BER, Factor Q y Potencia Óptica frente a la atenuación para el enlace ascendente..... | 50 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2. 1. Categorías de uso 5G..... | 14 |
| Figura 2. 2. Frecuencias 5G | 16 |
| Figura 2. 3. Tipos de Arquitecturas C-RAN | 17 |
| Figura 2. 4. Fronthaul | 18 |
| Figura 2. 5. NG-PON2, XG/XGS-PON en una misma red PON..... | 19 |
| Figura 2. 6. Arquitectura de un sistema RoF | 21 |
| Figura 2. 7. Modulador de Mach-Zehnder..... | 23 |
| Figura 2. 8. Transceptor Óptico | 24 |
| Figura 2. 9. Receptor con detección directa..... | 25 |
| Figura 2. 10. Filtrado Óptico | 25 |
| | |
| Figura 3. 1. Diagrama de bloques del fronthauling óptico RoF..... | 27 |
| Figura 3. 2. Enlace descendente oficina central..... | 28 |
| Figura 3. 3. Enlace descendente canal óptico | 29 |
| Figura 3. 4. Enlace descendente estación base | 31 |
| Figura 3. 5. Enlace ascendente estación base | 32 |
| Figura 3. 6. Enlace descendente canal óptico | 32 |
| Figura 3. 7. Enlace ascendente oficina central..... | 33 |
| | |
| Figura 4. 1. Enlace descendente de la CO a la BS..... | 36 |
| Figura 4. 2. (a) Espectro de frecuencia óptico a la salida del segundo MZM | 36 |
| Figura 4. 3. (b) Espectro de frecuencia óptico al final del canal óptico antes del Splitter..... | 36 |
| Figura 4. 4. (c) Espectro de frecuencia óptico en la BS después del FBG..... | 37 |
| Figura 4. 5. (d) Espectro de frecuencia eléctrico en la BS con datos en banda base | 37 |
| Figura 4. 6. (e) Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 0 dB)..... | 37 |
| Figura 4. 7. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 1 dB)..... | 38 |
| Figura 4. 8. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 2 dB)..... | 38 |
| Figura 4. 9. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 3 dB)..... | 39 |
| Figura 4. 10. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 4 dB)..... | 39 |
| Figura 4. 11. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 5 dB)..... | 39 |
| Figura 4. 12. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 6 dB)..... | 40 |
| Figura 4. 13. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 7 dB)..... | 40 |
| Figura 4. 14. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 8 dB)..... | 40 |
| Figura 4. 15. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 9 dB)..... | 41 |
| Figura 4. 16. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 10 dB)..... | 41 |
| Figura 4. 17. Resultados BER respecto a la potencia óptica recibida - enlace descendente..... | 42 |
| Figura 4. 18. Variación BER en función del aumento de atenuación - enlace descendente | 43 |
| Figura 4. 19. Resultados factor Q respecto a la potencia óptica recibida - enlace descendente | 43 |
| Figura 4. 20. Enlace ascendente de la BS a la CO | 44 |
| Figura 4. 21. (f) Espectro de frecuencia óptico de la portadora óptica en blanco extraída por el FBG..... | 45 |
| Figura 4. 22. (g) Espectro de frecuencia óptico a la salida del MZM..... | 45 |
| Figura 4. 23. (h) Espectro de frecuencia óptico al final del canal óptico | 45 |
| Figura 4. 24. (i) Espectro de frecuencia eléctrico en la CO con datos en banda base..... | 46 |
| Figura 4. 25. (j) Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 0 dB) | 46 |
| Figura 4. 26. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 1 dB) | 47 |
| Figura 4. 27. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 2 dB) | 47 |
| Figura 4. 28. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 3 dB) | 47 |
| Figura 4. 29. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 4 dB) | 48 |
| Figura 4. 30. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 5 dB) | 48 |
| Figura 4. 31. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 6 dB) | 48 |
| Figura 4. 32. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 7 dB) | 49 |
| Figura 4. 33. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 8 dB) | 49 |
| Figura 4. 34. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 9 dB) | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 4. 35. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 10 dB) | 50 |
| Figura 4. 36. Resultados BER respecto a la potencia óptica recibida - enlace ascendente | 51 |
| Figura 4. 37. Variación BER en función del aumento de atenuación - enlace ascendente | 51 |
| Figura 4. 38. Resultados factor Q respecto a la potencia óptica recibida - enlace ascendente | 52 |

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRIA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN MENCIÓN GESTIÓN
Y ADMINISTRACIÓN DE TI

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL FRONTHAULING ÓPTICO DE UNA RED 5G PARA
PROVEER SERVICIOS MÓVILES DE BANDA ULTRA ANCHA EN UN SECTOR
URBANO CON ALTA DENSIDAD DE USUARIOS**

Autor: Vanessa Katherine Guevara Balarezo

Director -Tutor: Dr. Germán Arévalo B, PhD.

Fecha: 05/09/2022

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar y simular el fronthauling óptico de una red 5G para proveer servicios móviles de banda ultra ancha en un sector urbano con alta densidad de usuarios. El fronthauling diseñado para la red 5G está formado por los enlaces descendente y ascendente que van desde y hacia la oficina central y la estación base, respectivamente, estos enlaces se basan en la tecnología de radio sobre fibra y operan con una onda milimétrica de 72 GHz. Además, permiten la transmisión de datos a 10 Gbps en enlaces de longitud de 24 km, para la simulación del sistema se utilizó el software Optisystem. En el capítulo 1 se presenta el planteamiento y justificación del problema, el cual contempla las limitaciones presentes en el fronthauling óptico de las redes móviles que actualmente se encuentran operando. En el capítulo 2 se trata los conceptos generales de las redes móviles 5G y las tecnologías de fronthauling óptico aplicadas para estas redes, enfocándose en la arquitectura de señales de radio sobre fibra. En el capítulo 3 se describe la metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo y se presenta los requerimientos necesarios para el fronthauling óptico de una red 5G, los cuales permitirán cumplir el objetivo del trabajo. Además, en este capítulo se detalla el diseño de los enlaces descendente y ascendente que conforman el fronthauling óptico. En el capítulo 4 se analizan los resultados obtenidos en la simulación de los enlaces diseñados utilizando el software Optisystem para determinar el desempeño del sistema en base a la calidad de la señal transportada. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo del trabajo.

Palabras clave:

Fronthauling, 5G, Ondas milimétricas, radio sobre fibra, componentes ópticos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRIA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN MENCIÓN GESTIÓN
Y ADMINISTRACIÓN DE TI

**DESIGN AND SIMULATION OF 5G OPTICAL FRONTHAULING TO PROVIDE ULTRA
WIDEBAND MOBILE SERVICES IN AN URBAN SECTOR WITH A LOT OF DENSITY
OF USERS**

Autor: Vanessa Katherine Guevara Balarezo

Director -Tutor: Dr. Germán Arévalo B, PhD.

Fecha: 05/09/2022

ABSTRACT

This project proposes to design and simulate a 5G optical fronthauling to provide ultra-broadband mobile services in an urban sector with a lot of density of users. The fronthauling has been designed for a 5G network and consists in two radio over fiber links, downlink and uplink, with a 72 GHz millimeter wave. The system has a transmission rate of 10 Gbps at 24 km link distance and it was simulated in Optisystem software. Chapter 1 presents the problem about optical fronthauling of mobile networks and its justification. Chapter 2 introduces general concepts about 5G mobile networks and optical fronthauling technologies used in these networks, focusing on radio over fiber technology. Chapter 3 explains the methodology used in the development of this project and presents necessary requirements for 5G optical fronthauling. In addition, this chapter details downlink and uplink design. Chapter 4 analyzes the results obtained in the simulation of the system designed using the Optisystem software, it is based on quality of the signal transported. Finally, chapter 5 shows conclusions and recommendations about this project.

Keywords

Fronthaul, 5G, Millimeter waves, optical components, radio over fiber

INTRODUCCIÓN

En los últimos años las redes móviles han evolucionado rápidamente, sin embargo, no son suficientes para satisfacer las demandas actuales de los consumidores, ni tampoco soportan una alta densidad de usuarios debido a que presentan limitaciones, principalmente en los sistemas que transportan los datos desde la estación base. Las aplicaciones móviles envían continuamente datos a la red causando sobrecarga en el tráfico, lo que implica que la red se haga más lenta y no respondan adecuadamente a todos los usuarios.

Las redes 5G deben garantizar servicios móviles a través de conexiones rápidas, con baja latencia, confiables y sin interrupciones, en escenarios densamente poblados. En este sentido, es necesario contar con sistemas de transporte de señales que se adecúen a los requerimientos de los usuarios. Los sistemas que llevan las señales de las redes 5G entre la oficina central y las estaciones base, constituyen el fronthaul de la red y es una parte esencial para superar las limitaciones de las redes anteriores, para cumplir con los requerimientos de las redes 5G y para facilitar la migración de las distintas tecnologías. (Patiño Carrillo, 2018)

Además, el aumento del tráfico de datos en las redes móviles requiere una mayor cantidad de estaciones bases que cuenten con una infraestructura con fibra óptica para el transporte de señales en el fronthaul, con la finalidad de que alcance las velocidades de gigabits para el transporte de señales, cubran áreas densamente pobladas y soporten diferentes tecnologías móviles. La fibra óptica es un medio de transmisión que en el fronthaul permite superar los obstáculos actuales y responder a las nuevas demandas. (Rivera Sánchez, 2020). Por tal razón, en este proyecto se plantea diseñar el fronthauling óptico de una red 5G para proveer servicios móviles de banda ultra ancha en un sector urbano con alta densidad de usuario y analizar su desempeño a través de su simulación utilizando el software Optisystem.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Formulación del problema

En la actualidad, las redes móviles 3G y 4G presentan varias limitaciones que no permiten a los usuarios en áreas con alta densidad utilizar aplicaciones con una gran cantidad de tráfico. Todas estas limitaciones dependen principalmente de los sistemas que transportan las señales desde las estaciones base hasta la oficina central convirtiéndose en un cuello de botella, lo que ha llevado a buscar y diseñar nuevos sistemas que superen estas limitaciones y enfrenten la demanda de los usuarios de los servicios móviles. (Rivera Sánchez, 2020)

A medida que se han ido desplegando las redes 5G se ha puesto en evidencia las limitaciones de los sistemas actuales, afectando al desempeño y disponibilidad de la red. La red 5G debe ser capaz de soportar diferentes aplicaciones en tiempo real, con latencia cero y alta calidad. Por lo tanto, es obligatorio rediseñar los sistemas actuales con el objetivo de proveer transmisiones de datos a alta velocidad. (Gallego Menéndez & Alonso Montes, 2018)

El fronthauling óptico constituye una parte fundamental en el despliegue de las redes 5G, ya que un adecuado diseño permite alcanzar altas velocidades, soportar el tráfico masivo y garantizar el funcionamiento de los servicios móviles. En este sentido, este proyecto busca resolver principalmente la siguiente pregunta:

¿Puede el fronthauling óptico garantizar el correcto funcionamiento de servicios móviles de banda ultra ancha en un sector urbano con alta densidad de usuarios para una red 5G?

1.2. Objetivos de la Investigación

Objetivo General

Diseñar y simular el fronthauling óptico de una red 5G para proveer servicios móviles de banda ultra ancha en un sector urbano con alta densidad de usuarios.

Objetivos Específicos

- Revisar los conceptos de las tecnologías de fronthauling óptico aplicadas para redes 5G.
- Determinar los requerimientos del fronthauling óptico para una red 5G con alta densidad de usuarios.
- Diseñar un sistema óptico para el transporte de señales entre las unidades ubicadas en la oficina central y las unidades localizadas en las estaciones base de una red 5G para proveer servicios móviles de banda ultra ancha.
- Probar el fronthauling óptico diseñado mediante simulación utilizando el software Optisystem.
- Analizar el desempeño del sistema diseñado en base a la calidad de la señal transportada.

1.3. Justificación de la Investigación

El acelerado crecimiento de las redes móviles ha traído consigo la necesidad de solventar las limitaciones que actualmente poseen. Hoy en día, las redes no son capaces de soportar servicios móviles de banda ultra ancha en sectores con alta densidad de usuarios, por lo que es importante analizar y diseñar nuevos sistemas para el transporte de señales, que sean capaces de enfrentar las nuevas demandas que requieren las redes móviles. (Madrazo Lorite, 2018)

En Ecuador, existen varias limitaciones adicionales para el despliegue de las nuevas redes móviles tanto técnicas, como económicas y de regulación. Las redes actuales no son suficientes para que las redes 5G provean servicios móviles, por ejemplo: videos y juegos de alta resolución (4K), internet de las cosas y otras aplicaciones que están surgiendo, por lo que no es posible desplegar la tecnología 5G en el país. En este sentido, es importante diseñar el fronthauling óptico con el objetivo de satisfacer las necesidades de las conexiones 5G, como el ancho de banda, las velocidades de conexión y las bajas latencias en sectores con alta densidad de usuarios. Para esto es necesario realizar una recopilación bibliográfica de cómo ha sido la evolución del fronthauling, de tal forma, que se puedan determinar las características básicas para el diseño de este. (Calucho Cabrera, 2021)

De esta manera, este proyecto busca diseñar un fronthauling óptico que permita cumplir con los requerimientos técnicos de las redes móviles 5G en sectores urbanos con alta densidad de usuarios y que ayude a desplegar esta red en el país.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Antecedentes de la Investigación

La evolución de las redes móviles ha evidenciado la importancia del fronthauling para satisfacer los requerimientos de ancho de banda, latencia y velocidad en las redes. En los orígenes de las redes móviles no existía un fronthaul como tal, que permitiera la conexión de la unidad de radio en la estación base con la unidad de banda base en la oficina central, si no que conectaban directamente las unidades de la estación base y la red de transporte con cables coaxiales debido a que era suficiente para satisfacer los requerimientos de esas redes. (Varios, 2020)

Durante la era del 3G e inicios del 4G los operadores tuvieron la necesidad de colocar las unidades de radio más cerca de las antenas con la finalidad de evitar las pérdidas causadas por los conectores y cables, por lo que aparece un nuevo enlace entre las estaciones base y la oficina central denominado fronthaul, en este enlace se utilizó como medios de transmisión la fibra óptica y el cable coaxial, para solventar las nuevas necesidades que aparecieron. Sin embargo, con el desarrollo de las redes móviles surgen nuevos requerimientos y por lo tanto el fronthaul evoluciona dejando ver la dependencia en la fibra óptica para satisfacer las demandas que se esperan en un futuro. (Cabrera Cochancela & Zambrano Jaramillo, 2021)

En este sentido, se procede a revisar el estado del arte de las tecnologías de fronthauling óptico aplicadas para redes 5G, con el objetivo de establecer las características y requerimientos básicos que se deben tener para diseñar el fronthauling de una red 5G con alta densidad de usuarios.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Redes Móviles 5G

La Quinta Generación de redes móviles 5G tiene como objetivo ofrecer al usuario servicios a alta velocidad (superior a 10 Gbps) y baja latencia (menor a 1 ms), así como mayor ancho de banda y permitir conexiones a una gran cantidad de dispositivos ($10^6 \frac{\text{dispositivos}}{\text{km}^2}$), dividiendo su uso en tres categorías principales, como se indica en la Figura 2. 1. (Sierra Solana, 2019)

- Banda ancha móvil mejorada (eMBB): aplicaciones que requieren mayor velocidad y transferencia de datos, como realidad virtual, videos 3D, tareas en la nube.
- Comunicaciones de baja latencia ultra-confiables (URLLC): son tareas que requieren control en tiempo real, como robótica industrial, vehículos autónomos, operaciones a distancias.
- Comunicaciones masivas máquina – máquina (mMTC): consiste en conectar dispositivos sin la intervención humana, es el internet de las cosas, ciudades y agriculturas inteligentes.

