



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

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

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Análisis de las tecnologías aplicadas en la interfaz óptica de las comunicaciones móviles de quinta generación

Trabajo de Titulación previo a optar por el
Título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones

AUTOR:

Ludgero Enrique Abad Torres

DIRECTOR:

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas. Mg. Sc

Loja – Ecuador

2023

Certificación

Loja, 16 de marzo de 2023

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas Mg Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Análisis de las tecnologías aplicadas en la interfaz óptica de las comunicaciones móviles de quinta generación**, previo a la obtención del título de **Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones** de autoría del estudiante **Ludgero Enrique Abad Torres**, con **cédula de identidad Nro. 1104652217**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas Mg Sc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Ludgero Enrique Abad Torres**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula: 1104542217

Fecha: 12/09/2023

Correo electrónico: ludgero.abad@unl.edu.ec

Teléfono: 0969965678

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

Yo, **Ludgero Enrique Abad Torres** declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Análisis de las tecnologías aplicadas en la interfaz óptica de las comunicaciones móviles de quinta generación**, como requisito para optar el título de: **Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

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

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

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los doce días del mes de septiembre del dos mil veintitrés.



Firma:

Autor: Ludgero Enrique Abad Torres

Cédula: 1104542217

Dirección: Loja

Correo electrónico: ludgero.abad@unl.edu.ec

Teléfono: 0969965678

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas, Mg Sc.

Dedicatoria

A la memoria de Adriana Christina Villavicencio Vásquez.

Ludgero Enrique Abad Torres

Agradecimientos

A mi madre Germania de Fátima Torres por heredarme la orientación hacia la electrónica. Por mostrar siempre confianza en mí, por motivarme a conseguir las metas más altas desde que era niño, por enseñarme a afrontar las cosas con valentía y perseverancia, por su cariño, por su alegría. A mi abuelo Segundo Moisés Torres por el apoyo, por los libros e implementos electrónicos al iniciar la carrera.

A mi padre Teófilo Enrique Abad Betancourt por mostrarme el mundo real y darme las oportunidades de aplicar mi conocimiento, por enseñarme la integridad en todo momento, por motivarme todos los días.

A ambos por su amor incondicional a esta familia, por incentivar en mí los valores y las ganas de superación. Estoy muy feliz de haber contado con su educación y cariño.

Ludgero Enrique Abad Torres

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de Tablas:	viii
Índice de Figuras:	ix
Índice de Anexos:	xi
1 Título	1
2 Resumen	2
2.1 Abstract	4
3 Introducción	5
4 Marco Teórico	7
4.1 Evolución de las Generaciones de Comunicaciones Móviles.....	7
4.2 Redes Móviles 5G	9
4.3 Arquitectura de Red 5G	10
4.3.1 Fronthaul	10
4.3.2 Midhaul	13
4.3.3 Backhaul	13
4.4 Características técnicas de la interfaz óptica en 5G	13
4.4.1 5G C-RAN con segmentos front-, mid-, y back-haul	14
4.5 Modulación en la interfaz óptica.....	15
4.5.1 Modulación directa	15
4.5.2 Modulación externa	16
4.5.3 Modulación en Fronthaul	17
4.5.4 Modulación Midhaul y Backhaul.....	19
4.6 Detección en la interfaz óptica	20
4.6.1 IM/DD	21
4.6.2 DPSK/DD	21
4.6.3 Detección coherente	21

4.7	Multiplexación en la interfaz óptica.....	22
4.7.1	25G WDM	22
4.7.2	SWDM	23
4.7.3	M-WDM	24
4.7.4	Red Ethernet/TSN	25
4.8	Convergencia Fronthaul 5G Y FTTH	26
4.9	Tipos de fibra óptica utilizada.....	29
4.10	Normativa.....	31
4.11	Seguridad	32
4.12	Software Optisystem	32
5	Metodología	34
5.1	Revisión Bibliográfica	34
5.2	Recopilación.....	34
5.3	Categorización	34
5.4	Estudio del Software	35
5.5	Simulación de los sistemas	35
5.6	Ordenamiento y finalización del documento	35
6	Resultados	36
6.1	Simulación de modulación PAM4	37
6.1.1	PAM4 con bloques nativos de Optisystem	37
6.1.2	PAM4 modificación propia.....	40
6.2	Simulación 1: Modulación PAM4 y multiplexación SWDM.....	43
6.3	Simulación 2: Modulación PAM4 y multiplexación M-WDM	52
7	Discusión	58
8	Conclusiones	61
9	Recomendaciones	62
10	Bibliografía	63
11	Anexos	68

Índice de Tablas:

Tabla 1.	Comparación entre características principales redes 4G y 5G	10
Tabla 2.	Resumen de los parámetros de las posibles tecnologías del fronthaul.....	11
Tabla 3.	Características técnicas de los enlaces de la red de transporte óptica 5G	13

Tabla 4. Desventajas de las diferentes topologías físicas de la red de transporte 5G	15
Tabla 5. Características de X-haul 5G.....	20
Tabla 6. Plan de 12 canales M-WDM respecto a los 6 primeros canales CWDM	25
Tabla 7. Comparación entre el performance de distintos tipos de fibra óptica	30
Tabla 8. Niveles de amplitud PAM 4 a partir de 2 generadores de bit	41
Tabla 9. Longitudes de onda utilizadas para la simulación del fronthaul con SWDM.....	45
Tabla 10. Comparación de distancias máximas entre distintos tipos de fibra óptica OM3, OM4 OM5	46
Tabla 11. Min BER y Max Factor Q obtenidos en Optisystem 19	51
Tabla 12. Canales ópticos utilizados en la simulación con multiplexación M-WDM.....	52
Tabla 13. Min BER y Max Factor Q obtenidos en Optisystem 19 para simulación con M-WDM	55
Tabla 14. Valores de potencia de cada uno de los láseres implementados	68
Tabla 15. Potencia aportada por los láseres en cada una de las configuraciones que generarán los símbolos de PAM4	68
Tabla 16. Configuración obtenida para el porte de potencia de los láseres que generarán los símbolos PAM4.....	69
Tabla 17. Potencia readecuada de los láseres.....	70

Índice de Figuras:

Figura 1. Evolución cronológica de las redes móviles.....	7
Figura 2. Casos de uso de la quinta generación de redes móviles	9
Figura 3. Evolución de la arquitectura de red desde 4G a 5G de las redes móviles	10
Figura 4. WDM-PON en Fronthaul 5G.....	12
Figura 5. C-RAN 5G común con todos los segmentos RU/CU/DU	14
Figura 6. Modulación óptica directa	16
Figura 7. Modulación óptica externa o indirecta	17
Figura 8. Comparación diagrama de ojo NRZ vs PAM4.....	18
Figura 9. Diagrama de transmisión full dúplex utilizando tecnología SWDM.....	23
Figura 10. Diferentes longitudes de onda de la tecnología SWDM.....	24
Figura 11. Diferencia entre densidad de antenas en un territorio para distintas generaciones de redes móviles.....	26
Figura 12. Número de celdas pronosticados para la implementación de 5G en EEUU.....	27

Figura 13. Densificación de las redes ópticas de distribución FTTH vs Fronthaul 5G	28
Figura 14. Comparación de costos en la implementación y despliegue de una red de comunicación móvil	29
Figura 15. Fibra óptica optimizada insensible a la flexión para centros de datos 5G.....	30
Figura 16. Arquitectura de red de transporte para redes móviles 5G que muestra el Fronthaul a simular	36
Figura 17. Tasa de símbolos y bits del sistema para ambas simulaciones en Optisystem.....	37
Figura 18. Modulador PAM4 utilizando bloques nativos de Optisystem 19.....	38
Figura 19. Gráfica de un bit luego de la codificación previa a la modulación PAM4 para obtener el bit rate.....	39
Figura 20. Espectro de la señal PAM4 modulada a 850 nm	40
Figura 21. Diagrama de 1 transmisor PAM 4 diseñado en Optisystem 19	40
Figura 22. Espectro a la salida del segundo modelo de modulador PAM 4 implementado ..	42
Figura 23. Diagrama de 3 ojos obtenido de modulación PAM4.....	43
Figura 24. Diagrama de simulación separado en partes.....	44
Figura 25. Esquema de canal simulado en Optisystem 19.....	45
Figura 26. Receptor para el primer modelo de modulador PAM4 implementado.....	46
Figura 27. Acercamiento a un bit del canal 1 en recepción en el dominio del tiempo	47
Figura 28. Visualizador de datos generados	48
Figura 29. Diagrama de ojo de señal en recepción en uplink del Canal 1	49
Figura 30. Diagrama de ojo de señal en recepción en uplink del Canal 2	49
Figura 31. Señal en recepción en uplink el dominio del tiempo y diagrama de ojo del Canal 3	50
Figura 32. Señal en recepción de uplink en el dominio del tiempo y diagrama de ojo del Canal 4.....	50
Figura 33. Espectro de canales ópticos implementados con la multiplexación SWDM en la simulación	51
Figura 34. Simulación de multiplexación M-WDM y modulación PAM4 de un fronthaul óptico 5G.....	53
Figura 35. Diagrama de ojo de señal en recepción en uplink del Canal 1 M-WDM.....	54
Figura 36. Diagrama de ojo de señal en recepción en downlink del Canal 1 M-WDM	54
Figura 37. Espectro de canales ópticos implementados con la multiplexación M-WDM en la simulación	56
Figura 38 Gráfica de uno de los bits en recepción de la simulación con PAM4 y M-WDM	57

Figura 39. Diagrama de ojo en recepción del canal 1 con moduladores con misma potencia de transmisión	59
Figura 40. Diagrama de ojo en recepción del canal 1 con moduladores con diferentes potencias de transmisión	60

Índice de Anexos:

Anexo 1. Adaptación de los valores de potencia obtenidos a la recomendación 50GBASE-LR PAM4	68
Anexo 2. Gráfica comparativa BER vs Factor Q obtenidos en SWDM PAM4	71
Anexo 3. Gráfica comparativa Degradación del factor Q conforme aumenta la distancia para la simulación SWDM PAM4	72
Anexo 4. Gráfica comparativa Diagramas de ojo correspondientes a diferentes valores del BER conseguidos en SWDM PAM4	73
Anexo 5. Certificado de traducción del resumen al idioma inglés	74

1 Título

**Análisis de las tecnologías aplicadas en la interfaz óptica de las comunicaciones móviles
de quinta generación**

2 Resumen

La interfaz óptica en 5G está implementada sobre fibra óptica la cual posee distintas características físicas según su ubicación en la arquitectura de red y transportan datos con características técnicas que dependen de la tecnología aplicada según la necesidad de la red y capacidad económica del proveedor de servicios de comunicaciones móviles. Dichas tecnologías son la multiplexación de canales ópticos, modulación de información mediante técnicas avanzadas y detección de la señal.

En la actualidad el primer paso para la implementación de redes móviles de 5G luego de las consideraciones económicas y de cobertura es decir posicionamiento estratégico de antenas en base a estudios, es el diseño de la arquitectura de red de transporte mediante fibra óptica que soporte el masivo flujo de datos proveniente de las antenas que se comunican con los usuarios de las redes 5G.

En el presente trabajo se estudian las tecnologías de interfaz óptica de redes 5G, haciendo énfasis en aquellas utilizadas para el desarrollo de las simulaciones presentadas en la sección 7 denominada Resultados Obtenidos, estas tecnologías fueron escogidas basándose en las recomendaciones de la ITU que separan la arquitectura de la red de transporte para comunicaciones móviles 5G y establecen el data rate admitido y futuro para los enlaces, así como sus recomendaciones para NGN o redes de nueva generación al estandarizar el funcionamiento de redes de transporte y redes de distribución de longitud de onda múltiple que sean convergentes.

De la misma manera se muestran las características físicas y técnicas que debe poseer la interfaz óptica de este tipo de redes, dependiendo de que parte de la arquitectura de la red de transporte se estudie: fronthaul, midhaul o backhaul.

Se realizan simulaciones de técnicas de modulación y multiplexación en un fronthaul óptico 5G utilizando modulación de alto nivel PAM4, y multiplexaciones de canales ópticos SWDM y M-WDM propias de las redes móviles 5G para comunicaciones bidireccionales desde las RRH o cabezales de radio remoto hacia una DU para verificar los diagramas de ojo generados a lo largo de 400 metros y 10 km para las simulaciones presentadas.

Dentro de las simulaciones del fronthaul óptico se muestra como la multiplexación óptica SWDM presenta mejores características que la M-WDM al utilizarse fibra de dos núcleos y menores distancias. De la misma manera se muestra el desarrollo de un modulador PAM4 en el entorno de simulación de redes ópticas Optisystem 19, que triplica el factor Q dentro del análisis de diagrama de ojo de las señales en recepción en un fronthaul óptico 5G en comparación con uno elaborado con bloques nativos dentro del programa.

Palabras clave: interfaz óptica, 5G, modulación, multiplexación, PAM4.

2.1 Abstract

The optical interface in 5G is implemented over optical fiber, which has different physical characteristics depending on its location in the network architecture and transports data with technical specifications depending on the technology applied according to the needs of the network and the economic capacity of the mobile communications service provider. These technologies are optical channel multiplexing, information modulation using advanced techniques, and signal detection.

Currently, the first step for the implementation of 5G mobile networks, after economic and coverage considerations, in other words, strategic positioning of antennas based on studies, is the design of the optic fiber transport network architecture to support the massive data flow coming from the antennas that communicate with the users of 5G networks.

In this research, we study the optical interface technologies of 5G networks, emphasizing those used for the development of the simulations presented in section seven, called Results Obtained; we chose these technologies based on the ITU recommendations that separate the architecture of the transport network for 5G mobile communications and establish the supported and future data rate for the links, as well as its recommendations for NGN or next-generation networks by standardizing the operation of transport networks and wavelength distribution networks that are convergent.

In the same way, the physical and technical characteristics of the optical interface of this type of network must have been shown, depending on which part of the transport network architecture is studied: front-haul, mid-haul, or backhaul.

Simulations of modulation and multiplexing techniques are performed in a 5G optical front-haul using PAM4 high-level modulation and SWDM and M-WDM optical channel multiplexing typical of 5G mobile networks for bidirectional communications from the RRHs or remote radio heads to a DU to verify the eye diagrams generated over 400 meters and 10 km for the simulations presented.

Within the optical front-haul simulations, we showed how SWDM optical multiplexing presents better characteristics than M-WDM using two-core fiber and shorter distances. In the same way, the development of a PAM4 modulator in the Optisystem 19 optical network simulation environment we showed, which triples the Q factor within the eye diagram analysis of the signals in reception in a 5G optical front-haul compared to one elaborated with native blocks within the program.

Keywords: *optical interface, transport, 5G, multiplexing, modulation, PAM4.*

3 Introducción

Las redes de acceso, transporte y núcleo tienden a evolucionar con cada generación de comunicación móvil, así como también con la evolución de otras tecnologías de comunicación y aplicaciones únicas para intentar adaptarse, según Rainbow (2022), un ejemplo específico de esto son los estudios que se tienen para especificar los rangos de espectro en los cuales puede trabajar un sistema de comunicaciones satelitales como Starlink para no generar interferencia con la interfaz de aire en las bandas milimétricas de las redes móviles 5G.

Dentro de la evolución de las redes móviles debe también existir tecnología que permita la convergencia de distintos datos a través de las redes de transporte o núcleo ya desplegadas, el ejemplo específico de esto es la convergencia de datos a través de la fibra óptica de tecnologías de acceso como FTTH con las redes móviles 5G, donde si bien se debe aumentar en un factor hasta de diez en algunos casos el número de estaciones de radio con su respectivo despliegue de red de transporte, bien pueden servir las redes ya desplegadas de FTTH o su fibra oscura para enviar datos también de la red móvil mediante multiplexación a sitios específicos.

Entonces si bien, las tecnologías aplicadas a la interfaz de fibra óptica se deben adaptar a otras tecnologías, ahora en la quinta generación de redes móviles también deben proveer un desempeño específico como por ejemplo en términos de capacidad de las comunicaciones la cual se ha multiplicado por 100 respecto a su generación anterior o en términos de latencia, confiabilidad y densidad de conexión. De esta manera se necesitan entonces redes ópticas que sean capaces de proveer dicha capacidad a todo el sistema de comunicaciones 5G.

La importancia de la investigación reside en la divulgación del conocimiento en nuestro país respecto a tecnologías de implementación en la interfaz óptica en redes 5G, y con ello también se debe mencionar la importancia del 5G en la transformación digital en marcha desde hace ya algunos años en el mundo, misma que involucra muchos aspectos sociales y económicos, que afectan tanto a los procesos industriales como a la gerencia de los recursos y por ende al desarrollo de procesos con mayor eficiencia.

Las mayores ventajas técnicas son las características de baja latencia, alta velocidad de datos, baja potencia y mayor funcionalidad que por supuesto tendrán un gran impacto en la industria y en los modelos de negocios que se están desarrollando para el logro de los objetivos de la cuarta y próxima quinta revolución industrial (Lopez, 2020).

Su incorporación en los procesos industriales favorecerá el uso de tecnologías de información y la comunicación en tiempo real de sensores, actuadores, la colaboración empresarial, la aplicación de drones y robots y el uso de la realidad virtual y la realidad aumentada para beneficiar las actividades de formación y mantenimiento de sectores

estratégicos, mejorando directamente la capacidad de producción y su habilidad para competir en mercados internacionales para países que logren adaptarse a los modelos de producción de primer mundo.

Se prevé que el mercado de las redes móviles 5G alcance los 600 billones de dólares americanos para el 2026 según un estudio de Juniper Research (Hogan, 2022).

Respecto al alcance del presente trabajo se realiza una investigación referente a tecnologías aplicadas en las comunicaciones ópticas que soportan las redes 5G, comenzando por definir la arquitectura física de la red de transporte y cada una de sus partes para poder entrar en contexto de la investigación, se mencionan diferentes topologías físicas de implementación de la misma, se especifican las características técnicas y varias tecnologías utilizadas dentro de cada una de los enlaces ópticos de la arquitectura de red, se analizan tecnologías importantes de modulación, multiplexación y detección en la interfaz óptica de las redes móviles 5G, finalmente se revisa la normativa de la *International Telecommunication Unit* ITU concerniente al tema de investigación, tipos de fibra óptica aplicada a este tipo de redes y de la importancia de la convergencia entre redes ópticas 5G y redes ópticas de dispersión en FTTH.

Se realizaron dos simulaciones de modulación y multiplexación en un fronthaul óptico para redes móviles 5G en el software Optisystem 19 la cual se presenta en la sección denominada resultados obtenidos basado en teoría analizada en la presente investigación.

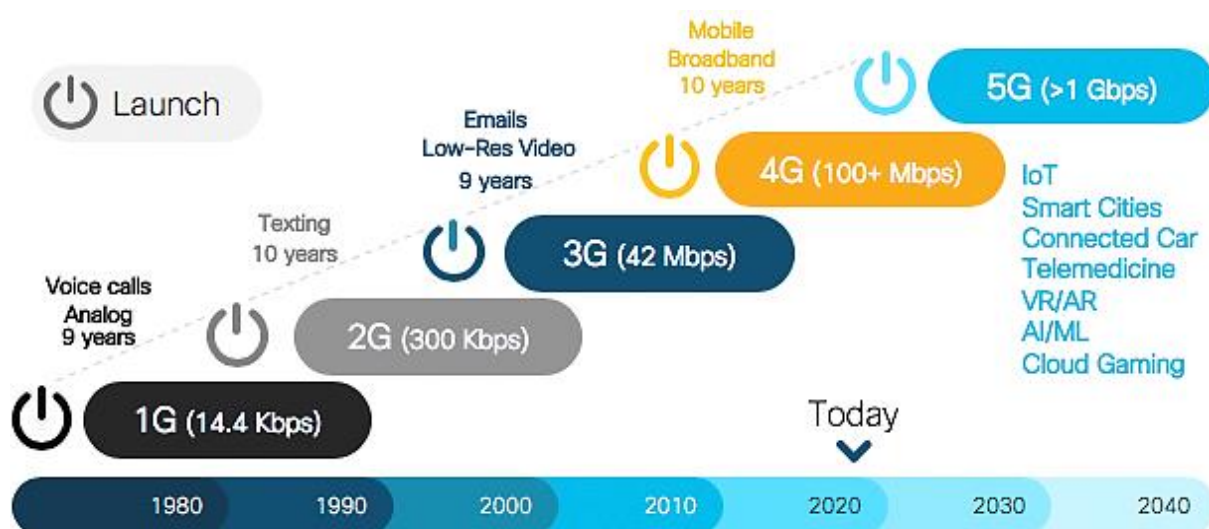
4 Marco Teórico

La evolución de las redes móviles se ha visto caracterizada por un acelerado aumento en la capacidad de red como se muestra en la Figura 1, así como también por el uso de tecnologías que propician eficiencia espectral, computacional y energética (Carrillo, 2018), esto a su vez abre la posibilidad a los usuarios a obtener una mayor cantidad de servicios como se muestra a continuación.

