

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

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UNA RED DE FRONTHAULING
PARA LA SEXTA GENERACIÓN DE REDES CELULARES, 6G**

Autor: Ing. Cristian Xavier Salazar Freire

Director: Dr. Germán Vicente Arévalo Bermeo, PhD.

Quito, 5 de enero de 2023

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, Cristian Xavier Salazar Freire declaro que el trabajo de titulación “ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UNA RED DE FRONTHAULING PARA LA SEXTA GENERACIÓN DE REDES CELULARES, 6G” previa a la obtención del Título de Magíster en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de TI, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas y fuentes que constan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

Autorizó a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UNA RED DE FRONTHAULING PARA LA SEXTA GENERACIÓN DE REDES CELULARES, 6G”, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Quito, a los 05 días del mes de enero del año 2023.

EL AUTOR



Cristian Xavier Salazar Freire

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi carácter de Director (a) – Tutor (a) del Trabajo de Posgrado Titulado: “ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UNA RED DE FRONTHAULING PARA LA SEXTA GENERACIÓN DE REDES CELULARES, 6G”, presentado por el maestrante CRISTIAN XAVIER SALAZAR FREIRE, titular de la Cédula de Identidad N.º 1721009056 para optar al Grado de Magíster en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de TI, considero que dicho Trabajo de Titulación 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 enero de 2023



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: 7% índice de similitud con otras fuentes.

TURNITIN: INCLUIR HOJA DEL INFORME CON EL PORCENTAJE

Tesis_MTIO_Christian_Salazar_2022_vf.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

7 %

INDICE DE SIMILITUD

6 %

FUENTES DE INTERNET

0 %

PUBLICACIONES

5 %

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Escuela Politecnica Nacional

Trabajo del estudiante

2 %

2

Submitted to Facultad Latinoamericana de
Ciencias Sociales (FLACSO) - Sede Ecuador

Trabajo del estudiante

1 %

3

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1 %

4

departamento.pucp.edu.pe

Fuente de Internet

1 %

5

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1 %

6

repositorio.ucsg.edu.ec

Fuente de Internet

1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Cristian Xavier Salazar Freire declaro que el trabajo de titulación “ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UNA RED DE FRONTHAULING PARA LA SEXTA GENERACIÓN DE REDES CELULARES, 6G” previa a la obtención del Título de Magíster en Tecnologías de Información mención Gestión y Administración de TI, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas y fuentes que constan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Quito, a los 05 días del mes de enero del año 2023.

EL AUTOR



Cristian Xavier Salazar Freire

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1. Formulación del problema	12
1.2. Objetivos de la Investigación	14
Objetivo General	14
Objetivos Específicos	14
1.3. Justificación de la Investigación	15
CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	16
2.1. Antecedentes de la Investigación	16
2.2. Bases Teóricas	17
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	26
3.1. Tipo de Investigación	26
3.2. Diseño de Investigación	27
3.3. Unidades de Estudio	37
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	37
3.5. Técnica de Análisis de Datos	42
3.6. Operacionalización de Variables	43
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
REFERENCIAS	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	19
Tabla 2	20
Tabla 3	21
Tabla 4	27
Tabla 5	29
Tabla 6	34
Tabla 7	35
Tabla 8	43
Tabla 9	44
Tabla 10	45
Tabla 11	45
Tabla 12	47
Tabla 13	47

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Fig. 1 Arquitectura de red 4G	17
Fig. 2 Arquitectura de red 5G	18
Fig. 3 Arquitectura de red 6G	20
Fig. 4 Modulación PAM	23
Fig. 5 Codificación Gray PAM-4.....	23
Fig. 6 Codificación Gray PAM-8.....	24
Fig. 7 Diagrama de ojo modulación PAM-4.....	25
Fig. 8 Diagrama de ojo modulación PAM-8.....	25
Fig. 9 Diagrama de Bloques del Sistema	28
Fig. 10 Diagrama del ojo Optisystem PAM4 a 50 Gbps.....	30
Fig. 11 Diagrama del ojo Optisystem PAM4 a 100 Gbps.....	30
Fig. 12 Diagrama del ojo Optisystem PAM8 a 100 Gbps.....	31
Fig. 13 Diagrama del ojo Optisystem PAM8 a 200 Gbps.....	31
Fig. 14 Diagrama del ojo en Matlab PAM4 a 50 Gbps.....	32
Fig. 15 Diagrama del ojo en Matlab PAM4 a 100 Gbps.....	32
Fig. 16 Diagrama del ojo en Matlab PAM4 a 200 Gbps.....	33
Fig. 17 Diagrama del ojo en Matlab PAM8 a 100 Gbps.....	33
Fig. 18 Diagrama del ojo en Matlab PAM8 a 200 Gbps.....	34
Fig. 19 Valor de BER errado para señal PAM4 en Optisystem.....	36
Fig. 20 Valor de BER errado para señal PAM8 en Optisystem.....	36
Fig. 21 Layout principal.....	37
Fig. 22 Parámetros del Layout	38
Fig. 23 Pseudo-Random Bit Sequence Generator.....	38
Fig. 24 CW Laser Measured	38
Fig. 25 MZ Modulator Analytical.....	39
Fig. 26 Optical Fiber	39
Fig. 27 Optical Attenuator	39
Fig. 28 Optical Receiver	40
Fig. 29 M-ary Pulse Generator.....	40
Fig. 30 Oscilloscope Visualizer	40
Fig. 31 Optical Time Domain Visualizer.....	41
Fig. 32 Optical Power Meter.....	41
Fig. 33 Matlab Component	42
Fig. 34 Software Matlab	42
Fig. 35 Diseño enlace Fronthaul 6G	44
Fig. 36 Potencia Recibida (dBm) vs BER para modulación PAM-4.....	46
Fig. 37 Potencia Recibida (dBm) vs BER para modulación PAM-8.....	48

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

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UNA RED DE FRONTHAULING PARA LA SEXTA
GENERACIÓN DE REDES CELULARES, 6G**

Autor: Cristian Xavier Salazar Freire

Director -Tutor: Germán Vicente Arévalo Bermeo

Fecha: 05 de enero de 2023

RESUMEN

El despliegue de las redes celulares modernas como 4G y 5G han provocado que se tenga una sociedad digital en todo momento con lo cual la tendencia que buscan las empresas de telecomunicaciones es que se migren la mayor cantidad de servicios a la nube y se tenga movilidad y portabilidad de los usuarios finales y de todo el contenido multimedia que se genera, lo que afecta directamente a que se deben tener enlaces (wireless y fronthaul) lo suficientemente robustos que puedan manejar, transportar y garantizar grandes cantidades de información que se está generando de manera continua, por lo cual el presente trabajo con la finalidad de presentar soluciones que reutilicen la infraestructura desplegada actualmente y de mejorar las comunicaciones mediante fibra óptica entre las estaciones base y las antenas de radio celular, se vio en la necesidad de simular una red de fronthauling para la sexta generación de redes celulares 6G que permita alcanzar velocidades superiores a los 50 Gbps mediante las modulaciones PAM4 y PAM8 con miras alcanzar velocidades de 200 Gbps.

Palabras clave: Fronthaul, PAM4, PAM8, fibra óptica, BER.

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

**ANALYSIS AND SIMULATION OF A FRONTHAULING NETWORK FOR THE
SIXTH GENERATION OF CELLULAR NETWORKS, 6G**

Author: Cristian Xavier Salazar Freire

Director -Tutor: Germán Vicente Arévalo Bermeo

Date: January 5, 2023

ABSTRACT

The deployment of modern cellular networks such as 4G and 5G have led to a digital society at all times, with which the trend sought by telecommunications companies is to migrate the largest number of services to the cloud and have mobility and portability of end users and of all the multimedia content that is generated, which directly affects the fact that links (wireless and fronthaul) must be robust enough to handle, transport, and guarantee large amounts of information that is being generated continuously, for which the present work with the purpose of presenting solutions that reuse the infrastructure currently deployed and to improve communications through fiber optics between base stations and cellular radio antennas, saw the need to simulate a fronthauling network. for the sixth generation of 6G cellular networks that allows speeds of over 50 Gbps to be reached through PAM4 and PAM8 modulations with a view to reaching speeds of 200 Gbps.

Keywords: Fronthaul, PAM4, PAM8, fiber optics, BER.

INTRODUCCIÓN

Con los avances tecnológicos de los últimos años, los ambientes de trabajo y producción han evolucionado sus mecanismos al momento de acceder a la información, la importancia de contar con enlaces inalámbricos es notable cuando los usuarios finales son capaces de acceder, manipular, trabajar, compartir e interactuar con la información deseada desde cualquier lugar y dispositivo móvil utilizado, en donde las redes celulares son el medio de envío y recepción perfecto si lo que se necesita es la movilidad, portabilidad, flexibilidad, entre otros lo que simplifica las tareas de los usuarios finales, por lo que constantemente se han desarrollado enlaces con altas prestaciones en cuanto a velocidad en el intercambio de datos de manera inalámbrica, es por eso que el sistema de comunicación inalámbrica 6G se presenta como una atractiva solución ya que integra inteligencia artificial (IA), nuevas tecnologías como los terahercios (THz), redes tridimensionales (3D), comunicaciones cuánticas, formación de haces holográficos, comunicación de retrodispersión, inteligencia superficial reflectante (IRS) y almacenamiento en caché proactivo (Chowdhury, Shahjalal, Ahmed, & Jang, 2020).

Las redes 5G tienen una gran apertura en cuanto a soportar los servicios basados en IoT (Internet of Things) y su despliegue comercial, sin embargo, presenta limitantes en sus prestaciones técnicas (velocidad, cobertura, latencia, capacidad de enlace), en consecuencia, una red 6G mejorará las especificaciones técnicas de una red de anterior generación, donde se podrá evidenciar velocidades de comunicación en el rango de los Tbps, baja latencia (microsegundos), enlaces de super altas capacidades, entre otros (Zakria, Khoa, Nasir, & Hafiz, 2021).

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Formulación del problema

Varios países de América Latina se encuentran en fases de desarrollo, pruebas y despliegues de la red celular 5G sin tener un impacto positivo, tal es el caso de Brasil, Chile, México, Puerto Rico, Uruguay, República Dominicana se encuentran en etapa de transición a esta generación tecnológica, aunque entre ellos existen notables asimetrías, siendo Brasil y México los países que lideran el proceso, sin embargo, para el caso de Ecuador recientemente se ejecutaron pruebas de conectividad 5G en la ciudad de Guayaquil por lo cual es considerado uno de los países más rezagados, todo esto se enmarca en que no existen políticas de gasto público que permitan tener una correcta transición de la red celular 4G hacia la red 5G (Levy, 2022).

En la actualidad el mundo de las telecomunicaciones y los servicios que se brindan a los diferentes usuarios tanto a proveedores así como a usuarios finales que se encuentran inmersos en los diferentes campos de las redes de telecomunicaciones, en donde se ha presentado una evolución, desarrollo y despliegue de manera exponencial de lo que son infraestructuras y servicios, para lo cual los giros de negocios actuales han demostrado que también es posible ser productivos sin la necesidad de estar detrás de un escritorio o de manera presencial en las oficinas de las empresas, bajo esta premisa las redes celulares actuales 4G y 5G cumplen un papel fundamental en la sociedad ya que son las encargadas de conectar a toda la sociedad a una nueva era digital con velocidades de navegación que van desde los 10 Mbps hasta 1 Gbps respectivamente, sin embargo, esta tendencia ha generado que el tráfico se haya incrementado de manera exponencial con lo cual se ha evidenciado la necesidad de contar con velocidades y anchos de banda superiores que permitan abarcar y soportar las demandas de tráfico actuales de la nueva era digital lo que ha provocado que el despliegue de la red celular 5G sea de manera anticipada en varias regiones del mundo, esta problemática afectó directamente a la estructura física tal es el caso de las bases celulares, antenas, torres, data center, oficinas de servicios de proveedores así como el medio de transporte en este caso los enlaces de fibra óptica o mejor conocido como fronthaul cuyo objetivo principal es el de conectar las oficinas de los proveedores de servicios con la infraestructura que permita la conexión inalámbrica de todos los usuarios finales, es por tal motivo que en la actualidad se están realizando estudios para un despliegue de una red celular de nueva generación 6G que sea capaz de abastecerlas necesidades actuales así como la de realizar la integración con el mundo de IoT (Internet of

Things), sin embargo, los estudios actuales se han centrado en los diseños de las arquitecturas de conectividad inalámbrica, por lo cual también es de suma importancia contar con enlaces de fronthaul que sean capaces de soportar la creciente demanda, en consecuencia el presente trabajo tiene como objetivo el de diseñar y simular una red óptica de conexión (fronthauling) entre la oficina del proveedor de servicios CO (Central Office) y una cabecera de radio remota RRH (Remote Radio Head) de 6G, con lo cual se pretende reutilizar la infraestructura actual para tratar de reducir costos de nuevos enlaces.