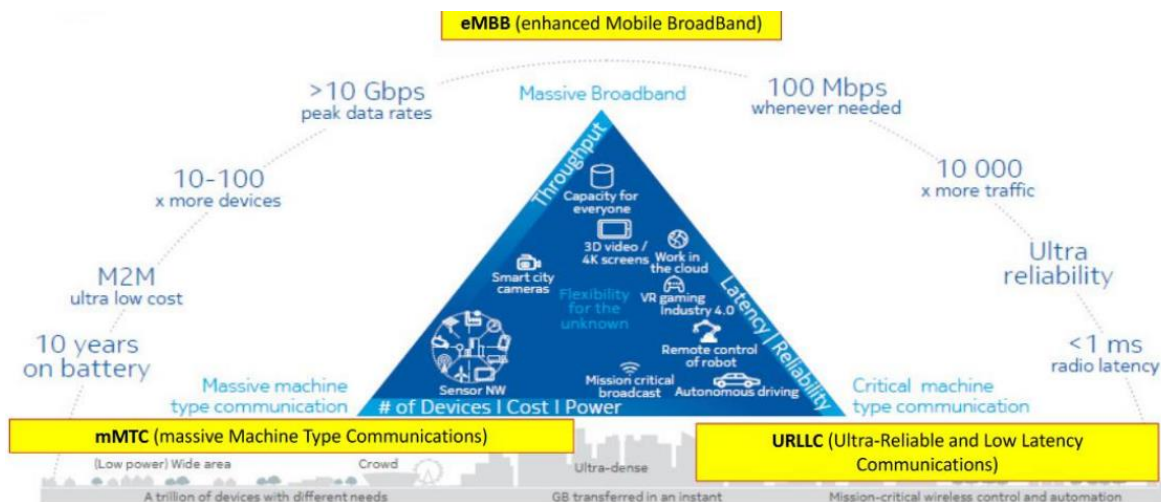


Figura 2. 1. Categorías de uso 5G
(Fuente: <https://n9.cl/8q54l>)

➤ Espectro y frecuencia para 5G

Las redes 5G admiten espectro en bandas bajas, medias y altas, mientras más alta la frecuencia

mayor cantidad de datos puede transportar y mientras más baja la frecuencia tiene un mayor alcance, como se muestra en la Figura 2. 2. Por lo tanto, las bandas para redes 5G son:

- Frecuencias súper altas - Ondas milimétricas ($\lambda < 10$ mm) : las frecuencias en el rango de 24 GHz a 100 GHz se están usando en diferentes regiones del mundo debido a que ayudan a tener comunicaciones de ultra banda ancha y en áreas con alta densidad de usuarios. Sin embargo, tiene un menor alcance por lo que es necesario desplegar mayor cantidad de celdas (small cell) para garantizar la comunicación en áreas con alto tráfico y disminuir los efectos de la lluvia y la atmosfera. En América Latina, los países utilizan las bandas de 26 GHz y 28 GHz, y algunos países tienen asignaciones en bandas de frecuencia a partir de los 39 GHz, no obstante, es importante mencionar que actualmente en Ecuador no se tiene asignadas frecuencias en estas bandas para las redes 5G. (Varios, 2020)
- Frecuencias ultra altas (UHF): las frecuencias UHF que actualmente no se están aprovechando se han destinado para las redes 5G. Se pueden diferenciar dos tipos:
 - Frecuencias medias: en el rango de 2 – 6 GHz proporcionan capacidad para zonas urbanas, en esta banda los países de américa latina han destinado el rango de 3.3 – 3.8 GHz, como en Ecuador que se está utilizando la frecuencia de 3.5 GHz para realizar pruebas de las redes 5G.
 - Frecuencias bajas: por debajo de los 2 GHz proporcionan amplia cobertura, pero bajo rendimiento, esta banda es la que hoy día se usa para LTE, pero también proporciona una arquitectura para los dispositivos 5G que se tienen en la actualidad.



Figura 2. 2. Frecuencias 5G

(Fuente: <https://es.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>)

➤ **Tipo de celdas**

En las redes móviles se diferencian tres tipos de celdas de acuerdo con su alcance, dado por la potencia del transmisor, los cuales son:

- **Macrocelas:** tienen un alcance de varios kilómetros y su potencia de transmisión está alrededor de 40 W, las antenas utilizadas son direccionales y se ubican en puntos altos, como empotradas en una edificación. (Calucho Cabrera, 2021)
- **Microcelas:** alcanzan distancias de cientos de metros hasta 1 Km y su potencia es alrededor de la 10 W, utilizan antenas omnidireccionales para dar cobertura a puntos con mala cobertura o con más densidad de usuarios.
- **Celdas Pequeñas (small cell):** tiene un alcance de pocos metros son utilizadas para dar cobertura en áreas densamente pobladas con tráfico muy alto, este tipo de celdas incluyen las picoceldas y femtoceldas. En las redes 5G son utilizadas con las frecuencias de ondas milimétricas para garantizar una conexión continua. (Patiño Carrillo, 2018)

2.2.2. Arquitectura Centralized RAN (C-RAN)

Las redes 5G emplean una arquitectura de red de acceso (RAN) más sencilla, con el objetivo de tener equipos menos complejos en las estaciones base, lo que ha llevado hacia una red RAN más flexible, centralizada y virtual. En este sentido, las redes 5G centralizan la parte de las unidades de banda base (BBU) en una oficina central para procesar los datos de múltiples estaciones base, esta arquitectura es conocida como C-RAN, la cual permite tener una operación más fácil y menos costosa, así como también ayuda a usar eficientemente los recursos del procesamiento. Además, las BBU centralizadas en la oficina central pueden trabajar independientemente (BBU Hotel) o juntas (BBU Pool), y en la actualidad incluso pueden ser virtualizadas (VRAN), como se indica en la Figura 2. 3. (Abril Reyes, 2022)

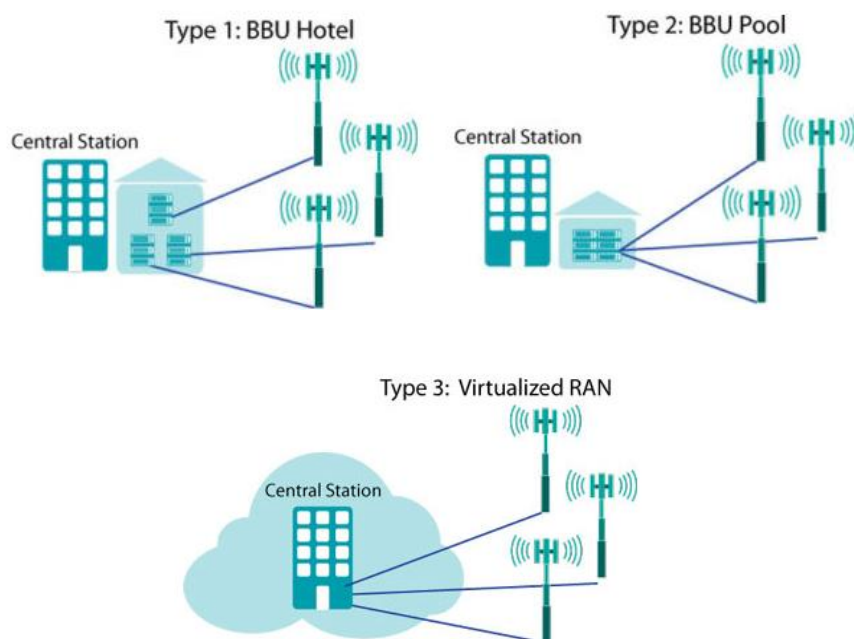


Figura 2. 3. Tipos de Arquitecturas C-RAN

(Fuente: <https://www.5gworldpro.com/blog/2021/12/16/what-is-open-ran-dran-cran-and-vran/>)

2.2.3. Fronthaul

El fronthaul constituye el enlace entre la oficina central y las estaciones bases, donde se encuentran las unidades de banda base (BBU) y las unidades de radio remoto (RRH), respectivamente (Rommel, Grivas, & Cimoli, 2021), como se indica en la Figura 2. 4 y las

cuales se describen a continuación:

- Unidad de radio remota (RRH): es la unidad en la que se encuentra los quipos de radio que se conectan a las antenas y la encargada de convertir la señal óptica en señal eléctrica y viceversa.
- Unidad de banda base (BBU): es la encargada de procesar la señal de radio en banda base de manera remota y cuenta con las interfaces para transportar la señal hacia el backhaul.

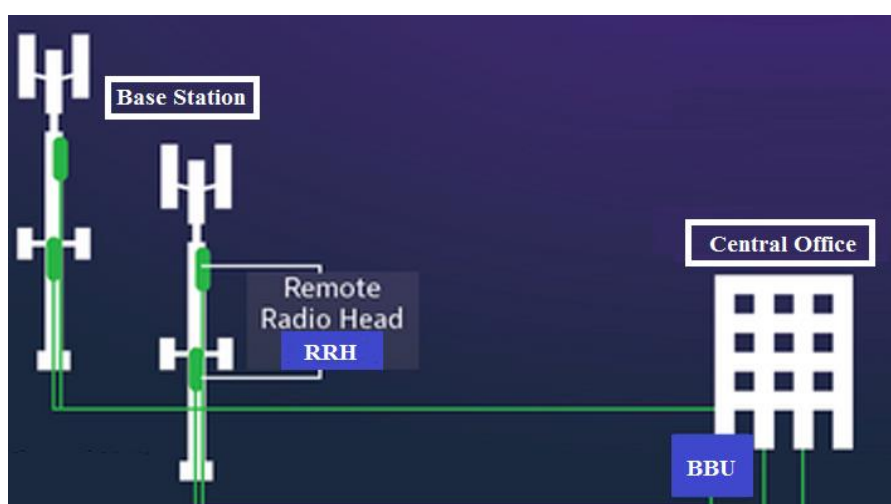


Figura 2. 4. Fronthaul

(Fuente: <https://www.viavisolutions.com/es-es/fronthaul>)

En el fronthaul se puede usar tecnologías de transporte como: radioenlaces, ethernet y fibra óptica, dependiendo de los requerimientos del enlace, siendo las principales (Qureshi, Qureshi, & Magam, 2020):

- Baja latencia (100 ms).
- Capacidad de la unidad de banda base de soportar varias unidades de radio remota.
- Distancia de hasta 40 km.
- Altas Velocidades (mayor a 10 Gbps).

En este sentido, la fibra óptica es el medio de transporte más utilizado debido a su alta capacidad de soportar grandes flujos de datos. (Palacios Garzón, 2019)

➤ Tecnologías de Transporte de Fronthaul

La fibra óptica constituye la mejor opción para satisfacer las necesidades del fronthaul inmediatamente debido a su rápida implementación y baja latencia. Además, permite alcanzar las velocidades de gigabits requeridas para 5G. Los nuevos avances en las tecnologías de redes ópticas pasivas (PON) como la GPON, XG/XGS-PON y NG-PON2 han permitido mejorar las características de los enlaces de fronthaul y la coexistencia de los servicios existentes en una misma red PON, como se indica en la Figura 2. 5.

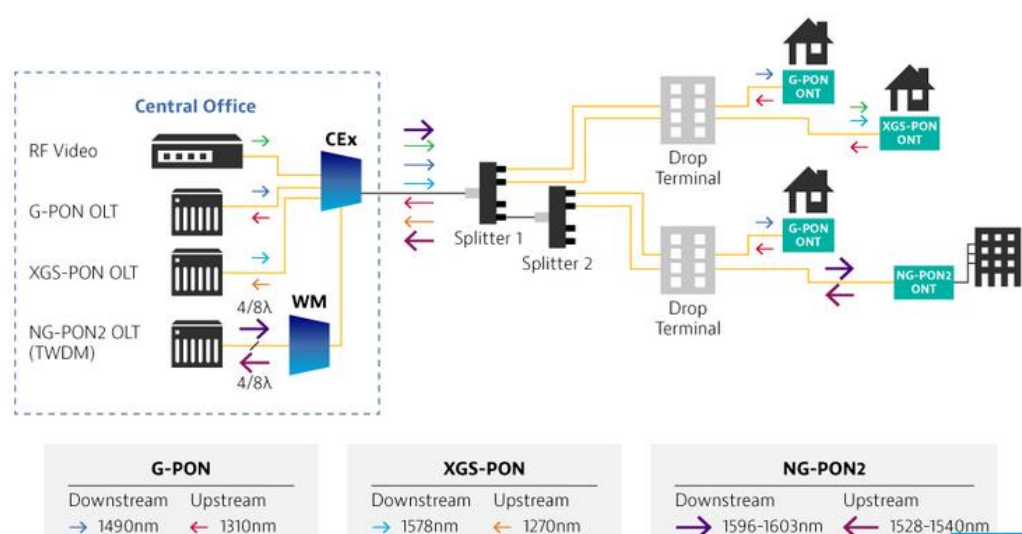


Figura 2. 5. NG-PON2, XG/XGS-PON en una misma red PON

(Fuente: <https://www.viavisolutions.com/es-es/fronthaul>)

En la Tabla 2. 1 se indican las principales características de las redes GPON, XG/XGS-PON y NG-PON2.

Tabla 2. 1. Características Tecnologías de Transporte Fronthaul

| | GPON | XG-PON | NG-PON2 |
|--------------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------------|
| Velocidad en enlace descendente | 2.5 Gbps | 10 Gbps | hasta 40 Gbps |
| Velocidad en enlace ascendente | 1.5 Gbps | 10 Gbps | hasta 40 Gbps |
| División mínima | 1:128 | 1:64 | 1:64 |
| Bandas de trabajo enlace descendente | 1480-1500 [nm] | 1575-1580 [nm] | 1596 -1603 [nm] |
| Banda de trabajo enlace ascendente | 1260-1360 [nm] | 1260-1280 [nm] | 1524-1544, 1525-1540,1532-1540 [nm] |

| | GPON | XG-PON | NG-PON2 |
|--------------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------------|
| Alcance | 20 km | 20 km | 40 km |
| Velocidad en enlace descendente | 2.5 Gbps | 10 Gbps | hasta 40 Gbps |
| Velocidad en enlace ascendente | 1.5 Gbps | 10 Gbps | hasta 40 Gbps |
| División mínima | 1:128 | 1:64 | 1:64 |
| Bandas de trabajo enlace descendente | 1480-1500 [nm] | 1575-1580 [nm] | 1596 -1603 [nm] |
| Banda de trabajo enlace ascendente | 1260-1360 [nm] | 1260-1280 [nm] | 1524-1544, 1525-1540,1532-1540 [nm] |

(Fuente: (Sierra Solana, 2019) (Robles Coronel, 2017))

➤ **Fronthaul 5G**

❖ **Fronthaul 5G basado en CPRI**

La Interfaz de radio pública común (CPRI) aparece en el año 2003 y establece los requerimientos de la capa física, red y datos para permitir la comunicación entre la BBU y la RRH. (Abril Reyes, 2022) Sus principales ventajas son:

- Transporta señales de radiofrecuencia (RF) digitalizadas y utiliza un mapeo de bits en fase y cuadratura (IQ).
- Permite multiplexación WDM con fibra oscura.
- Admite velocidades entre 245 Mbps y 10 Gbps.