4.1 Evolución de las Generaciones de Comunicaciones Móviles

Figura 1

Evolución cronológica de las redes móviles



Nota: Se observan las velocidades y aplicaciones nuevas que son implementadas con cada generación, así como un estimado de la duración de su implementación. Fuente: (Shruti, 2019)

La primera generación de comunicaciones móviles apareció en la década de los ochenta usando una tecnología totalmente analógica, se utilizaba FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia) como parte de su interfase de aire, en ella se asignaban frecuencias de banda estrecha a cada una de las comunicaciones de los diferentes usuarios, únicamente soportando comunicación de voz entre los distintos suscriptores que componían la red. La interfaz que unía las estaciones base con las MSC (Centro de Conmutación móvil) eran mayoritariamente troncales telefónicas basadas en cable coaxial o diferentes estaciones base conectadas inalámbricamente mediante radiofrecuencia (Sepúlveda, 2016).

En la década de los noventa apareció GSM como el estándar de segunda generación donde se utiliza una combinación entre FDMA y TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo) como parte de su interfase de aire. A diferencia de la primera versión que se utilizaba para servicios de voz, esta ya se utilizaba para permitir servicios de mensajes cortos y también permitir la tasa de transmisión de paquetes de datos inicialmente con velocidades teóricas de

hasta 50 kbps para GSM y posteriormente para las siguientes versiones tanto Edge como GPRS hasta 300 kbps. Para la interfaz que conecta los diferentes nodos se usaba comunicación inalámbrica, así como tecnología Frame Relay, la cual bien podría utilizar líneas dedicadas de cobre como E1 o T1 así como cable de fibra óptica. (Walton, 2019)

En la década de los 2000 aparece UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones móviles) como el estándar de tercera generación de comunicaciones móviles y ahora tenemos WCDMA (Acceso Múltiple por División de Códigos) como parte de su interfase de aire, que a diferencia de primera y de segunda generación WCDMA asigna frecuencias de banda ancha para lograr las comunicaciones móviles en donde las comunicaciones de usuarios ahora se identifican mediante la asignación de diferentes códigos.

UMTS en las primeras versiones logra velocidades de hasta 400 Kbps teóricas, lo cual era muy complicado de lograr dado las características electromagnéticas del ambiente de propagación donde se desplegaban las estaciones base. Con la llegada de HSPA (Acceso a Paquetes de datos de Alta Velocidad) se logran velocidades de hasta 10 Mbps y hasta 40 Mbps con HSPA+.

En la década de los 2010 llega LTE (*Long Term Evolution*) como estándar de cuarta generación de comunicaciones móviles, ahora se vuelven a utilizar frecuencias de banda estrecha sin embargo las frecuencias deben de ser ortogonales entre sí para minimizar la interferencia inter símbolo. Esta red es totalmente de conmutación de paquetes, cuando se quiere transmitir señales de voz se hace uso de segunda y de tercera generación para canalizar las señales de voz o a través de VoIP (Voz sobre IP) para ser totalmente una red basada en IP. Las primeras versiones de LTE prometían tener velocidades mayores a 100 Mbps y con la llegada de LTE-*Advanced* velocidades superiores a un Gbps (Pachón de la Cruz, 2004)

Para lograr mayores tasas de transmisión a un gigabyte por segundo LTE hace uso de *Carrier Aggregation* que conceptualmente es tomar diferentes secciones del espectro electromagnético que no están contiguos para lógicamente agruparlas como si se viera una sola señal de banda más ancha para poder permitir tasas de transmisión mucho mayores (Alkhansa et al., 2014).

Conforme transcurra la década del 2020 al 2030, se espera que 5G aumente sus despliegues comerciales en América Latina, el marco referencial conceptual ya está definido y su aplicación ya comienza a cimentarse en países como México (Instituto Federal de Telecomunicaciones, 2022), para esta generación se sigue utilizando OFDMA como parte de su interfase de aire sin embargo presenta mayores casos de uso que su contraparte OFDMA para LTE. Las altas tasas de transmisión de alrededor de más de 10 gigabits por segundo se

logran por el uso de ondas milimétricas en la sección del espectro electromagnético y MIMO (Múltiples Entradas y Múltiples Salidas) Masivo tanto en la parte de la estación base como también desplegado una parte en el dispositivo móvil.

La primera red 5G comercial del mundo fue activada en el año 2019 en Corea del Sur. El hito lo llevaron a cabo empresas como SK Telecom, TK y LG Uplus. El gran y rápido alcance que logró lo menciona Lopez (2020).

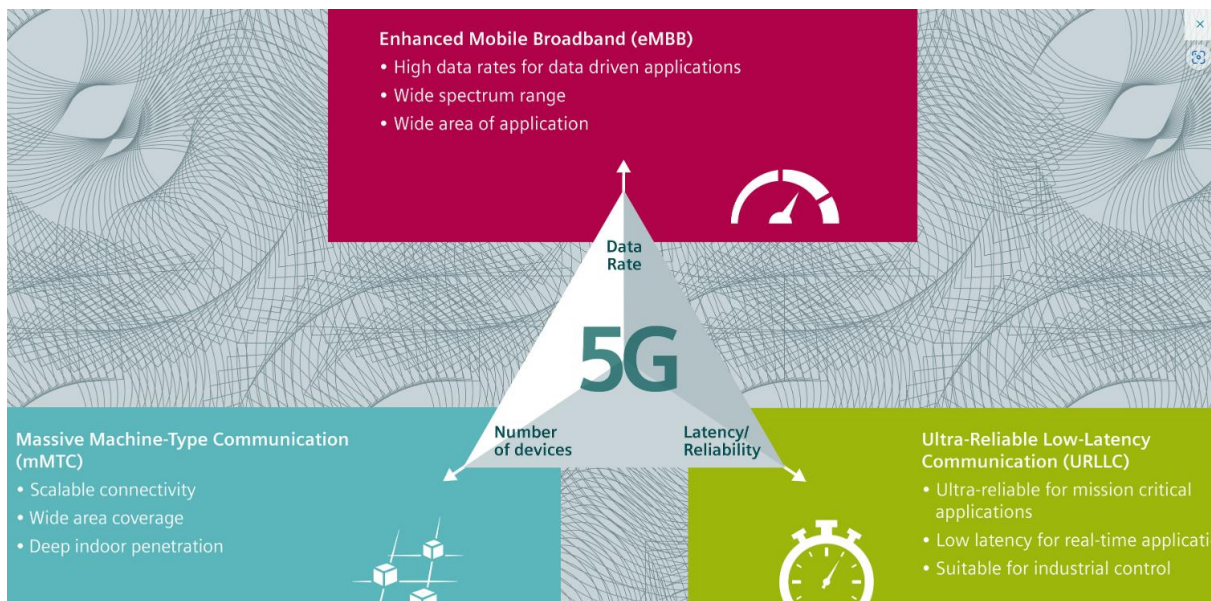
Tras poco más de 2 meses de desplegada su red 5G, Corea del Sur había superado el millón de suscriptores, alcanzando para ese entonces más de 61 mil radios bases 5G instaladas.

4.2 Redes Móviles 5G

Las redes móviles 5G conforman la tecnología predecesora de la Cuarta Generación, esta permite un nuevo concepto de red enfocado especialmente en brindar una mayor capacidad, mayor densidad de usuarios, menor latencia y una considerable reducción del consumo energético (Soriano, 2022). Por todas estas ventajas es que la principal característica del 5G es la mayor cantidad de aplicaciones que se incorporan al día a día de la industria, salud, transporte, ciudades inteligentes e internet de las cosas respaldado como se menciona en (INCIBE-CERT, 2019) en el fuerte enfoque en la comunicación máquina-internet.

(SIEMENS, 2020) menciona que existen tres casos de uso específicos para las redes móviles 5G, las cuales son las siguientes y cuyas características se muestran en la Figura 2 a continuación.

Figura 2
Casos de uso de la quinta generación de redes móviles



Nota: Se observan los diferentes casos de uso de 5G y su aspecto principal a priorizar dentro de la red. Recuperado de: Conexiones Industriales 5G (SIEMENS, 2020.).

El aumento de las diferentes características de esta generación de comunicaciones móviles respecto a la anterior se puede observar en la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1
Comparación entre características principales redes 4G y 5G

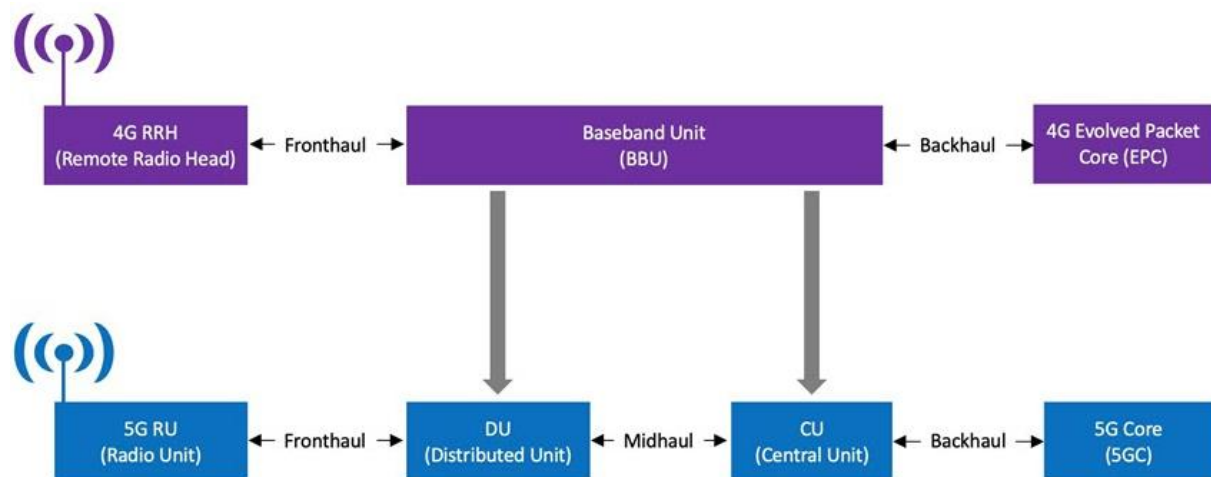
Características	4G	5G
3GPP Release	Rel 8-14	Rel 15
Velocidad	100 Mbps	10 Gbps
Ancho de banda en portadora	20 MHz	1000MHz
MIMO	8	256
Latencia	100 ms	1 ms
Movilidad	350 Km/h	500Km/h
Densidad de conexión	10,000	1,000,000

Nota: Obtenido de Red 5G y cómo se compara con antiguas redes (Bismark, 2019)

4.3 Arquitectura de Red 5G

Figura 3

Evolución de la arquitectura de red desde 4G a 5G de las redes móviles



Nota: En esta generación se separaron las funcionalidades de la unidad de banda base en unidad de distribución y centralizada para proveer características específicas de latencia y capacidad según la aplicación. Recuperado de: Las redes 4G/5G backhaul en primer plano (Lavallée, 2020).

4.3.1 Fronthaul

Esta parte de la red óptica es importante dentro de la presente investigación puesto que es el segmento de la arquitectura de red en la cual se trabajó dentro de las simulaciones que se presentan en la sección de resultados obtenidos. El fronthaul de la red comprende el enlace de

transmisión óptico entre la Unidad de Radio RU (conocida en 4G como RRH o Cabezal de Radio Remoto) y la Unidad de Distribución DU, su correcta implementación es importante debido a que controla en gran parte distintas condiciones de capacidad y latencia dentro de la red. Dicha latencia también es un parámetro importante debido a que interviene en la división de funciones de la red para cada dispositivo según el tipo de aplicación que intente satisfacer mayoritariamente la red en ese momento.

Existen diferentes tecnologías que bien pueden ser aplicadas en la interfaz del fronthaul, se puede apreciar claramente en la Tabla 2 a continuación el por qué se escoge la fibra óptica como medio de transmisión para la estructura de red de fronthaul en el 5G.

Tabla 2

Resumen de los parámetros de las posibles tecnologías del fronthaul

	Latencia	Capacidad	Alcance
Fibra óptica	<2.5 us	10Gbps	1km
Microondas	1ms	100Mbps-1Gbps	2km
Ondas milimétricas	1ms	500Mbps-2Gbps	1km
XDSL	15-60ms	10-100 Mbps	2km

Nota: Recuperado de División de funciones en arquitectura Cloud Radio Access Network (Zubimendi, 2019).

En lo que se refiere a topología según menciona (Rodríguez, 2021) se puede observar que se posee algunas soluciones de red fronthaul para analizar e implementar según los requerimientos técnicos como equipo y capacidad de la red y sobre todo el presupuesto económico de la empresa que brinde el acceso a la red móvil 5G, algunos ejemplos de implementación sobre fibra óptica se mencionan a continuación:

4.3.1.1 Implementación sobre Fibra oscura

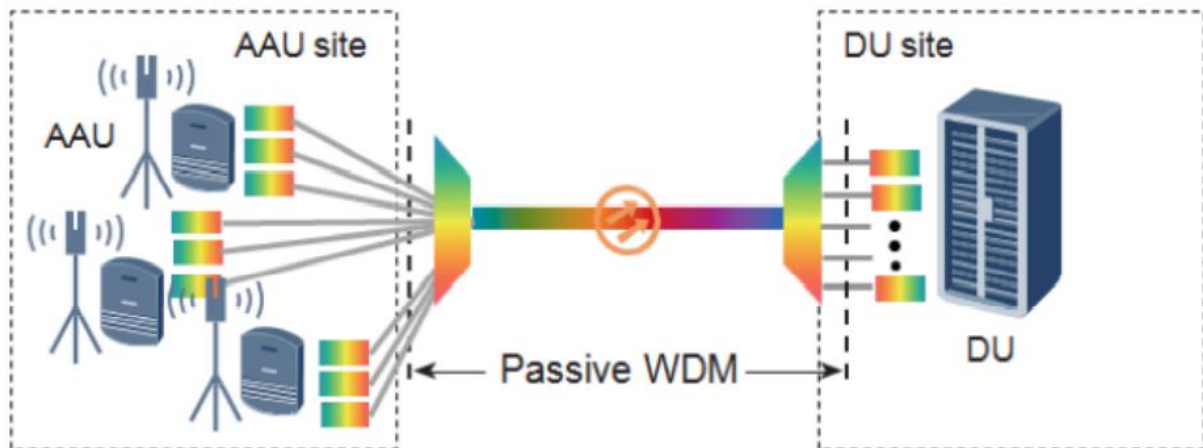
Hace referencia a los hilos de fibra que no están siendo utilizados por distintos proveedores que las desplegaron y que bien pueden ser utilizadas por la empresa proveedora de telefonía móvil. También se conoce con el nombre de fibra gris y es una buena opción para enlaces punto a punto con el que se cuenta con todo el ancho disponible de esta fibra.

4.3.1.2 Implementación con WDM pasiva

La multiplexación por división de longitud de onda se realiza con el fin de multiplexar distintas tramas de datos sobre un hilo de fibra que ya puede contar con servicios diferentes a los de la red de transporte 5G, al mismo tiempo que se encarga de multiplexar distintos canales de las tramas fronthaul sobre una misma fibra para aumentar la capacidad del sistema o para reducir el coste de implementación de la red fronthaul como se muestra en la Figura 4.

Un caso específico de aplicación de este tipo de red se explicará en la sección 5.9 donde se especifica el despliegue de las redes FTTH convergentes con las redes de fronthaul ópticas que soportan 5G actualmente en auge y algunas de sus principales ventajas sobre todo en relación al coste de despliegue de la red fronthaul.

Figura 4
WDM-PON en Fronthaul 5G



Nota: Representación de una red Fronthaul. A la derecha la Unidad de Distribución con un canal físico que alimenta con 3 canales a cada AAU (Unidad de Antena Activa) con diferentes longitudes de onda. Recuperado de: Sistema de transporte óptico para el segmento fronthaul en una red 5G NR (Balero et al., 2021).

4.3.1.3 Implementación con Active WDM/OTN (Optical Transport Network)

Para este tipo de implementación de red fronthaul se necesita la implementación de dispositivos activos en ambos extremos de la comunicación como amplificadores ópticos y transpondedores que realicen conversiones de señal óptico-eléctrica y viceversa que garantizan funcionalidad del enlace pero con el costo energético, de refrigeración y mantenimiento que esto conlleva, es preferible la implementación de equipos y modelos pasivos por el hecho de que el aspecto económico es uno de los principales problemas para este tipo de red, esto en especial debido a que se necesita una mayor cantidad de antenas específicamente el triple y hasta diez veces más en algunos casos donde se posee una cantidad densa de usuarios o entornos metropolitanos que puedan tener o generar interferencia y degradación de la señal respecto a la generación anterior, es por esto que los dispositivos WDM/OTN se deben configurar en los sitios de las unidades de antenas activas, así como en los nodos donde se encuentren los equipos de las unidades de distribución.

Este fue uno de los primeros tipos de fronthaul desplegados para redes móviles 5G y algunas de las importantes funcionalidades como agregación de puertos lógicos para distintos servicios y extensión de distancia de transmisión. La solución WDM/OTN activa tiene modos de red que

son más flexibles que los de las soluciones WDM pasivas es decir admite redes punto a punto (P2P) y redes en anillo.

4.3.2 Midhaul

Consiste en la parte de la estructura de red que conecta las Unidades de Distribución DU con la Unidad Central, en algunos nodos se encuentran centralizadas estas 2 partes de la red y preparan la gran cantidad de tráfico que será enviado hacia el núcleo 5G de la red. Sus características técnicas y tecnologías que se utilizan en estos enlaces se muestran en las Tablas 3 y 5 respectivamente, de la misma manera para los enlaces fronthaul y backhaul.

4.3.3 Backhaul

Se encarga de conectar las Unidades Centrales CU con el tráfico del núcleo de la red móvil 5G, utilizan interfaces de 1, 10, 100 hasta 400GbE, se implementan para permitir latencia de comunicaciones entre 10 a 300 ms a diferencia del fronthaul que prioriza la mejora de respuesta respecto a latencia en las comunicaciones, pero se centra en transportar enormes cantidades de datos correspondientes a todos los casos de uso de las redes móviles 5G.

4.4 Características técnicas de la interfaz óptica en 5G

Se puede diferenciar un total de 4 posibilidades de configuración en la estructura de una red óptica que soporte las redes 5G como se muestra en la Tabla 4. La diferenciación se produce al momento de la implementación de cada uno de las diferentes partes funcionales definidas anteriormente (Backhaul, Midhaul y Fronthaul), las características de latencia, sincronización, distancia y tipo de conexiones se muestran a continuación:

Tabla 3

Características técnicas de los enlaces de la red de transporte óptica 5G

	Segmento Fronthaul	Segmento Midhaul	Segmento Backhaul
Latencia en una vía	< 100 us	<0.4 ms	< 10 ms
Tiempo de sincronización	Relativo desde ± 65 ns hasta ± 260 ns	Absoluto ± 1.5 us	Absoluto ± 5 us
Distancia en una vía	< 10 km	< 80 km	< 200 km
Tipo de conexión nodo a nodo	Punto a punto	Punto a multipunto	Punto a multipunto

Nota: Se muestran los valores recomendados estandarizados para cada una de las partes de la red de transporte 5G. Recuperado de Optical and Wireless Convergence for 5G Networks (Abdalla et al., 2020).

Es importante mencionar que cada una de las partes de la arquitectura de red de transporte posee una cantidad máxima de enlaces que, al menos con las características ya elaboradas y prestablecidas del resto de la red, mantengan un funcionamiento correcto y

sincronizado con el resto sin comprometer la eficiencia de su funcionamiento, este número máximo de conexiones se especifica en la Tabla 5.

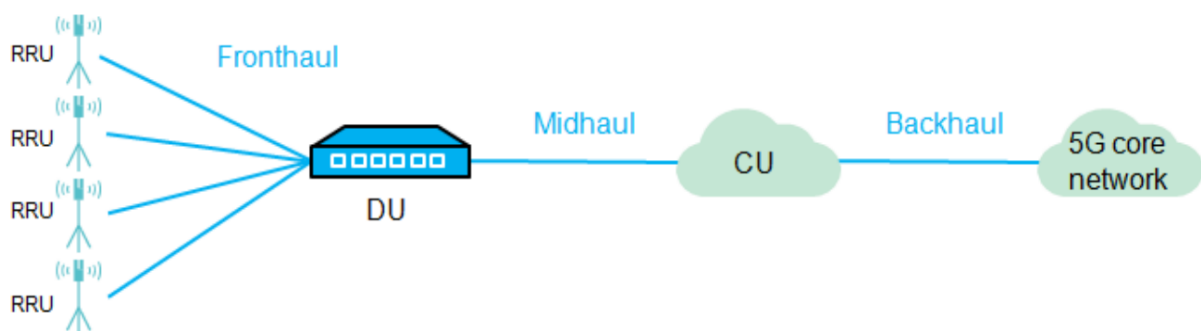
4.4.1 5G C-RAN con segmentos front-, mid-, y back-haul

Este es el modelo de topología estándar para redes de transporte 5G, por lo que la presente investigación se basa en este modelo y en las tecnologías que se aplican aquí y que se mencionan en la Tabla 4 para realizar la simulación del fronthaul.

La unidad de radio (RU) se mantiene en el sitio donde se encuentra ubicada la antena o sistema radiante, y tanto las unidades de distribución como unidades centralizadas se encuentran alojadas en lugares geográficos distintos como se muestra en la Figura 5.

Como beneficio se puede mencionar la baja complejidad de la antena debido a la posibilidad de implementación de las Unidades de Antena Activas AAUs compactas además de que le brinda alta escalabilidad a la red.