1.2. Objetivos de la Investigación

Objetivo General

- Diseñar y simular una red óptica de conexión (fronthauling) entre la oficina del proveedor de servicios CO (Central Office) y una cabecera de radio remota RRH (Remote Radio Head) de 6G (asumiendo que esta tecnología proveerá banda ultra-ancha a los usuarios)

Objetivos Específicos

- Estudio del estado del arte del fronthauling para redes de 6G
- Diseño de un fronthauling óptico para la sexta generación de redes celulares
- Simulación fronthauling óptico para redes 6G
- Análisis de resultados de la simulación

1.3. Justificación de la Investigación

La sociedad tecnológica actual presenta una tendencia y necesidad de contar con una red celular de ultra banda ancha que les permita explotar el uso de los diferentes servicios como por ejemplo telepresencia, envío y recepción de información, IoT (Internet of Things), automatización industrial, telemedicina y demás escenarios en donde el usuario final pueda tener la garantía que la comunicación será lo más fiel posible al tiempo real.

La sexta generación de redes celulares promete tener muchas ventajas sobre sus tecnologías predecesoras (5G y 4G), ya que se deben incrementar y mejorar la transferencia de la tasa de datos para que logren soportar enlaces de altas capacidades (ultra banda ancha), una menor latencia, confiabilidad, disponibilidad de acceso a los diferentes servicios, procesamiento de la señales en las RRH (Remote Radio Head), densidad de conexión para soportar una gran demanda de usuarios y cobertura global que permita realizar el Roaming de manera transparente para el usuario final.

Para el desarrollo del presente trabajo de tesis se va a elaborar el diseño y estructura del fronthauling óptico de la red celular de sexta generación (6G) para proveer banda ultra ancha a los usuarios finales, el enlace diseñado va a tener una conexión entre la CO (Central Office) del proveedor de servicios y una RRH (Remote Radio Head), cuya información será inyectada de manera directa sobre la fibra óptica, es decir la señal de radio será transmitida por un canal óptico, en consecuencia, se usará lo que se conoce como RoF (Radio Over Fiber).

Como se indicó en el apartado 1.1 Formulación del Problema varios de los países de Latino América se encuentran en proceso de migración de la red 4G hacia la red 5G, este caso no es el que viven otros países ya que estos se encuentran rezagados, todo esto debido a que realizar este nuevo despliegue de la red celular 5G conlleva la asignación y ejecución de un elevado gasto público, ya que hacer la transición de 4G hacia 5G se estima un costo de 7 veces mayor, lo cual con una economía atrasada demanda grandes sacrificios económicos y de talento humano, es por este motivo que el presente trabajo de tesis busca simular un enlace de fronthaul que sea capaz de abastecer la demanda de tráfico de la sociedad actual pero manteniendo el uso de la infraestructura desplegada actualmente con la finalidad de tratar de mitigar el costo de infraestructura (Levy, 2022).

CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Antecedentes de la Investigación

Las redes celulares de cuarta generación 4G pertenecen a una tecnología capaz del envío y recepción de voz y datos a altas velocidades, con lo cual se estimó que la conectividad con los dispositivos de los usuarios supere en al menos 10 veces las capacidades entregadas por tecnologías 2G y 3G logrando alcanzar velocidades de hasta 100 Mbps en el down link y 50 Mbps en el up link lo cual se fundamenta en la tecnología IP (Internet Protocol) (Constain Prado, 2019).

De acuerdo a la creciente demanda de dispositivos que acceden a las redes celulares móviles, para el año 2020 se implementó reléase 15 o mejor conocido como red celular 5G, cuyo despliegue se fue en países europeos, cuyo objetivo principal fue la cobertura de la demanda de los enlaces de subida (up link a 10 Gbps) como en los enlaces de bajada (down link a 20 Gbps), con lo cual se esperó entregar al usuario final una velocidad promedio de 100 Mbps (Santillán Carranza, 2019).

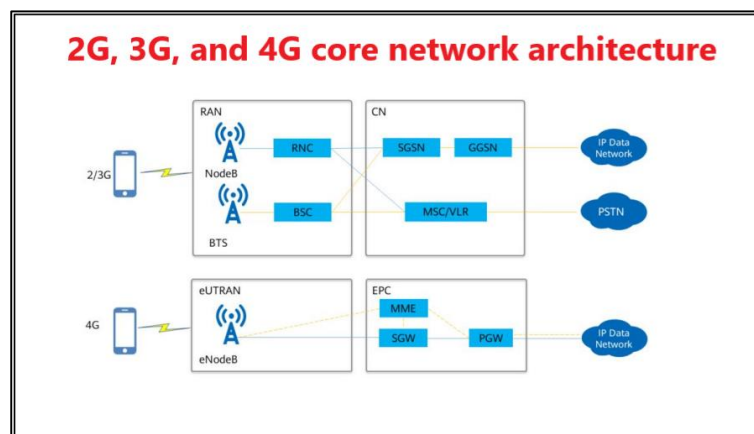
Hasta el año 2030 las aplicaciones y los escenarios implementados gracias a la evolución de la nueva red celular 6G contemplarán inteligencia artificial, productividad inteligente y una sociedad inteligente, donde se espera sea aplicada en la industria y todos sus campos, logrando que se tenga una sociedad conectada en todo lugar y en todo momento (Shimaa, Hanan, & HyungWon, 2022).

2.2. Bases Teóricas

Redes Móviles Celulares 4G

Las redes móviles celulares de cuarta generación o 4G son un conjunto de servicios y equipos que proveen de banda ancha inalámbrica a todos los dispositivos móviles de los usuarios finales basados en el estándar IP (Internet Protocol), soportando velocidades teóricas de hasta 100 Mbps para el Up y Down link.

Para lograr estas conexiones se utiliza la interfaz radioeléctrica basada en OFDMA (Orthogonal Frecuencia División Múltiple Access- Multiplicación por División de Frecuencias Ortogonales) para el enlace descendente (DL) y SC-FAMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) para el enlace ascendente (AL) (Ruiz Leal & Gutierrez Gonzales, 2020).



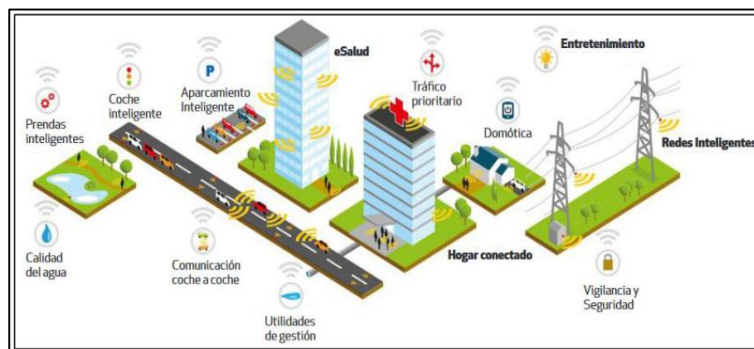
*Fig. 1 Arquitectura de red 4G
Fuente: (Huawei, 2022)*

Con el despliegue de la tecnología LTE se evidenciaron grandes ventajas que favorecen tanto a los usuarios finales, así como a las prestadoras de servicios y a las entidades de control y regulación, las cuales son:

- Altas velocidades de transmisión, 100 Mbps Down link y 50 Mbps Up link.
- Mejora de la eficiencia espectral comparada con el sistema UMTS ya que se utiliza el método de acceso OFDM.
- Latencias en la red de acceso de radio menores a 10 ms.
- Se puede escalar el ancho de banda.
- LTE es compatible con tecnologías anteriores como UMTS, GPRS, etc (Gutierrez Gonzalez, 2020).

Redes Móviles Celulares 5G

Con los avances tecnológicos que se han venido realizando en las redes celulares, la necesidad de contar con mejoras en las mismas y abrirse hacia el campo de la industria y automatización, se ha evidenciado que ya no únicamente se debe transportar voz y datos entre los usuarios finales por lo cual la red celular de quinta generación 5G tiene como objetivo principal el diseño y despliegue de redes que sean capaces de integrar, soportar y potenciar al IoT (Internet of Things), donde se tienen como principales ejemplos y servicios la domótica, banda ancha, streaming, entre otros mismos que gracias a las velocidades soportadas por 5G que son de 20 Gbps con una latencia de 1 ms aproximadamente y cobertura celular de gran capacidad (Vera Cárdenas, 2018).



*Fig. 2 Arquitectura de red 5G
Fuente: (Vera Cárdenas, 2018)*

Fronthaul de las Redes Celulares 4G y 5G

Desde el despliegue de la primera red celular 1G o GSM cuyas velocidades rondaban los kbps, la comunidad científica ha desarrollado paulatinamente nuevos estándares, protocolos, tecnologías, frecuencias de uso, entre otras características técnicas que han permitido el despliegue de las redes celulares 2G, 3G, LTE, 4G y 5G que han mejorado la velocidad de manera exponencial llegando al rango de los 10 Gbps, aceptación y ofrecimiento de nuevos servicios como son el IoT, cloud, acceso móvil web, telefonía IP entre otros, provocando que el tráfico de datos a través de los enlaces inalámbricos deban soportar mucha más carga (García Quilachamin, y otros, 2021).

Tabla 1**Características principales de la evolución de las redes celulares**

RED	VELOCIDAD	TECNOLOGÍA	SERVICIO
GSM	9.6 Kbps	Digital	Voz
2G	Entre 14 a 64 Kbps	Digital	Voz Digital
3G	Entre 384 kbps a 2 Mbps	Multiplexación / acceso	Internet
LTE	50 Mbps	Multiplexación Espacial	Acceso móvil, Telefonía
4G	Entre 100 Mbps a 1 Gbps	Multiplexación / acceso	Acceso móvil web, telefonía, telefonía IP, cloud.
5G	Entre 1 a 10 Gbps	Multiplexación / acceso	Variedad de servicios con mucha mayor velocidad.

Fuente: 5G y el Internet de las Cosas: Revisión Sistemática (García Quilachamin, y otros, 2021)

Fronthaul de la Red Celular 6G

La red celular de nueva generación 6G tiene como objetivo superar las características técnicas de las redes celulares 4G y 5G, en donde se contempla trabajar con OFDM con al menos 4096 subportadoras espaciadas a 240 KHz entre si usando modulación QPSK, lo que permitirá una tasa teórica máxima de 200 Gbps, con un espectro de frecuencia de 300 GHz y niveles de latencia de hasta 100 us.

Para el diseño del enlace de fronthaul se pretende usar la tecnología de multiplexación WDM ultradensa, misma que se puede simular sobre el enlace de fibra óptica que permita funcionalidades inteligentes y reconfigurables con la finalidad de determinar la capacidad del enlace que una la CO y la BS. (Raddo, y otros, 2021).

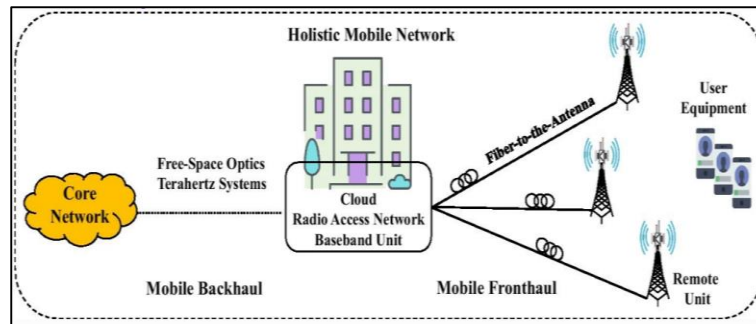


Fig. 3 Arquitectura de red 6G
Fuente: (Raddo, y otros, 2021)

Tomando como referencia a las investigaciones e implementaciones realizadas en los enlaces de fronthaul de anteriores redes celulares 4G y 5G en donde se definen las velocidades de los enlaces entre la CO y la RRH (Calucho Cabrera, 2021), adicional se han desarrollado transmisores laser para transportar información a altas velocidades, en donde manejan velocidades de 10 Gbps para enlaces fronthaul de redes 4G y velocidades de 25 Gbps para enlaces de fronthaul de redes 5G (Huang, y otros, 2018).

Tabla 2

Velocidades de los enlaces de fronthaul

RRH / IF	4G / LTE	4G / LTE - Advanced	5G
Data Rate	2.5 Gbps	9.8 Gbps	25 Gbps

Fuente: 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 (Calucho Cabrera, 2021).

Sin embargo, debido a la escasa madurez e información relevante de la nueva tecnología de redes celulares 6G, se pretende simular un enlace de fronthaul de capacidad proporcional al salto de la red 4G a la red 5G, por lo cual se van a utilizar para la transmisión de la red 6G técnicas ópticas no complejas de modulación de intensidad con el fin de reducir costos ya que el fronthauling de la red 6G va a seguir utilizando los enlaces ópticos actuales pero con la diferencia que se tendrán nuevas interfaces.

Tabla 3

Velocidad propuesta para el enlace de fronthaul de la red celular 6G

RRH / IF	4G / LTE	4G / LTE - Advanced	5G	6G
Data Rate	2.5 Gbps	9.8 Gbps	25 Gbps	50 – 200 Gbps

Fuente: Elaborado por el autor.