❖ **Fronthaul 5G basado en eCPRI**

eCPRI es la interfaz de radio pública mejorada, se introdujo en 2017 y optimiza el rendimiento de los equipos de radio, gracias a que establece prioridades para el tráfico en tiempo real. La transferencia de datos se basa en paquetes que utilizan servicios IP o Ethernet. Además, identifica tres planos: usuario, sincronización, control y gestión. (Fronthaul, 2022)

❖ Fronthaul 5G basado en Radio sobre fibra (RoF)

El propósito de RoF en el fronthaul es transmitir señales de radiofrecuencia (30 -300 GHz) sobre fibra óptica directamente desde la BBU en la oficina central hasta la RRH en la estación base. (Amagua & Mogro, 2013)

Sus principales ventajas son:

- Poca atenuación independientemente de la frecuencia y banda que se utilice.
- Permite el uso de ondas milimétricas y microondas.
- Mayor ancho de banda.
- Mayor flexibilidad ya que soportan infraestructuras multiservicios.
- Permite asignación dinámica de recursos.

2.2.4. Arquitectura de un sistema de radio sobre fibra (RoF)

La arquitectura de radio sobre fibra constituye un enlace óptico que transmite señales de radiofrecuencia moduladas, está formado por el enlace descendente (downlink) y el enlace ascendente (uplink) de la señal, hacia y desde la oficina central y la estación base, como se indica en la Figura 2. 6. Sus principales componentes son los transmisores y receptores ópticos, y el canal de fibra óptica. (Borja González, 2021)

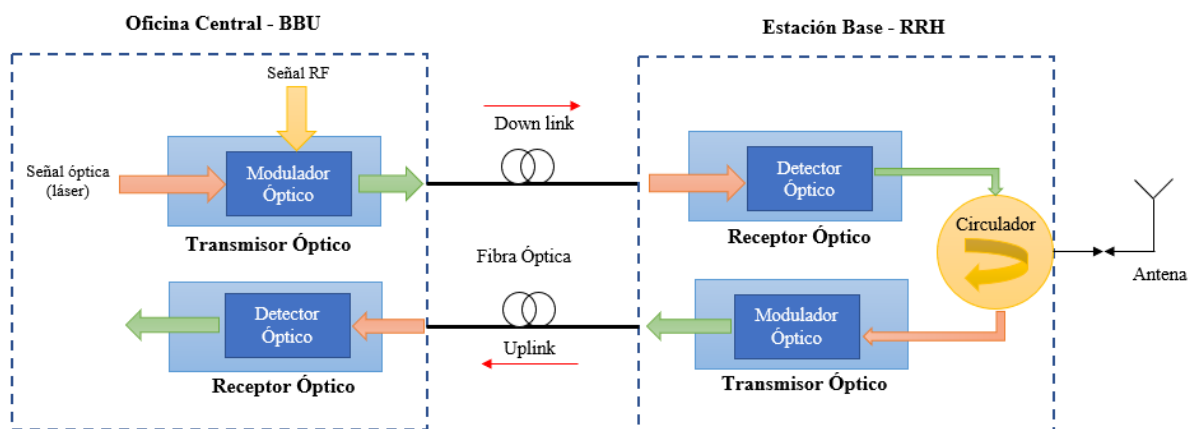


Figura 2. 6. Arquitectura de un sistema RoF
(Fuente: Autor)

➤ **Transmisor Óptico**

El transmisor óptico se encarga de transformar la señal eléctrica en ondas ópticas milimétricas, para lo cual existen diferentes métodos de generación de señales en bandas milimétricas pudiendo ser por modulación óptica (directa o externa), heterodinación o transceptor ópticos: (Albán López, 2019)

- **Modulación directa:** la intensidad de la fuente de diodo láser se modula directamente con la señal de radiofrecuencia. Sin embargo, limita el ancho de banda a 30 GHz y se trabaja generalmente con frecuencias de hasta 10 GHz. (Carriel Sevillano, 2020)
- **Modulación externa:** la intensidad del diodo láser, que opera en modo de onda continua, es modulada con un modulador externo, ya sea electroóptico o de electro-absorción, lo que permite tener una señal con mejor calidad y se puede alcanzar anchos de banda de hasta 100 GHz. Cuando se opera en la banda de frecuencia de las ondas milimétricas es necesario utilizar moduladores externos, uno de los moduladores externos más utilizados es el modulador Mach-Zehnder. (Amagua & Mogro, 2013)

Modulador Mach-Zehnder (MZM)

El funcionamiento del modulador Mach-Zehnder está basado en algunos materiales con propiedades electroópticas y en los interferómetros Mach-Zehnder, este modulador divide la señal de entrada y cada una de estas circula por dos tramos diferentes, después se unen nuevamente dando como resultado una señal óptica con variación de amplitud, como se muestra en la Figura 2. 7. Cuando la diferencia de las señales combinadas en fase es nula se tiene una interferencia constructiva, en cambio, se crea una interferencia destructiva si la diferencia de fase de las señales combinadas no es nula, lo que no permite conseguir la señal original nuevamente. (Muñoz Ortiz, Cely Mancipe, & Puerto Leguizamón , 2015)

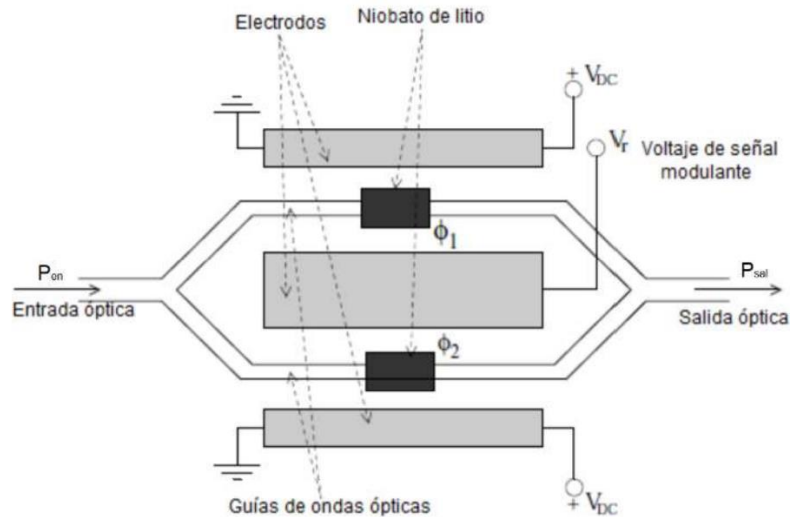


Figura 2. 7. Modulador de Mach-Zehnder
(Fuente: <https://n9.cl/w1eg1>)

- Heterodinación óptica: este método consiste en generar diferentes señales ópticas por la fuente de luz; una de ellas es modulada por la señal que lleva la información y luego son mezcladas por un mezclador externo o por un fotodetector para formar la señal RF de salida, sus ventajas es que disminuye la dispersión cromática y permite trabajar con frecuencias de hasta la región Thz. (Cabrera Cochancela & Zambrano Jaramillo, 2021)
- Transceptor óptico: se transmiten desde la oficina central a la BS dos longitudes de onda, una de ellas está modulada mientras que la otra no está. La longitud de onda no modulada es modulada en la estación base para regresar a la oficina central. Es decir, se utiliza un transceptor óptico como fotodiodo, eliminando así la necesidad de un láser en la BS, como se muestra en la Figura 2. 8. (Vásquez , 2020). Una de sus principales desventajas es la dispersión cromática.

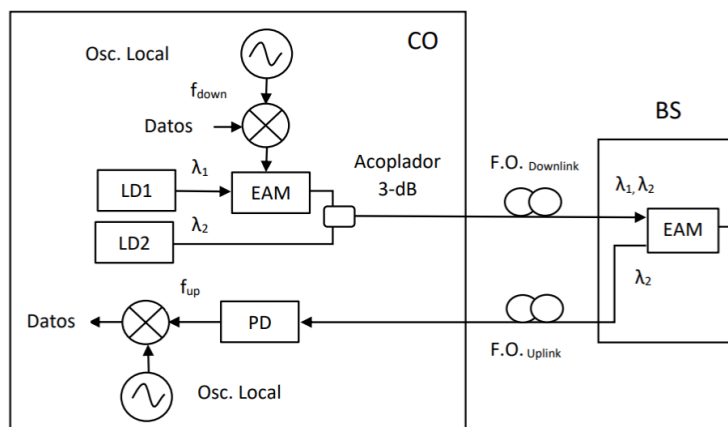


Figura 2. 8. Transceptor Óptico
(Fuente: <https://n9.cl/w1eg1>)

➤ Receptor Óptico

El receptor óptico en sistemas RoF es el encargado de extraer la señal formada por la señal de radiofrecuencia y la señal de banda base, tanto en la parte de la oficina central, como en el lado de la estación base, con el objetivo de enviar cada una a los sistemas de procesamiento. Existen diferentes técnicas para separar estas señales, como: la separación utilizando detección directa, la extracción basada en filtrado y los receptores ópticos coherentes con procesamiento digital de señales: (Albán López, 2019)

- **Detección Directa:** la señal que ingresa a la BBU y al RRH pasa por un acoplador direccional que divide a la señal en dos partes. Para obtener la señal de RF, la señal pasa a través de un filtro pasa banda centrado en la frecuencia de la subportadora con el objetivo de suprimir la señal en banda base, después la señal filtrada pasa por un fotodetector que permita obtener su envolvente o en ocasiones también es mezclada con un tono a la frecuencia de la subportadora. Para obtener la señal en banda base, la otra parte de la señal suprime la señal RF mediante detección óptica y posterior filtrado pasa bajo, como se indica en la Figura 2. 9. (Vásquez , 2020)

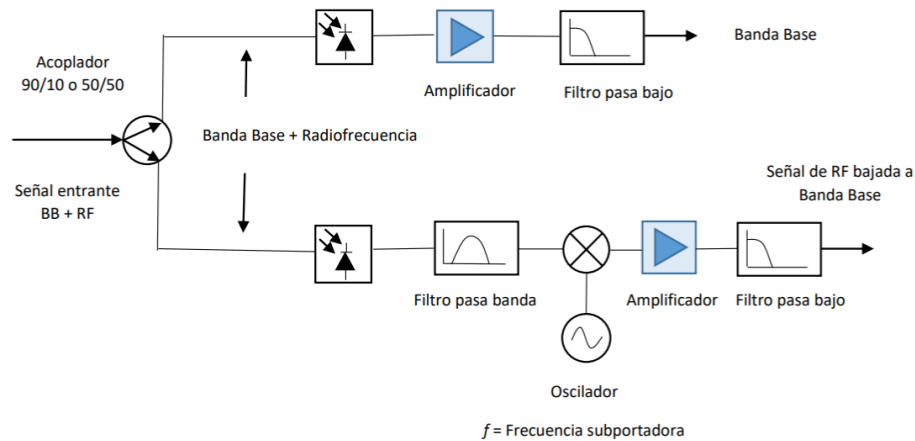


Figura 2. 9. Receptor con detección directa
(Fuente: <https://n9.cl/w1eg1>)

- Filtrado óptico: en este método la señal de RF es separada de la señal de banda base en el dominio óptico. Sus principales ventajas son: un receptor óptico más simple, mayor tolerancia a fallos, menor desvanecimiento de subportadora debido a la dispersión cromática. Además, bajas pérdidas de inserción del filtro y reduce los efectos de diafonía provocados entre las señales transportadas. Con esta técnica se pueden diseñar diferentes configuraciones en las que se usan dispositivos, como: filtros Fabry-Perot, redes de difracción de Bragg e Interferómetros Sagnac, como se indica en la Figura 2. 10. (Patiño Carrillo, 2018)

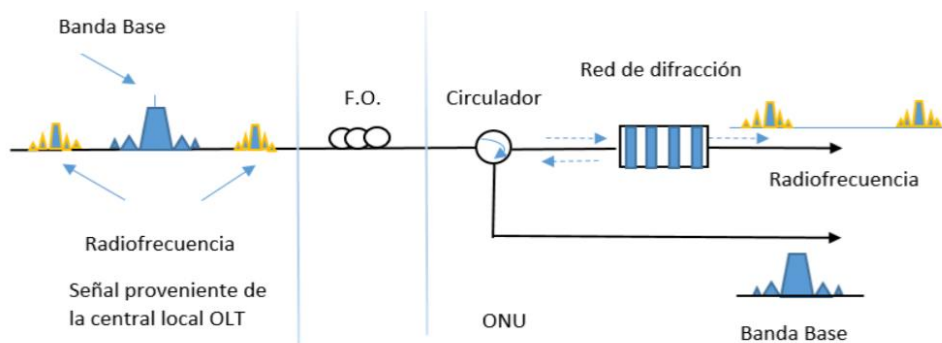


Figura 2. 10. Filtrado Óptico
(Fuente: <https://n9.cl/w1eg1>)

- Receptores ópticos coherentes: en enlaces de radio sobre fibra donde la fase es modulada es necesario utilizar un receptor óptico coherente combinado técnicas de procesamiento digital de señales para reconstruir la señal de RF. (Vásquez , 2020)

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Desarrollo de la metodología

Este proyecto corresponde a una investigación aplicada que parte de un marco cualitativo, en el cual se utilizan técnicas de investigación cualitativas, como el análisis y revisión de la documentación relacionada a las tecnologías de fronthauling óptico aplicadas a redes 5G.

La investigación aplicada corresponde a un proceso que tiene por objetivo solucionar un problema de la sociedad basándose en la investigación básica. En este sentido, este proyecto busca solventar los requerimientos de fronthauling que actualmente tienen las redes móviles 5G.

La modalidad de investigación utilizada para el desarrollo de proyecto ha sido documental, pues en primera fase se realizó la recopilación de la información de las tecnologías de fronthauling óptico utilizadas en redes 5G, posteriormente se desarrolló una revisión bibliográfica de los artículos académicos acerca de fronthauling óptico 5G en la cual se utilizó el método de análisis y síntesis, con el fin de contrarrestar y organizar la documentación de manera apropiada, y lograr una síntesis concreta que permita extraer los datos más importantes y relevantes. Además, se considera como variables cualitativas ordinales: la calidad de la señal transportada y el nivel de potencia óptica recibida en cada enlace.

A partir de la revisión bibliográfica se utilizó el método inductivo para comprender el problema en las tecnologías de fronthauling 5G actuales y el método deductivo para establecer los requerimientos de las redes móviles 5G, de tal manera, que se pueda diseñar y simular el fronthauling óptico de una red 5G.

3.2. Diseño del sistema

Este proyecto tiene como objetivo general diseñar y simular el fronthauling óptico de una red 5G para proveer Servicios Móviles de Banda Ultra Ancha en un Sector Urbano con Alta Densidad de Usuarios. Para el diseño y simulación de los enlaces descendente y ascendente del

fronthauling óptico se utiliza el software Optisystem y se analiza el desempeño del sistema en términos de la calidad de la señal transportada.

3.2.1. Requerimientos del fronthauling óptico de una red 5G

Las condiciones del fronthauling óptico de una red 5G para proveer Servicios Móviles de Banda Ultra Ancha en un Sector Urbano con Alta Densidad de Usuarios están definidas en base a los requerimientos del proyecto, las cuales son las siguientes:

- Frecuencias súper altas (Ondas milimétricas) para garantizar comunicaciones de ultra banda ancha.
- Velocidad de transmisión: 10 Gbps
- Distancia enlace: 24 km
- Sistema punto – multipunto para tener celdas pequeñas que permitan dar cobertura en áreas densamente pobladas con tráfico muy alto. Por lo tanto, la unidad de banda base debe ser capaz de soportar varias unidades de radio remota (32 unidades).

En la Figura 3. 1 se indica el diagrama de bloques del fronthauling óptico diseñado, el cual se basa en una arquitectura de señales de radiofrecuencia sobre fibra.