Figura 5
C-RAN 5G común con todos los segmentos RU/CU/DU



Nota: Recuperado de 5G-Ready OTN Technical White Paper (China Telecom, 2020).

Se posee mayor flexibilidad en cuanto al almacenamiento y distribución de las funciones de red a lo largo de cada una de las partes de la red, esto quiere decir, que habrá momentos donde las unidades de centralización trasladen funciones a las unidades de distribución con el fin de lograr características específicas dentro de la comunicación.

Tabla 4

Desventajas de las diferentes topologías físicas de la red de transporte 5G

N	Configuración	Desventajas
1	5G D-RAN con únicamente segmento back-haul	Alta complejidad en el sitio de la antena debido a la gran cantidad de funciones que deben estar alojadas en el servidor en aquel sitio. No se posee compatibilidad para CoMP o multipunto coordinado.
2	5G C-RAN con segmentos mid- y back-haul	Complejidad media en el sitio del sistema radiante Ganancia CoMP limitada.
3	5G C-RAN con segmentos front- y back-haul	Requerimientos ópticos medios para el transporte de información para los enlaces fronthaul-
4	5G C-RAN con segmentos front-, mid-, y back-haul	Requerimientos ópticos mayores para el transporte de información para los enlaces fronthaul al igual que la configuración anterior

Nota: Recuperado de Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era (Liu, 2019)

4.5 Modulación en la interfaz óptica

Las redes de telecomunicación evolucionan principalmente mejorando la capacidad del sistema para adaptarse a nuevas aplicaciones y propiciando características clave en redes de próxima generación como la convergencia de servicios, el aumento masivo de dispositivos y la eficiencia computacional y espectral.

Una gran ventaja de la fibra óptica es su potencial ancho de banda, únicamente limitado por las características y capacidad de gestión sobre la información de los equipos actuales, es así que en la actualidad con el fin de lograr convertir las señales eléctricas en señales ópticas que puedan transportar la información de un sistema, es posible utilizar dos técnicas específicas de modulación óptica: la modulación externa o indirecta y la modulación directa, cada una con características únicas aplicables a distintos casos de transmisión. Con estas es posible entonces variar o modular propiedades de la luz como estado de polarización, intensidad, fase y frecuencia a fin de transportar información sobre la interfaz óptica.

4.5.1 Modulación directa

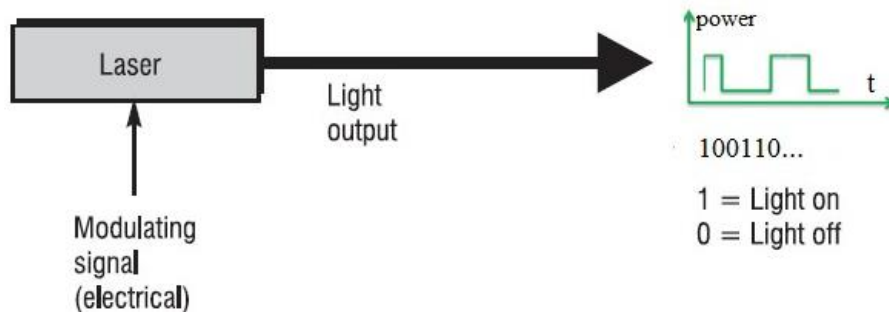
La modulación directa se caracteriza por no requerir equipamiento adicional a la propia fuente de luz, esto quiere decir la intensidad de la señal óptica variará directamente con la aplicación de la señal directa en la fuente como se muestra en la Figura 6.

Este tipo de modulación es la más sencilla y económica, sin embargo, posee limitantes respecto a la velocidad de transmisión que se puede lograr. Tal y como menciona (Acosta, 2018) la velocidad máxima que pueden alcanzar estos láseres semiconductores DML (*Directly*

Modulated Láser) es de 2.5 Gbps en enlaces con distancias inferiores a 250 km y hasta 10 Gbps en enlaces mucho menos distantes.

Figura 6

Modulación óptica directa



Nota: Se puede observar como la señal eléctrica activa el encendido del láser y realiza la modulación sobre la señal óptica. Recuperado de: Direct-modulation-vs-External-modulation (RF Wireless World, 2019).

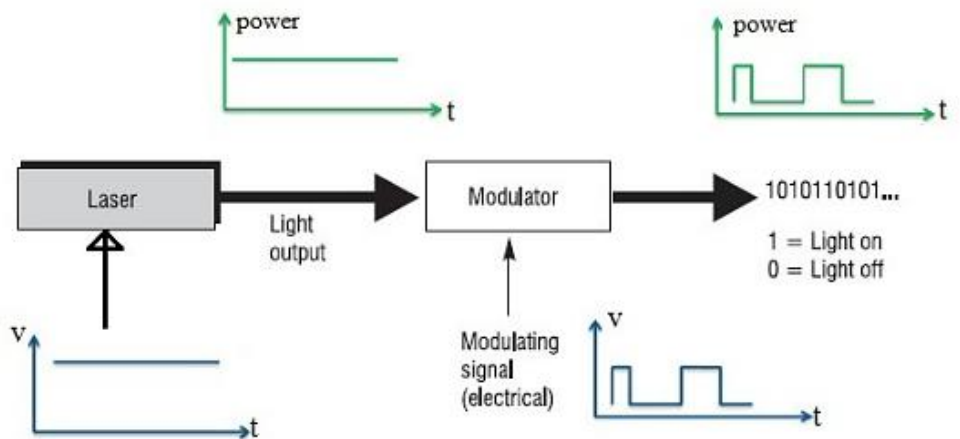
4.5.2 Modulación externa

Este tipo de modulación se caracteriza por poseer un dispositivo adicional además de la propia fuente de luz para variar la fase o intensidad de la señal como se muestra en la Figura 7, es decir la potencia del láser se mantiene siempre constante, pero dependiendo del tipo de modulación externa utilizada, se variarán aspectos físicos del resto de componentes del sistema de transmisión que lograrán modular la señal óptica a partir de la información. Otra de las importantes ventajas de los moduladores externos es el hecho de poder utilizar láseres con potencias superiores a 150 mW (21.7 dBm) anulando el efecto chirp (variación momentánea de la longitud de onda de la luz) que distorsiona la señal en moduladores directos (Kaminow & Willner, 2018).

Por estas importantes razones, además del hecho de poseer mucha mayor capacidad de transmisión es que los moduladores externos son los escogidos para las interfaces ópticas de las redes móviles 5G tal y como menciona Hogan (2022):

“Los enlaces 4G normalmente funcionan a 10 Gbps, mientras que los enlaces 5G suelen funcionar a 25 Gbps. Por lo tanto, el láser y el detector en un transceptor 5G deben permitir un mayor ancho de banda. Esto también afecta la elección de la tecnología láser y la electrónica asociada para impulsarlos”.

Figura 7
Modulación óptica externa o indirecta



Nota: Se puede observar como el bloque modulador se encuentra aparte y no es accionado directamente por la señal eléctrica. Recuperado de: Direct-modulation-vs-External-modulation (RF Wireless World, 2019).

Sin embargo, es necesario aclarar que la modulación externa es mucho más costosa y obviamente necesita equipamiento mucho más complejo para poder aprovechar sus ventajas en comparación con su contraparte directa. Actualmente para las interfaces ópticas de alto desempeño, así como enlaces long haul se utilizan los modulares electroópticos y de electro absorción, los cuales a pesar de poseer anchos de banda similares (Rivadeneira, 2019) difieren en su velocidad de transmisión, puesto que el modulador electroóptico posee mayor velocidad superando los 100 Gbps.

4.5.3 Modulación en Fronthaul

Existen diferentes tipos de modulación empleados dependiendo del segmento de la arquitectura de red seleccionado, si bien las modulaciones NRZ al ser las más comunes fueron ampliamente utilizadas en los primeros sistemas de telecomunicaciones móviles 5G, se han desarrollado diferentes tipos de modulación óptica con el fin de optimizar el ancho de banda utilizado propiciando la eficiencia espectral y energética, al mismo tiempo que se aumenta la capacidad del sistema en términos de cantidad de datos a enviar como por ejemplo mediante modulación PAM 4 tal y como se explica a continuación.

4.5.3.1 NRZ-OOK *Non return to zero on-off shift keying*

Este tipo de modulación óptica que bien se puede considerar básica, toma en cuenta la modulación de la información en señal eléctrica hacia óptica encendiendo y apagando la señal portadora según el tren de bits de la señal original.

Su principal diferencia con el RZ-OOK es que durante el periodo completo de un bit de información la señal mantiene su amplitud todo el tiempo, mientras que en RZ esta amplitud se

mantiene solo la mitad del tiempo de periodo de un bit, una ventaja de este último tipo de modulación en comparación con NRZ es el hecho de que la potencia óptica por bit se va a reducir a aproximadamente la mitad puesto que la señal debe volver a cero cada vez que pasa la mitad del periodo, al mismo tiempo que se reduce los efectos por no linealidad de la fibra que puede introducir imperfecciones en la señal como distorsiones y ruido (Alzate, 2018).

4.5.3.2 PAM 4 (*Pulse Amplitude Modulation 4-level*)

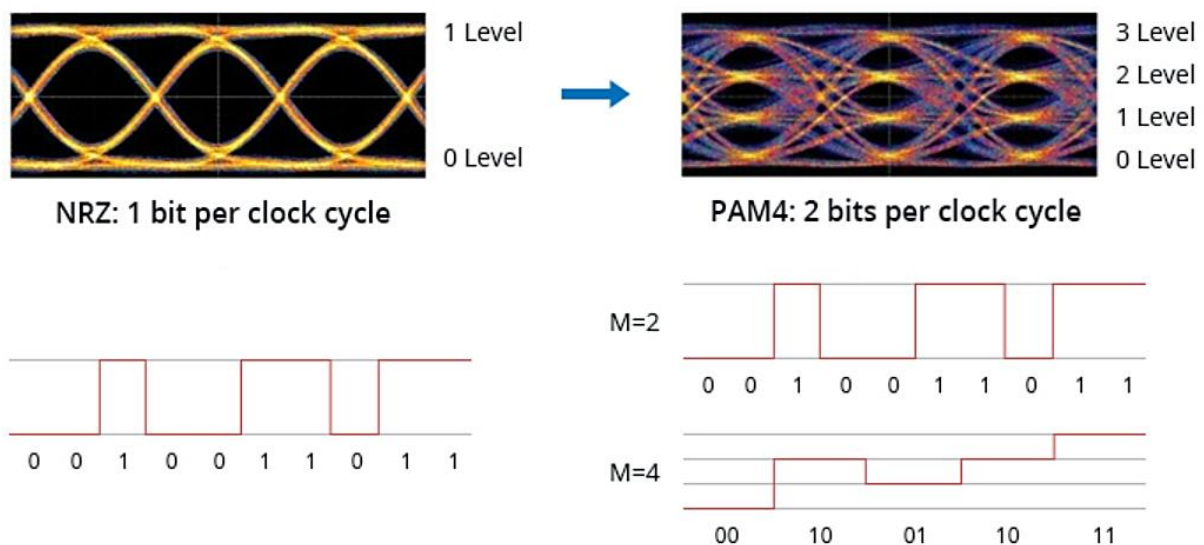
Este tipo de modulación de alto nivel se utilizará para las simulaciones de un fronthaul óptico en la sección 7.

PAM4 es una técnica de modulación óptica que combina diferentes niveles de amplitud de la señal modulada, 4 para ser exactos, con el fin de aumentar la cantidad de bits por símbolo a 2 y con esto duplicar la capacidad de transmisión de un canal óptico simplemente cambiando la técnica de modulación y demodulación en ambos extremos del sistema de comunicación.

La recomendación IEEE LR8/FR está encargada de parametrizar los distintos transceptores ópticos que utilicen PAM4 de hasta 400 Gbps de capacidad, se posee diferentes parámetros técnicos a considerar como por ejemplo ecualización en ambos extremos del sistema de comunicación con el fin de reducir la tasa de error de bit BER, mayor consumo de energía y menor pérdida de señal causada por el canal físico, a continuación se puede observar en la Figura 8 una comparación entre diagramas de ojo de señales PAM4 con 2 bits por símbolo y una señal óptica NRZ con un solo bit por símbolo, así como los diferentes niveles de amplitud de cada una de las modulaciones.

Figura 8

Comparación diagrama de ojo NRZ vs PAM4



Nota: En la modulación PAM4 se aumenta la cantidad de bits por símbolo a 2 por lo que el bit rate se duplica utilizando el mismo ancho de banda. Recuperado de: ¿Qué es PAM4 y cuáles son las diferencias entre PAM4 y NRZ? (Flores, 2022).

Un ejemplo de circuitos integrados modulares PAM4 aplicables a 5G es el GN1089 / GN1800: TIA PAM4 FiberEdge de 50 Gbps del fabricante Semtech Corporation como lo expone (Davis, 2021) el cual habilita los canales de 25 Gbps para transmitir en 50 Gbps debido a la cantidad de bit por símbolo de este tipo de modulación tal y como se expuso anteriormente.

4.5.3.3 DMT (*Discrete Multitone Modulation*)

DMT es un modelo de modulación de señales y multiplexación que posee las mismas características que OFDM o Multiplexación por división de frecuencia ortogonal pero manteniéndose en banda base, las principales causas para la utilización de este esquema de modulación es la utilización eficiente del espectro electromagnético al trasladar las distintas señales en banda base a frecuencias ortogonales donde sus picos o máximos en el dominio de la frecuencia coincidan con los ceros o nulos de los diferentes canales a transmitir.

El conjunto de todas las señales a transmitir bajo modelos de modulación/multiplexación como OFDM o DMT se conoce como sistemas multiportadora por el hecho de que pueden transmitir varios canales utilizando primeramente modulaciones digitales como QAM o PSK.

Por el momento no se pueden diferenciar características específicas que diferencien la transmisión entre interfaces inalámbricas e interfaces ópticas, sin embargo es importante mencionar que los sistemas de comunicación difieren bastante en lo que se refiere a la estabilidad de la señal (Zoireff, 2018) , puesto que el medio alámbrico en este caso la fibra óptica introduce varias distorsiones que no lo hace el medio inalámbrico, estas pueden ser causadas por la no linealidad de las fibras debido a errores de fabricación o impurezas dentro de la misma, lo cual produce dispersión entre los pulsos y por lo tanto interferencia entre símbolos.

4.5.4 Modulación Midhaul y Backhaul

Respecto a la modulación en Midhaul y Backhaul se utilizan esquemas de modulación de varios niveles de amplitud como lo es PAM4, el cual propicia el aumento de la capacidad del sistema tal y como se explicó anteriormente. Existe una diferencia específica en la modulación entre Mid y Backhaul y es que en esta última se maneja esquemas 200G/400G (Xiang, 2019).

Algunas características específicas en comparación con el resto del esquema de red completo 5G se muestran en la siguiente tabla a continuación:

Tabla 5
Características de X-haul 5G

Segmento	Característica	Valor típico
Fronthaul	Número de AAUs	12000
	Bit rate desde/hacia DU por cada AAU	50 Gb/s aprox.
	Distancia de transmisión	< 20 km (típicamente < 10 km)
	Data rate	25 Gb/s, 50Gb/s, 100-Gb/s.
	Tipos de trancivers ópticos típicos	NRZ, DMT o PAM4, BiDi, WDM, L-WDM, M-WDM
Midhaul DU	Bit rate total desde/hacia DUs	600 Tb/s
	Número de DUs	400
	Bit rate desde/hacia CU por DU	300 Gb/s
	Distancia de transmisión	< 80 km (típicamente < 40 km)
	Tipos de trancivers ópticos típicos	50-Gb/s PAM4, QAM, QPSK, O-band DWDM 100-Gb/s coherente, DWDM
Back-haul CU	Bit rate total desde/hacia CUs	120 Tb/s
	Número de CUs	20
	Bit rate desde/hacia 5GCs por CU	3 Tb/s
	Distancia de transmisión	< 80 km (típicamente)
	Tipos de trancivers ópticos típicos	200G/400G coherente, DWDM
Metro-core	Bit rate total desde/hacia CUs	60 Tb/s (por dirección)
	Número de CUs	4
	Bit rate desde/hacia 5GCs por CU	7.5 Tb/s
	Distancia de transmisión	< 120 km (típicamente)
	Tipos de trancivers ópticos típicos	400G/800G coherente, DWDM
	Bit rate total desde/hacia otra 5GCs	45 Tb/s

Nota: Se han agregado las tasas de transmisión generalmente utilizadas para enlaces fronthaul y algunos trancivers ópticos en el segmento Midhaul. AAU, Active antenna unit; BiDi, bi-directional; CU, centralized unit; DMT, discrete multitone; DU, distributed unit; DWDM, dense WDM; L-WDM, 12-channel LAN-WDM; M-WDM, 12-channel medium-WDM; NRZ, non-return to-zero; PAM4, 4-level pulse-amplitude modulation; WDM, wavelength-division multiplexing. Obtenido de Optical Communications in the 5G Era. (Xiang, 2019).

4.6 Detección en la interfaz óptica

La detección hace referencia a la adquisición de la señal que se transmite a través de la interfaz óptica, este fenómeno físico se lleva a cabo por los intercambios fotón electrón que realizan los equipos de detección de señal, los cuales producen una corriente eléctrica que varía conforme lo hacen los fotones de la señal óptica. Existen diversos esquemas de detección modulación (Liu, 2019) , dentro de los cuales los más utilizados son IM/DD (Modulación de

intensidad y detección directa), DPSK/DD (Modulación y detección por desplazamiento de fase en cuadratura diferencial) y Modulación/detección coherente.

4.6.1 IM/DD

Para la modulación de intensidad y detección directa IM/DD la técnica de modulación más utilizada es la NRZ-OOK, la cual se caracterizaba por ser la más simple y económica de las modulaciones en la interfaz óptica de las redes móviles 5G por el hecho de que simplemente encendía o apagaba los pulsos de luz según el tren de bits de información que se quiera modular dependiendo de si se tratase de un 1 o 0 lógico.

IM/DD forma parte de los esquemas de modulación/detección desarrollados de manera más temprana y no está optimizado para poder dar las características de eficiencia espectral que bien pueden ofrecer otros esquemas de modulación como los siguientes.

4.6.2 DPSK/DD

DPSK/DD o Modulación y detección por desplazamiento de fase en cuadratura diferencial utiliza típicamente formatos de modulación como BPSK Modulación en fase binaria y QPSK modulación de fase en cuadratura. Habitualmente para este tipo de sistemas el esquema de detección a utilizar consiste de un ODI o Interferómetro de retraso óptico que es usado para comparar la señal con una copia de sí misma retrasada para convertir la modulación de fase en modulación de amplitud la cual pueda ser directamente detectada por los detectores square-law.

Este esquema de detección puede ser extendido y utilizado con DQPSK el cual lleva 2 bits por símbolo usando 2 ODIs con un desfase de 90 grados entre cada señal.

4.6.3 Detección coherente

Estos esquemas toman el nombre de coherentes por la coherencia de fase de la portadora óptica, esto quiere decir que permite una gran tolerancia a la dispersión cromática de la interfaz.

Para este esquema es posible realizar la modulación de 2 señales polarizadas ortogonalmente con sus componentes en fase y cuadratura lo que aumenta la capacidad del canal tal cual lo hace PAM4. Para la implementación de este sistema es necesaria la utilización de conversores analógico digitales de muy alta velocidad lo cual también habilitaría la posibilidad de implementar modulaciones mucho más eficientes como n-QAM con el mismo hardware. De la misma manera es necesaria la combinación con módulos DSP para la detección y demodulación de señales lineales.

La detección coherente presenta 2 importantes ventajas (Rodríguez, 2022) la más importante hace referencia a la utilización más eficiente del ancho de banda del canal óptico al aumentar la cantidad de bits por símbolo y la otra razón es el hecho de que se puede aumentar cerca de 10 dB si los comparamos con los sistemas IM/DD anteriormente mencionados.

Este tipo de detección de señales ópticas es ampliamente utilizado en sistemas RoF (Radio over Fiber).

4.7 Multiplexación en la interfaz óptica

4.7.1 25G WDM

La tecnología 25G WDM utiliza la multiplexación óptica de canales a 25 Gbps con el fin de estandarizar la comunicación a través de la interfaz óptica entre unidades de distribución y las unidades de radio para distintos proveedores garantizando la correcta implementación del precepto de las C-RAN que buscan normalizar los enlaces y equipos de la red de transporte para que estos puedan funcionar bajo diferentes marcas de distintos proveedores. En el (Next-Generation Optical transport network Forum, 2018) se mencionó que la motivación de la actualización de los enlaces desde 5 y 10 Gbps hasta 25 Gbps también se debe a la mejora sustancial de la latencia para esta red a 1 microsegundo o incluso menos.

25G WDM utiliza la multiplexación por división de longitud de onda análoga a la multiplexación por división de frecuencia para enviar distintos canales de información sobre la misma fibra óptica con la ventaja de la gran capacidad de 25 Gbps que al ser usada con esquemas de modulación como PAM-4 permiten llegar a tasas de transmisión de hasta 50 Gbps.

Tuvieron que pasar distintas implementaciones de tecnologías de transporte hasta que se adoptase esta que es la que mejores resultados da en cuanto a costos de implementación, capacidad y convergencia con redes de acceso como FTTH.