Software Optisystem

La presente tesis se procederá a simular y diseñar en el software Optisystem que fue creado por la empresa Optiwave Systems que es una herramienta de diseño de software potente, innovadora y de rápida evolución que permite a los usuarios planificar, probar y simular casi todos los tipos de enlaces ópticos en la capa de transmisión de un amplio espectro de redes ópticas desde LAN, SAN, MAN hasta redes ultra largas de transporte. Ofrece diseño y planificación de sistemas de comunicación óptica de capa de transmisión desde el nivel de componente hasta el de sistema, y presenta análisis y escenarios de forma visual, todo esto se lo puede diseñar, configurar y simular tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

Dentro de las principales características de Optisystem podemos encontrar:

- Proporciona la información general de cuál es el rendimiento del sistema.
- Permite evaluar el nivel de sensibilidad de los parámetros y poder manejar diseños con tolerancias permisibles.
- Proporciona un barrido y optimización de manera automática de los parámetros de interés.

Para (Systems, 2022) como aplicaciones destacadas de Optisystem se puede mencionar:

- Diseños de redes ópticas que incluyen OTDM, anillos SONET/SDH, CWDM, 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/BER, potencia de señal/OSNR, estados de polarización, diagramas de constelación, penalizaciones lineales y no lineales) (Systems, 2022).

Software Matlab

MATLAB, el lenguaje de cálculo técnico desarrollado por MathWorks, es un entorno de programación para el desarrollo de algoritmos, análisis de datos, visualización y cálculo numérico.

- Como beneficios destacados se pueden enumerar:
- Simulación de procesos.
- Permite construir modelos simples para testear teorías.
- Ofrece Toolboxes complementarias para amplia variedad de aplicaciones de ingeniería e investigación.
- Lenguaje de alto nivel para cálculos científicos e ingeniería.
- Identificación y simulación de sistemas.
- Visualiza, explora y analiza datos.
- Diseño de control, procesamiento de señales e imágenes.
- Creación de gráficos para visualizar datos.
- Rapidez y precisión en la ejecución de proyectos (Pontificia Universidad Católica del Perú, 2019).

Modulación PAM

Modulación por Amplitud de Pulso o PAM es una técnica que se utiliza para transmitir datos utilizando la variación de la amplitud de cada pulso de manera secuencial y temporizada, en donde la entrada o la fuente de la señal es un tren de pulsos de 1 y 0 lógico, mientras que la salida puede tener diferentes niveles de modulación o M-PAM (Leon Albiño, 2021).

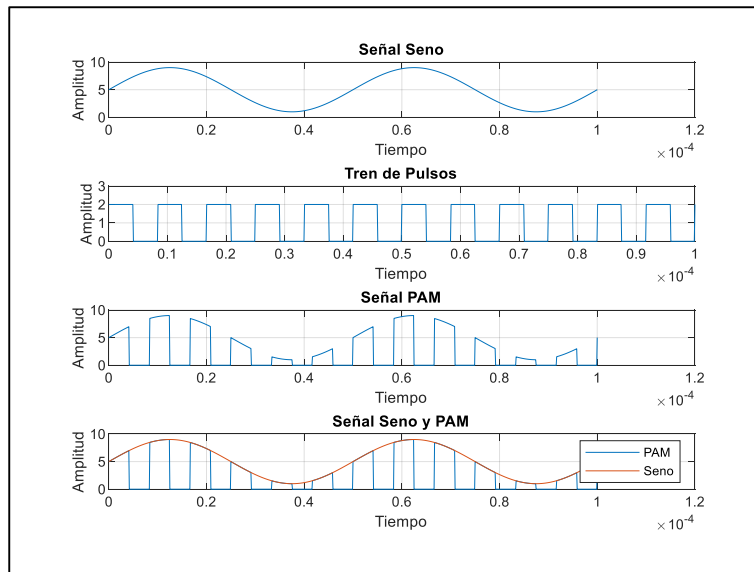


Fig. 4 Modulación PAM
Fuente: Elaborado por el autor

Modulación PAM-4

Modular mediante PAM-4 requiere el uso de 2 bits para generar 4 niveles de señal mediante codificación Gray, con lo cual se logra duplicar la velocidad de cada bit que se transmite por medio de la fibra óptica, todo esto sin la necesidad de contar con ancho de banda adicional (Costales Vallejo, 2020).

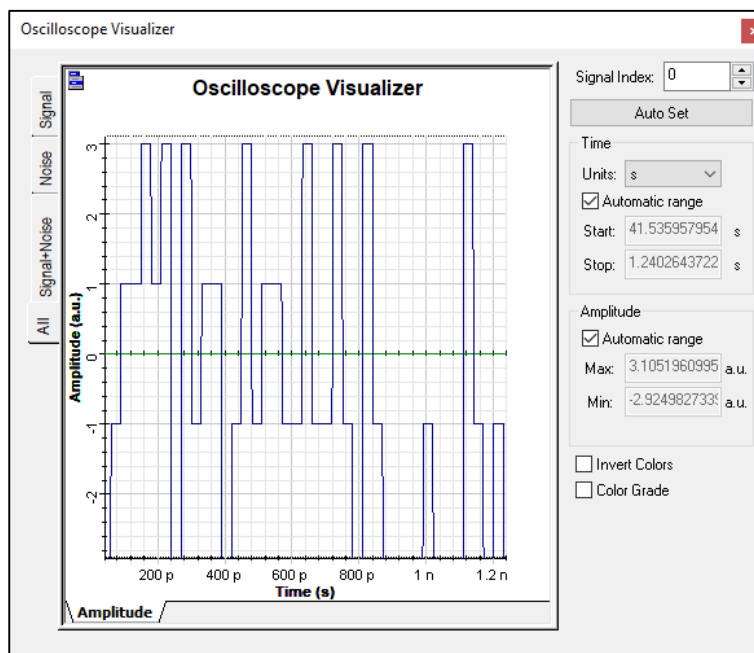
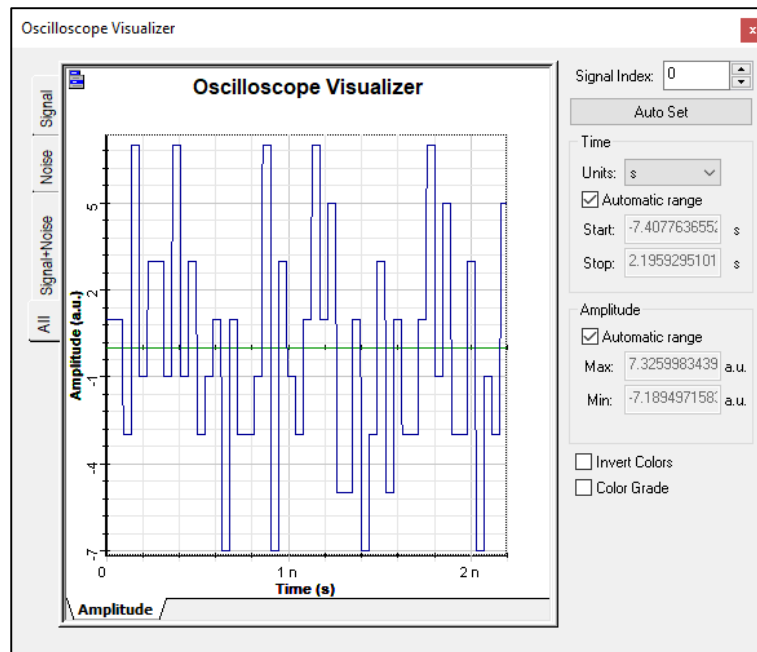


Fig. 5 Codificación Gray PAM-4
Fuente: Elaborado por el autor

Modulación PAM-8

Para modular PAM-8 se requiere el uso de 3 bits para generar 8 niveles en codificación Gray, con lo cual se logra triplicar la velocidad de transmisión.



*Fig. 6 Codificación Gray PAM-8
Fuente: Elaborado por el autor*

Diagrama del Ojo

Para medir que tan eficiente es un sistema digital en la recepción de datos, es necesario utilizar el diagrama del ojo, con el cual se va a determinar cómo se comporta el enlace de fronthaul, mediante la super posición de los bits mostrados en el lado del receptor se va a observar desfases, niveles de ruido, niveles de codificación además de las potencias recibidas, conforme se muestra en la figura 7 el diagrama del ojo para una modulación PAM-4 va a presentar 4 niveles, la figura 8 muestra el diagrama del ojo para una modulación PAM-8 y va a presentar 8 niveles respectivamente.

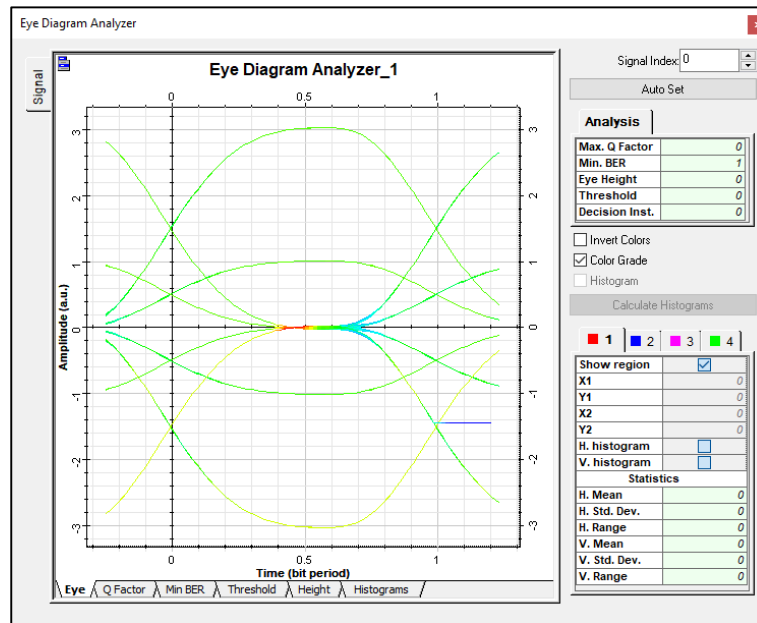


Fig. 7 Diagrama de ojo modulación PAM-4
Fuente: Elaborado por el autor

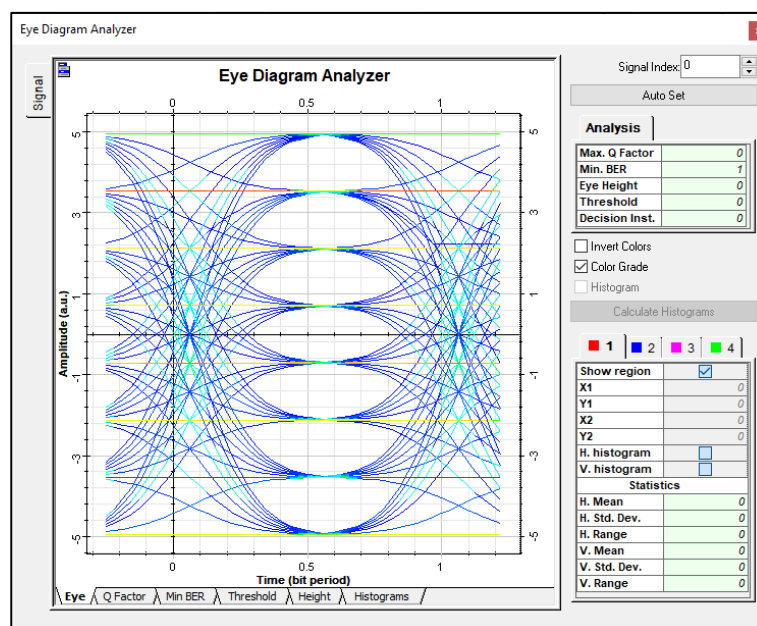


Fig. 8 Diagrama de ojo modulación PAM-8
Fuente: Elaborado por el autor

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo de Investigación

De acuerdo a la naturaleza del trabajo de tesis que se va a desarrollar, se pretende abordar la investigación exploratoria mediante un acercamiento científico al problema planteado, ya que al ser un tema moderno en el mundo de las comunicaciones ópticas no ha sido estudiado e investigado de manera significativa por lo cual las condiciones e investigaciones actuales no son del todo concluyentes y determinantes en todos sus aspectos técnicos.

Para el presente trabajo de tesis como parte de la metodología de la investigación se lo realizará en varias etapas, en primera instancia se ejecutará una recopilación de trabajos a fines con el fin de extraer y organizar la información más importante sobre el fronthauling óptico para redes celulares de nueva generación 6G y sus predecesoras.

Como segunda etapa se desarrollará el diseño y la simulación una red óptica de conexión (fronthauling) entre la oficina del proveedor de servicios CO (Central Office) y una cabecera de radio remota RRH (Remote Radio Head) de 6G (asumiendo que esta tecnología proveerá banda ultra-ancha a los usuarios)

Como tercera y última etapa se emitirán las conclusiones y recomendaciones que surjan de la simulación previamente diseñada en el software Optisystem, con el fin de que para trabajos futuros se puedan realizar análisis en base a costos, beneficios y demás especificaciones técnicas pertinentes, mismos que podrán ser comparados y analizados con estudios de fronthauling ópticos para las redes celulares de tecnología 4G y 5G.