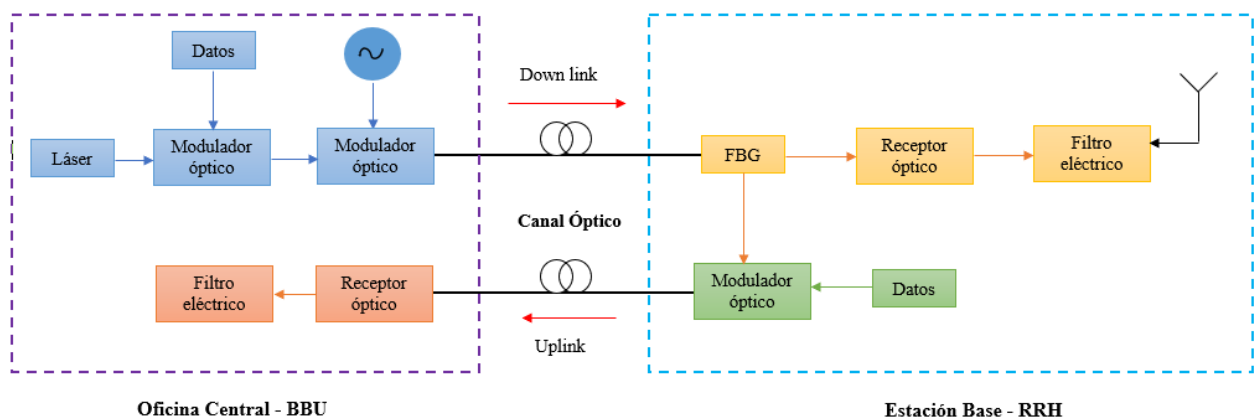


Figura 3. 1. Diagrama de bloques del fronthauling óptico RoF
(Fuente: Autor)

3.2.2. Diseño del enlace descendente

Para el enlace descendente que va desde la oficina central hasta cada una de las estaciones base

(32 estaciones), se propone un sistema de transmisión basado en la arquitectura de señales de radiofrecuencia sobre fibra para generar y transportar la onda milimétrica de 72 GHz, esta frecuencia ha sido seleccionada debido a que permite tener comunicaciones de ultra banda ancha y en áreas con alta densidad de usuarios. Este enlace se conforma también por un Fiber Bragg Grating (FBG) que permite reutilizar la portadora óptica para el enlace ascendente. Además, el enlace permite la transmisión de datos a 10 Gbps para dar solución a los requerimientos de las redes 5G.

➤ Oficina Central

El sistema de transmisión para el enlace descendente en la oficina central está formado por un transmisor óptico con modulación externa electroóptica (Mach-Zenhder). Este esquema contempla un generador de señal sinusoidal para obtener la señal eléctrica de RF de 72 GHz y el láser de onda continua, cuyas características se detallan en la Tabla 3. 1. En este sistema la señal de RF y la señal de banda base pasan a través de dos moduladores Mach-Zenhder independientes que se encuentran conectados en serie.

Además, para simular la señal de banda base se utiliza un generador de secuencias de bits PBRS con una tasa de bit de 10 Gbps conectado a un codificador de pulsos Non Return to Zero (NRZ), tal como se indica en la Figura 3. 2.

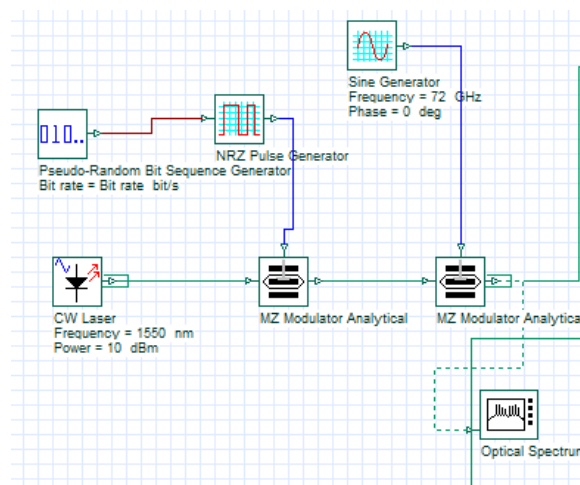


Figura 3. 2. Enlace descendente oficina central
(Fuente: Autor)

Tabla 3. 1. Características del sistema de transmisión CO

| Componente | Características |
|---------------------------|---|
| Láser | Tipo: láser de onda continua Potencia: 10 dBm Longitud de Onda: 1550 nm |
| Generador de datos | Tasa de bit: 10 Gbps Codificación: NRZ |
| Modulador Óptico | Tipo: externo MZM |
| Generador señal RF | Frecuencia: 72 GHz |

(Fuente: Autor)

➤ Canal Óptico

Entre el transmisor y el receptor del enlace descendente, se propone usar un enlace de fibra óptica monomodo de 20 km de longitud y adicional una fibra óptica de 4 km para compensar la dispersión generada en la fibra de 20 km y dos amplificadores ópticos que amplifiquen las señales ópticas débiles. Además, al final del canal óptico se encuentra un splitter para dividir la potencia de la señal transportada a las diferentes estaciones base, tal como se muestra en la Figura 3. 3 y cuyas características se indican en la Tabla 3.2.

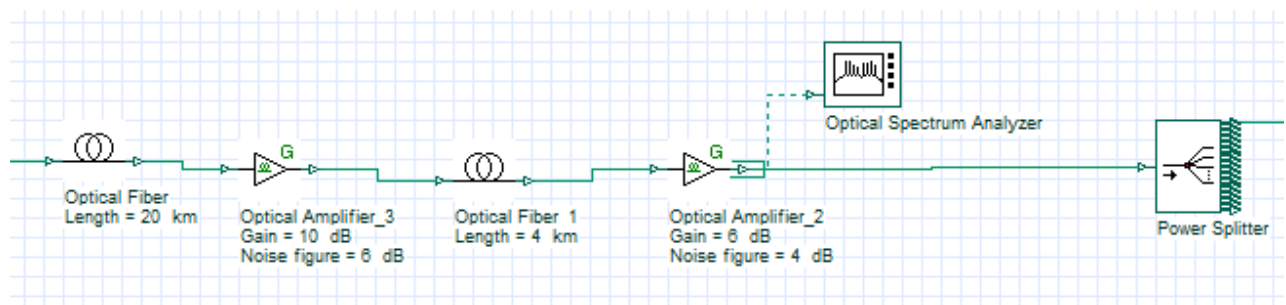


Figura 3. 3. Enlace descendente canal óptico

(Fuente: Autor)

Tabla 3. 2. Características del canal óptico

| Componente | Características |
|-----------------------|--|
| Fibra Óptica 1 | Atenuación: 0.2 dB/km Dispersión: 16.75 ps/nm/km Longitud: 20 km |
| Fibra Óptica 2 | Atenuación: 0.2 dB/km Dispersión: -80 ps/nm/km Longitud: 4 km |
| Amplificador 1 | Ganancia: 10 dB Ruido: 6 dB |
| Amplificador 2 | Ganancia: 6 dB Ruido: 4 dB |
| Splitter | Salidas: 32 Pérdidas: 17 dB |

(Fuente: Autor)

➤ Estación Base

Para el enlace descendente en la estación base se utiliza un Fiber Bragg Grating (FBG) con la finalidad de reutilizar la portadora óptica para el enlace ascendente, la señal que pasa a través del Fiber Bragg Grating (FBG) será detectada directamente por el receptor óptico, el mismo que cuenta con un fotodetector APD, un filtro pasa bajo y a la salida del demodulador un regenerador de señal, tal como se muestra en la Figura 3. 4 y sus características se indican en la Tabla 3. 3. Después de eso, la información en banda base es transmitida al terminal del usuario por una antena de forma inalámbrica.

En este enlace se ha colocado un atenuador óptico con la finalidad de conocer el comportamiento de la señal recibida en la estación base a medida que las pérdidas de la señal aumentan, para esto se ha configurado la atenuación entre 0 dB y 10 dB, en pasos de aumento de 1 dB.

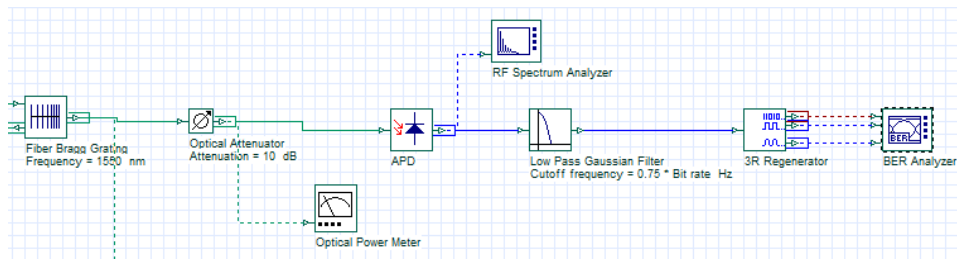


Figura 3. 4. Enlace descendente estación base
(Fuente: Autor)

Tabla 3. 3. Características del sistema de recepción BS

| Componente | Características |
|----------------------------|---|
| Fiber Bragg Grating | Longitud de Onda: 1550 nm |
| Atenuador Óptico | Atenuación: 0 - 10 dB Paso variación: 1 dB |
| Fotodetector | Tipo: APD Longitud de Onda: 1550 nm |
| Filtro pasa bajos | Tipo: Gaussian Frecuencia corte: 7.5 GHz |

(Fuente: Autor)

3.2.3. Diseño del enlace ascendente

Para el enlace ascendente que va desde cada una de las estaciones base hasta la oficina central, se propone un sistema de transmisión basado en la arquitectura de señales de radiofrecuencia sobre fibra. Este enlace reutiliza la portadora óptica gracias al FBG utilizado en el enlace descendente, el cual permite extraer la mitad de la portadora óptica en blanco a 1550 nm.

➤ Estación Base

Para el enlace ascendente en la estación base, los datos son recibidos por la antena de forma inalámbrica para luego ser modulados con la portadora óptica abstraída a través de un modulador externo electro-óptico (Mach-Zehnder). Los datos recibidos en la estación base son simulados con un generador de secuencias de bits PBRS a una tasa de bit de 10 Gbps conectado a un codificador de pulsos NRZ, tal como se indica en la Figura 3. 5 y cuyas características de detallan en la Tabla 3. 4.

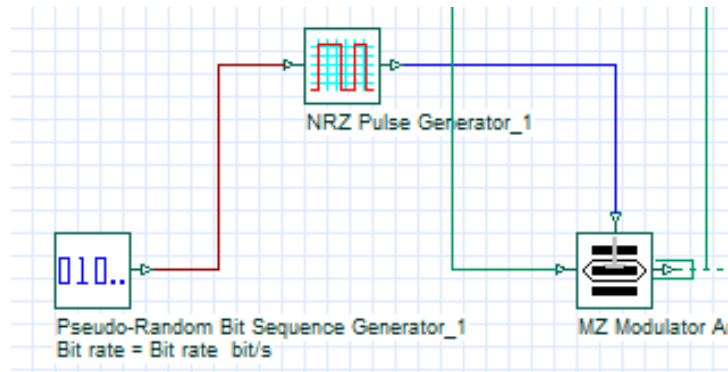


Figura 3. 5. Enlace ascendente estación base
(Fuente: Autor)

Tabla 3. 4. Características del sistema de transmisión BS

| Componente | Características |
|---------------------------|---|
| Generador de datos | Tasa de bit: 10 Gbps Codificación: NRZ |
| Modulador Óptico | Tipo: externo MZM |

(Fuente: Autor)

➤ Canal Óptico

Entre el transmisor y el receptor del enlace descendente, se propone usar un enlace de fibra óptica monomodo de 20 km de longitud y adicional una fibra óptica de 4 km para compensar la dispersión generada en la fibra de 20 km y dos amplificadores ópticos que amplifiquen las señales ópticas débiles, tal como se muestra en la Figura 3. 6 y cuyas características se indican en la Tabla 3. 5.

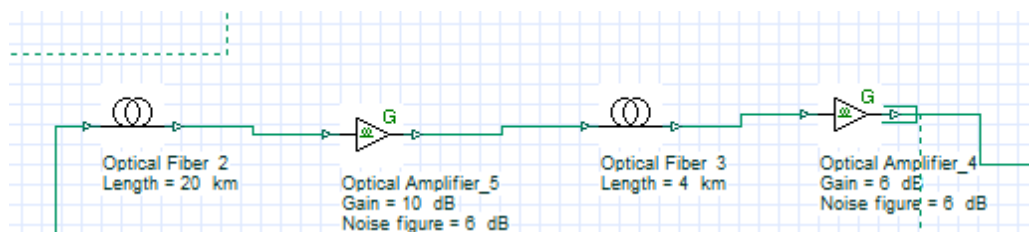


Figura 3. 6. Enlace descendente canal óptico
(Fuente: Autor)

Tabla 3. 5. Características del canal óptico

| Componente | Características |
|-----------------------|--|
| Fibra Óptica 1 | Atenuación: 0.2 dB/km Dispersión: 16.75 ps/nm/km Longitud: 20 km |
| Fibra Óptica 2 | Atenuación: 0.2 dB/km Dispersión: -80 ps/nm/km Longitud: 4 km |
| Amplificador 1 | Ganancia: 10 dB Ruido: 8 dB |
| Amplificador 2 | Ganancia: 6 dB Ruido: 4 dB |

(Fuente: Autor)

➤ **Oficina Central**

Para el enlace ascendente en la oficina central se opta por una arquitectura compuesta por un receptor óptico con detección directa, el mismo que cuenta con un fotodetector APD, un filtro pasa bajo y un regenerador de señal, tal como se muestra en la Figura 3. 7 y sus características se indican en la Tabla 3. 6. Además, al final del canal óptico se ha colocado un atenuador óptico con el objetivo de conocer el comportamiento de la señal recibida en la oficina central a medida que las pérdidas de la señal aumentan, para esto se ha configurado la atenuación entre 0 dB y 10 dB, en pasos de aumento de 1 dB.

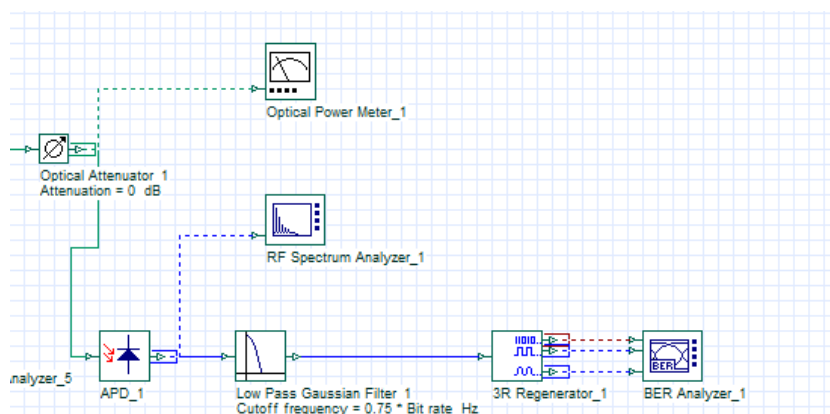


Figura 3. 7. Enlace ascendente oficina central

(Fuente: Autor)

Tabla 3. 6. Características del sistema de recepción CO

| Componente | Características |
|--------------------------|---|
| Fotodetector | Tipo: APD Longitud de Onda: 1550 nm |
| Filtro pasa bajos | Tipo: Gaussian Frecuencia corte: 7.5 GHz |
| Atenuador Óptico | Atenuación: 0 - 10 dB Paso variación: 1 dB |

(Fuente: Autor)

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en la simulación del fronthauling óptico diseñado, el cual se basa en las variables ordinales del método cualitativo que corresponden a la calidad de la señal transportada y el nivel de potencia óptica recibida en cada enlace. Para la simulación de la arquitectura propuesta se utilizó el software Optisystem y se realizó la simulación del enlace descendente y enlace ascendente. En la Tabla 4. 1 se muestran los parámetros utilizados para la simulación.