4.7.1.1 25 WDM-PON

Es la implementación favorita para fronthaul en 5G en la actualidad debido a su implementación sobre fibra oscura que poseen los proveedores de FTTH ya desplegada, por lo que se reducen costos de implementación de fronthaul, es decir tal y como menciona Cifarelli (2022) en el caso de que una FTT-5G sea planificada al intentar desarrollar una red FTTH, el intervalo de reducción de gastos para fronthaul 5G, debido a la convergencia utilizando WDM-PON, estará entre el 65% y 96%.

WDM-PON como su nombre lo indica utiliza redes pasivas con multiplexación por división de longitud de onda transmitiendo distintas tramas de distintos servicios como FTTH y tramas fronthaul 5G sobre un mismo canal físico de comunicación, el nombre que reciben estas redes GPON son FTTH-5G.

Este modelo de multiplexación y topología provee un alto ancho de banda, baja latencia, una implementación fácil plug and play de las Unidades de distribución óptica de las redes GPON, una administración y mantenimiento simple de este tipo de redes en un solo nodo

combinado con el bajo costo de implementación para proveedores de servicios móviles como menciona (Addams, 2019).

Las longitudes de onda a utilizar para este tipo de multiplexación se encuentran entre 1271 y 1611 nm según el estándar ITU-T G694.2.

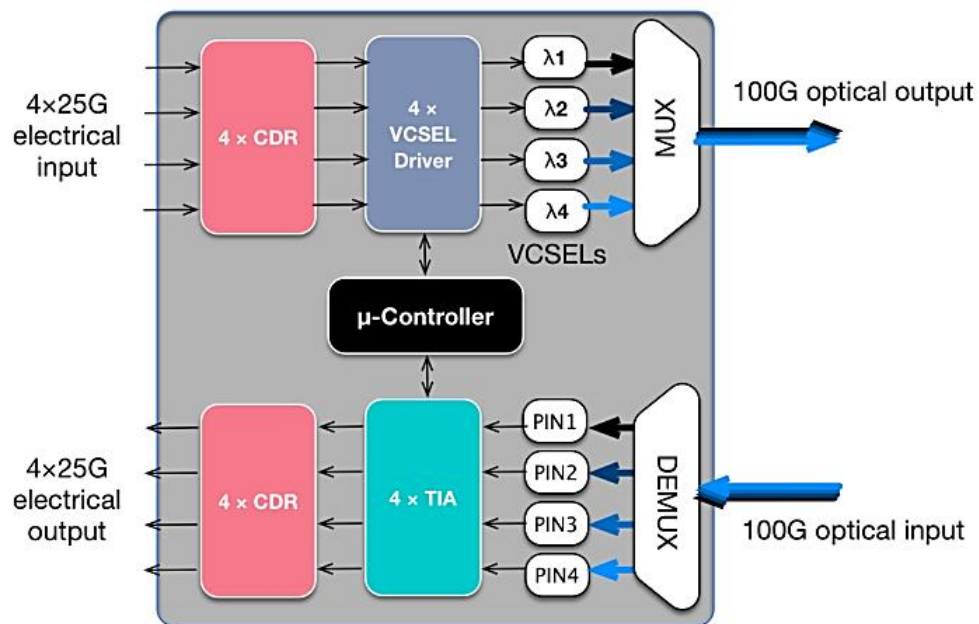
A continuación, se hablará de algunos otros esquemas de multiplexación en la red, donde la elección de la implementación de cada uno de estos dependerá de las necesidades técnicas, estado de la red actual y capacidad económica de los proveedores de servicios de comunicación de telefonía móvil.

4.7.2 SWDM

SWDM acrónimo en inglés de Multiplexación por división de longitud de onda corta es una tecnología de multiplexación para señales ópticas que utiliza solamente 4 longitudes de onda desde los 850 nm hasta los 955 nm con 30 nm de espaciamiento entre cada una de las portadoras ópticas.

Figura 9

Diagrama de transmisión full dúplex utilizando tecnología SWDM



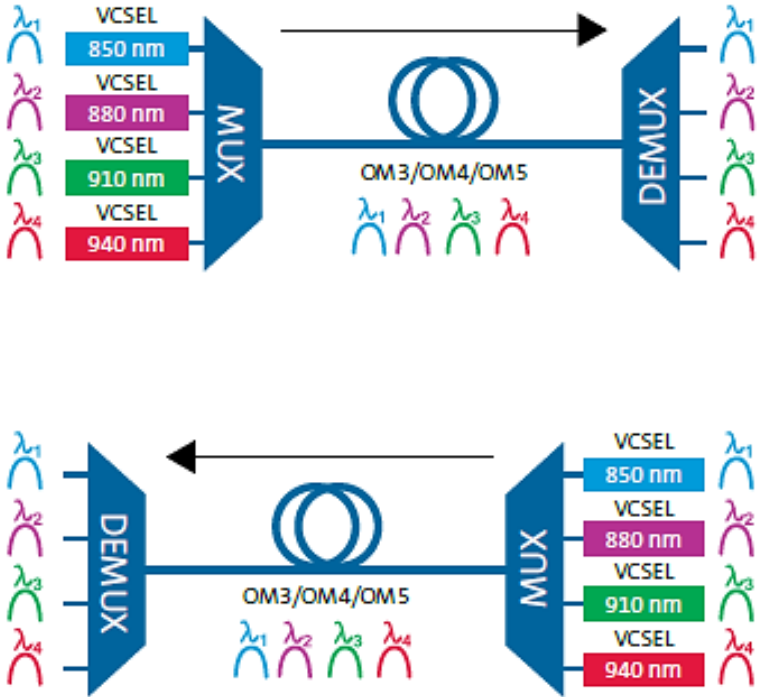
Nota: Se observa una comunicación utilizando las 4 longitudes de onda disponibles en SWDM tanto para transmisión como para recepción. Extraído de OM5 and SWDM. (Qing Xu 2017).

Como se observa en la Figura 9 la transmisión bidireccional utilizando esta tecnología se realiza mediante la transmisión sobre cables de fibra óptica utilizando 2 núcleos, En 2017 ISO/IEC decidió que el tipo de fibra óptica recomendado para este tipo de tecnologías de multiplexación será la fibra óptica OM5.

Se pueden utilizar 2 velocidades de datos para la comunicación, 4 canales a 10 Gbps cada uno o 4 canales a 25 Gbps cada uno que darían una tasa total de datos de 100 Gbps.

Su alcance de transmisión es de máximo 450 metros, suficiente para el manejo de centros de datos y enlaces fronthaul cortos demostrado en el apartado de resultados obtenidos del presente trabajo. Las diferentes longitudes de onda habitualmente usadas se muestran en la Figura 10 a continuación.

Figura 10
Diferentes longitudes de onda de la tecnología SWDM



Nota: La multiplexación por división de longitud de onda corta permite transmitir hasta 4 canales a través de una fibra óptica desde los 850 hasta los 955 nm con un espaciamiento de 30 nm entre cada canal. Recuperado de ¿Qué es SWDM? (Martínez, 2017).

4.7.3 M-WDM

M-WDM acrónimo en inglés de Multiplexación por División de Longitud de Onda Media es una tecnología basada en CWDM que utiliza 12 canales en específico dentro de la banda O de los 6 primeros canales de CWDM los cuales se muestran en la tabla 6.

La penalización de pérdida que debe ser agregada al momento de realizar los cálculos de pérdidas utilizando este tipo de tecnología de multiplexación van desde 1 hasta 5 dB (Xiang, 2021).

Al utilizar las 12 longitudes de onda en un solo sentido para la transmisión utilizando portadoras de 25 Gbps se logran tasas de 300 Gbps por fibra óptica.

Para lograr la transmisión bidireccional dentro de una sola fibra óptica cada uno de los canales especificados para M-WDM posee un índice que indica cual debe ser utilizado para

transmisión y para recepción como se muestra en la tabla 6, naturalmente la tasa de transmisión en una sola dirección se reduce a la mitad es decir 125 Gbps.

Tabla 6

Plan de 12 canales M-WDM respecto a los 6 primeros canales CWDM

Índice de canal CWDM	Longitud de onda central (nm)	Índice de canal M-WDM	Longitud de onda central (nm)
CWDM1	1271	C1 -	1267.5
		C1 +	1274.5
CWDM2	1291	C2 -	1287.5
		C2 +	1294.5
CWDM3	1331	C3 -	1307.5
		C3 +	1314.5
CWDM4	1331	C4 -	1327.5
		C4 +	1334.5
CWDM5	1351	C5 -	1347.5
		C5 +	1354.5
CWDM6	1371	C6 -	1367.5
		C6 +	1374.5

Nota: Los canales indexados con el símbolo + y – representan los canales de transmisión y recepción respectivamente que deben ser utilizados para comunicaciones bidireccionales sobre una sola fibra al utilizar M-WDM. Recuperado de Optical Communications in the 5G era. (Xiang 2021)

4.7.4 Red Ethernet/TSN

Las redes ethernet/TSN utilizan la interfaz óptica dentro de las redes 5G para realizar una comunicación rápida y de gran ancho de banda en los centros de datos de la red 5G. TSN es acrónimo en español de redes sensibles al tiempo, las cuales ya han sido definidas por estándares IEEE específicamente para servicios determinísticos, es decir redes en las cuales se espera la participación de cada una de las partes y equipos en orden para realizar una tarea dada, como autenticación, registros, validaciones, correcciones y transmisión. Este tipo de redes garantiza el transporte de los datos de manera confiable, evitando la pérdida de paquetes y asegurando una latencia estable dentro de la red al realizar la petición de servicios específicos.

Addams (2019) explica que la flexibilidad de este tipo de redes respecto a las necesidades técnicas de la red como ancho de banda por servicio o latencia ultra baja se ve propiciada gracias a las soluciones de conmutación de datos Ethernet y a la multiplexación estadística que a su vez garantiza una calidad de servicio según el tipo de servicio solicitado en

ese momento por la red. Sin embargo, hay que mencionar que las redes sensibles al tiempo necesitan conmutadores adaptables a fronthaul que sean ultrasensibles a delays de la información que poseen elevados costos de adquisición y mantenimiento.

4.8 Convergencia Fronthaul 5G Y FTTH

Bajo el precepto de que la quinta generación de comunicación móviles utiliza bandas espectrales de mayor frecuencia que la 4ta generación, en especial la banda alta o milimétrica que está cercana a los 24 GHz, se conoce que estas señales al tener una longitud de onda mucho menor, se verán atenuadas con mayor facilidad que las ondas de una estación de cuarta generación, incluso su capacidad de penetración sobre edificios y objetos se ve disminuida, por lo que es necesaria la implementación de una mayor cantidad de AAU (unidades de antenas activas) como se muestra en la Figura 11 y por lo tanto el despliegue de redes de fibra óptica que soporten e interconecten a estas AAU.

Figura 11

Diferencia entre densidad de antenas en un territorio para distintas generaciones de redes móviles



Nota: Se evidencia que conjuntamente con la evolución de las comunicaciones móviles es necesaria la implementación de una mayor cantidad de antenas y por lo tanto el despliegue de redes ópticas que las soporten. Recuperado de: Convergence of FTTH & 5G Networks (MENA, 2021).

Existen casos críticos en los cuales será necesario el despliegue de fibras ópticas hasta grandes edificios corporativos que cuentan con muchas paredes o pisos subterráneos y que por lo tanto a las ondas milimétricas se les dificulta acceder y que se deberá instalar unidades de

antenas activas en el lugar mimetizadas con su entorno en especial en bandas de ondas milimétricas y bandas estudiadas en la actualidad como la de 60 GHz.

La ITU al estudiar el hecho del gran despliegue de fibra óptica que se necesitaría alrededor de todo el mundo decidió comenzar a estandarizar las redes de distribución y algunas de dispersión ya existentes como FTTH para hacerlas convergentes con las redes ópticas para el fronthaul 5G, así como definir nuevas velocidades para redes PON que convergen con las velocidades de fronthaul y estandarizar la multiplexación de 25 WDM PON como se indica en la sección 5.10.

En cifras podemos realizar una comparativa de la cantidad de fibra necesaria para la implementación de redes fronthaul 5G en comparación con la fibra de distribución ya desplegada de redes ópticas pasivas como FTTH para cubrir con 5G a Estados Unidos como se observa en la Figura 12 a continuación.

Figura 12

Número de celdas pronosticados para la implementación de 5G en EEUU



Nota: Recuperado de Convergence of FTTH & 5G Networks (MENA, 2021).

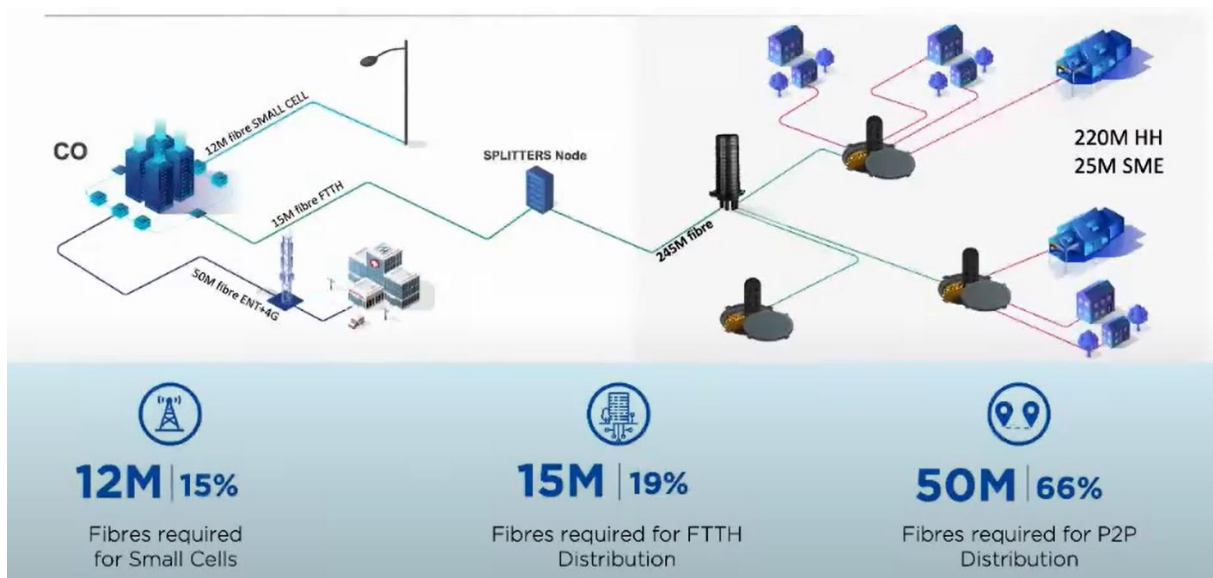
Se observa claramente en la imagen anterior como se prevé una actualización de la red de cuarta generación ya existente basada en el número de celdas 4G actualmente existentes, la densificación de antenas por un factor de 10 anteriormente mencionada en la Figura 11 especifica que para poder proveer servicios en micro celdas en la banda milimétrica de 5G se requiere aumentar el número de antenas por lo cual se requerirían un total de 4 millones de micro celdas que a su vez es multiplicada por un factor de 1.5 con el fin de poseer un crecimiento de la red o actualización a bandas futuras que se encuentran en investigación como la de 60 GHz.

Por lo tanto, se requerirían 6 millones de fibras ópticas para interconectar todas las AAU necesarias, sin embargo, los proveedores de servicios al desplegar fibra óptica suelen acostumbrarse a tender 2 fibras en lugar de una con el fin de estar preparados para un posible crecimiento de la red, es de esta manera que se concluye que finalmente se requeriría el despliegue de 12 millones de fibras ópticas solo para contar con el fronthaul 5G en EEUU.

Si comparamos esto con el número de fibras que deben ser desplegadas para cubrir con redes de distribución ópticas para FTTH en EEUU como se muestra en la Figura 13, se puede evidenciar como su número incluso supera al necesario para fronthaul 5G y aquí es donde yace la importancia de la convergencia de redes ópticas de distintos servicios, que han sido estandarizadas por la ITU con el fin de aprovechar su despliegue y abaratar una gran cantidad de costos aproximados entre el 65 y 96% según Cifarelli (2022) en la implementación de redes ópticas que soporten la conexión entre unidades de antena activa y unidades de distribución.

Figura 13

Densificación de las redes ópticas de distribución FTTH vs Fronthaul 5G



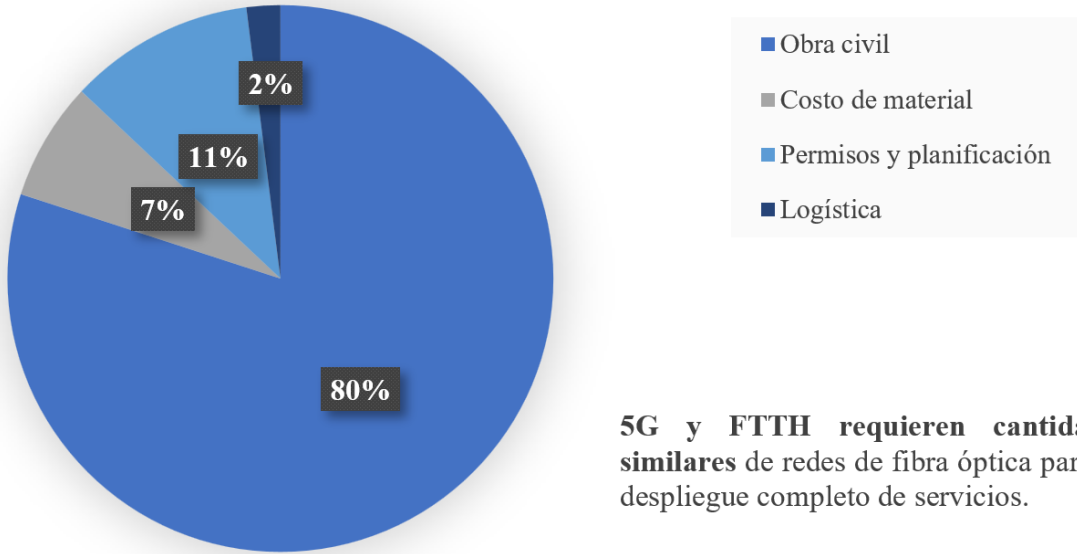
Nota: Recuperado de Convergence of FTTH & 5G Networks (MENA, 2021).

En la actualidad en EEUU es necesario el despliegue de redes de distribución de fibra óptica en un 70% del total de abonados de todo el país y cerca al 99% de las redes de transporte de fronthaul óptico para comunicaciones móviles 5G, es decir, la situación plantea un reto que bien podría ser abordado con el fin de evitar muchos gastos económicos para las empresas de 5G y una ganancia importante para las empresas de FTTH que decidan arrendar sus enlaces ópticos a los proveedores de comunicaciones móviles ya que las cantidades de fibra óptica que se requieren son casi similares y sus tecnologías que aseguren una convergencia adecuada de los datos ya se encuentran estandarizadas por la ITU.

Un dato importante que podemos observar desglosado en la Figura 14 es que cerca del 80% de los gastos implementados al momento del despliegue de redes de transporte para comunicaciones móviles se centra el despliegue en sí de la infraestructura del canal físico o cables de fibra óptica, mientras el resto de gastos lo constituyen los cables en sí, ductos y productos suplementarios como logística y materiales.

Figura 14
Comparación de costos en la implementación y despliegue de una red de comunicación móvil

Análisis de TCO de proyecto de despliegue de fibra para 5G



Nota: Fuente Convergence of FTTH & 5G Networks (MENA, 2021). Elaboración propia.

4.9 Tipos de fibra óptica utilizada

En lo que se refiere a los tipos de fibra óptica que han sido diseñados con el fin de proveer mejores características técnicas que logren un desempeño más adecuado para la transmisión de datos en redes ópticas 5G se deben mencionar primeramente que es necesaria la implementación de canales físicos con las menores pérdidas permisibles dentro del mercado, este tipo de fibra óptica se conoce como fibra ULL estandarizada como G.654.E (Charlene, 2021), la cual posee un área efectiva más grande que la fibra óptica G.652.D y además con la capacidad de poseer mejor respuesta al reducir de manera significativa la no linealidad del medio óptico para de esa manera mejorar la relación señal a ruido óptico que generalmente se ve afectado sobre manera por los métodos de modulación de alto nivel utilizados en las redes ópticas para comunicaciones móviles 5G.