3.2. Diseño de Investigación

La simulación de la presente tesis se desarrolló mediante el uso del software Optisystem, para la parte del transmisor óptico se generó una secuencia de bits de manera aleatoria y se moduló mediante Modulación de Amplitud de Pulso, para la parte del medio de transmisión o fronthaul óptico de la nueva red celular 6G se simuló una fibra óptica con sus especificaciones técnicas reales, para la parte de receptor se utilizó un foto receptor y un demodulador que sean capaces de interpretar y detectar las señales ópticas transmitidas, finalmente se comparó la potencia recibida versus el BER (Bit error ratio).

Se realizaron cinco diseños, mediante PAM-4 para alcanzar una velocidad de 50 Gbps, 100 Gbps y 200 Gbps, y PAM-8 para alcanzar una velocidad de 100 Gbps y 200 Gbps, con la finalidad de encontrar una distancia del fronthauling óptico que no necesite la intervención del procesamiento digital de señales, amplificación y demás elementos que puedan contribuir a que el costo del enlace se eleve, conforme a las especificaciones técnicas de la Tabla 4.

Tabla 4
Características del enlace de fronthaul de la red celular 6G

Modulación	Número de bits	Velocidad	Fibra Óptica	Dispersión Cromática	Longitud Enlace	Atenuador Óptico
PAM-4	1'048.576	50 Gbps	G652D a 1550 nm	17 ps/nm*km	20 km	6 a 10 dBm
PAM-4	1'048.576	100 Gbps	G652D a 1550 nm	17 ps/nm*km	20 km	6 a 10 dBm
PAM-4	1'048.576	200 Gbps	G652D a 1550 nm	17 ps/nm*km	15 km	6 a 9.5 dBm
PAM-8	1'048.576	100 Gbps	G652D a 1550 nm	17 ps/nm*km	20 km	0 a 5 dBm
PAM-8	1'048.576	200 Gbps	G652D a 1550 nm	17 ps/nm*km	15 km	3 a 7 dBm

Fuente: Elaborado por el autor.

A continuación, se muestra el diagrama de bloques del sistema que va a ser simulado mediante la integración de Optisystem que será el encargado de simular un enlace de fibra óptica con todos sus elementos y Matlab que será el encargado de realizar los cálculos matemáticos para la determinación del valor del BER.

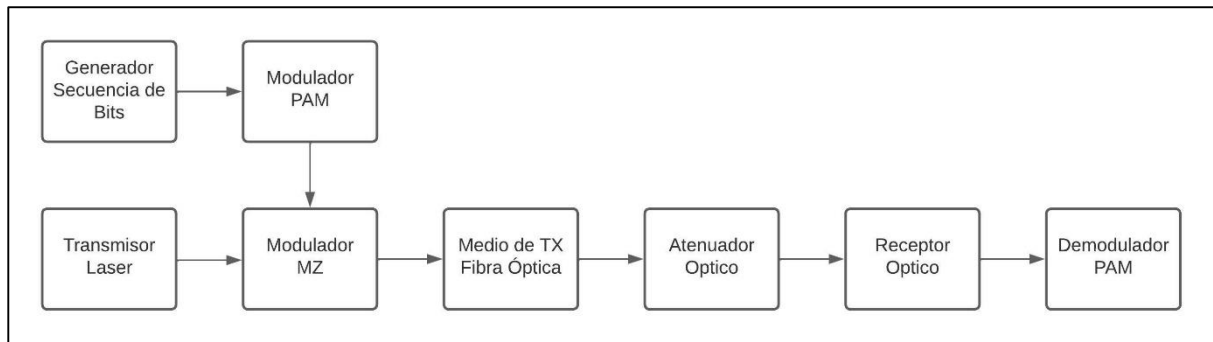


Fig. 9 Diagrama de Bloques del Sistema
Fuente: Elaborado por el autor

Para la información a transmitir, mediante un generador de secuencia de bits seudo randómico se generó la cantidad de al menos 1'048.576 bits, ya que con una cantidad inferior a las previamente establecidas el valor del BER mostró resultados inexactos y poco concluyentes.

Para el modulador, los bits generados se muestrearon y almacenaron en vectores de longitud N en Matlab y archivos de texto plano en formato txt, luego se programó la modulación PAM mediante código Gray de M niveles para la generación de los baudios a transmitir.

Para el transmisor óptico se utilizó un diodo laser con una frecuencia de trabajo de 193.1 THz, una potencia de 0 dBm y un ancho de banda de 10 MHz.

Para el medio de transmisión, se utilizó una fibra óptica monomodo G652D con una dispersión cromática máxima a 1550 nm con un valor típico de 17 ps/nm*km, con 0.25 dB de atenuación por cada kilómetro y una longitud máxima de 15 y 20 km respectivamente de acuerdo a la velocidad a transmitir sin que afecte a la integridad del sistema.

Uno de los efectos adversos que se producen en la fibra óptica es un diagrama de ojo que presente una apertura reducida, la cual puede ser interpretada por una posible interferencia entre cada uno de los símbolos transmitidos, es por eso que la dispersión modal de la fibra óptica va a provocar que tanto la distancia a cubrir, el ancho de banda y el BER (Bit Error Rate) presenten resultados negativos, inesperados e inexactos, bajo esta premisa y con la finalidad de corregir este problema se vio en la necesidad de simular una fibra óptica de compensación conforme a las especificaciones indicadas.

Tabla 5**Cálculo de la fibra compensadora para enlace de fronthaul de la red celular 6G**

Modulación	Velocidad	Fibra Óptica	Dispersión Cromática	Longitud Enlace	Longitud Fibra Compensadora
PAM-4	50 Gbps	G652D a 1550 nm	17 ps/nm*km	20 km	3.4 km
PAM-4	100 Gbps	G652D a 1550 nm	17 ps/nm*km	20 km	3.4 km
PAM-4	200 Gbps	G652D a 1550 nm	17 ps/nm*km	15 km	2.55 km
PAM-8	100 Gbps	G652D a 1550 nm	17 ps/nm*km	20 km	3.4 km
PAM-8	200 Gbps	G652D a 1550 nm	17 ps/nm*km	15 km	2.55 km

Fuente: Elaborado por el autor.

Sin embargo, al colocar los valores exactos previamente calculados de las fibras compensadoras en Optisystem, el software Matlab simulaba a un sistema ideal sin pérdidas por lo cual el diagrama del ojo no presentaba variación alguna a pesar de las grandes cantidades de bits transmitidos y recibidos, en este sentido como medida correctiva se redujo la longitud de la fibra compensadora de manera que no afecta al sistema para comportarse como un enlace perfecto.

Para el atenuador óptico se simularon las iteraciones de conformidad a la Tabla 4 hasta llegar alcanzar una degradación del enlace en donde el valor del BER se encuentre en el orden de 1×10^{-2} con la finalidad de poder medir la calidad de la transmisión.

Para el receptor óptico la señal proveniente del atenuador fue convertida a una señal eléctrica mediante el uso de un fotodiodo tipo PIN con una responsividad de 1 A/W, un umbral de corriente de 10 nA, frecuencia de corte de 0.75 veces la velocidad de símbolo recibido y una sensibilidad de -18 dBm.

En la simulación realizada en Optisystem al momento de generar el diagrama del ojo se pudo notar que el mismo no presentaba consistencia con la cantidad de bits y baudios transmitidos, así como la velocidad del sistema como se aprecia en las figuras 10, 11, 12 y 13.

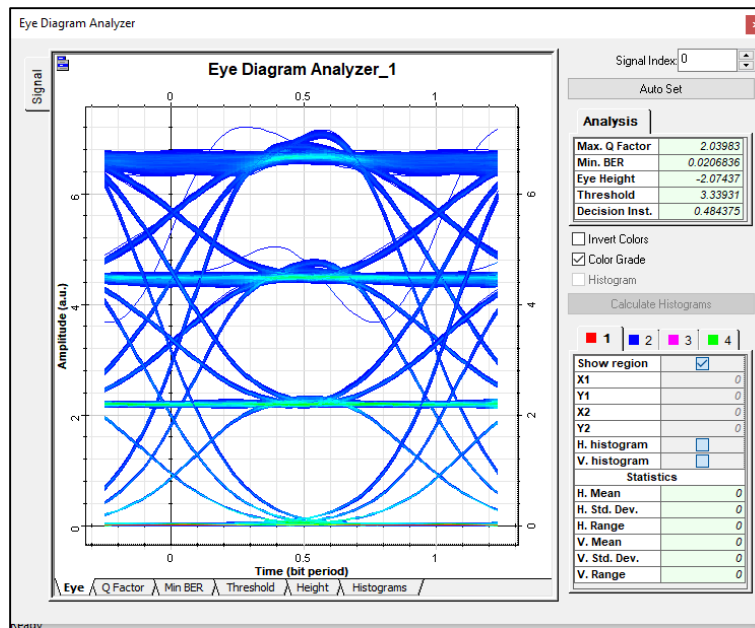


Fig. 10 Diagrama del ojo Optisystem PAM4 a 50 Gbps
Fuente: Elaborado por el autor

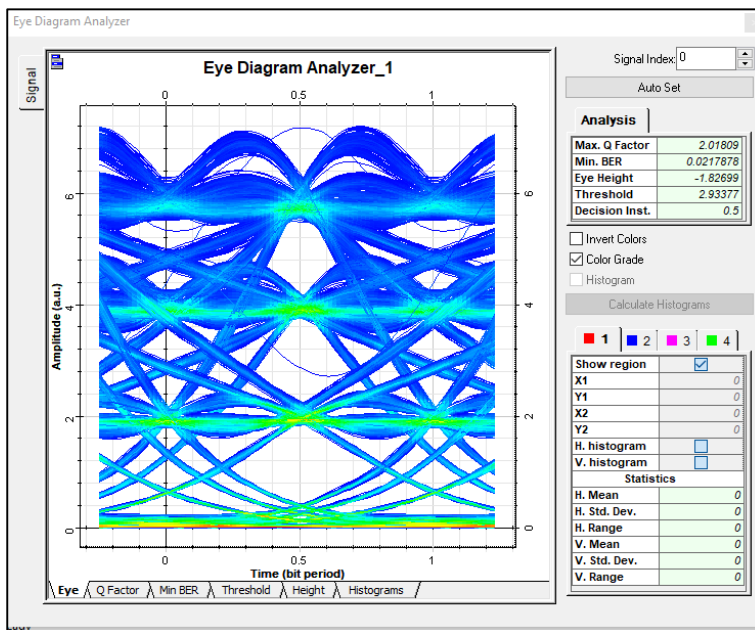


Fig. 11 Diagrama del ojo Optisystem PAM4 a 100 Gbps
Fuente: Elaborado por el autor

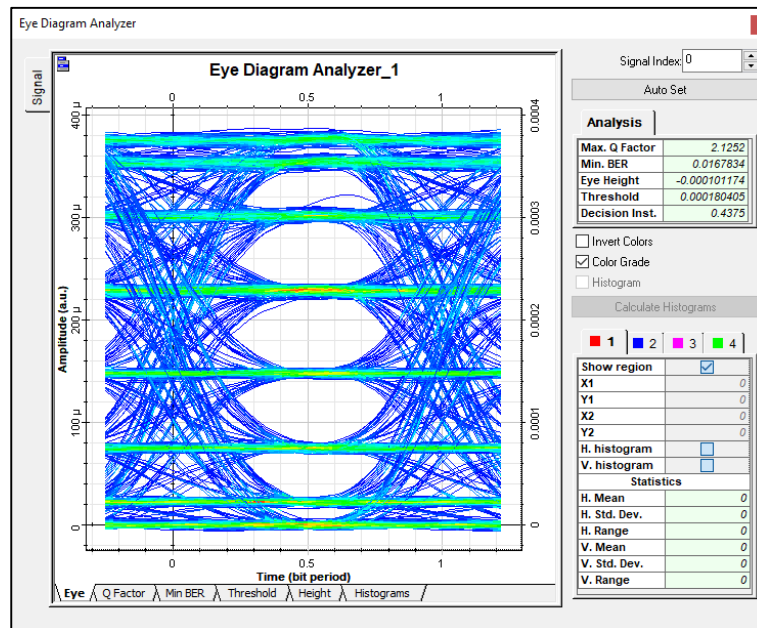


Fig. 12 Diagrama del ojo Optisystem PAM8 a 100 Gbps
Fuente: Elaborado por el autor