Tabla 4. 1. Parámetros de simulación

| Componente | Características |
|---------------------------------|------------------------|
| Tasa de bit | 10 Gbps |
| Longitud de la secuencia | 16384 bits |
| Muestras por bit | 32 |
| Número de muestras | 524288 |
| Ventana de tiempo | 1.63 μ s |

(Fuente: Autor)

4.1 Simulación enlace descendente

En la Figura 4. 1 se muestra el enlace descendente, para observar las componentes espectrales de la portadora de onda milimétrica se colocó un analizador de espectros a la salida del segundo Modulador Mach-Zehnder (a), al final del canal óptico (b), a la salida del FBG (c) y después del receptor óptico (d). En la Figura 4. 2 y Figura 4. 3 se observa la portadora de onda milimétrica de frecuencia 72 GHz antes y después del canal óptico, respectivamente, la portadora tiene una calidad alta con muy poco ruido, aproximadamente a -80 dBm, luego de pasar por el canal óptico. En la Figura 4. 4 se muestra la portadora de onda milimétrica después del FBG donde se puede ver que el ruido ha disminuido a -100 dBm. En la Figura 4. 5 se indica la salida del receptor óptico, que es la portadora de onda milimétrica con datos. Finalmente, para observar el diagrama de ojo, la tasa de bits errados y el factor de calidad Q de la señal que llega a la estación base se colocó un analizador de BER al final del enlace descendente(e). En

la Figura 4. 6 se indica el diagrama de ojo en el que se tiene un ojo completamente abierto lo que garantiza un buen desempeño del enlace. Además, se tiene un factor de calidad Q de 27 y un BER de 10^{-164} .

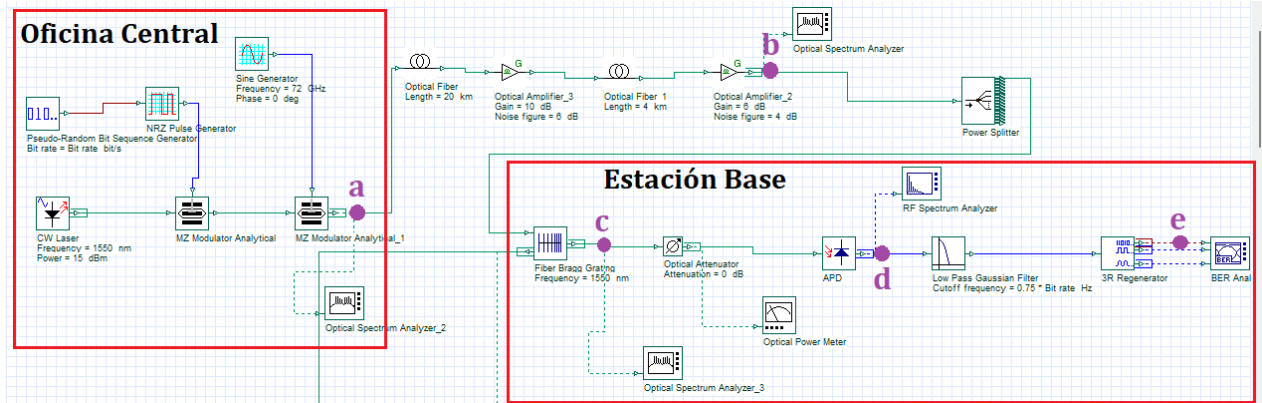


Figura 4. 1. Enlace descendente de la CO a la BS
(Fuente: Autor)

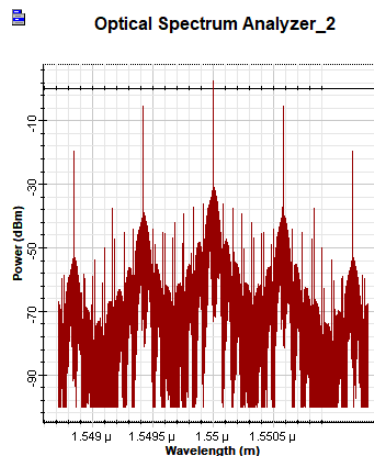


Figura 4. 2. (a) Espectro de frecuencia óptico a la salida del segundo MZM
(Fuente: Autor)

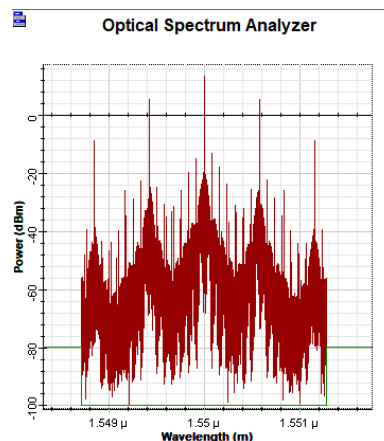


Figura 4. 3. (b) Espectro de frecuencia óptico al final del canal óptico antes del Splitter
(Fuente: Autor)

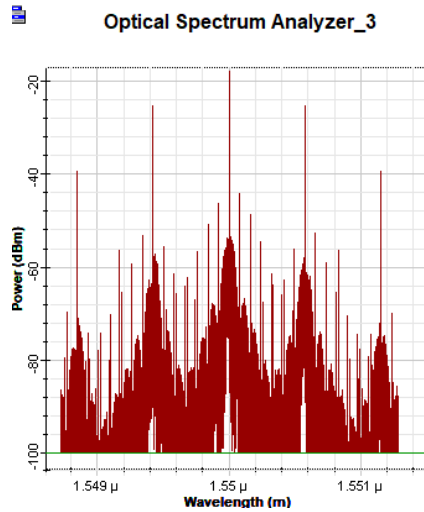


Figura 4. 4. (c) Espectro de frecuencia óptico en la BS después del FBG
(Fuente: Autor)

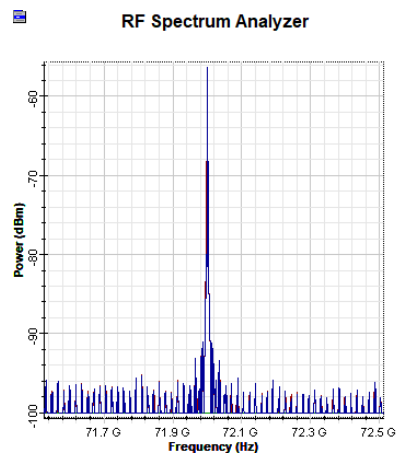


Figura 4. 5. (d) Espectro de frecuencia eléctrica en la BS con datos en banda base
(Fuente: Autor)

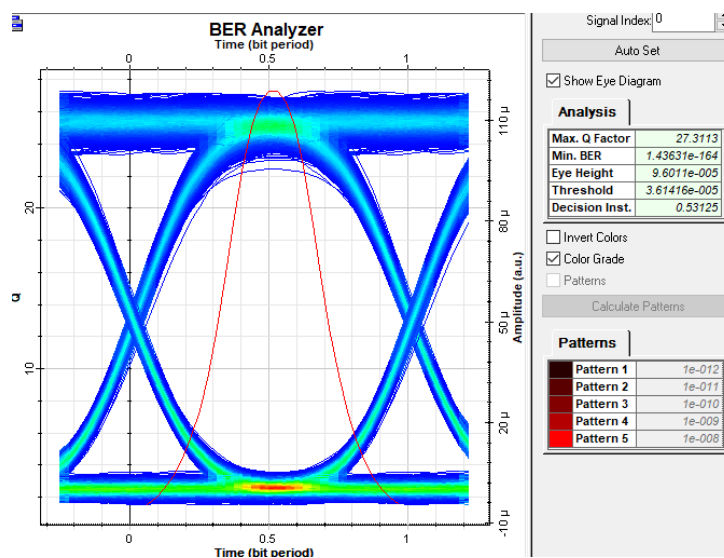


Figura 4. 6. (e) Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 0 dB)
(Fuente: Autor)

4.1.1 Comportamiento del enlace descendente frente al aumento de atenuación

Para determinar el comportamiento de la señal recibida en la estación base a medida que las pérdidas de la señal aumentan, se muestran los resultados de la simulación en pasos de aumento de la atenuación de 1 dB, a partir de 1 dB hasta 10 dB. Para esto, se documenta el diagrama de ojo de la señal recibida en la estación base a las diferentes atenuaciones, en el diagrama se puede apreciar la tasa de bits errados y el factor de calidad Q de la señal.

- **Atenuación: 1 dB**

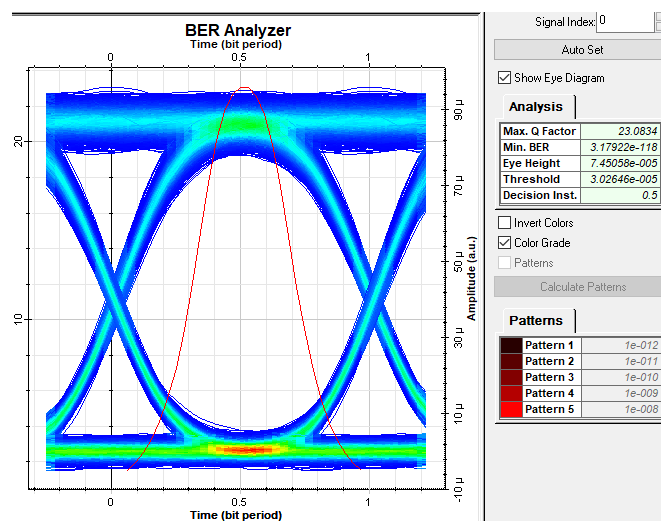


Figura 4. 7. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 1 dB)
(Fuente: Autor)

- **Atenuación: 2 dB**

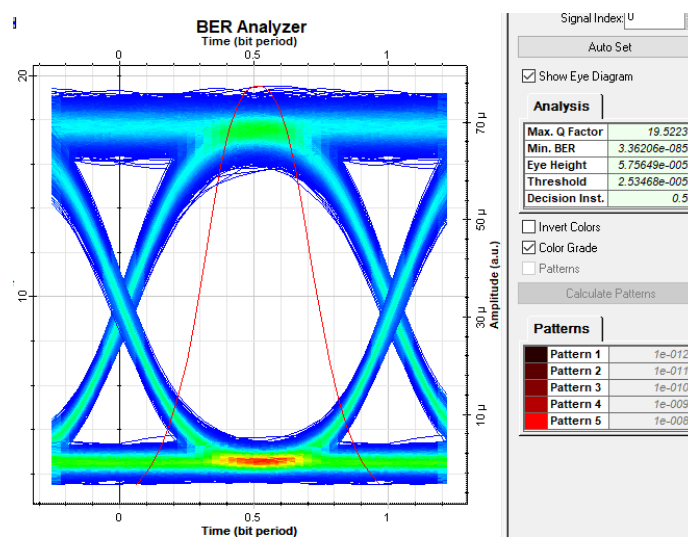


Figura 4. 8. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 2 dB)
(Fuente: Autor)

- **Atenuación: 3 dB**

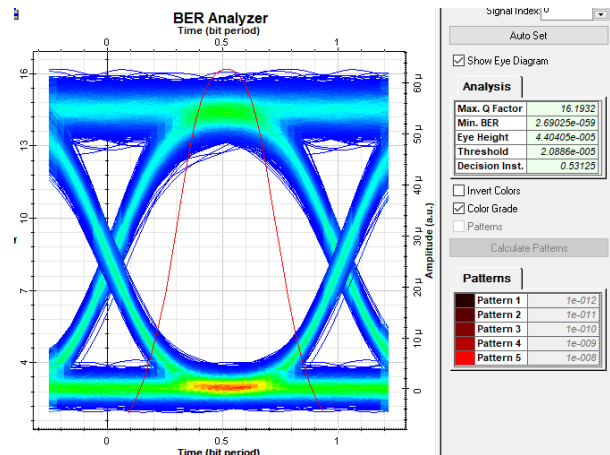


Figura 4. 9. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 3 dB)
(Fuente: Autor)

- **Atenuación: 4 dB**

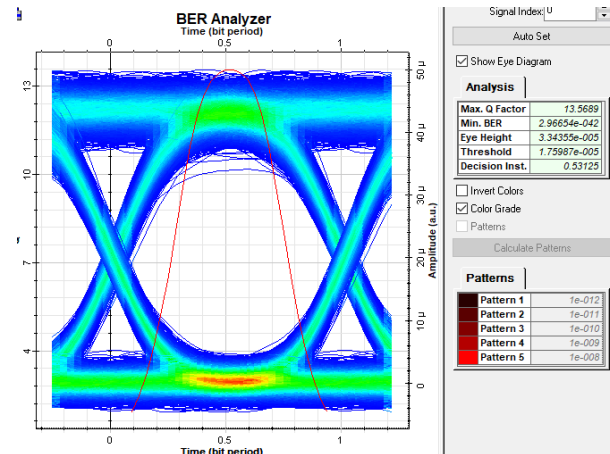


Figura 4. 10. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 4 dB)
(Fuente: Autor)

- **Atenuación: 5 dB**

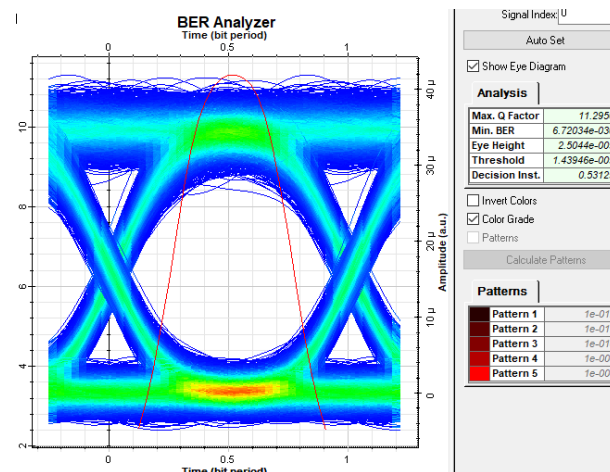


Figura 4. 11. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 5 dB)
(Fuente: Autor)

- Atenuación: 6 dB

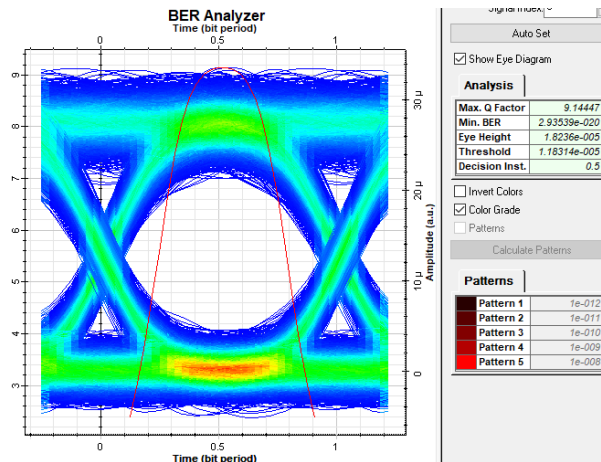


Figura 4. 12. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 6 dB)
(Fuente: Autor)

- Atenuación: 7 dB

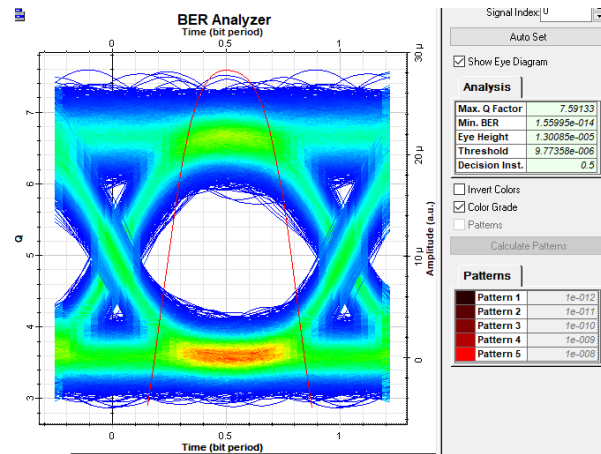


Figura 4. 13. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 7 dB)
(Fuente: Autor)