Tabla 7

Comparación entre el performance de distintos tipos de fibra óptica

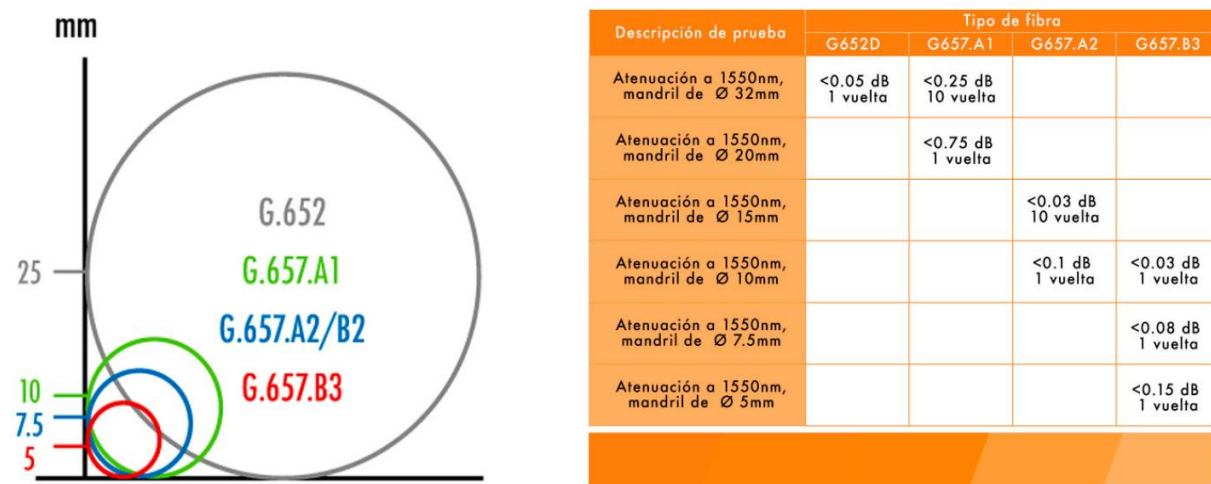
Velocidad (bps)	40G	100G	400G	400G
Tipo de fibra	G.652 común	G.652 de baja pérdida	G.652 de baja pérdida	G.654.E. innovadora
Capacidad máxima (Tbps)	3.2	8	20	20
Límite de la distancia del relé (km)	6000	3200	<800	<2000
Atenuación típica del enlace (dB/km)	0.21	0.20	0.20	0.18
Área efectiva de la fibra (μm^2)	80	80	80	130

Nota: Se observan las grandes ventajas de la fibra recomendada para redes ópticas 5G G.654.E. Recuperado de: Types of optical fibers for 5g networks (Charlene, 2021).

También se utilizan otros tipos de fibra óptica dependiendo del lugar de implementación y de las necesidades específicas (FOM, 2021) como por ejemplo cables de fibra óptica que sean insensibles a curvaturas como se muestra en la Figura 15 dentro de los centros de datos o estaciones donde se ubiquen las unidades centralizadas o de distribución, este tipo de fibra óptica se encuentra estandarizada bajo la normativa ITU G.657.A2/B2/B3 la cual puede ser doblada y grapada en las esquinas de los centros de datos sin comprometer la calidad y velocidad de los enlaces.

Figura 15

Fibra óptica optimizada insensible a la flexión para centros de datos 5G



Nota: Se muestra una comparación de la atenuación entre distintos diámetros de la fibra para distintos tipos de fibra estandarizada. Recuperado de El despliegue de fibra óptica en las redes 5G. (FOM, 2021).

Así también se realiza el despliegue de cables de fibra óptica multimodo OM5 compatibles con velocidades de 400G y 800G que soportan multiplexación de longitud de onda

y comunicación bidireccional. compatibles con grandes velocidades bajo estándar ethernet para interconectar servidores y métodos de multiplexación y comunicación bidireccional, así como también que posean diámetro micrómico que permita una mayor densidad de fibra, que sean fácilmente desplegadas a través de los ductos y posean la protección física adecuada a estos medios.

4.10 Normativa

En el año 2018 la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) empezó a definir los requisitos que poseerían las redes de transporte 5G en lo que se conoce como IMT-2020/5G (Telecomunicaciones móviles internacionales 2020 para la quinta generación) estas redes de transporte son definidas por el grupo de trabajo de la Comisión de Estudio 15 de la ITU-T como la «columna vertebral» del ecosistema de las TIC.

Se estableció entonces la primera norma de la serie ITU G.300 denominado “Características de las redes de transporte para soportar las IMT-2020/5G”, el cual ayudó a definir características muy importantes acerca de la arquitectura de esta red óptica para 5G estableciendo cada uno de los componentes de red como fronthaul, midhaul y backhaul al separar las funcionalidades de las unidades de banda base en unidades de distribución y unidades centralizadas.

Un aspecto importante de esta serie de normas es el haber especificado los requisitos de los enlaces ópticos para esta arquitectura de red, así como sus características relacionadas con el transporte de datos para 5G, estas especificaciones se encuentran en las dos últimas adiciones a la norma las cuales son ITU G.8310 e ITU G.8312.

Con el fin de comenzar a estandarizar un entorno de redes ópticas convergentes sin importar si estas pertenecen o no a las redes de transporte 5G, se lanzó la norma ITU G.709.4 la cual define interfaces para las redes ópticas de transporte OTN a velocidades de 25 y 50 Gbit/s. En esta norma también se introduce el concepto de comunicación ethernet a estas mismas velocidades que interconecten centros de datos para aplicaciones dentro de las redes de comunicación móvil.

Bajo la premisa de que las redes ópticas pasivas proporcionarían la capacidad necesaria para un fronthaul 5G junto con una atractiva rentabilidad (ITU G.9804.1, 2021) se estableció dicha norma bajo el nombre de “Redes ópticas pasivas de mayor velocidad y sus requisitos” en la cual se describieron las necesidades de los sistemas de red ópticas pasivas de próxima generación que nos permitan soportar velocidades de canal de hasta 50 Gbit/s.

Luego con el fin de aprovechar la fibra existente ya desplegada y aumentar la capacidad de las comunicaciones sobre esta fibra utilizando multiplexación con velocidades de cada canal

estandarizada a 25 Gbit/s en redes WDM PON se lanza la norma ITU G.9802 denominada “Redes ópticas pasivas de longitud de onda múltiple (MW-PON)”

Finalmente, con el fin de mejorar la capacidad de los canales y aprovechar al máximo la cantidad de fibra gris desplegada se logró estandarizar las comunicaciones bidireccionales con una velocidad de 10 y 25 Gbit/s con posibilidad de adaptación de hasta 50 Gbit/s en la norma ITU G.9806 denominada “Sistema de acceso óptico punto a punto bidireccional de fibra única y de mayor capacidad”.

4.11 Seguridad

Abdalla et al., (2020) mencionan que existen algunas técnicas que han sido desarrolladas con el fin de proteger los enlaces de comunicación a través de fibras ópticas de la manipulación o del robo y manipulación de información como, por ejemplo:

1. Uso de sensores de fibra óptica como sistema de detección de intrusión física.
2. Utilización del reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR) para detectar la reflexión y la atenuación a lo largo de la fibra por si el canal físico es intervenido.
3. Monitoreo del nivel de potencia óptica en puntos discretos dentro de una red de comunicación de fibra óptica, que deben mantenerse dentro de los márgenes establecidos en la certificación inicial de la red.
4. Sistemas de seguridad física donde el cable de comunicación de fibra se puede fabricar con una capa más gruesa y una cubierta protectora más dura, también albergar cables de fibra en conductos o tuberías, conductos metálicos de seguridad o encerrarlos en concreto.
5. Técnicas, protocolos y métodos de cifrado de la información transmitida a través del enlace de comunicación de fibra óptica.

Estos últimos son inherentes a la tecnología 5G y no se desarrollan específicamente para la interfaz óptica sino que los datos cifrados son transmitidos a través de toda la red, algunos de los algoritmos que se pueden mencionar según VIAVI (2022) son la autenticación unificada que intenta separar la autenticación de cada uno de los puntos de acceso inalámbricos, los protocolos de autenticación extensible que permiten transacciones seguras dentro de la red móvil, políticas de seguridad flexible para cubrir varios casos prácticos en cuestión de la necesidad de seguridad y latencia permitida, y los denominados SUPI o identificadores permanentes de los suscriptores que propician la privacidad de los usuarios dentro de la red.

4.12 Software Optisystem

Es un software de diseño de sistemas de comunicaciones ópticas basado en modelos matemáticos y empíricos, posee diversas bibliotecas con componentes de redes ópticas,

eléctricas, modulaciones digitales y analógicas, componentes de red pasivos y activos, donde las características técnicas de su funcionamiento como en la vida real dependerán de la frecuencia o de su longitud de onda asociada.

Posee la posibilidad de realizar subsistemas definidos por el usuario y modificar los existentes mediante lenguaje de script, también es posible importar los archivos .dll de MATLAB para realizar los cálculos descritos en el archivo dentro de un componente (MathWorks, 2023).

De la misma manera es posible realizar cambios dentro de los parámetros técnicos de los diferentes dispositivos, así como visualizar los diferentes resultados gracias a diversos módulos o bloques que posee el software tanto en tiempo como en frecuencia. Actualmente se encuentra en la versión 19 que es la que estamos utilizando en este trabajo debido a los modelos de modulaciones avanzadas que posee.

5 Metodología

5.1 Revisión Bibliográfica

Al tratarse de un tema investigativo del cual no se cuenta con la suficiente información en trabajos similares en nuestro medio, el principal reto consistió en buscar información para comprender de qué manera está estructurada esta rama del conocimiento de las telecomunicaciones. La investigación se basó en fuentes de información de calidad, libros y artículos científicos sobre el tema.

Se comenzó por comprender la arquitectura física de la red de transporte óptica, es decir de qué manera está estructurada la red que posee interfaz óptica dentro de las comunicaciones móviles 5G, para luego concentrarse en la búsqueda bibliográfica de las tecnologías de modulación y multiplexación que intervienen en cada uno de los segmentos de la interfaz óptica.

De la misma manera fue necesaria la revisión bibliográfica dentro de la normativa ITU para corroborar que los parámetros técnicos de las diferentes tecnologías coincidan con las investigadas en el presente trabajo.

5.2 Recopilación

La mayor cantidad de información respecto a 5G se concentra en la interfaz aire o en las nuevas funciones de red lo que tiene que ver con procesamiento de datos en las redes, redes definidas por software y virtualización de funciones, por lo que fue clave saber obtener terminología concerniente al tema de investigación con el fin de ampliar la información y explorar de manera adecuada entre bibliotecas en línea guardando enlaces y libros sobre la temática abordada.

Se decidió investigar la convergencia de este tipo de redes ópticas con otras ya que se encontró relación con tecnologías ya conocidas en nuestro medio como FTTH.

5.3 Categorización

La categorización de los datos obtenidos permitió discernir entre lo concerniente a esta exploración sabiendo delimitar de manera adecuada los temas a recopilar para la investigación. Una vez se logró conseguir información fiable que coincidiera con las recomendaciones de la ITU, se escogió aquellas tecnologías que serían simuladas dentro del Software de simulación de comunicaciones ópticas Optisystem en su última versión a la vez que se asignaban los subtemas dentro de los temas generales considerando el índice propuesto inicialmente y adaptándolo según su importancia.

5.4 Estudio del Software

Con el fin de mejorar el desempeño de trabajo al realizar las simulaciones fue necesaria la capacitación personal en el Software Optisystem, conocimiento importante como bloques del programa, atajos de teclado, manejo de gráficas, manipulación de datos, compatibilidad entre bloques, propicia un mejor desempeño y ahorra tiempo al momento de realizar la verificación de los datos investigados implementando sistemas de comunicaciones ópticas dentro del software.

5.5 Simulación de los sistemas

Se comenzó implementando los sistemas escogidos dentro del simulador Optisystem 19 que se muestran en la sección de resultados obtenidos para estudiar su comportamiento, a la vez que se variaba parámetros para analizar los resultados obtenidos.

Conforme se encontraban problemas se guardaba una copia de dicho sistema para intentar analizar el inconveniente por separado, la mayor cantidad de estos se daba por incompatibilidad de los bloques del Software. Una vez se logró realizar uno de los sistemas propuestos se trabajó en mejorar su respuesta en términos de calidad de señal de diversas maneras, esto se explica con mayor detalle en el apartado de Discusión.

El mejoramiento de los modelos de simulación se realizaba paso por paso para poder solucionar los posibles inconvenientes de manera temprana y poder identificar donde podría estar la falla de mejor manera, por ejemplo primero se intentó simular de manera correcta la modulación, luego se consiguió multiplexar varios canales correctamente modulados, acto seguido se mejoró la calidad de la señal, luego se adaptó estas señales a estándares propios de 5G, se subió la capacidad de transmisión al máximo según la tecnología seleccionada y finalmente se adaptó los sistemas para una comunicaciones bidireccional, esto para ambos modelos de simulaciones presentados.

5.6 Ordenamiento y finalización del documento

Fue importante referenciar de manera clara la relación entre las aclaraciones y menciones dentro del mismo documento para facilitar la lectura con el fin de que el lector sepa desde el inicio como la teoría analizada se relaciona con la simulación de los sistemas ópticos propuestos. Fue necesaria la creación de imágenes utilizando edición y recortes de capturas de pantalla del software Optisystem. Por ejemplo, para la imagen de la simulación de fronthaul óptico con PAM4 y M-WDM fueron necesarias 10 capturas de pantalla de diferentes partes de la red para realizar esa única imagen.

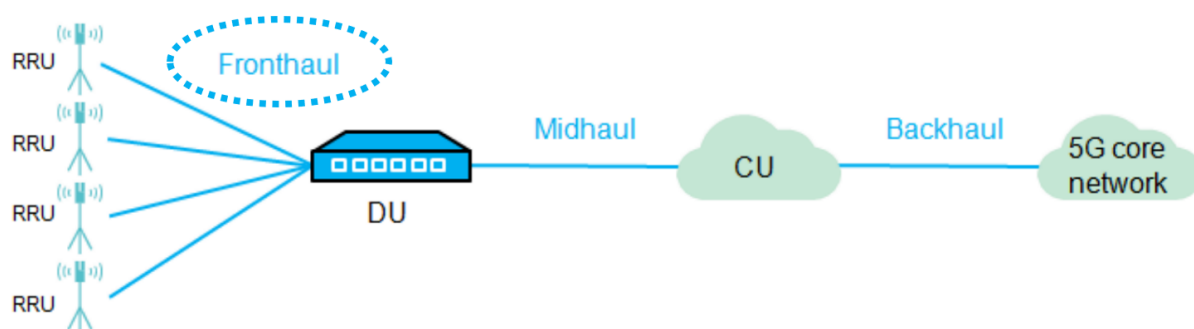
Respecto a los resultados, la utilización de una cantidad de imágenes que sea necesaria y ocupar tablas que resuman los datos facilitaron la lectura del documento.

6 Resultados

Se trabajó en el desarrollo de dos simulaciones de modulación y multiplexación de un fronthaul óptico de una red móvil 5G utilizando canales ópticos a 25 Gbaudios/s con un bit rate de 50 Gbps utilizando modulación de alto nivel PAM4. El diagrama de red que señala el Fronthaul, es decir cual parte de la arquitectura de red de transporte óptica se está simulando se muestra a continuación en la Figura 16.

Figura 16

Arquitectura de red de transporte para redes móviles 5G que muestra el Fronthaul a simular



Nota: El fronthaul óptico, se ubica entre las RRU o Unidades de radio remoto o AAU unidades de antena activa y la DU o unidad de distribución (en la parte izquierda del diagrama). Recuperado de 5G-Ready OTN Technical White Paper (China Telecom, 2020).

La diferencia entre las 2 simulaciones que se presentan reside en la técnica de multiplexación de canales ópticos empleada, la primera considera un escenario tomando en cuenta la tecnología SWDM (multiplexado por división de longitud de onda corta) con multiplexor no refrigerado y fibra multimodo de banda ancha WBMMF de alta capacidad OM5, mientras que la segunda simulación considera tecnología M-WDM (multiplexado por división de longitud de onda media) dentro de la banda C, se consideró fibra G.652 de baja pérdida recomendada para enlaces de comunicaciones ópticas 5G como se revisó en la Tabla 7.

A continuación, en la Figura 17 se muestran las configuraciones de bit rate y tasa de baudios utilizada para ambos sistemas, como se puede observar se tiene una tasa de 25 Gbaudios/s y un bit rate del sistema equivalente al doble es decir 50 Gbps, esto es debido a que la simulación que se aplicará (PAM4) envía 2 bits por símbolo por lo que el bit rate se duplica como se había mencionado en la sección 5.

Figura 17

Tasa de símbolos y bits del sistema para ambas simulaciones en Optisystem

Simulation			
Signals	Spatial effects	Noise	Signal tracing
Name	Value	Units	Mode
Simulation window	Set bit rate		Normal
Reference bit rate	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
Bit rate	50e+009	bit/s	Normal
Time window	2.56e-009	s	Normal
Sample rate	3.2e+012	Hz	Normal
Sequence length	128	bits	Normal
Samples per bit	64		Normal
Guard Bits	0		Normal
Symbol rate	25e+009	symbols/s	Normal

Nota: Elaboración propia.

Para realizar la modulación de los datos utilizando la técnica de modulación avanzada PAM4 se realizó la comparación con un modulador PAM4 hecho a base de distintos bloques modificados versus un modulador PAM4 ya constituido por el software. Obteniendo por poco mejores resultados para el primer caso lo cual se analiza en la sección 8.

Se realizó la experimentación y comparación entre la modulación con distintas potencias de transmisión para los diferentes moduladores dentro de un solo canal versus el mismo esquema con iguales potencias de transmisión, observando que el primer caso es el más favorable en términos de calidad de la señal. De la misma manera esto se analiza en la sección 8 denominada Discusión.

Las alternativas de tipos de modulación óptica para fronthaul son NRZ y PAM4, donde la segunda de estas posee el mejor desempeño en términos de eficiencia espectral por lo que se la escogió para ambos escenarios de simulación, el proceso de simulación para este tipo de modulación se presenta a continuación.

6.1 Simulación de modulación PAM4

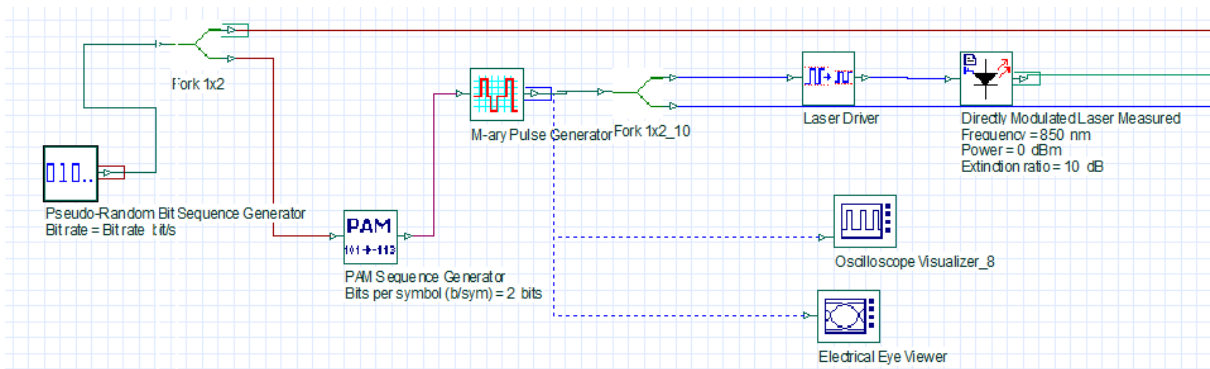
A continuación, se presentan 2 modelos de moduladores ópticos avanzados PAM4, el primero está compuesto de bloques nativos de Optisystem 19 y el segundo modelo de modulador ha sido desarrollado de manera personal con el fin de mejorar factor Q de la señal en recepción y por lo tanto la calidad de la misma.

6.1.1 PAM4 con bloques nativos de Optisystem

El diagrama del sistema implementado se muestra en la Figura 18. El bloque inicial denominado Pseudo Random Bit Sequence Generator se encarga de generar una secuencia de

unos y ceros con frecuencia igual al bit rate establecido en nuestro sistema, es decir 50 Gbps, la ramificación de estos datos que se extiende fuera de la imagen sirve para la obtención de reloj en el demodulador dentro de la simulación. Esta secuencia de 1s y 0s activa el bloque generador de secuencia PAM el cual tal y como se puede observar está configurado para secuencias de 2 bits por símbolo correspondiente a PAM4. Lo que hace este bloque es generar distintos valores desde el 0 hasta el 3 dependiendo que configuración de bits tiene a la entrada al transformar a binario cada 2 bits. El hecho de obtener un dígito a la salida por cada dos dígitos a la entrada hace que el bit rate disminuya a la mitad, es decir ahora se posee un bit rate de 25 Gbps puesto que se poseía inicialmente 50 Gbps como se puede comprobar en la Figura 18.

Figura 18
Modulador PAM4 utilizando bloques nativos de Optisystem 19



Nota: Elaboración propia.