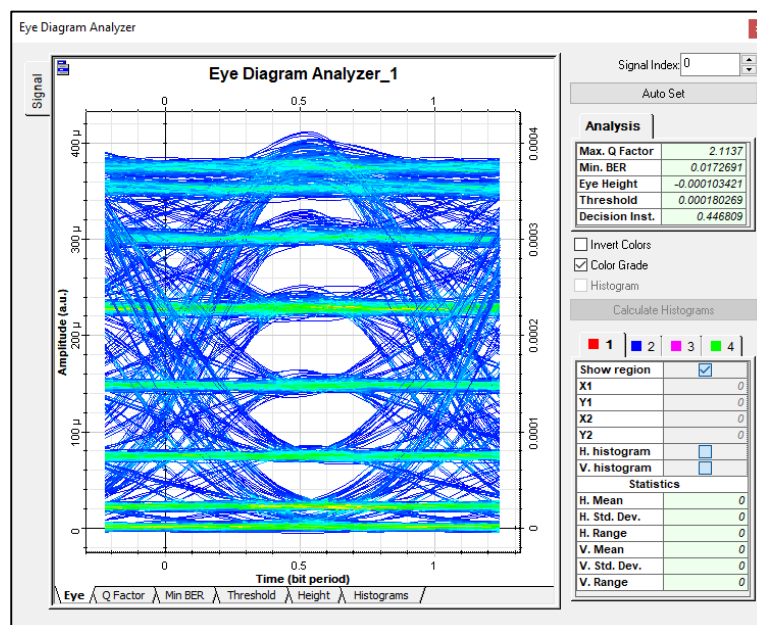
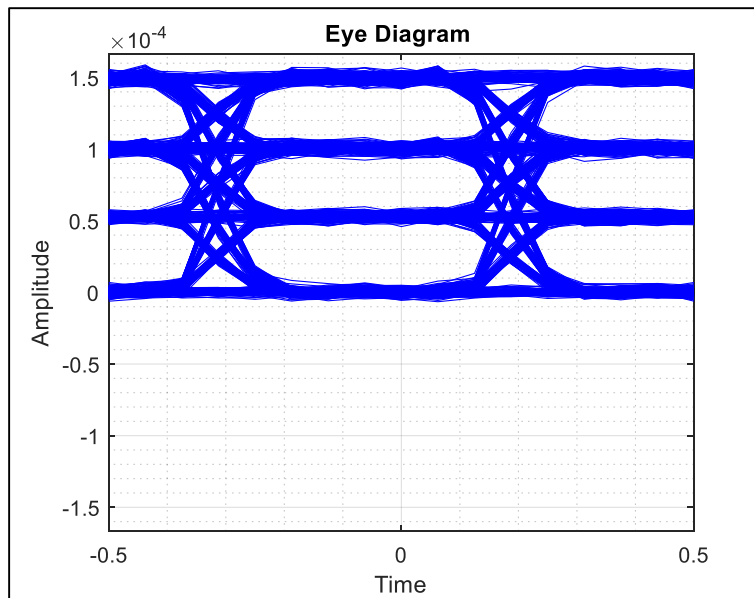
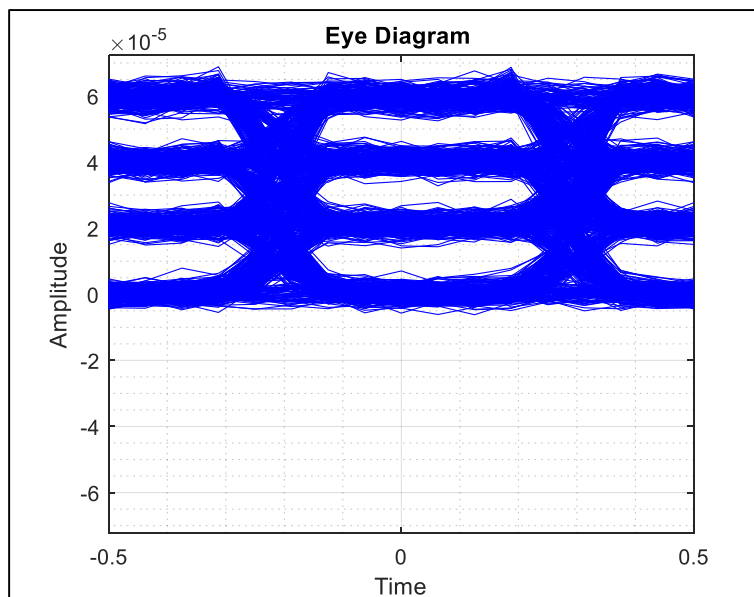


Fig. 13 Diagrama del ojo Optisystem PAM8 a 200 Gbps
Fuente: Elaborado por el autor

Con la finalidad de obtener un diagrama del ojo que se rija a las condiciones reales del enlace simulado, fue necesario calcularlo mediante programación en Matlab, para que se genere en cada simulación realizada como se muestra en las figuras 14, 15, 16, 17 y 18 respectivamente.



*Fig. 14 Diagrama del ojo en Matlab PAM4 a 50 Gbps
Fuente: Elaborado por el autor*



*Fig. 15 Diagrama del ojo en Matlab PAM4 a 100 Gbps
Fuente: Elaborado por el autor*

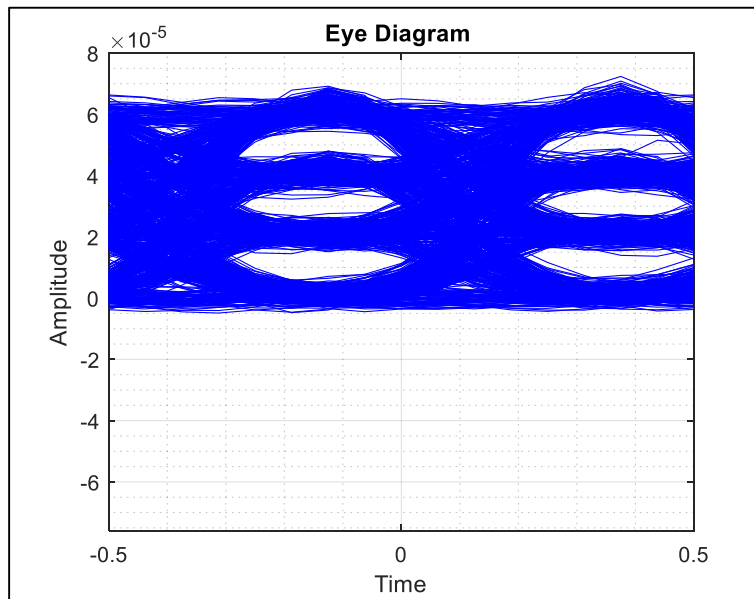


Fig. 16 Diagrama del ojo en Matlab PAM4 a 200 Gbps
Fuente: Elaborado por el autor

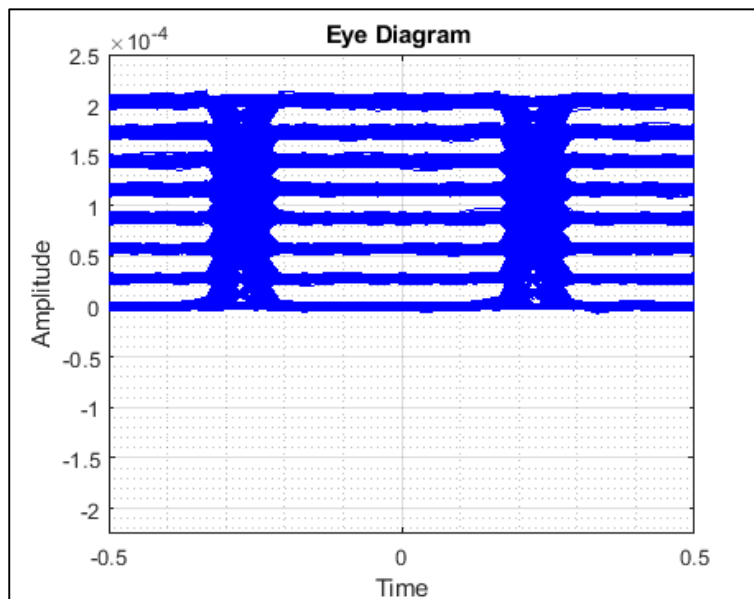
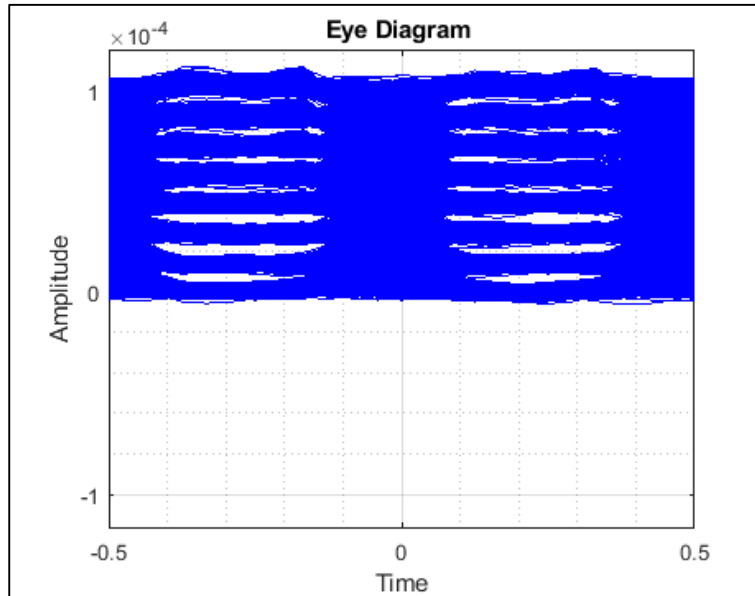


Fig. 17 Diagrama del ojo en Matlab PAM8 a 100 Gbps
Fuente: Elaborado por el autor



*Fig. 18 Diagrama del ojo en Matlab PAM8 a 200 Gbps
Fuente: Elaborado por el autor*

Adicionalmente, se observó que no existía simetría en las aperturas de cada nivel de la modulación PAM-4 y PAM-8, por lo cual, para corregir este error, mediante programación realizada en Matlab se procedió a realizar una pre-distorsión en la etapa del transmisor, con lo cual se determinó los siguientes niveles asignarse en la codificación Gray de acuerdo a la Tabla 6 para PAM-4 y Tabla 7 para PAM-8.

Tabla 6

Niveles de pre-distorsión para codificación Gray en PAM-4

Símbolo	Nivel de Voltaje	Pre-distorsión Nivel de Voltaje
10	+3	+3
11	+1	+0.7
1	-1	-0.6
0	-3	-3

Fuente: Elaborado por el autor.

Para la pre-distorsión que se debe aplicar a PAM-8, varios de los niveles positivos no van a mantener una igualdad y relación numérica con los niveles negativos debido a que las aperturas no mostraron simetría.

Tabla 7**Niveles de pre-distorsión para codificación Gray en PAM-8**

Símbolo	Nivel de Voltaje	Pre-distorsión Nivel de Voltaje
100	+7	+7
101	+5	+3.6
111	+3	+2
110	+1	+0.65
010	-1	-0.65
011	-3	-2.1
001	-5	-3.8
000	-7	-7

Fuente: Elaborado por el autor.

Para el demodulador, se muestreó la señal eléctrica proveniente del fotodiodo PIN así como el ruido presente en el sistema, se generó el diagrama del ojo mediante programación de acuerdo a la cantidad de bits y baudios recibidos, con la finalidad de poder interpretar cada nivel de la señal PAM-4 y PAM-8, mediante el diagrama del ojo se extraen los umbrales de decodificación y se los compara con cada bit y baudio recibido para posterior a esto almacenarlos en vectores de Matlab y un archivo de texto plano en formato txt, es preciso mencionar que este procedimiento se lo debe realizar cada vez que se realicen modificaciones en el sistema tales como:

- Número de muestras del sistema
- Cantidad de bits a transmitir
- Velocidad a transmitir
- Distancia de la fibra óptica del enlace principal
- Distancia de la fibra óptica de compensación
- Atenuación óptica
- Modificación del Diagrama del Ojo

El valor del BER calculado en el software Optisystem no está acorde al diagrama del ojo, ya que como se observa en la figura 19 y 20 se aprecia una apertura del ojo lo suficientemente buena como para que la decodificación sea exitosa, sin embargo, se muestra un valor de BER de 1×10^{-2} lo cual no hace referencia a la calidad del enlace simulado.