- Atenuación: 8 dB

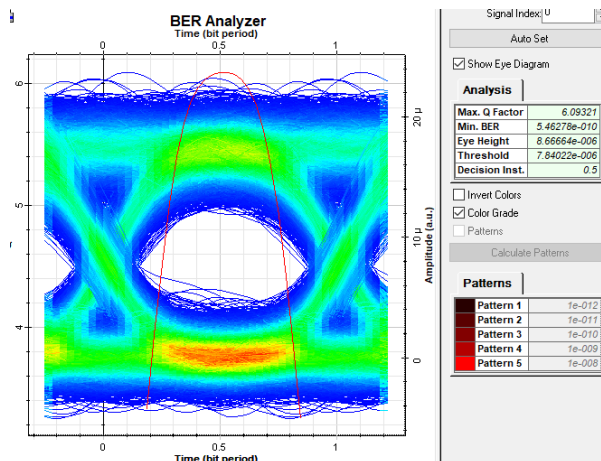


Figura 4. 14. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 8 dB)
(Fuente: Autor)

- **Atenuación: 9 dB**

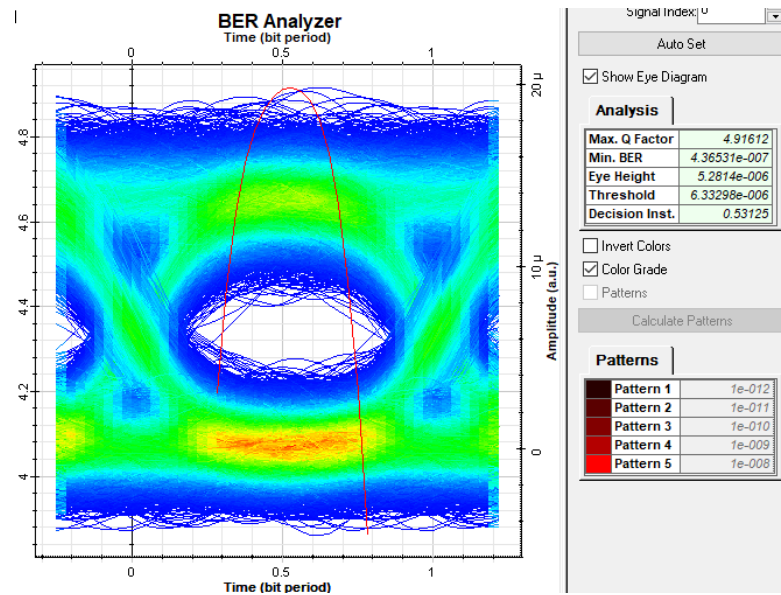


Figura 4. 15. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 9 dB)
(Fuente: Autor)

- **Atenuación: 10 dB**

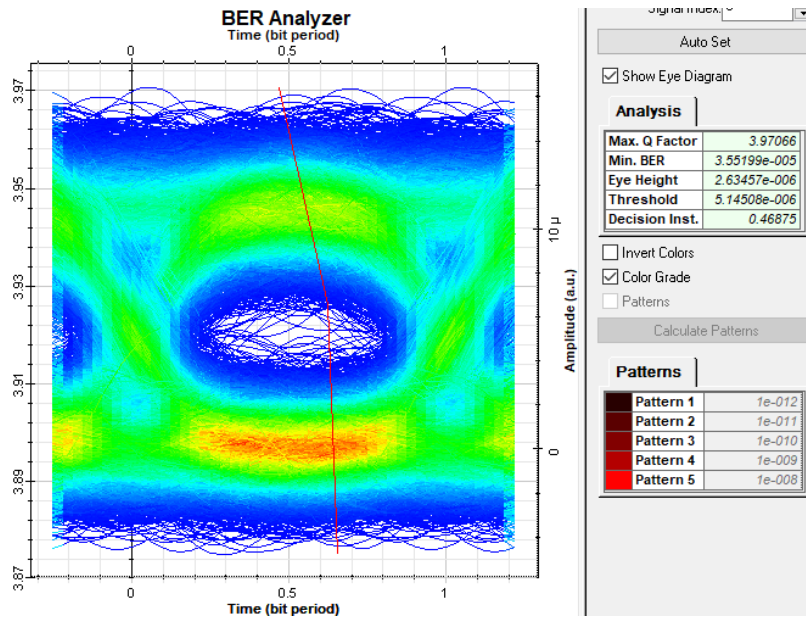


Figura 4. 16. Diagrama de ojo en la BS (Atenuación = 10 dB)
(Fuente: Autor)

En la Tabla 4. 2 se muestra los valores obtenidos de la tasa de bits errados, potencia óptica recibida y el factor de calidad Q de la señal frente al aumento de atenuación.

Tabla 4. 2. BER, Factor Q y Potencia Óptica frente a la atenuación para el enlace descendente

| Atenuación (dB) | Tasa de Bits errados (BER) | Potencia Óptica recibida (dBm) | Factor de Calidad (Q) |
|-----------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1 | 2.82E-119 | -18.7173 | 23.1879 |
| 2 | 8.05E-085 | -19.7286 | 19.4776 |
| 3 | 4.00E-059 | -20.714 | 16.169 |
| 4 | 2.94E-042 | -21.7213 | 13.5697 |
| 5 | 9.51E-029 | -22.7233 | 11.0603 |
| 6 | 1.53E-020 | -23.7267 | 9.21452 |
| 7 | 1.56E-014 | -24.7398 | 7.59133 |
| 8 | 5.46E-010 | -25.727 | 6.09321 |
| 9 | 4.36E-007 | -26.7292 | 4.91612 |
| 10 | 3.55E-005 | -27.7285 | 3.97066 |

(Fuente: Autor)

Para la evaluación del enlace se realizó en Matlab tres gráficas, la primera con los datos obtenidos en la simulación de BER y potencia óptica recibida, la segunda con los datos de BER y atenuación, para esto se graficó el semi logaritmo de los valores de BER como se muestra en la Figura 4. 17 y Figura 4. 18, respectivamente.

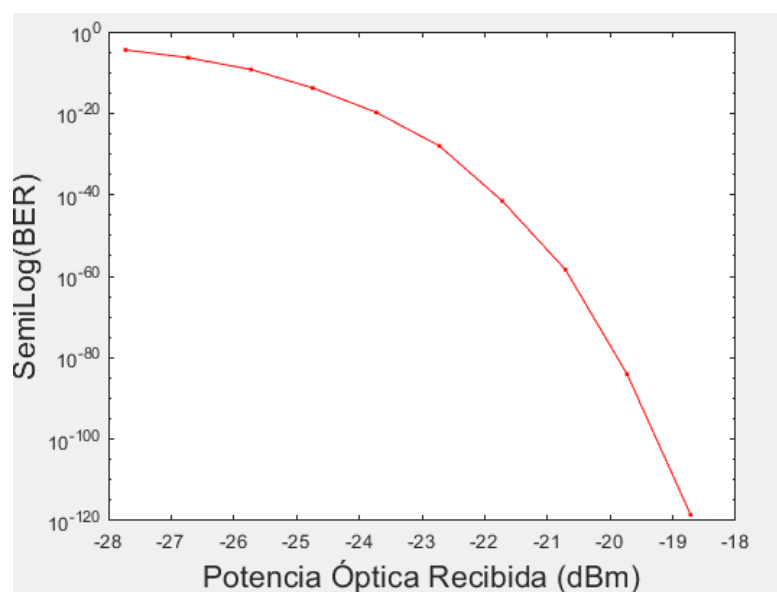


Figura 4. 17. Resultados BER respecto a la potencia óptica recibida - enlace descendente
(Fuente: Autor)

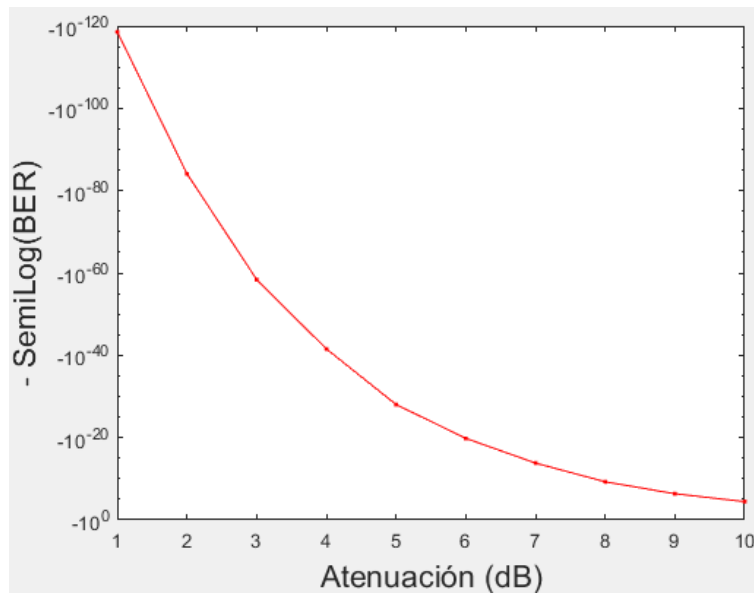


Figura 4. 18. Variación BER en función del aumento de atenuación - enlace descendente
(Fuente: Autor)

Para la tercera gráfica se utilizó los datos de factor de calidad Q y potencia óptica recibida, como se indica en la Figura 4. 19.

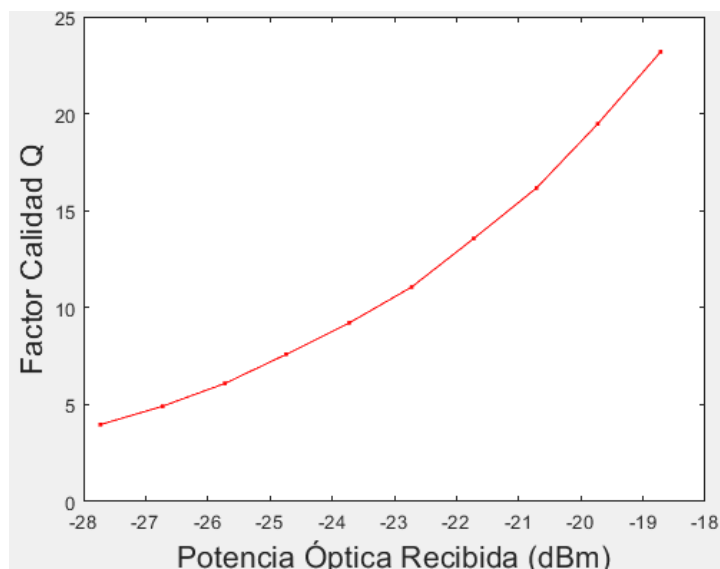


Figura 4. 19. Resultados factor Q respecto a la potencia óptica recibida - enlace descendente
(Fuente: Autor)

Los resultados muestran el rendimiento de BER para el enlace descendente y el efecto de aumentar la atenuación en la cantidad de potencia de la señal recibida y BER, lo cual fue realizado para conocer cómo se comportaría el esquema en un ambiente real. En las gráficas se evidencia que a medida que la atenuación aumenta hasta 10 dB la señal se va degradando hasta un BER de 10^{-05} para transmisiones con tasas de 10 Gbps.

4.2 Simulación enlace ascendente

En la Figura 4. 20 se muestra el enlace ascendente, para observar las componentes espectrales de la portadora de onda milimétrica se colocó un analizador de espectros antes (f) y después del modulador MZM (g), al final del canal óptico (h) y después del receptor óptico (i). En la Figura 4. 21 se muestra el espectro de la portadora óptica en blanco extraída por el FBG antes de ingresar al modulador. En la Figura 4. 22 y Figura 4. 23 se observa la portadora de onda milimétrica de frecuencia 72 GHz antes y después del canal óptico, respectivamente, la portadora tiene una calidad alta con muy poco ruido, aproximadamente a -80 dBm, luego de pasar por el canal óptico. En la Figura 4. 24 se indica la salida del receptor óptico, que es la portadora de onda milimétrica con datos. Finalmente, para observar el diagrama de ojo, la tasa de bits errados y el factor de calidad Q de la señal que llega a la oficina central se colocó un analizador de BER al final del enlace ascendente(j). En la Figura 4. 25 se indica el diagrama de ojo en el que se tiene un ojo completamente abierto con un factor de calidad Q de 10.7 y un BER de 10^{-27} .

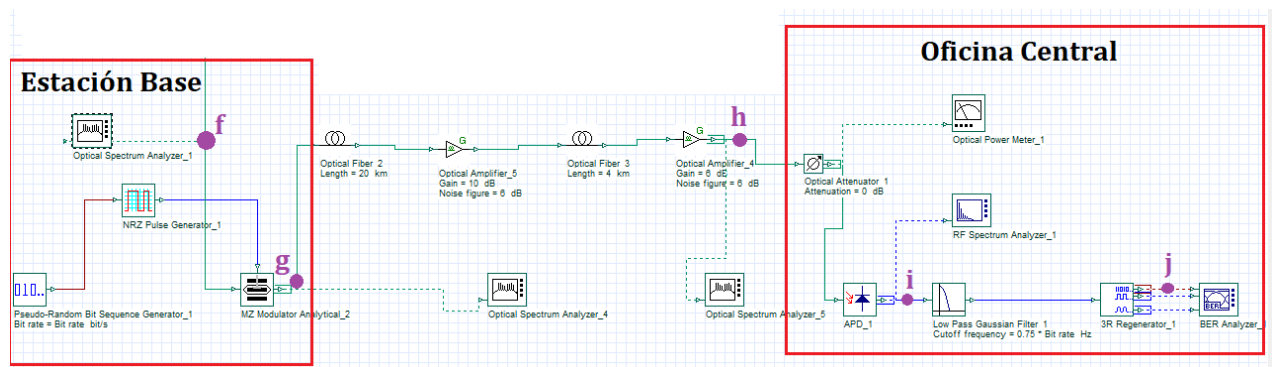


Figura 4. 20. Enlace ascendente de la BS a la CO
(Fuente: Autor)

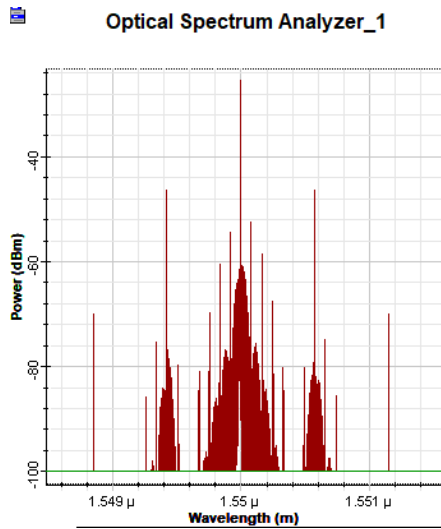


Figura 4. 21. (f) Espectro de frecuencia óptica de la portadora óptica en blanco extraída por el FBG
(Fuente: Autor)

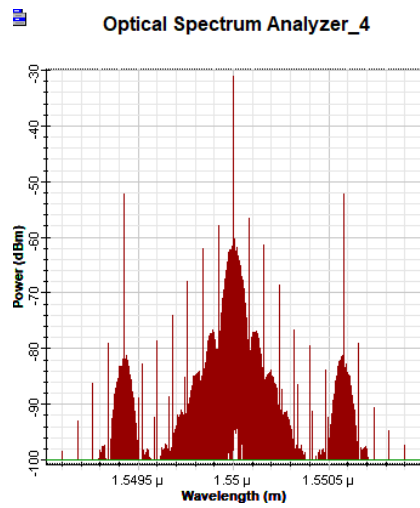


Figura 4. 22. (g) Espectro de frecuencia óptica a la salida del MZM
(Fuente: Autor)