Una vez que se poseen datos (dígitos) de modulación pertenecientes a un sistema PAM4, se realiza la modulación en un tren de bits de señal eléctrica mediante el bloque generador de pulso M-ario, en este caso se obtendrán diferentes amplitudes dependiendo de los dígitos obtenidos por la codificación PAM previamente explicada, una vez más se extiende una copia de esta señal para sincronizar un reloj en demodulación específicamente en el bloque de decisión PAM, a la vez que se ingresa la señal eléctrica a modulación óptica directa. En este caso la longitud de onda en la imagen de este láser corresponde al primer canal del sistema PAM4 SWDM a modular o sea 850 nm como se observa en la Figura 18. Para obtener el bit rate utilizado por la modulación PAM4 se puede realizar el cálculo en base al tiempo de bit (T_b) obtenido al observar la gráfica del tren de bits codificado en la Figura 19.

$$(T_b) \text{ obtenido de la Figura 18} = 1.32 \cdot 10^{-9} s - 1.28 \cdot 10^{-9} s$$

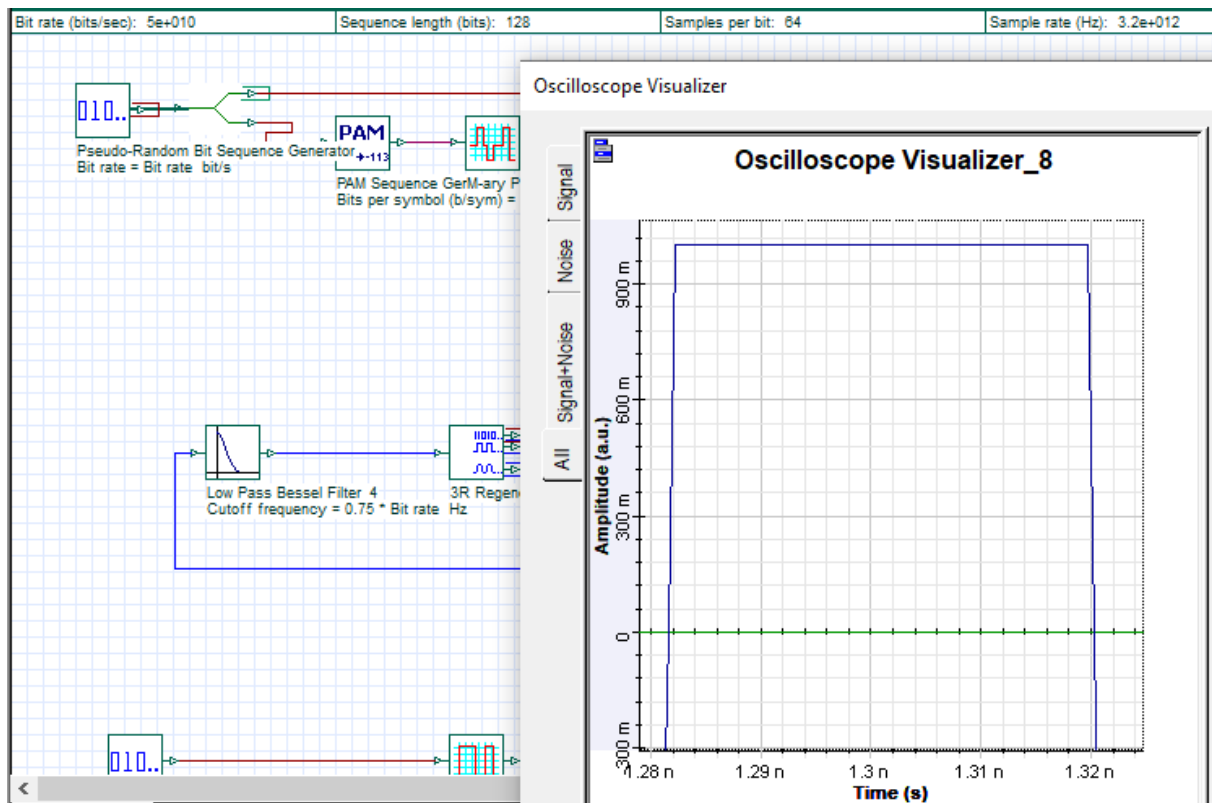
$$T_b = 0.04 \cdot 10^{-9} s$$

$$\text{Bit rate} = \frac{1}{T_b} = \frac{1}{0.04 \cdot 10^{-9} \text{s}} = 25 \cdot 10^9 = 25 \text{ Gbps}$$

Esta señal a 25 Gbps será demodulada y decodificada en recepción y se obtendrá una de 50 Gbps al distinguir entre 4 niveles de amplitud y asignarle 2 bits por cada una de ellas. Es decir, el proceso inverso al que se mencionó anteriormente.

Figura 19

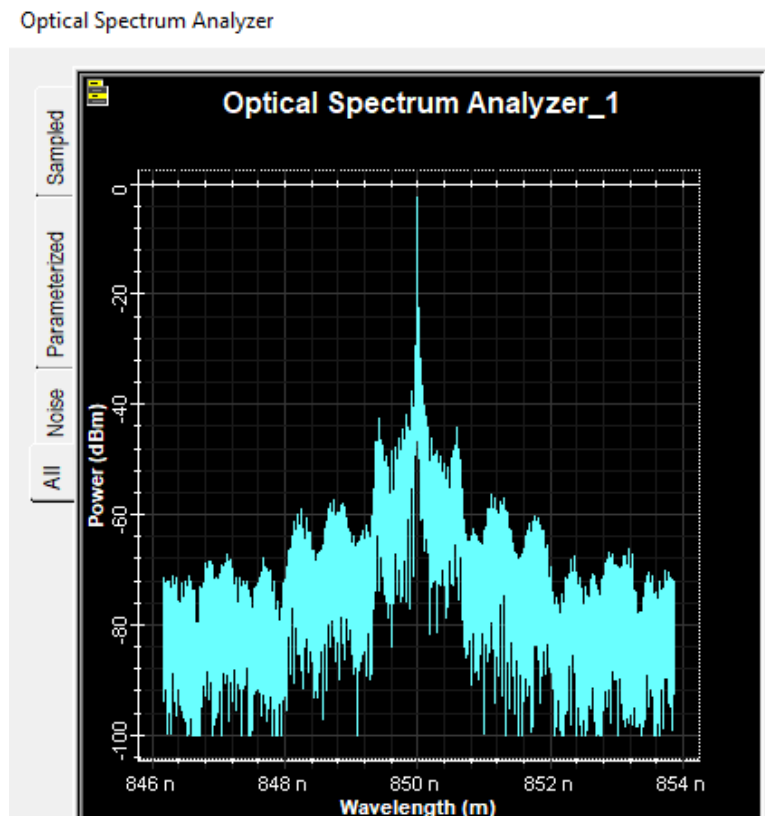
Gráfica de un bit luego de la codificación previa a la modulación PAM4 para obtener el bit rate.



Nota: Elaboración propia.

Se puede observar el espectro obtenido luego de la modulación a 850 nm a continuación en la Figura 20.

Figura 20
Espectro de la señal PAM4 modulada a 850 nm



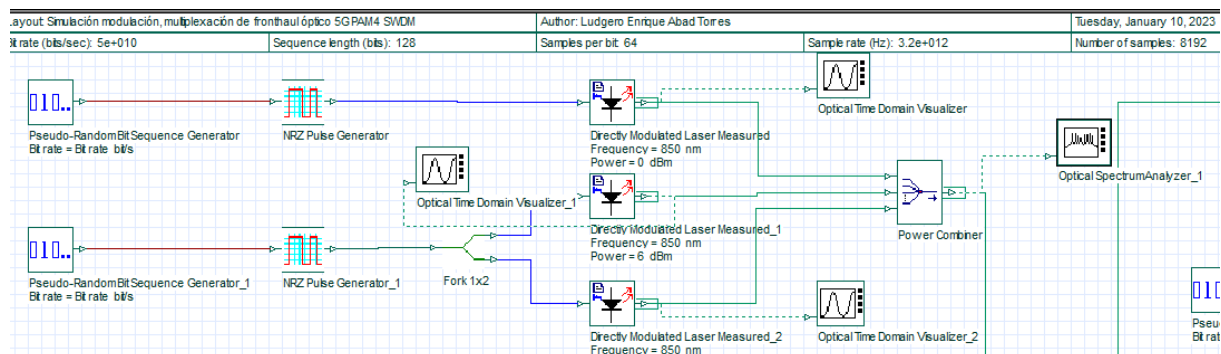
Nota: Elaboración propia.

6.1.2 PAM4 modificación propia

El siguiente modelo de modulación PAM4 se utiliza para obtener la señal y a la vez el diagrama de ojo puesto que los bloques que lo conforman poseen compatibilidad con los visualizadores dentro del software a diferencia del primer modelo.

Se ha configurado el diseño con el fin de poder variar los niveles de amplitud de cada uno de los símbolos dentro de la modulación PAM4 y mejorar el factor Q tal y como se analiza en la sección 8.

Figura 21
Diagrama de 1 transmisor PAM 4 diseñado en Optisystem 19



Nota: En las simulaciones estudiadas se poseerán tantos moduladores como canales en cada uno de los extremos de la comunicación. Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 21 el modulador está conformado inicialmente por 2 Generadores de secuencias de bits pseudo aleatorias, los cuales serán convertidos a trenes de bits eléctricos gracias al generador de pulsos NRZ, con frecuencia igual al bit rate del sistema prestablecido anteriormente, es decir 50 Gbps.

Uno de los trenes de bits entra directamente a un modulador óptico directo como se puede observar en la parte superior y el otro tren de bits se bifurca en 2, es decir se obtiene una copia idéntica de la señal para realizar 2 modulaciones directas de estos 2 canales resultantes a la salida de la bifurcación. Por lo tanto, se poseerán los mismos bits en ambas salidas de esta bifurcación. Las diferentes combinaciones de bits a las salidas de los generadores se presentan en la Tabla 8.

Cada una de estas 3 señales ingresará al combinador de potencia donde se obtendrá una salida dependiente de cada una de las posibles combinaciones de bits a la entrada, hablamos de 4 posibles combinaciones exactamente como se muestra a continuación.

Tabla 8
Niveles de amplitud PAM 4 a partir de 2 generadores de bit

Bit de salida			Nivel de amplitud generada luego de la combinación	Símbolo de salida generado
Generador 2 Bifurcación 1	Generador 2 Bifurcación 2	Generador 1		
0	0	0	1	$S_1 = 00$
0	0	1	2	$S_2 = 10$
1	1	0	3	$S_3 = 01$
1	1	1	4	$S_4 = 11$

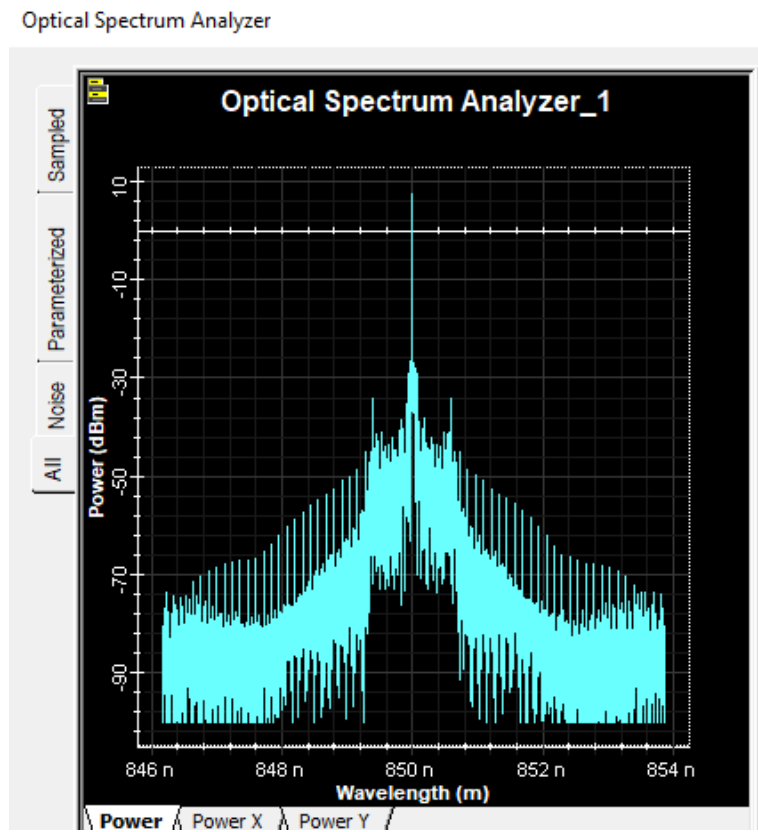
Nota: En el Anexo 1 se muestra la adaptación de potencia realizada para esta configuración de láseres. Elaboración propia.

Ambos generadores de bit pueden tener a la salida un 1 o un 0 lógico, fue necesaria la bifurcación en 2 líneas del generador número 2 para obtener una combinación de bit que provea 4 niveles de amplitud dependiendo de la configuración de bits a la salida que muestra la tabla 8. Luego cada uno de los niveles de amplitud a la salida del transmisor representa un símbolo con 2 bits por cada uno de ellos, donde se justifica el hecho de doblar el bit rate transmitido gracias a la simulación PAM4.

El espectro de la señal modulada a 850 nm se muestra a continuación en la Figura 22.

Figura 22

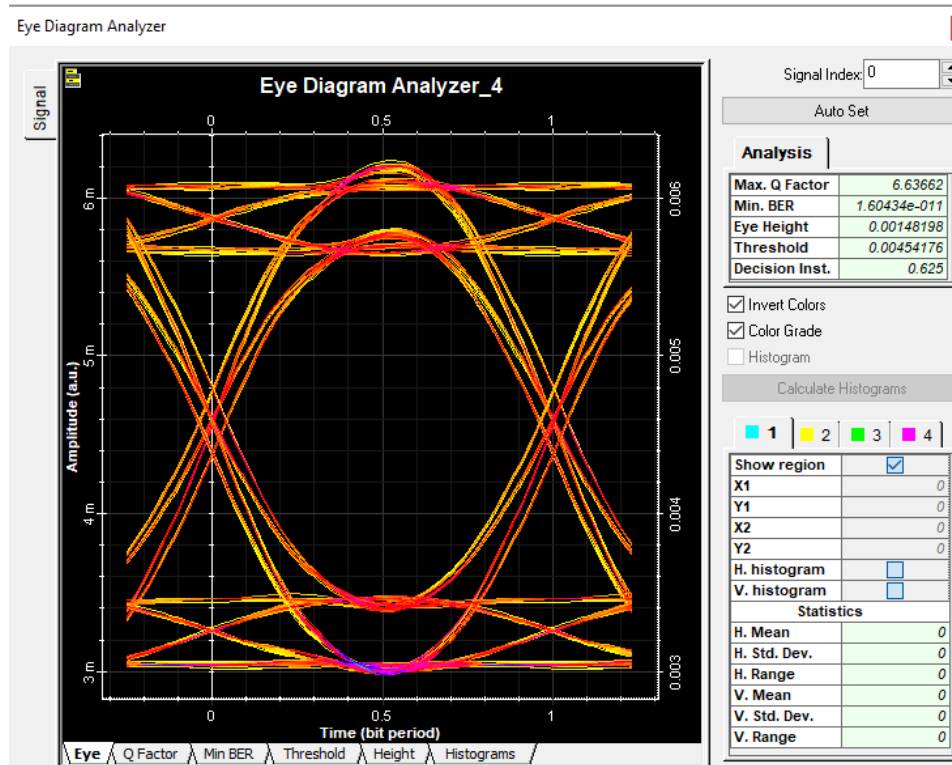
Espectro a la salida del segundo modelo de modulador PAM 4 implementado



Nota: Elaboración propia.

El modulador presentado fue implementado dentro de las simulaciones propuestas con el fin de poder observar los diagramas de ojos de las simulaciones propias de PAM 4 el cual posee 3 ojos como se observa en la Figura 23 a diferencia del diagrama de NRZ que suele poseer un solo ojo como se había mencionado en la sección 5.

Figura 23
 Diagrama de 3 ojos obtenido de modulación PAM4



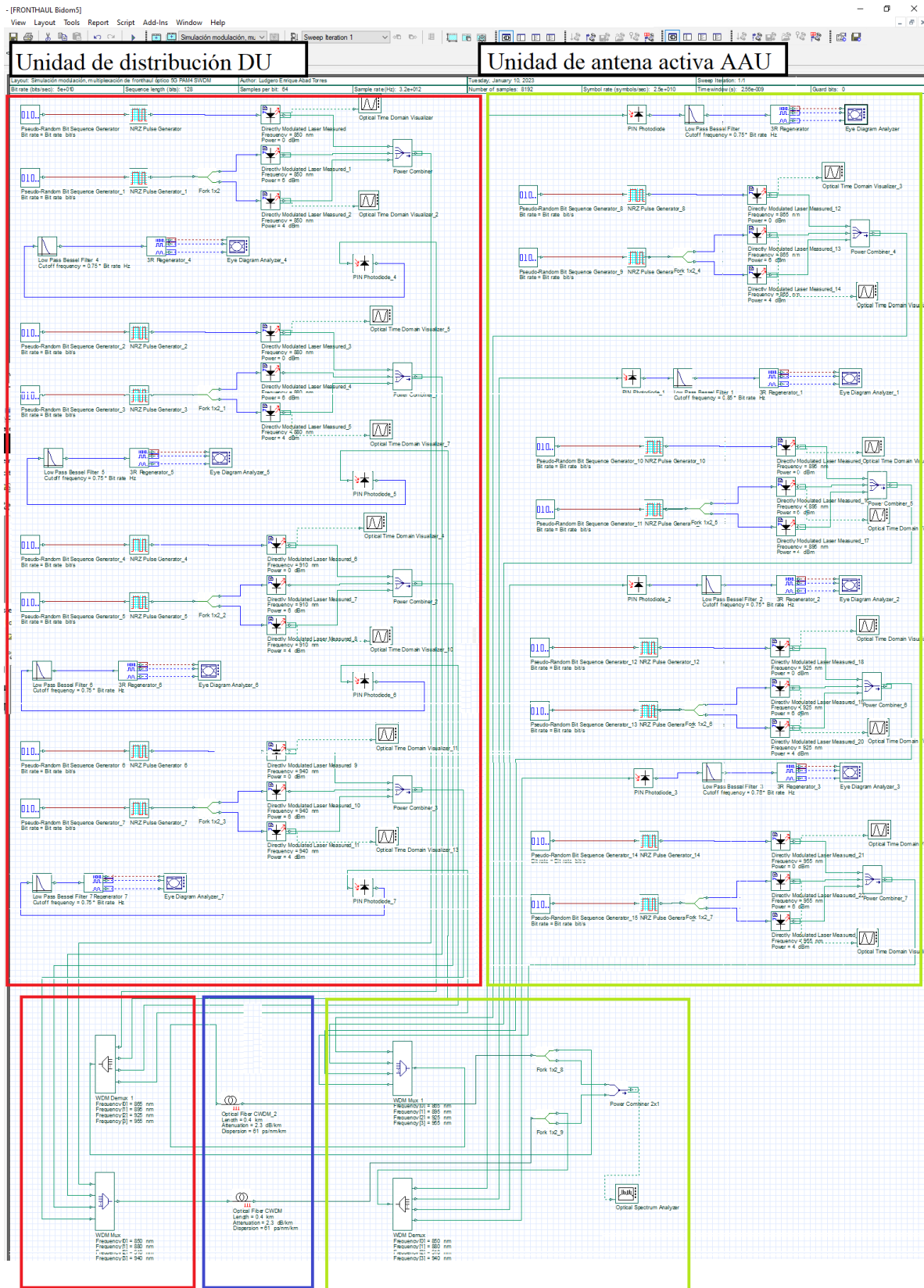
Nota: Elaboración propia.

6.2 Simulación 1: Modulación PAM4 y multiplexación SWDM

El diagrama de bloques de la simulación separado en Unidad de distribución DU, canal y AAU o RRU se muestra a continuación en la Figura 24.

Tanto en la Unidad de Distribución como en el lugar de las RRU se poseen sistemas transmisores y receptores para obtener comunicación bidireccional, el número de estos dependerá del número máximo de canales que sea permitido transmitir por la fibra óptica utilizando la multiplexación escogida, en este caso 4 canales de uplink y 4 de downlink para SWDM. Los canales a utilizar se observan en la Tabla 9.

Figura 24
Diagrama de simulación separado en partes



CANAL

Nota: Elaboración propia.

Tabla 9

Longitudes de onda utilizadas para la simulación del fronthaul con SWDM

Enlace	λ_1 (nm)	λ_2 (nm)	λ_3 (nm)	λ_4 (nm)
Uplink	850	880	910	940
Downlink	865	895	925	955

Nota: Los valores propuestos se encuentran dentro de los permitidos por la tecnología SWDM. Elaboración Propia.

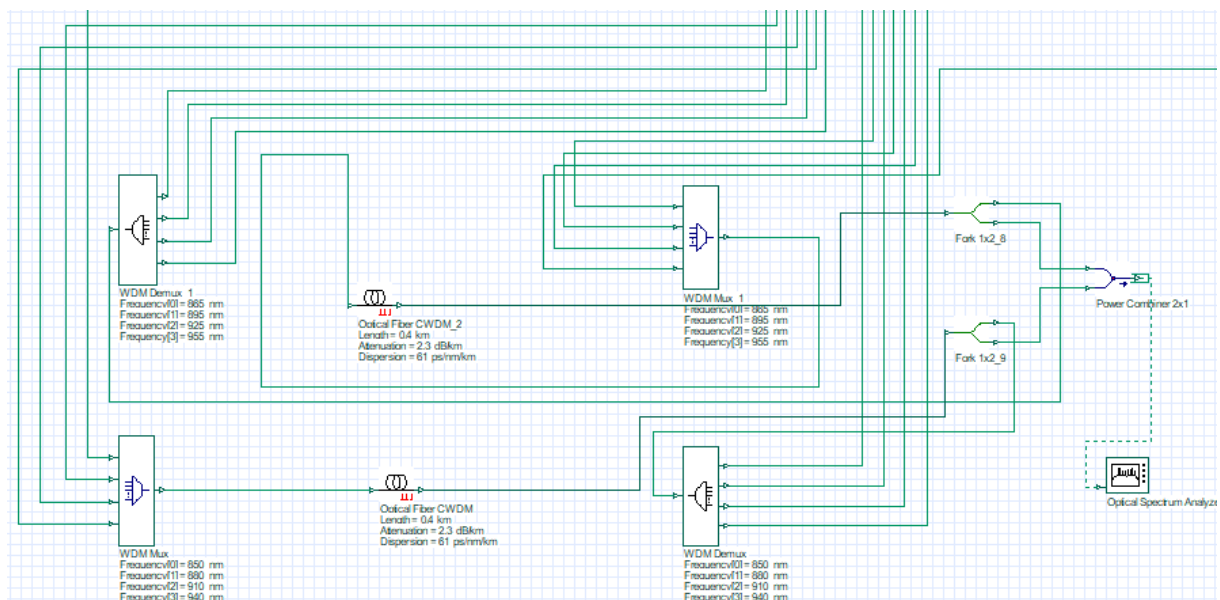
Se ha considerado usar diferentes niveles de amplitud de los moduladores como se puede observar en la Figura 24, con el fin de tornar la convergencia de los bits en un punto central en el diagrama de ojo en recepción tal y como se muestra en la Figura 40 en la sección denominada discusión.