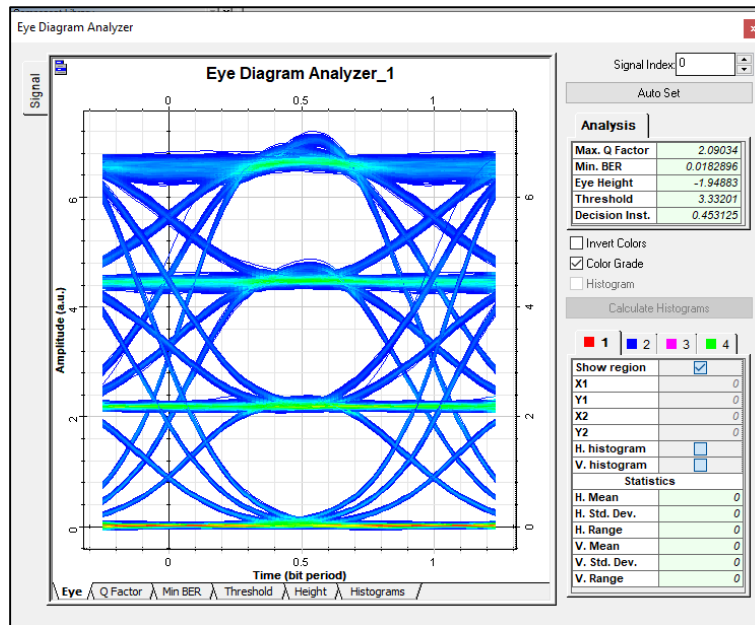


Fig. 19 Valor de BER errado para señal PAM4 en Optisystem
Fuente: Elaborado por el autor

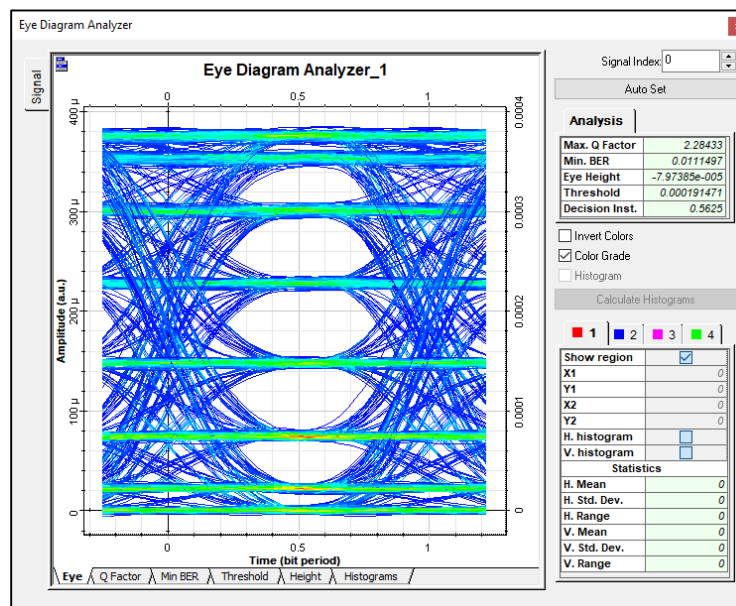


Fig. 20 Valor de BER errado para señal PAM8 en Optisystem
Fuente: Elaborado por el autor

Para calcular el BER de cada simulación realizada de una manera correcta, mediante programación en Matlab se procedió a utilizar los archivos de texto plano tanto de los bits transmitidos como de los bits recibidos y se los comparó con la finalidad de poder determinar la cantidad de bits errados presente en cada simulación del sistema.

3.3. Unidades de Estudio

De acuerdo a la naturaleza del presente trabajo de tesis, en donde se realizó el diseño y la simulación una red óptica de conexión (fronthauling) entre la oficina del proveedor de servicios CO (Central Office) y una cabecera de radio remota RRH (Remote Radio Head) de 6G, la misma no se encuentra aún implementada ni tampoco tiene resultados concluyentes, en este sentido no aplica definir una población y tampoco las muestras.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el desarrollo del presente trabajo de tesis se lo realizó en el software Optisystem en su versión 15.0 hasta 18.0 y en el software Matlab en su versión R2018a, se procede a describir de manera breve cada elemento usado en la simulación, así como la funcionalidad que cumple el mismo en cada escenario planteado.

Layout Principal. – es el escenario principal en donde se van a integrar los diferentes elementos que formarán la simulación, además de ingresar configuraciones globales.

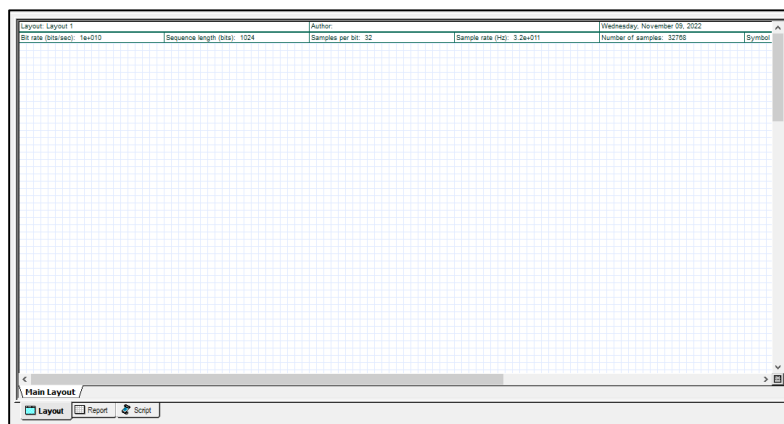


Fig. 21 Layout principal
Fuente: Elaborado por el autor

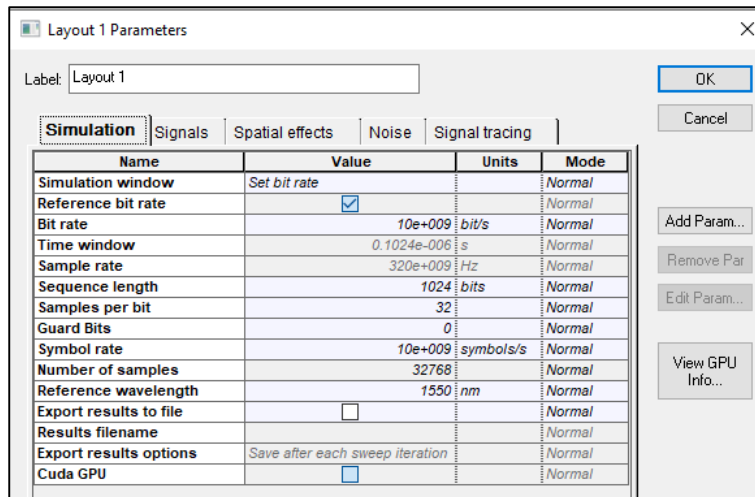


Fig. 22 Parámetros del Layout
Fuente: Elaborado por el autor

Pseudo-Random Bit Sequence Generator. – es el encargado de generar de manera aleatoria los bits a transmitir que se encuentran conformados por 0 y 1 lógicos.

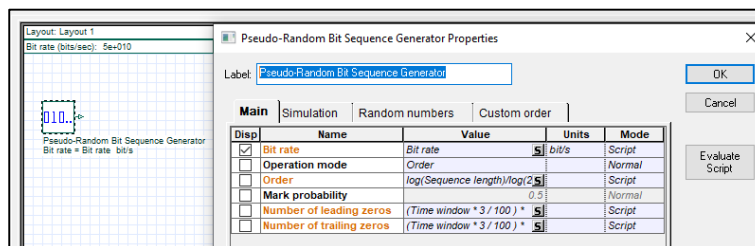


Fig. 23 Pseudo-Random Bit Sequence Generator
Fuente: Elaborado por el autor

CW Laser Measured. - es el encargado de generar una onda continua mediante pulsos ópticos.

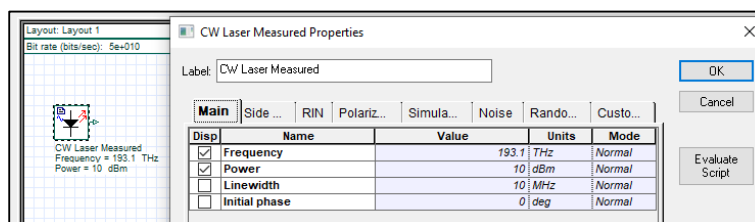


Fig. 24 CW Laser Measured
Fuente: Elaborado por el autor

MZ Modulator Analytical. - es el encargado de modelar analíticamente un modulador Mach-Zehnder.

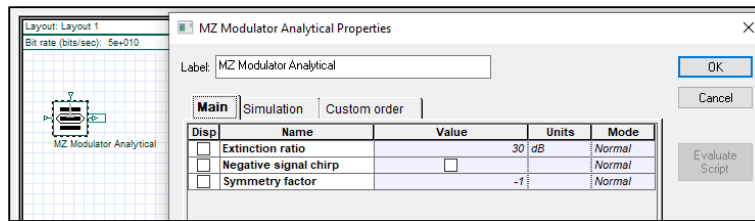


Fig. 25 MZ Modulator Analytical
Fuente: Elaborado por el autor

Optical Fiber. - es el encargado de simular una fibra óptica con todas sus especificaciones técnicas.

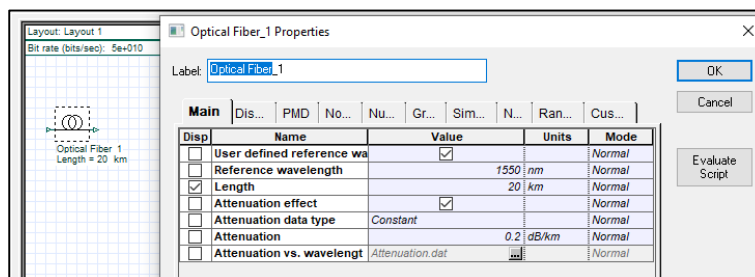


Fig. 26 Optical Fiber
Fuente: Elaborado por el autor

Optical Attenuator. - es el encargado de simular todas las pérdidas más comunes (empalmes, conectores, etc.) en el recorrido del enlace óptico.

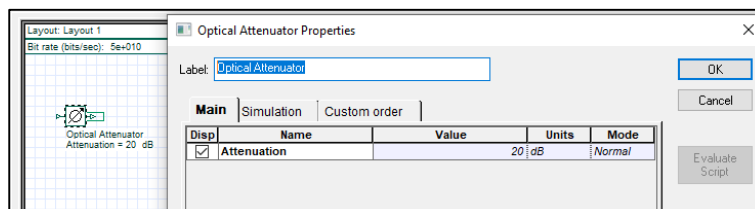


Fig. 27 Optical Attenuator
Fuente: Elaborado por el autor

Optical Receiver. – es el encargado de recibir las señales ópticas mediante la simulación de un foto diodo PIN y convertirlas en pulsos eléctricos mismos que son filtrados (para reducción de ruido) mediante el uso de un filtro Bessel pasa bajos y procesados luego por un regenerador 3R.

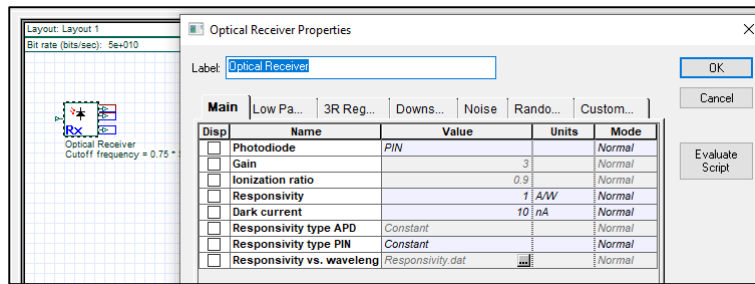


Fig. 28 Optical Receiver
Fuente: Elaborado por el autor

M-ary Pulse Generator. – es el encargado de generar y asignar los diferentes niveles a la señal eléctrica a transmitir mediante codificación Gray.

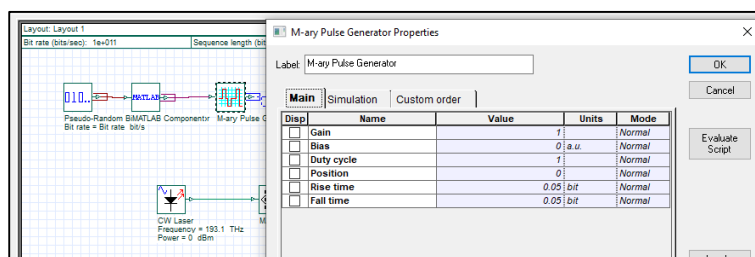


Fig. 29 M-ary Pulse Generator
Fuente: Elaborado por el autor

Oscilloscope Visualizer. – permite al usuario calcular y mostrar las señales eléctricas en el dominio del tiempo, en donde se despliega la amplitud y la autocorrelación de las señales.

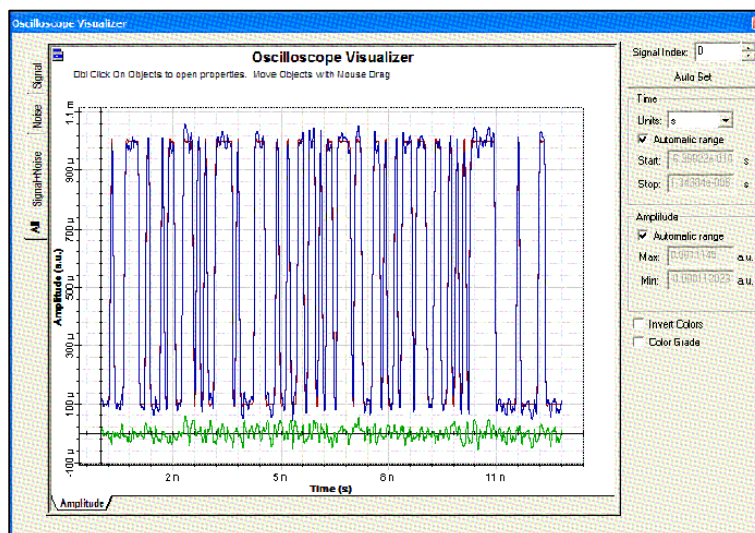


Fig. 30 Oscilloscope Visualizer
Fuente: Elaborado por el autor

Optical Time Domain Visualizer. – permite al usuario calcular y mostrar señales ópticas en el dominio del tiempo, muestra la intensidad de la señal, frecuencia, fase y parámetro alfa para

polarizaciones X y Y, también proporciona funciones mejoradas para caracterizar pulsos ultracortos como la autocorrelación y el FROG (Frequency Resolved Optical Gating).