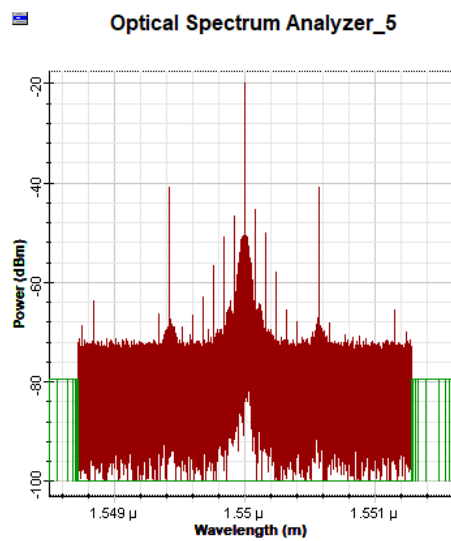


Figura 4. 23. (h) Espectro de frecuencia óptica al final del canal óptico
(Fuente: Autor)

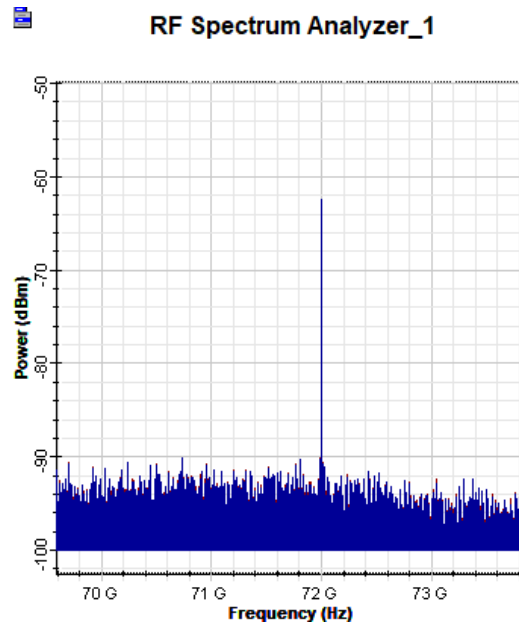


Figura 4. 24. (i) Espectro de frecuencia eléctrico en la CO con datos en banda base
(Fuente: Autor)

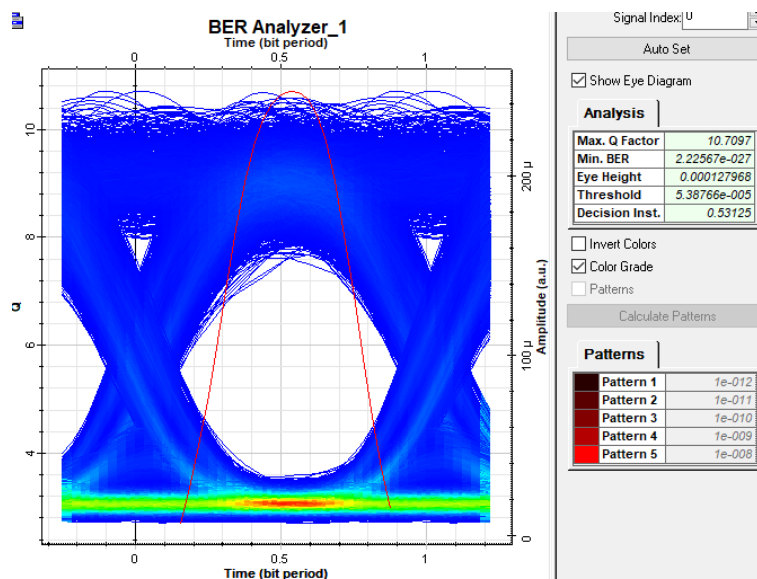


Figura 4. 25. (j) Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 0 dB)
(Fuente: Autor)

4.2.1 Comportamiento del enlace ascendente frente al aumento de atenuación

Para determinar el comportamiento de la señal recibida en la oficina central a medida que las pérdidas de la señal aumentan, se muestran los resultados de la simulación en pasos de aumento de la atenuación de 1 dB, a partir de 1 dB hasta 10 dB. Para esto, se documenta el diagrama de ojo de la señal recibida en la oficina central a las diferentes atenuaciones, en el diagrama se puede apreciar la tasa de bits errados y el factor de calidad Q de la señal.

- Atenuación: 1 dB

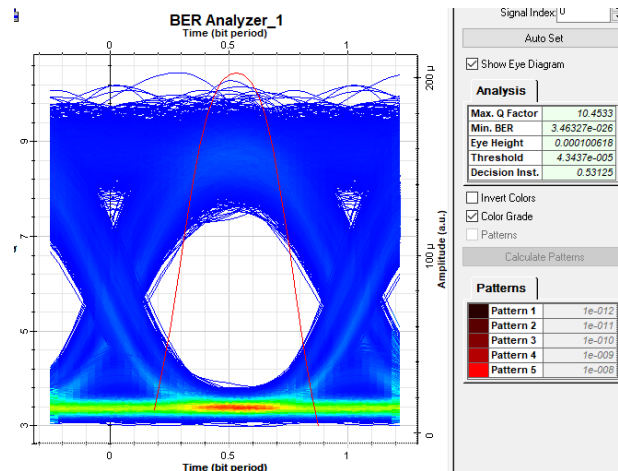


Figura 4. 26. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 1 dB)
(Fuente: Autor)

- Atenuación: 2 dB

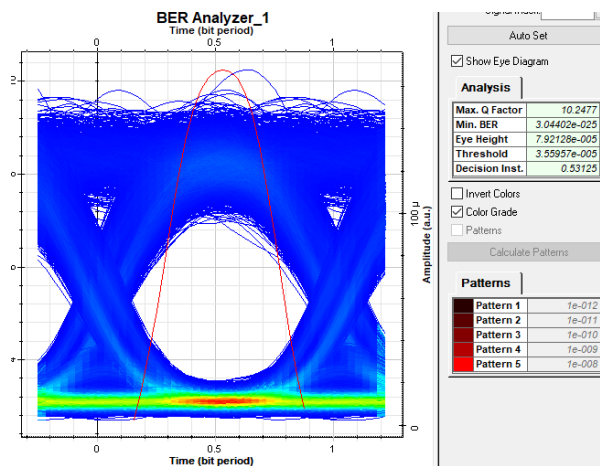


Figura 4. 27. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 2 dB)
(Fuente: Autor)

- Atenuación: 3 dB

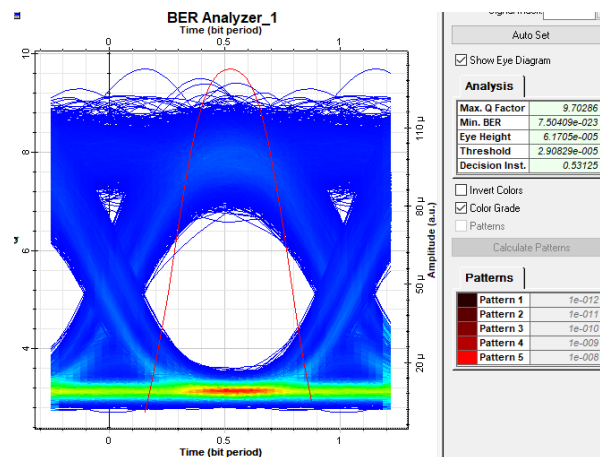


Figura 4. 28. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 3 dB)
(Fuente: Autor)

- **Atenuación: 4 dB**

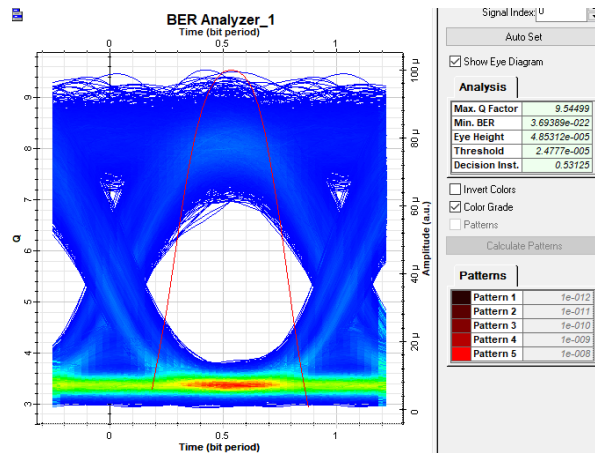


Figura 4. 29. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 4 dB)
(Fuente: Autor)

- **Atenuación: 5 dB**

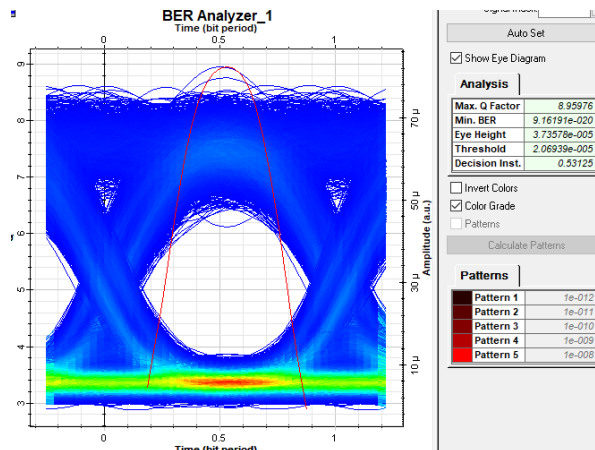


Figura 4. 30. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 5 dB)
(Fuente: Autor)

- **Atenuación: 6 dB**

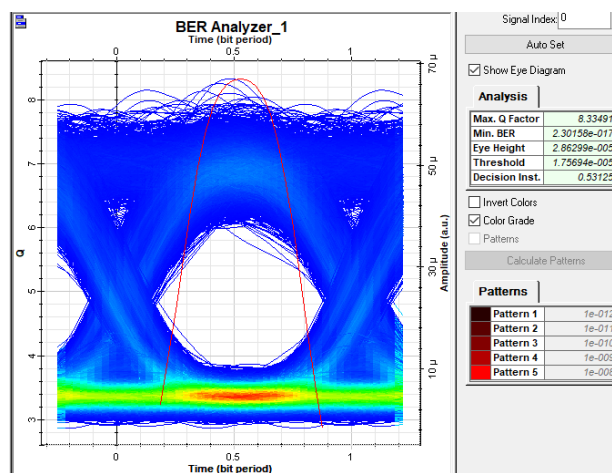


Figura 4. 31. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 6 dB)
(Fuente: Autor)

- Atenuación: 7 dB

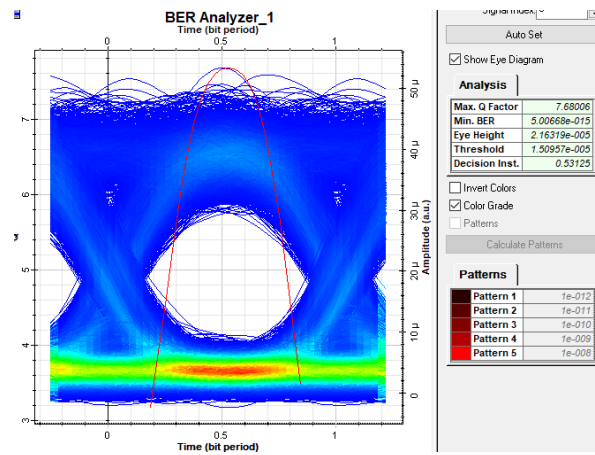


Figura 4. 32. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 7 dB)
(Fuente: Autor)

- Atenuación: 8 dB

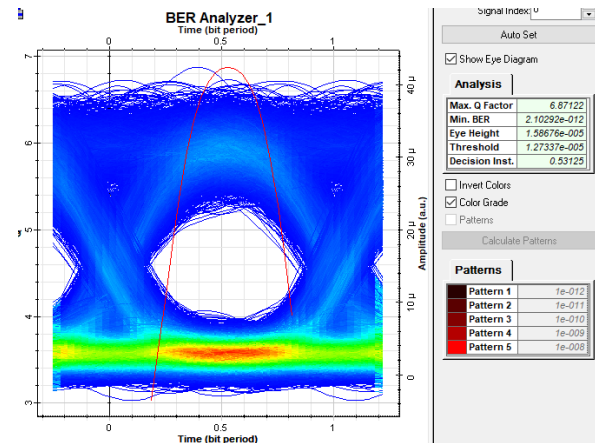


Figura 4. 33. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 8 dB)
(Fuente: Autor)

- Atenuación: 9 dB

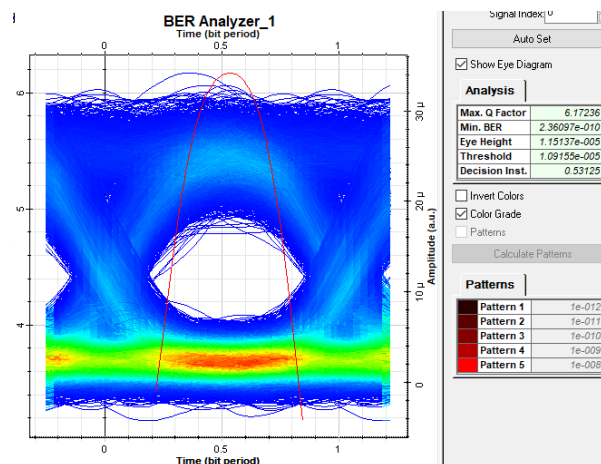


Figura 4. 34. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 9 dB)
(Fuente: Autor)

- **Atenuación: 10 dB**

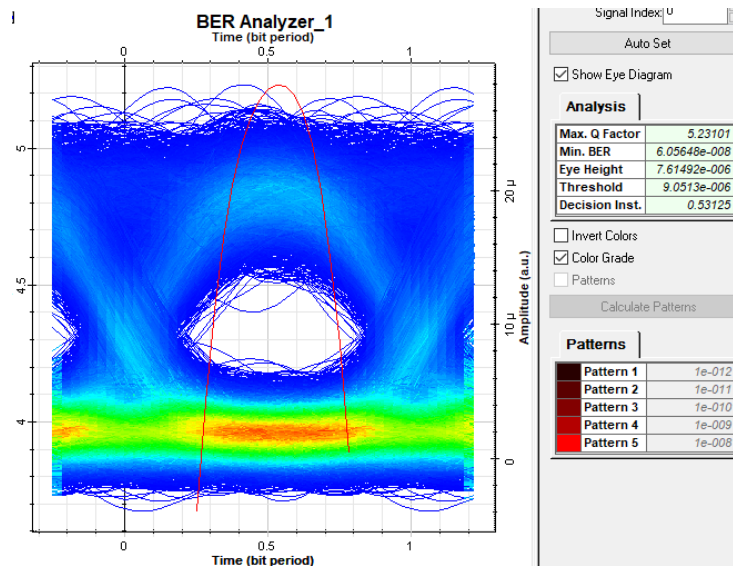


Figura 4. 35. Diagrama de ojo en la CO (Atenuación = 10 dB)
(Fuente: Autor)

En la Tabla 4. 3 se muestra los valores obtenidos de la tasa de bits errados, potencia óptica recibida y el factor de calidad Q de la señal frente al aumento de atenuación.