Además del canal físico o fibra óptica se utiliza un multiplexor y un demultiplexor no refrigerados de hasta 4 canales debido a la tecnología SWDM anteriormente mencionada y al hecho de que se utilizó fibra óptica multimodo de banda ancha WBMMF OM5, necesaria para enlaces multiplexados de alta capacidad y distancia máxima de 440 metros como se puede observar en la Tabla 8 más adelante.

Se debió establecer los diferentes canales a multiplexar, así como las características de atenuación y coeficiente de dispersión cromática de la fibra óptica escogida como se muestra en la Figura 25 a continuación.

Figura 25

Esquema de canal simulado en Optisystem 19



Nota; La distancia del canal se la escogió debido al tipo de fibra óptica utilizado que admite canales a 25 Gbps y su distancia de transmisión máxima que es 440 metros, es decir 0.44 km. Elaboración propia.

La distancia máxima de transmisión para OM5 según el bit rate máximo utilizado se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 10

Comparación de distancias máximas entre distintos tipos de fibra óptica OM3, OM4 OM5

	OM3	OM4	OM5
40Gbps SWDM	240 m	350 m	440 m
100Gbps SWDM	75 m	100 m	150 m

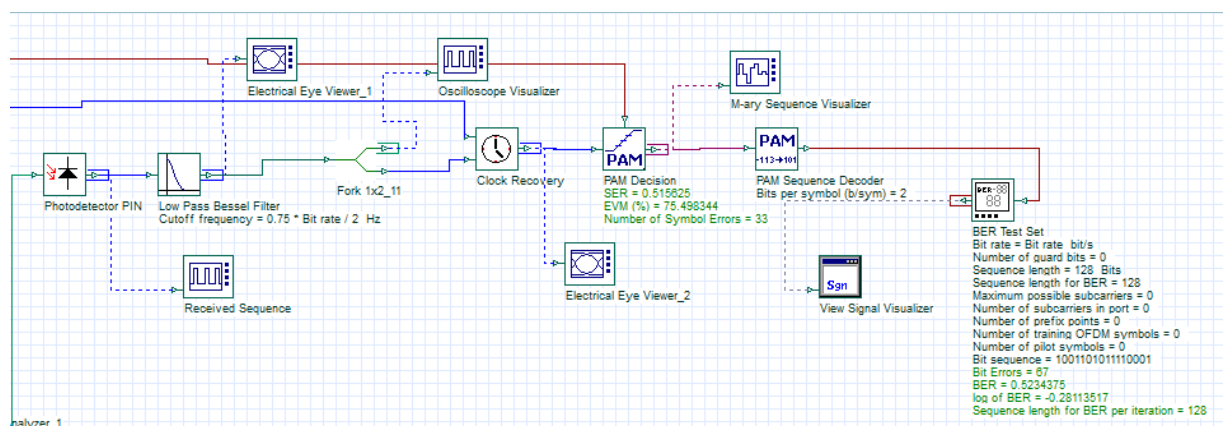
Nota: Se observa la distancia máxima escogida previamente para un máximo de 40Gbps utilizando fibra óptica OM5. Recuperado de: What's the Deal with OM5 Cable Standards – WBMMF? (Fluke Networks, 2019).

El valor de dispersión cromática fue escogido al obtener los valores máximos para cada una de las longitudes permisibles dentro de la tecnología SWDM, se escogió el máximo de todos igual a 61 ps/nm/km señalado por (Oñate, 2016). A pesar de que es un valor bastante alto, la distancia máxima de transmisión para este tipo de fibra óptica ni si quiera llega al medio kilómetro por lo que este valor no llegaría si quiera a la mitad de su máximo, y se pueden observar buenos resultados en recepción, puesto que se encuentra el diagrama de ojo de la señal.

Se puede observar a continuación en la Figura 26 uno de los receptores junto con la señal en recepción reconstruida en la Figura 27. Se implementó además analizadores de diagrama de ojo mediante la implementación de receptores para el segundo modelo de modulador con el fin de observar los resultados de cada canal y además verificar conceptos anteriormente señalados respecto a comparación de gráficas de resultados aplicando variaciones en el método de modulación PAM4 específicamente.

Figura 26

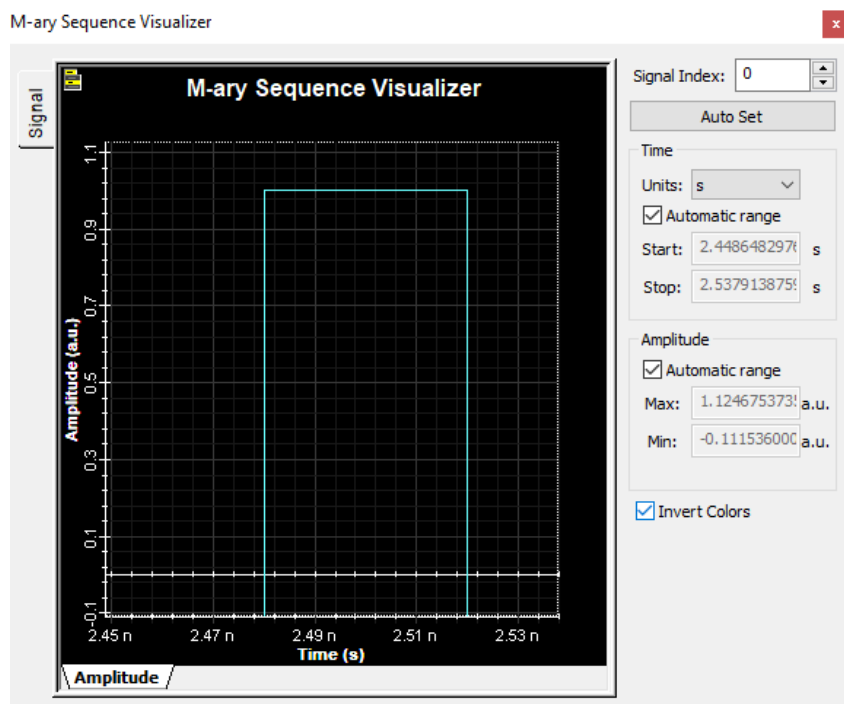
Receptor para el primer modelo de modulador PAM4 implementado



Nota: El receptor para el segundo modelo se observa en la Figura 24 anteriormente presentada. Elaboración propia en el Software Optisystem.

Figura 27

Acercamiento a un bit del canal 1 en recepción en el dominio del tiempo



Nota: Se observa el tiempo de bit en recepción desde 2.48ns hasta 2.52ns, es decir 0.04ns, el visualizador se encuentra aún en la secuencia M-aria por lo que cada bit aquí equivale a 2 bits luego de la decodificación, de aquí se puede obtener el bit rate del canal y del sistema. Elaboración propia en el Software Optisystem.

$$T_b \text{ (por cada canal)} = \frac{0.04 \cdot 10^{-9} \text{ s}}{2}$$

$$T_b \text{ (por cada canal)} = 0.02 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

$$\text{Bit rate por canal} = \frac{1}{T_b \text{ (por cada canal)}}$$

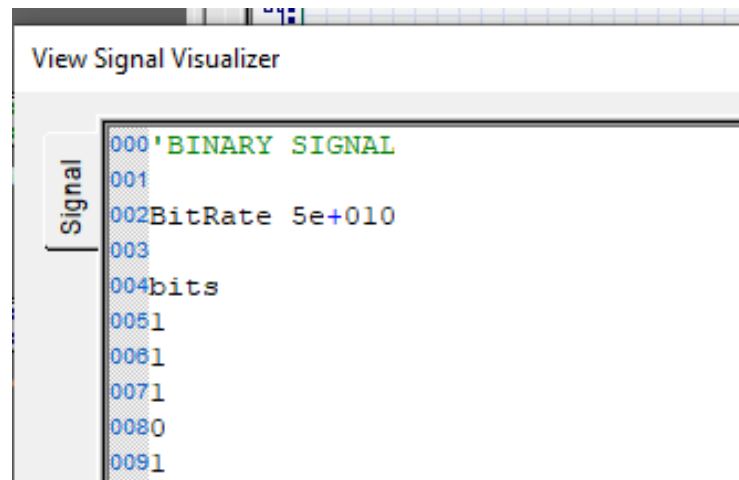
$$\text{Bit rate por canal} = \frac{1}{0.02 \cdot 10^{-9} \text{ s}}$$

$$\text{Bit rate por canal} = 50 \text{ Gbps}$$

Lo cual se puede comprobar en el visualizador de datos generado que se presenta a continuación en la Figura 28.

Figura 28

Visualizador de datos generados



Nota: Elaboración propia en el Software Optisystem 19.

Con esto comprobamos que efectivamente las señales de 50 Gbps correspondiente a cada uno de los canales están llegando a recepción luego de haber sido moduladas y multiplexadas en los bloques de transmisión y canal. A continuación, se presentarán los resultados de los diagramas de ojo en las Figuras desde la número 29 a la 32.

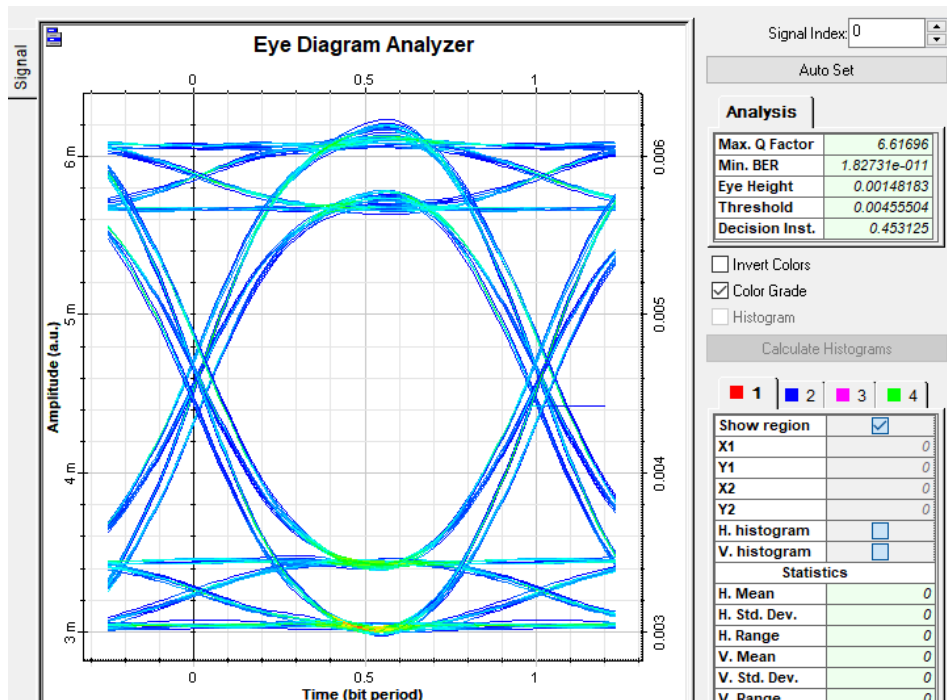
$$\text{Bit rate del sistema} = \text{Bit rate por canal} \cdot \text{Número de canales}$$

$$\text{Bit rate del sistema} = 50\text{Gbps} \cdot 4$$

$$\text{Bit rate del sistema} = 200\text{ Gbps}$$

Figura 29

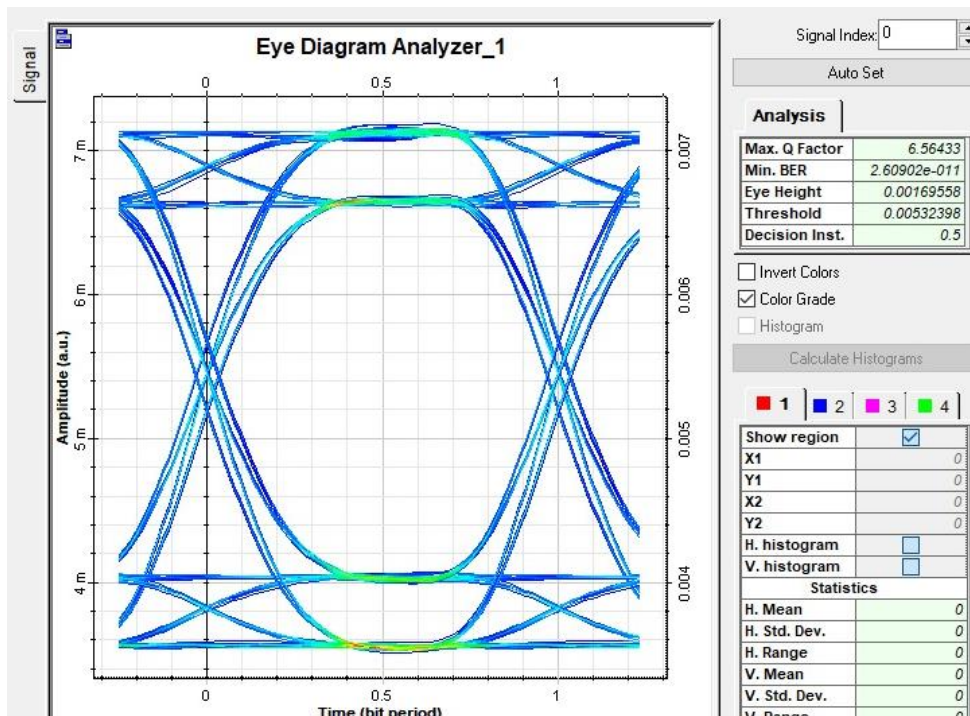
Diagrama de ojo de señal en recepción en uplink del Canal 1



Nota: Elaboración propia.

Figura 30

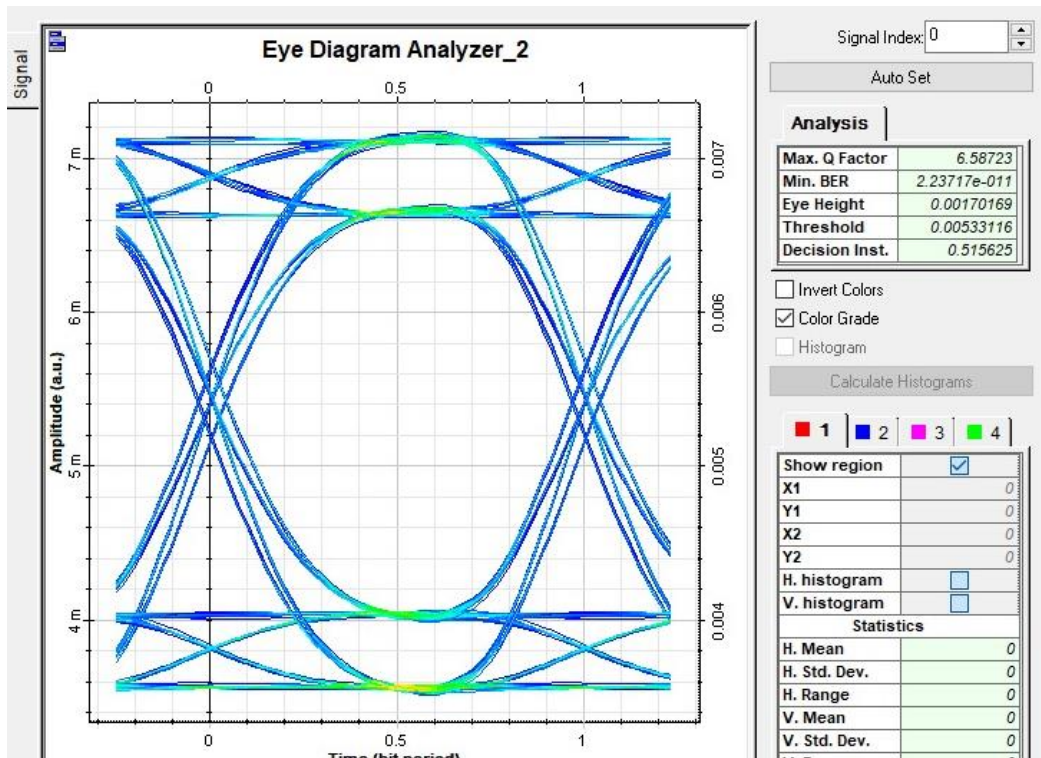
Diagrama de ojo de señal en recepción en uplink del Canal 2



Nota: Elaboración propia en el Software Optisystem.

Figura 31

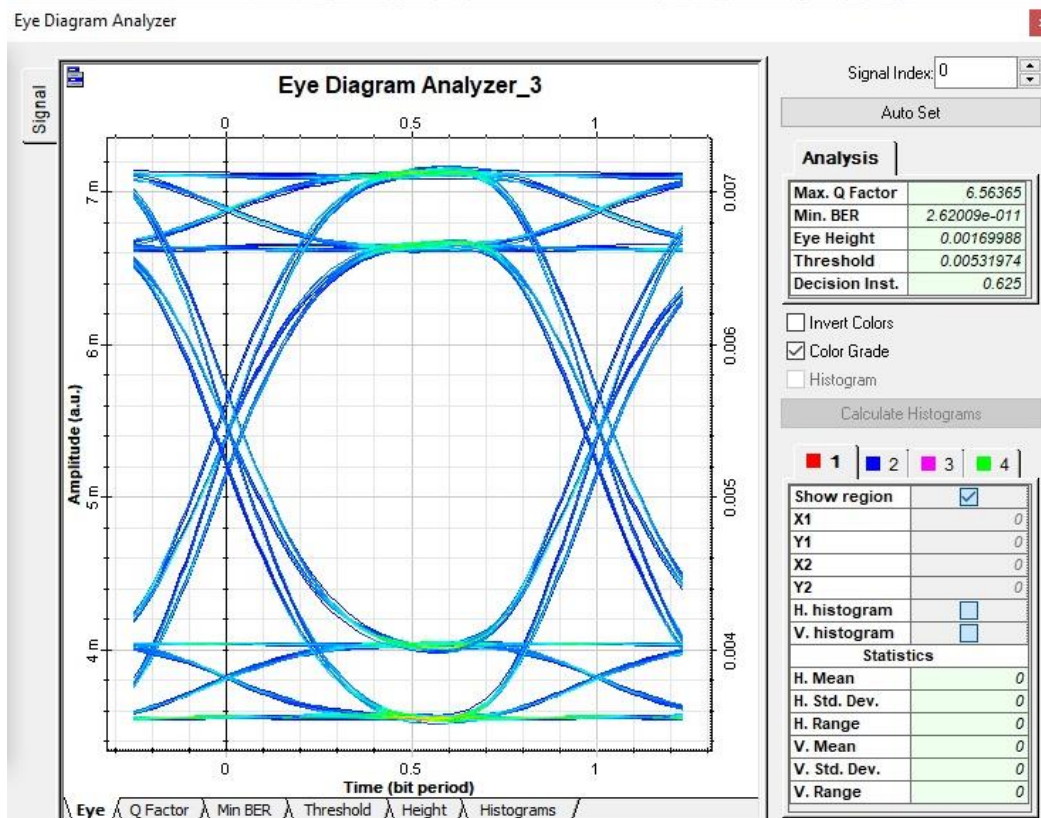
Señal en recepción en uplink el dominio del tiempo y diagrama de ojo del Canal 3



Nota: Elaboración propia en el Software Optisystem.

Figura 32

Señal en recepción de uplink en el dominio del tiempo y diagrama de ojo del Canal 4



Nota: Elaboración propia en el Software Optisystem.

Tanto estos como el resto de datos obtenidos en los diagramas de ojo se presentan en la tabla a continuación.