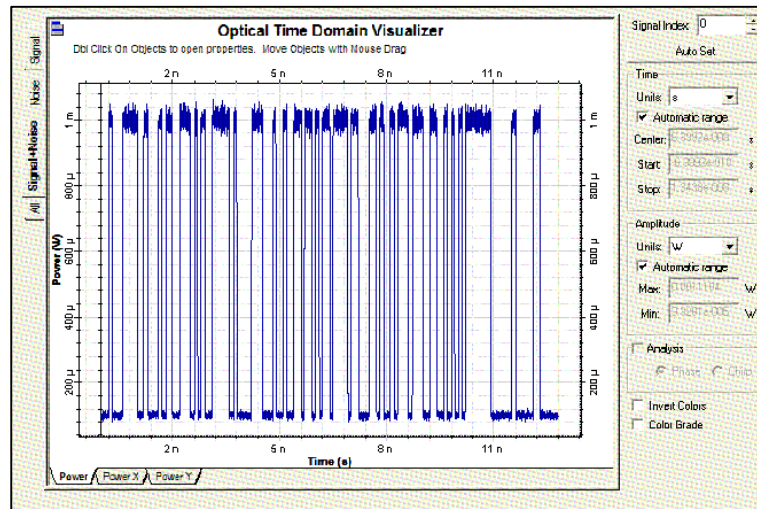


Fig. 31 Optical Time Domain Visualizer
Fuente: Elaborado por el autor

Optical Power Meter. – permite al usuario calcular y mostrar la potencia promedio de las señales ópticas, también se puede calcular el nivel de potencia para la polarización X y Y.

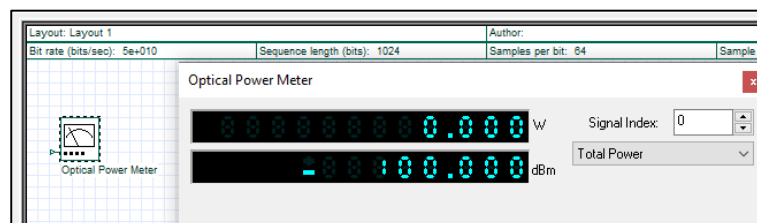


Fig. 32 Optical Power Meter
Fuente: Elaborado por el autor

Matlab Component. – es un módulo implementado mediante una librería de software externo que permite realizar la comunicación entre los softwares de Optisystem y Matlab, mediante este componente se va a desarrollar el modulador y demodulador ya que Optisystem presenta deficiencias e inexactitudes al realizar cálculos matemáticos con grandes cantidades de información a ser transmitidos en la fibra óptica.

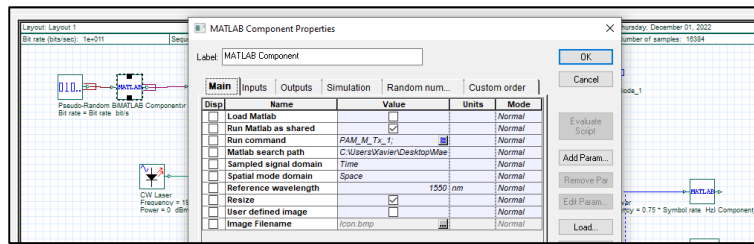


Fig. 33 Matlab Component
Fuente: Elaborado por el autor

Matlab. – es un software de programación que permite realizar cálculos matemáticos mediante la programación de algoritmos.

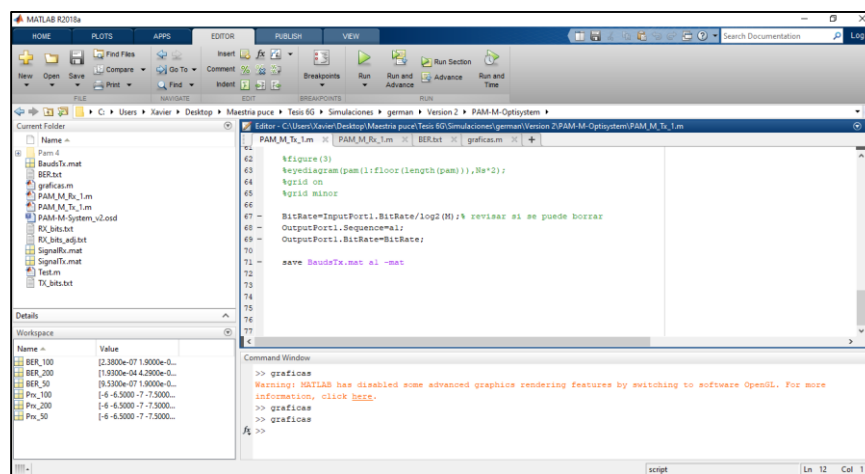


Fig. 34 Software Matlab
Fuente: Elaborado por el autor

3.5. Técnica de Análisis de Datos

Se realizó mediante la generación de datos estadísticos, en donde para la obtención de los mismos fue necesario la exploración de toda la información publicada para determinar que no se han realizado trabajos de las mismas características, en este sentido, se diseñó varios escenarios de simulación ya que se pudo tener un control estricto del tratamiento de las condiciones iniciales, con lo cual se llegan a tener datos cuantitativos mediante la variación de parámetros como la atenuación óptica y el tipo de modulación, así como la constancia de otros datos como la distancia y cantidad de bits iniciales, todo esto responde a determinar un valor que sea capaz de medir la calidad de las condiciones iniciales así como de sus resultados, tomando en comparación la cantidad de datos iniciales con la cantidad de datos finales y esclarecer la cantidad de datos errados que presenta la simulación.

3.6. Operacionalización de Variables

Tabla 8

Variables que intervienen el diseño del sistema

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Bit Error Rate (Cualitativo)	Es el número de bits recibidos de forma incorrecta respecto al total de bits enviados durante un intervalo especificado de tiempo	Diagrama del ojo	Niveles de recepción óptica	Apertura del ojo	1×10^{-6} a 1×10^{-2}
Potencia Óptica (Cuantitativo)	Magnitud física que mide la capacidad de una lente o de un espejo para hacer converger o divergir un haz de luz incidente	OPM Medidor de Potencia Óptica	Nivel de potencia	Potencia recibida	0 dB a -18 dB
Atenuación (Cuantitativo)	Es la reducción de potencia de la señal óptica que se transmite	Atenuador óptico	Atenuación de potencia	Atenuación incrementada	0 a 10 dBm
Modulación PAM (Cualitativo)	Técnica de modulación de señales analógicas donde el desfase y la frecuencia de la señal quedan fijas y la amplitud es la que varía	Simulador numérico Optisystem + Matlab	PAM-4 PAM-8	Velocidad de transmisión	PAM-4 a 50 Gbps PAM-4 a 100 Gbps PAM-4 a 200 Gbps PAM-8 a 100 Gbps PAM-8 a 200 Gbps
Distancia (Cuantitativo)	Espacio, considerado desde una perspectiva lineal, entre un objeto A y el objeto B	Distancia máxima del enlace	Longitud de la fibra óptica	Kilómetros	0 a 20 kilómetros

Fuente: elaborado por el autor.

CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A través del diseño del enlace de fronthaul para la nueva red celular 6G simulado mediante Optisystem mostrado en la figura 35, además de los cálculos matemáticos del valor de BER realizados conjuntamente con Matlab, se obtuvieron los resultados que se detallan a continuación:

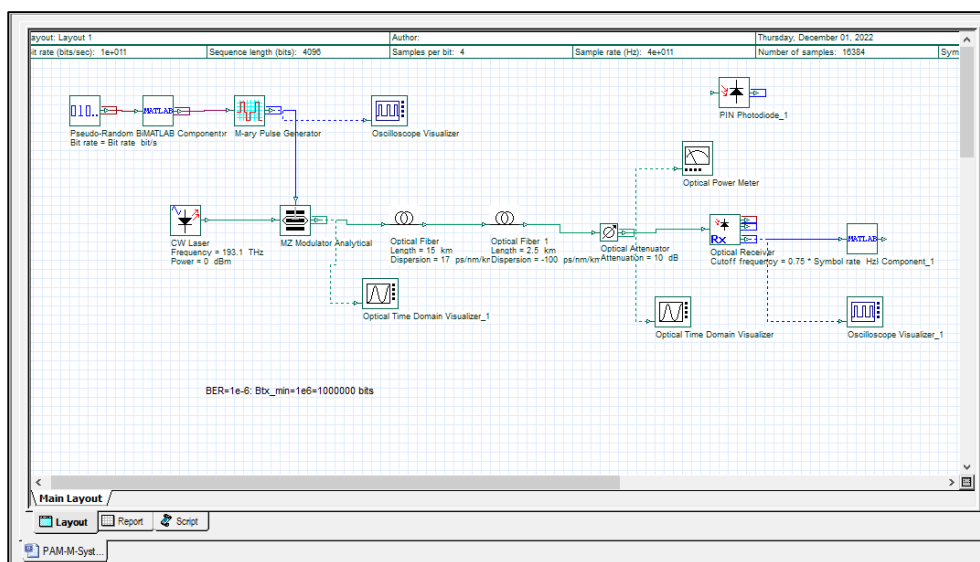


Fig. 35 Diseño enlace Fronthaul 6G
Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 9

Resultados del enlace PAM-4 a 50 Gbps a una distancia de 20 Km

Ítem	Bits	Atenuación (dB)	Potencia Recibida (dBm)	BER
1	1'048.576	6.5	-15.119	1.9073523e-06
2	1'048.576	7	-15.619	4.2915426e-05
3	1'048.576	7.5	-16.122	1.5258818e-04
4	1'048.576	8	-16.617	2.5558520e-04
5	1'048.576	8.5	-17.120	1.1949562e-03
6	1'048.576	9	-17.624	2.4290131e-03
7	1'048.576	9.5	-18.114	5.9156531e-03
8	1'048.576	10	-18.624	1.4246968e-02

Fuente: elaborado por el autor.

Nota: los bits generados, la atenuación introducida y la potencia recibida fueron simulados en Optisystem 15.0 y 18.0, para el cálculo del valor del BER se utilizaron los bits almacenados en los vectores en Matlab.

Tabla 10**Resultados del enlace PAM-4 a 100 Gbps a una distancia de 20 Km**

Ítem	Bits	Atenuación (dB)	Potencia Recibida (dBm)	BER
1	1'048.576	6.5	-15.115	1.9073523e-06
2	1'048.576	7	-15.619	8.2016148e-05
3	1'048.576	7.5	-16.114	1.3256098e-04
4	1'048.576	8	-16.625	4.1866382e-04
5	1'048.576	8.5	-17.117	1.1634849e-03
6	1'048.576	9	-17.614	3.0107556e-03
7	1'048.576	9.5	-18.117	7.0686475e-03
8	1'048.576	10	-18.617	1.3951328e-02

Fuente: elaborado por el autor.

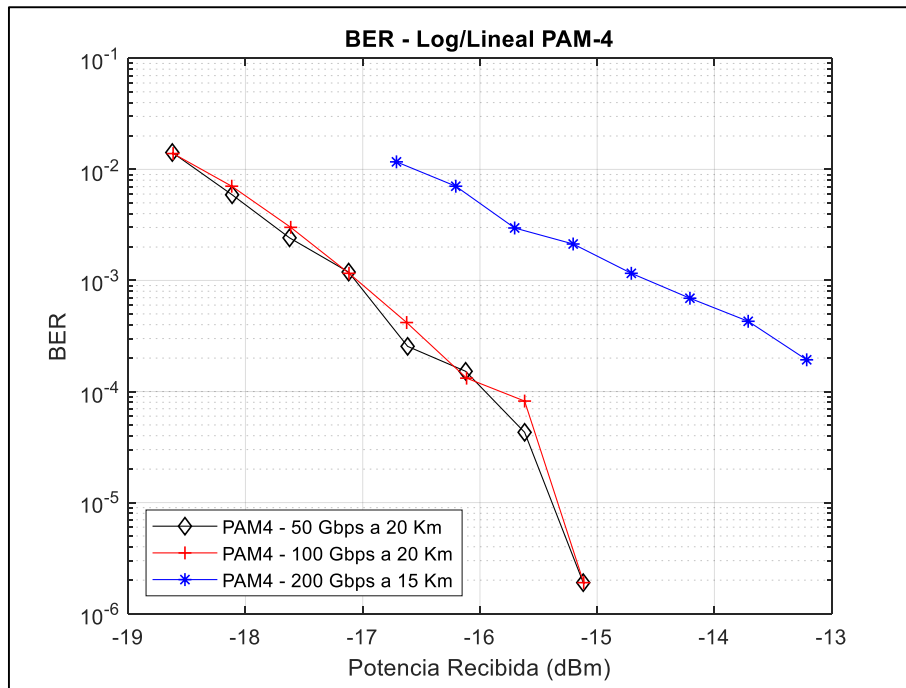
Nota: los bits generados, la atenuación introducida y la potencia recibida fueron simulados en Optisystem 15.0 y 18.0, para el cálculo del valor del BER se utilizaron los bits almacenados en los vectores en Matlab.