Tabla 4. 3. BER, Factor Q y Potencia Óptica frente a la atenuación para el enlace ascendente

| Atenuación (dB) | Tasa de Bits errados (BER) | Potencia Óptica recibida (dBm) | Factor de Calidad (Q) |
|-----------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1 | 7.53E-027 | -6.98184 | 10.5971 |
| 2 | 3.044E-025 | -7.98182 | 10.2477 |
| 3 | 2.31E-023 | -8.98098 | 9.82266 |
| 4 | 9.76E-022 | -9.98186 | 9.44305 |
| 5 | 5.75E-020 | -10.9826 | 9.01028 |
| 6 | 8.69E-018 | -11.9814 | 8.44935 |
| 7 | 5.00E-015 | -12.9824 | 7.68006 |
| 8 | 2.10E-012 | -13.9824 | 6.87122 |
| 9 | 2.36E-010 | -14.9811 | 6.17236 |
| 10 | 6.056E-008 | -15.9812 | 5.23101 |

(Fuente: Autor)

Para la evaluación del enlace se realizó en Matlab tres gráficas, la primera con los datos obtenidos en la simulación de BER y potencia óptica recibida, la segunda con los datos de BER

y atenuación, para esto se graficó el semi logaritmo de los valores de BER como se muestra en la Figura 4. 36 y Figura 4. 37, respectivamente.

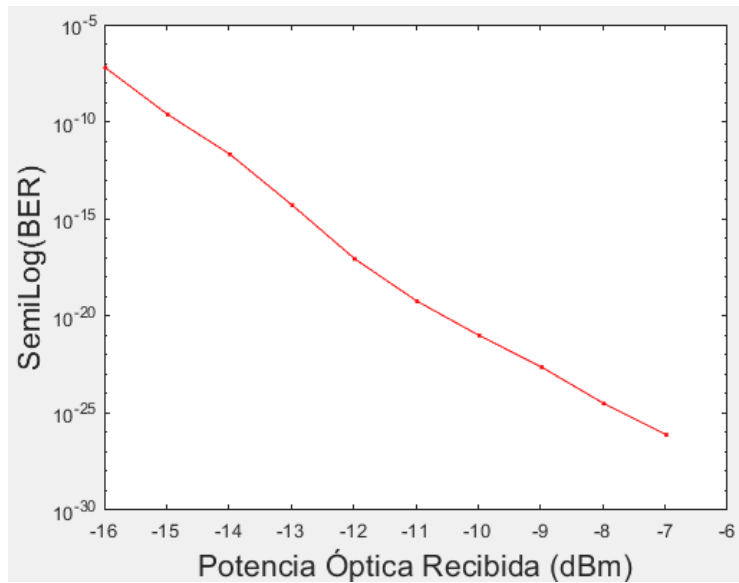


Figura 4. 36. Resultados BER respecto a la potencia óptica recibida - enlace ascendente
(Fuente: Autor)

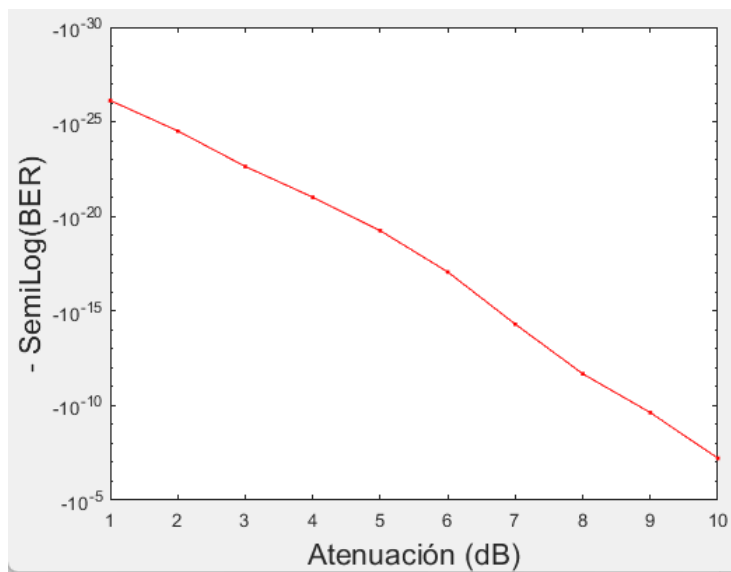


Figura 4. 37. Variación BER en función del aumento de atenuación - enlace ascendente
(Fuente: Autor)

Para la tercera gráfica se utilizó los datos de factor de calidad Q y potencia óptica recibida, como se muestra en la Figura 4. 38.

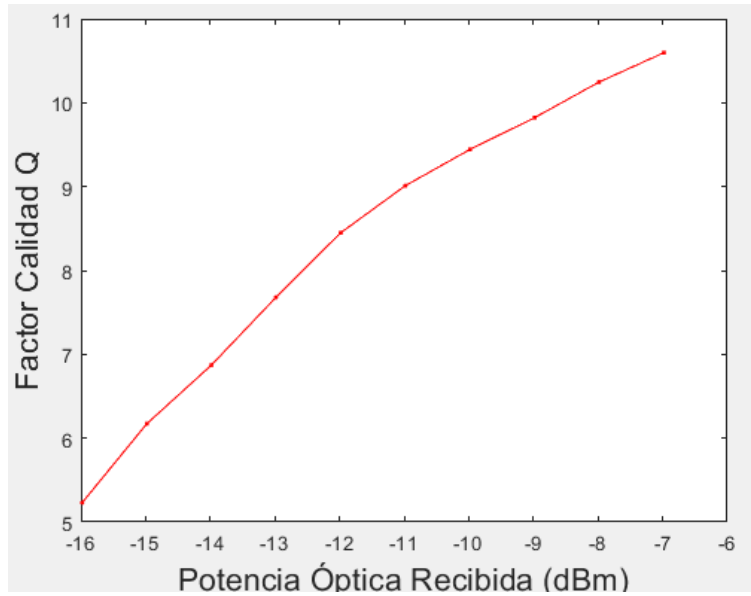


Figura 4. 38. Resultados factor Q respecto a la potencia óptica recibida - enlace ascendente
(Fuente: Autor)

Los resultados muestran el rendimiento de BER para el enlace ascendente y el efecto de aumentar la atenuación en la cantidad de potencia de la señal recibida y BER. En las gráficas se evidencia que a medida que la atenuación aumenta hasta 10 dB la señal se va degradando hasta un BER de 10^{-08} para transmisiones con tasas de 10 Gbps.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se realizó una revisión de los conceptos de las tecnologías de fronthauling óptico aplicadas para redes 5G, las tecnologías empleadas se basan principalmente en CPRI y en sistemas de radio sobre fibra (RoF). Los sistemas RoF transmiten señales de radiofrecuencia moduladas con los datos sobre el canal de fibra permitiendo trabajar con ondas milimétricas lo que ayuda a tener comunicaciones de ultra banda ancha en áreas con alta densidad de usuarios. Además, el fronthauling óptico para redes móviles se conforma por el enlace descendente y el enlace ascendente de la señal, que va hacia y desde la oficina central y la estación base, respectivamente.

El fronthauling óptico de una red 5G debe garantizar el correcto funcionamiento de servicios móviles de banda ultra ancha en sectores urbanos con alta densidad de usuarios, razón por la cual se establecieron como requerimientos del fronthauling óptico diseñado trabajar con ondas milimétricas, garantizar una velocidad de transmisión de 10 Gbps y la capacidad de que la oficina central soporte varias unidades remotas. Además, se trabajó con una distancia de enlace de fronthauling de 24 km considerando que la mayor parte de las estaciones bases se encuentra a pocos kilómetros de la oficina central.

Para el fronthauling óptico diseñado se seleccionó la tecnología de radio sobre fibra con el objetivo de dar cobertura en áreas densamente pobladas con tráfico muy alto. Los enlaces ascendente y descendente trabajan con ondas milimétricas de 72 GHz. Para la transmisión de las señales se consideró un transmisor óptico con modulación externa electroóptica (Mach-Zehnder) y para la recepción de la señal se trabajó con detección directa. Con la finalidad de reutilizar la portadora óptica en el enlace ascendente se utilizó un FBG lo que implica menor costo en la implementación del sistema. Además, para compensar la dispersión generada en la

fibra de 20 km se utilizó una fibra de longitud 4 km.

El sistema de fronthauling óptico basado en RoF fue simulado en Optisystem 19, para lo cual se realizaron 11 iteraciones con el propósito de variar a la atenuación en pasos de 1 dB, desde 0 dB hasta 10 dB, de tal manera, que se puedan obtener los datos, de BER, Factor de calidad Q y potencia óptica recibida, necesarios para el análisis del sistema. Además, la simulación realizada permite observar la forma del diagrama de ojo considerada para determinar el desempeño del enlace. En la simulación se consideró una velocidad de transmisión de 10 Gbps en una longitud de secuencia de 16384 bits, los cuales son transportados por los enlaces a una distancia de 24 km.

A partir de los datos obtenidos en la simulación se realizaron tres gráficas en Matlab para analizar el desempeño del sistema diseñado en base a la calidad de la señal transportada. En este sentido, se verifica que los enlaces descendente y ascendente permiten el transporte de señales con velocidades de transmisión de 10 Gbps con un BER menor a 10^{-20} y factores de calidad mayores a 13, esto a pesar de que la atenuación aumentó hasta 10 dB disminuyen la potencia óptica recibida hasta -15 dBm. Además, en los diagramas de ojo se observa un ojo completamente abierto libre de inconsistencias, garantizando el adecuado comportamiento del sistema.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda a los operadores móviles invertir en la repotenciación de las redes de fronthauling actuales, con la finalidad de garantizar las velocidades de transmisión requeridas para las redes 5G, de tal manera, que se tenga conexiones adecuadas en sitios con un gran flujo de datos y que requieran de baja latencia.

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo, la tecnología de radio sobre fibra

aplicada en el fronthauling óptico de las redes móviles permite solventar los requerimientos de las redes 5G, razón por la cual, se recomienda a los operadores móviles implementar nuevas soluciones simples basadas en RoF que permitan optimizar los recursos disponibles y reduzcan los costos en la implementación del sistema. Además, RoF garantiza la adecuada integración entre ondas milimétricas y fibra óptica para implementación de redes móviles 5G.

Como aspecto de continuidad para este trabajo, se recomienda construir un ambiente de pruebas real que simule la implementación de futuras redes móviles de celdas pequeñas con una configuración simple.

REFERENCIAS

- Abril Reyes, A. (2022). *Migración de la Arquitectura D-RAN en radiobases del sector intercambiador Carapungo. Trabajo Titulación para Ingeniera Electrónica. Universidad Politécnica Salesiana.*
- Albán López, E. (2019). *Análisis de rendimiento de métricas en el modelado del sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando OptiSystem. Tesis Ingeniería. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.*
- Al-Dabbagh, R. K., & Al-Raweshidy, H. (2017). 64-GHz millimeter-wave photonic generation with a feasible radio over fiber system. *Optical Engineering*, 56, 026117.
- Amagua, N., & Mogro, N. (2013). *Análisis y simulación de un enlace de radio sobre fibra óptica (ROF) a 60GHZ. Tesis Ingeniería. Universidad Politécnica Salesiana.*
- Borja González, R. (2021). *Diseño de Redes de Acceso Ópticas para Comunicaciones 5G basadas en la Generación Fotónica de las señales de onda milimétrica. Tesis Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Valencia.*
- Cabrera Cochancela, I., & Zambrano Jaramillo, J. (2021). *Análisis del rendimiento y eficiencia de un sistema de Radio-over-Fiber sobre una red PON mediante Optisystem. Trabajo Titulación Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad de Cuenca.*
- Calucho Cabrera, R. (2021). *Análisis y estudio de un Fronthauling óptico para redes 5G basado en micro-celdas comparando su rendimiento y costo con la red tradicional 4G basado en CPRI. Trabajo Máster en Redes de Comunicación. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.*
- Carriel Sevillano, G. (2020). *Diseño e implementación de esquemas de modulación QAM-OFDM para sistemas de comunicación RoF utilizando OptiSystem. Trabajo Titulación Maestría. Universidad Católica Santiago de Guayaquil.*

- Dhasarathan, V., & Singh, M. (2020). Development of high-speed FSO transmission link. *Wireless Networks*, 26, 2403-2412.
- Fronthaul. (20 de marzo de 2022). Obtenido de Domine la red: <https://www.viavisolutions.com/es-es/fronthaul>
- Gadze, J., Akwafo, R., & Agyeman, K. (2021). A 100 Gbps OFDM-Based 28 GHz Millimeter-Wave Radio over Fiber Fronthaul System for 5G. *Optics*, 70-86.
- Gallego Menéndez, L., & Alonso Montes, J. (2018). *Análisis y propuesta de diseño del despliegue de tecnologías 5G en entornos ferroviarios de alta movilidad*.
- Jain, D., & Iyer, B. (2021). Design and analysis of high-speed four-channel WDM Radio. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1-13.
- Jawad, S., & Fyath, R. (2018). Transmission Performance of Analog Radio-over-Fiber. *International Journal of Networks and Communications*, 8, 81-96.
- Khair, F., & Hario, F. (2015). Modeling and simulation of OFDM scheme for radio over fiber (RoF). *2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 376-381.
- Madrazo Lorite, J. (2018). *Análisis y estudio de soluciones para fronthaul radio. Trabajo Final Máster de Ingeniería en Telecomunicaciones. Universitat Oberta de Catalunya*.
- Muñoz Ortiz, R., Cely Mancipe, M., & Puerto Leguizamón, G. (2015). Generación de señales para sistemas de radio sobre fibra basados en la combinación eléctrica de componentes de banda base y radiofrecuencia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 585-598.
- Palacios Garzón, M. (2019). *Diseño de un sistema de transmisión de señales de radiofrecuencia sobre fibra óptica usando particionado espectral. Trabajo de Grado Universidad José de Caldas*.
- Patiño Carrillo, A. (2018). *Diseño de un sistema de radio sobre fibra. Tesis Maestría en Telecomunicaciones Móviles. Universidad Francisco José de Caldas*.

- Qureshi, K., Qureshi, A., & Magam, M. (2020). Radio-over-fiber front-haul link design using optisystem. *Journal of Optical Communications*.
- Rebhi, S., Barrak, R., & Menif, M. (2014). Performance Evaluation of Radio over Fiber System at 60 GHz for Outdoor and Indoor Environments. *International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, 1418-1421.
- Rivera Sánchez, A. (2020). *Propuesta de Implementación de una arquitectura de radio acceso centralizada LTE usando sistemas de radio sobre fibra (RoF) encaminados al desarrollo de redes 5G para un Operador móvil en Colombia en la ciudad de Bogotá y en la localidad de Soacha. Tesis . Maestría en Telecomunicaciones y Regulación TIC. Universidad Santo Tomás.*
- Robles Coronel, I. (2017). *Simulación de la tecnología RoF empleando GPON para el mejoramiento del servicio de internet móvil en redes LTE. Trabajo Titulación Maestría. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.*
- Rommel, S., Grivas, E., & Cimoli, B. (2021). Real-time high-bandwidth mm-wave 5G NR signal transmission with analog radio-over-fiber fronthaul over multi-core fiber. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 1-20.
- Sierra Solana, I. (2019). *Diseño de red fronthaul sobre WDM para soportar acceso radio 5G. Trabajo Final Máster de Ingeniería en Telecomunicaciones. Universitat Oberta de Catalunya.*
- Sreenesh Shashidharan, J. (2012). Design and Simulation of a Radio Over Fiber System . *IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems. IEEE*, 636-639.
- Varios. (2020). *Understanding MMwave spectrum for 5G networks*. Obtenido de 5G Americas: <https://www.5gamericas.org/understanding-millimeter-wave-spectrum-for-5g-networks/>

Vásquez , F. (2020). *Análisis de comportamiento de la señal de OFDM al pasar por un canal óptico con receptor no coherente. Trabajo Titulación Ingeniería. EPN.*

Wang, Y., & Li, P. (2017). Full-duplex radio-over-fiber system with tunable millimeter-wave signal generation and wavelength reuse for upstream signal. *Applied Optics*, 4982-4989.

ANEXOS

ANEXO I

ESQUEMA DEL FRONTHAULING ÓPTICO DISEÑADO