Tabla 11**Resultados del enlace PAM-4 a 200 Gbps a una distancia de 15 Km**

Ítem	Bits	Atenuación (dB)	Potencia Recibida (dBm)	BER
1	1'048.576	6	-13.213	1.9359626e-04
2	1'048.576	6.5	-13.712	4.2915426e-04
3	1'048.576	7	-14.209	6.9236887e-04
4	1'048.576	7.5	-14.709	1.1653922e-03
5	1'048.576	8	-15.205	2.1333735e-03
6	1'048.576	8.5	-15.704	2.9783306e-03
7	1'048.576	9	-16.206	7.0638791e-03
8	1'048.576	9.5	-16.712	1.1792205e-02

Fuente: elaborado por el autor.

Nota: para lograr una decodificación exitosa en PAM-4 a una velocidad de 200 Gbps es necesario disminuir la distancia hasta un máximo de 15 km.



*Fig. 36 Potencia Recibida (dBm) vs BER para modulación PAM-4
Fuente: Elaborado por el autor*

Como se muestra en las tablas 9, 10 y 11 además de la figura 36 la modulación PAM4 logra enviar datos de manera satisfactoria y con un desempeño muy similar a una distancia sumamente considerable de 20 kilómetros de fibra óptica para velocidades de transmisión de 50 Gbps y 100 Gbps con una tasa de bits alta.

Sin embargo, para alcanzar una velocidad de transmisión de 200 Gbps con PAM4 se debe reducir la distancia de fibra óptica hasta un máximo de 15 kilómetros ya que luego de este umbral la decodificación de bits no es exitosa lo que provoca directamente a obtener un valor de BER de 1 con lo cual ya no es factible el envío de datos, se nota además que para un BER objetivo de 1×10^{-3} se tiene una penalidad de más de 2 dB al aumentar la tasa de bits a 200 Gbps.

Es preciso mencionar que la atenuación total del enlace no debe ser mayor a 10 dB para el rango de 50 a 100 Gbps y 9.5 dB para 200 Gbps.

Tabla 12**Resultados del enlace PAM-8 a 100 Gbps a una distancia de 20 Km**

Ítem	Bits	Atenuación (dB)	Potencia Recibida (dBm)	BER
1	1'048.576	0.5	-9.200	1.9073505e-06
2	1'048.576	1	-9.700	1.1444103e-05
3	1'048.576	1.5	-10.200	1.9073505e-05
4	1'048.576	2	-10.700	7.1525642e-05
5	1'048.576	2.5	-11.198	1.5926376e-04
6	1'048.576	3	-11.694	2.1648428e-04
7	1'048.576	3.5	-12.194	4.1294137e-04
8	1'048.576	4	-12.694	1.7900484e-03
9	1'048.576	4.5	-13.194	2.3393653e-03
10	1'048.576	5	-13.698	1.2707722e-02

Fuente: elaborado por el autor.

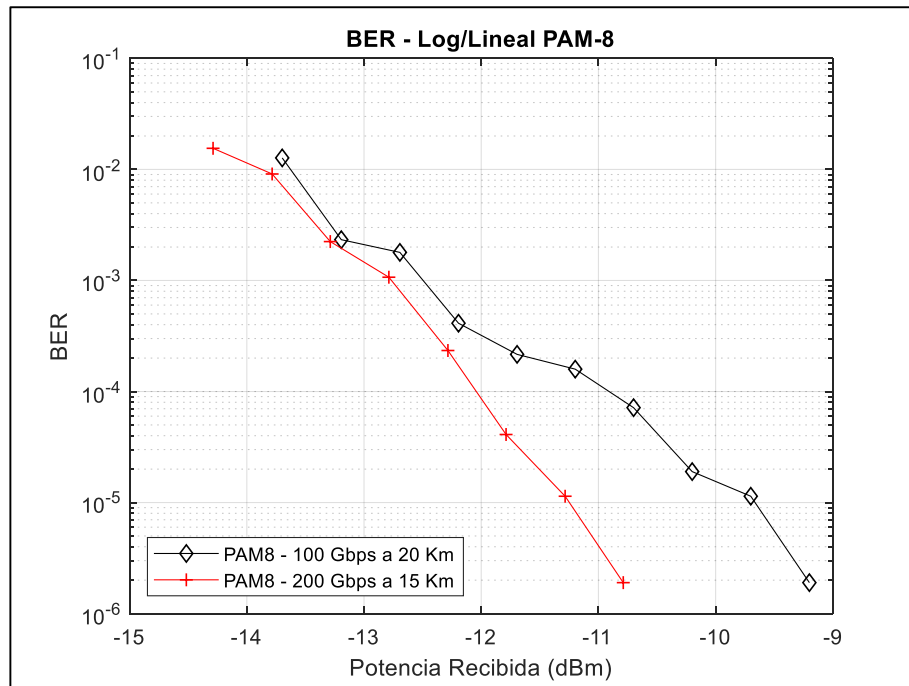
Nota: para lograr una decodificación de bits de manera exitosa mediante PAM-8 a 100 Gbps es necesario reducir el valor de la atenuación total del enlace entre el rango de 0.5 a 5 dB, con valores superiores el diagrama del ojo tiende a presentar lóbulos muy cerrados.

Tabla 13**Resultados del enlace PAM-8 a 200 Gbps a una distancia de 15 Km**

Ítem	Bits	Atenuación (dB)	Potencia Recibida (dBm)	BER
8	1'048.576	3.5	-10.788	1.9073505e-06
9	1'048.576	4	-11.284	1.1444103e-05
10	1'048.576	4.5	-11.788	4.1008035e-05
11	1'048.576	5	-12.284	2.3460411e-04
12	1'048.576	5.5	-12.788	1.0728846e-03
13	1'048.576	6	-13.288	2.2439978e-03
14	1'048.576	6.5	-13.784	9.1028300e-03
15	1'048.576	7	-14.288	1.5545860e-02

Fuente: elaborado por el autor.

Nota: para lograr una decodificación de bits de manera exitosa mediante PAM-8 a 200 Gbps es necesario reducir 5 km el valor de la distancia total de la fibra óptica, ya que con valores superiores el valor del BER es inexacto y no muestra variación.



*Fig. 37 Potencia Recibida (dBm) vs BER para modulación PAM-8
Fuente: Elaborado por el autor*

Como se aprecia en los datos de las tablas 12 y 13 además de la figura 37 es factible el envío de altas cantidades de bits utilizando una la modulación PAM8, ya que se logra alcanzar tasas de 100 Gbps y 200 Gbps para la velocidad de transmisión, sin embargo, para lograr una decodificación exitosa de los bits y obtener un valor de BER aceptable, la potencia recibida con PAM8 debe tener como valor máximo -14 dB con lo cual se corrobora que enviar datos mediante PAM-4 es un enlace mucho más robusto, además de mantener distancias no mayores a 15 y 20 kilómetros, también se debe mencionar que la atenuación total del enlace no debe superar los 5dB y 7dB respectivamente, además de verificar que la distancia total juega un papel importante cuando se requiere transmitir grandes cantidades de datos en altas velocidades.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante la simulación de una fibra óptica real en Optisystem y con los cálculos realizados en Matlab para modular, demodular y obtener el valor del BER de cada escenario, se logró diseñar y simular una red óptica de conexión (fronthauling) sin la necesidad de contar con elementos amplificadores y de procesamiento digital de la señal, manteniendo así una compatibilidad con las infraestructuras desplegadas actualmente.

El enlace en PAM-4 y PAM-8 de hasta 200 Gbps es factible siempre y cuando la distancia máxima de la fibra óptica no supere el valor de 15 km, la atenuación máxima del sistema se encuentre por debajo de 10 dB además de que la potencia recibida alcance los -16 dB como valor máximo.

Los valores de potencia recibida y atenuación en PAM-4 para 50 Gbps y 100 Gbps no presentan una variación significativa, por lo cual, con la finalidad de mejorar el enlace, se diseñó un escenario a 200 Gbps donde se determinó que reducir la distancia en un 25% contribuye directamente a duplicar la velocidad en un 100%.

Para futuros trabajos se recomienda que posterior a la recepción de la señal en el fotodiodo PIN se coloque un amplificador eléctrico con la finalidad de mejorar la calidad de la señal y se tenga una mejor decodificación de la información.

Para lograr una mejor decodificación mediante el análisis del diagrama del ojo se recomienda realizar una pre-distorsión mucho más fina y limpia en los niveles positivos de voltaje (+7 +5 +3) ya que es donde se tiende a tener una mayor superposición de los bits y no se logra diferenciar a que nivel corresponden.

Las simulaciones realizadas en varias ocasiones entregaban resultados ideales en los cuales no se evidenciaban pérdida de bits y tampoco presentaban relación directa con los gráficos mostrados, por lo cual se recomienda en primera instancia diseñar el escenario lo más apegado a la realidad de la infraestructura posible y realizar el envío de al menos 1 millón de bits hasta 4 millones ya que pasada esta cantidad los procesos ejecutados por los ordenadores pueden tomar tiempos excesivamente altos.

REFERENCIAS

- Calucho Cabrera, R. F. (04 de 03 de 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*. Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec:80/handle/22000/18676>
- Chowdhury, M. Z., Shahjalal, M., Ahmed, S., & Jang, Y. M. (15 de Junio de 2020). *6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions*.
- Constain Prado, D. D. (12 de 04 de 2019). *COBERTURA Y CAPACIDAD EN REDES 2G, 3G y 4G*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11349/14691>
- Costales Vallejo, F. D. (03 de 12 de 2020). *Comparación del desempeño de las modulaciones PAM-2, PAM-4 y PAN-8 en la transmisión de datos a alta velocidad en redes PON de nueva generación (NG-PON)*. Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec:80/handle/22000/18443>
- García Quilachamin, W., Herrera Tapia, J., Ayoví Ramírez, M. W., Piloza Pin, K., Sendón Varela, J. C., & Alcivar Heredia, I. (16 de Mayo de 2021). *5G y el Internet de las Cosas: Revisión Sistemática*. Obtenido de <https://www.proquest.com/openview/f46ca4e91037bafc44bcdaed5c9b9041/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1006393>
- Gutierrez Gonzalez, O. S. (2020). *Análisis y comparación de la interfaz de radio de las redes de comunicación móviles celulares de 4G y 5G*. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25598>
- Huang, J. J.-S., Jan, Y. H., Yu, D., Chang, R., Chang, J., Shiu, G., . . . Chou, E. (2018). *Manufacturing excellence and future challenges of wireless laser components for 4G/5G optical mobile fronthaul networks*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8372709>
- Huawei. (2022). *Arquitectura de red central 5G*. Obtenido de <https://forum.huawei.com/enterprise/es/arquitectura-de-red-central-5g/thread/836371-100763>
- Leon Albiño, I. M. (08 de 03 de 2021). *Estudio y simulación de una PAM-4 PON basada en el entrelazado de bits de dos señales NRZ*. Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec:80/handle/22000/18679>
- Levy, G. (10 de 11 de 2022). *El lento avance del 5G en Latinoamérica*. Obtenido de AndinaLink: <https://andinalink.com/el-lento-avance-del-5g-en-latinoamerica/>
- Pontificia Universidad Católica del Perú. (2019). *¿Qué es MATLAB?* Obtenido de <https://proyecto-matlab.pucp.edu.pe/que-es-matlab/index.htm>
- Raddo, T., Rommel, S., Cimoli, B., Vagionas, C., Perez, D., Pikasis, E., . . . Tafur, I. (2021). *Transition technologies towards 6G networks*. Obtenido de <https://jwcn-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-021-01973-9#citeas>
- Ruiz Leal, B. L., & Gutierrez Gonzales, O. S. (06 de 11 de 2020). *Análisis y comparación de la interfaz de radio de las redes de comunicación móviles celulares de 4G y 5G*. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25598>
- Santillán Carranza, H. J. (30 de Octubre de 2019). *Virtualización de una central telefónica celular 4G como preparación para convivencia con red celular 5G*. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/14011>
- Shimaa, A. H., Hanan, H., & HyungWon, K. (30 de Mazo de 2022). *Vision and research directions of 6G technologies and applications*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.03.019>
- Systems, O. (2022). *OptiSystem Overview*. Obtenido de <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- Vera Cárdenas, D. J. (2018). *ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED MÓVIL 5G EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL*. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/33979>
- Zakria, Q., Khoa, L., Nasir, S., & Hafiz, S. (5 de Octubre de 2021). *Towards 6G Internet of Things: Recent advances, use cases, and open challenges*.