Tabla 11
Min BER y Max Factor Q obtenidos en Optisystem 19

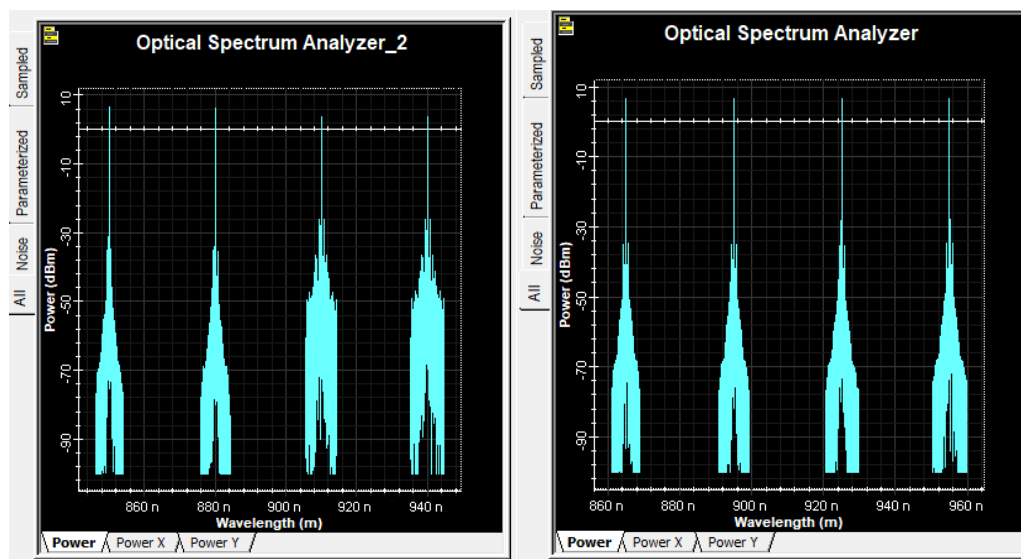
Canal	Min BER	Max Factor Q
Ch1 Uplink 850 nm	$1.82731 \cdot 10^{-11}$	6.61696
Ch2 Uplink 880 nm	$2.60902 \cdot 10^{-11}$	6.56433
Ch3 Uplink 910 nm	$2.23717 \cdot 10^{-11}$	6.58723
Ch4 Uplink 940 nm	$2.62009 \cdot 10^{-11}$	6.56365
Ch1 Downlink 865 nm	$3.61844 \cdot 10^{-11}$	6.51564
Ch2 Downlink 895 nm	$3.59675 \cdot 10^{-11}$	6.51653
Ch3 Downlink 925 nm	$2.79759 \cdot 10^{-11}$	6.55413
Ch4 Downlink 955 nm	$3.29002 \cdot 10^{-11}$	6.53119

Nota: En el Anexo 2 se muestra una gráfica de puntos con los valores correspondientes a estos resultados. Elaboración propia.

A continuación en la Figura 33, se pueden observar los diferentes canales ópticos que han sido obtenidos gracias a la aplicación de espectrómetros ópticos:

Figura 33

Espectro de canales ópticos implementados con la multiplexación SWDM en la simulación



Nota: La imagen de la izquierda corresponde al espectro de los canales ópticos de uplink mientras en la imagen de la derecha se presentan los canales de downlink. Se poseen 2 gráficas puesto que son 2 núcleos separados tal y como establece SWDM. Elaboración propia.

En los anexos 3 y 4 se muestra un análisis de la calidad de la señal transportada en la simulación al exceder el límite de distancia para SWDM PAM4 hasta los 10 km.

6.3 Simulación 2: Modulación PAM4 y multiplexación M-WDM

La diferencia entre este sistema y el anterior reside en el método de multiplexación aplicado, y de manera clave en el hecho de que esta multiplexación permite hasta 12 canales dentro de una sola fibra óptica utilizando un solo núcleo lo que nos permitirá hasta 6 canales de manera bidireccional, es decir 6 canales a 50 Gbps en uplink y lo mismo para downlink.

Las longitudes de onda utilizadas por M-WDM e implementadas en la simulación se muestran a continuación:

Tabla 12

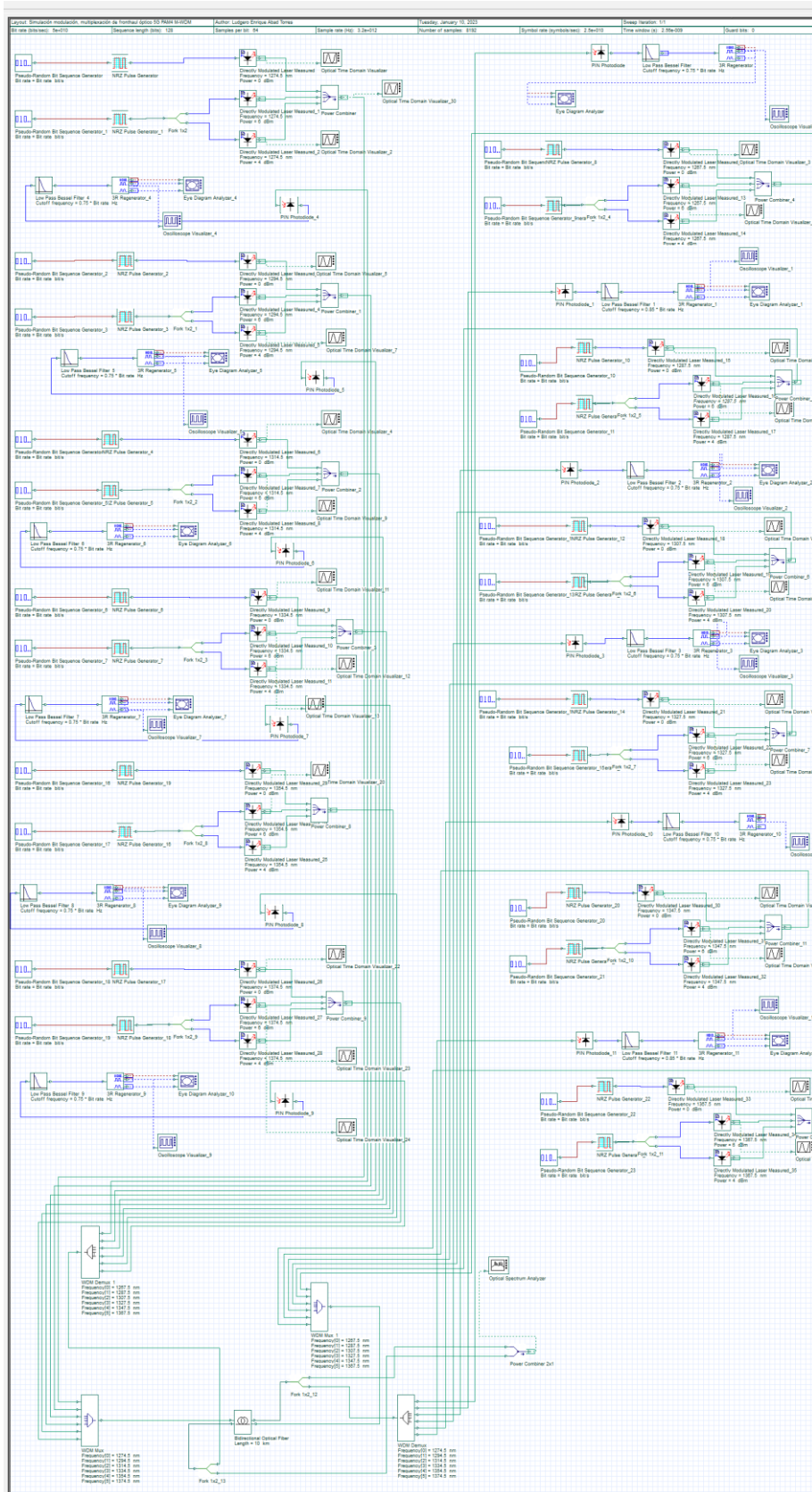
Canales ópticos utilizados en la simulación con multiplexación M-WDM

Número de Canal óptico	Índice de canal M-WDM	Longitud de onda (nm)
Ch1	Ch1 Downlink	1267.5
	Ch1 Uplink	1274.5
Ch2	Ch2 Downlink	1287.5
	Ch2 Uplink	1294.5
Ch3	Ch3 Downlink	1307.5
	Ch3 Uplink	1314.5
Ch4	Ch4 Downlink	1327.5
	Ch4 Uplink	1334.5
Ch5	Ch5 Downlink	1347.5
	Ch5 Uplink	1354,5
Ch6	Ch6 Downlink	1367.5
	Ch6 Uplink	1374.5

Nota: Elaboración propia.

El diagrama implementado para la simulación de PAM4 con multiplexación M-WDM se presenta a continuación en la Figura 34.

Figura 34
Simulación de multiplexación M-WDM y modulación PAM4 de un fronthaul óptico 5G

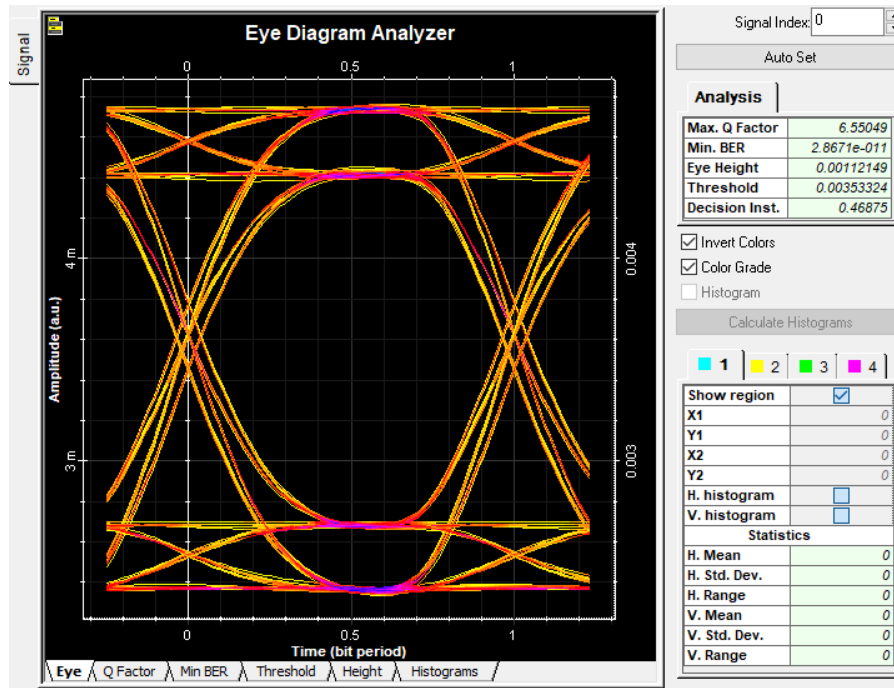


Nota: Elaboración propia

A continuación en las Figuras 35 y 36, se pueden observar algunos diagramas de ojo obtenidos para la segunda simulación.

Figura 35

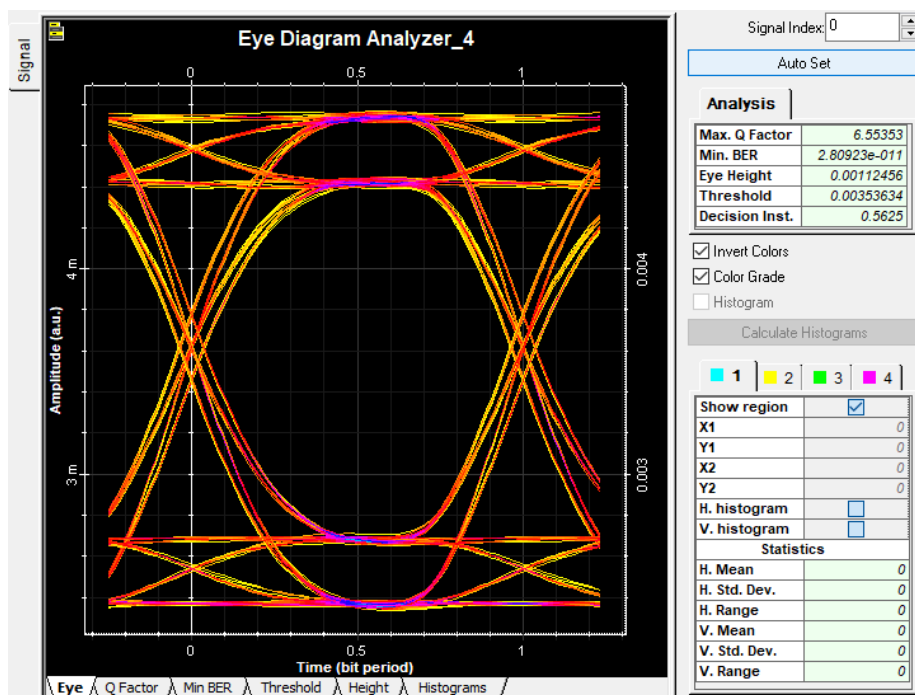
Diagrama de ojo de señal en recepción en uplink del Canal 1 M-WDM



Nota: Elaboración propia.

Figura 36

Diagrama de ojo de señal en recepción en downlink del Canal 1 M-WDM



Nota: Elaboración propia.

Tanto estos como el resto de datos obtenidos en los diagramas de ojo se presentan en la tabla a continuación.

Tabla 13

Min BER y Max Factor Q obtenidos en Optisystem 19 para simulación con M-WDM

Canal	Min BER	Max Factor Q
Ch1 Uplink 1274.5 nm	$2.8671 \cdot 10^{-11}$	6.55049
Ch2 Uplink 1294.5 nm	$1.6524 \cdot 10^{-11}$	6.63231
Ch3 Uplink 1214.5 nm	$2.52975 \cdot 10^{-11}$	6.56914
Ch4 Uplink 1234.5 nm	$2.97079 \cdot 10^{-11}$	6.54518
Ch5 Uplink 1254.5 nm	$2.46127 \cdot 10^{-11}$	6.57325
Ch6 Uplink 1274.5 nm	$2.32936 \cdot 10^{-11}$	6.58144
Ch1 Downlink 1267.5 nm	$2.80923 \cdot 10^{-11}$	6.55353
Ch2 Downlink 1287.5 nm	$3.48078 \cdot 10^{-11}$	6.52146
Ch3 Downlink 1307.5 nm	$2.54813 \cdot 10^{-11}$	6.56810
Ch4 Downlink 1327.5 nm	$2.79657 \cdot 10^{-11}$	6.55421
Ch5 Downlink 1347.5 nm	$2.11036 \cdot 10^{-11}$	6.59611
Ch6 Downlink 1367.5 nm	$2.93155 \cdot 10^{-11}$	6.54717

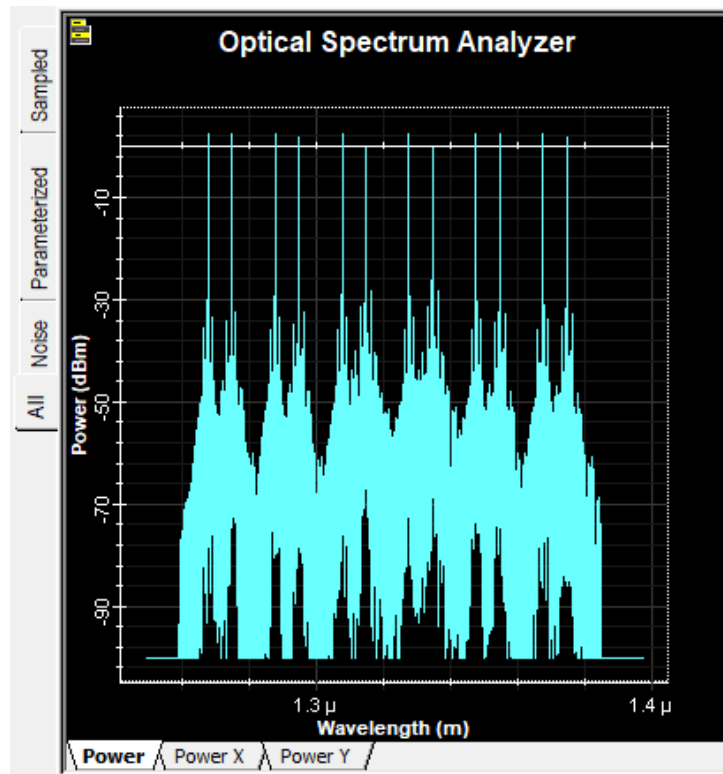
Nota: Elaboración propia.

En general se poseen buenos resultados tanto para esta simulación como para la anterior puesto que en ambas simulaciones se poseen factor Q mayor a 6 para todos los canales implementados.

A continuación en la Figura 37, se pueden observar los diferentes canales ópticos que han sido obtenidos gracias a la aplicación de un espectrómetro óptico:

Figura 37

Espectro de canales ópticos implementados con la multiplexación M-WDM en la simulación

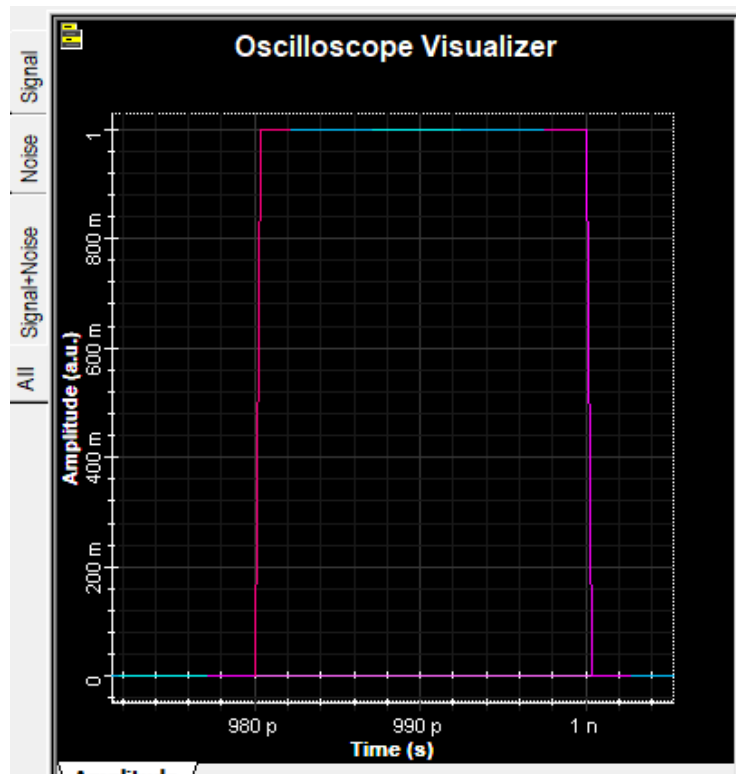


Nota: Se pueden observar los 12 canales ópticos correspondientes a M-WDM que pasan a través de una sola fibra óptica. Elaboración propia.

Se puede observar en la Figura 38 el tiempo de bit de uno de los canales en recepción a partir del cual se puede realizar el cálculo del data rate que atraviesa la fibra.

Figura 38

Gráfica de uno de los bits en recepción de la simulación con PAM4 y M-WDM



Nota: Elaboración propia.

A partir de esta gráfica se puede obtener el tiempo de bit de la señal transmitida en ese canal y por lo tanto su bit rate, de esta manera se puede calcular entonces el bit rate total en un sentido al multiplicarlo con el número de canales transmitidos.

$$Tb \text{ (por cada canal)} = 1000 \cdot 10^{-12} - 980 \cdot 10^{-12}$$

$$Tb \text{ (por cada canal)} = 20 \cdot 10^{-12} \text{ s}$$

$$\text{Bit rate por canal} = \frac{1}{Tb \text{ (por cada canal)}}$$

$$\text{Bit rate por canal} = \frac{1}{20 \cdot 10^{-12} \text{ s}}$$

$$\text{Bit rate por canal} = 50 \text{ Gbps}$$

$$\text{Bit rate total en un sentido} = 50 \text{ Gbps} \cdot \text{número de canales en un sentido}$$

$$\text{Bit rate total en un sentido} = 50 \text{ Gbps} \cdot 6$$

$$\text{Bit rate total en un sentido} = 300 \text{ Gbps}$$

El cual corresponde a la capacidad máxima que debe transportar una fibra en un solo sentido para un fronthaul óptico 5G según (Xiang, 2019) en su libro Optical Communications in the 5G Era.

7 Discusión

Al desarrollar la modulación PAM4 se obtenía valores cercanos a 2 de factor Q el cual no es óptimo ya que es necesario un valor mínimo de 6 para asegurar la calidad de la señal en recepción. Con el propósito de mejorar este parámetro, se realizaron diversas configuraciones, incluso se llegó a conectar el modulador directamente al receptor, con el fin de intentar asegurar que la señal llegara con la potencia completa hacia el analizador de diagrama de ojo en recepción sin tener pérdidas por trayecto o dispersión cromática debido a la fibra, pero los resultados se mantuvieron.

Se trabajó en optimizar la calidad de la señal en recepción basándose en mejorar el factor Q de la señal, primeramente, se disminuyó el data rate, luego se aumentó la potencia de los láseres moduladores, se utilizó un solo canal y bajo ninguno de estos cambios se logró mejorar la señal, finalmente dentro de estos intentos se probó realizar una regeneración de la señal utilizando fibra regenerativa con índice de dispersión cromática negativo sin embargo, no se obtuvo buenos resultados y el factor Q mejoraba tan solo décimas.

Al continuar estudiando el bloque del analizador del diagrama de ojo de manera experimental se tuvo conciencia que se debía intentar hacer converger las señales de los bits en el diagrama de ojo a un solo punto en el centro como se explicó al inicio de los resultados obtenidos. Se decidió aplicar este razonamiento en el modelo de modulación que permite observar el diagrama de ojo hasta obtener buenos resultados, esto corresponde a un trabajo de gran calibración con el que se logró triplicar el factor Q inicial.

Esta calibración del modulador se logró cambiando la potencia de los láseres moduladores para ampliar el ojo central del diagrama lo que permitiría que las líneas de los símbolos converjan hacia un solo punto como se puede observar en las Figuras 39 y 40.

Se pudo evidenciar que luego de la recopilación bibliográfica de las diferentes tecnologías de multiplexación y modulación así de como la arquitectura física de la red estas coinciden con las recomendaciones de la ITU para distancia de alcance de cada parte de la arquitectura, capacidad de los enlaces y velocidad de los canales a implementar en la interfaz óptica de las redes móviles 5G.

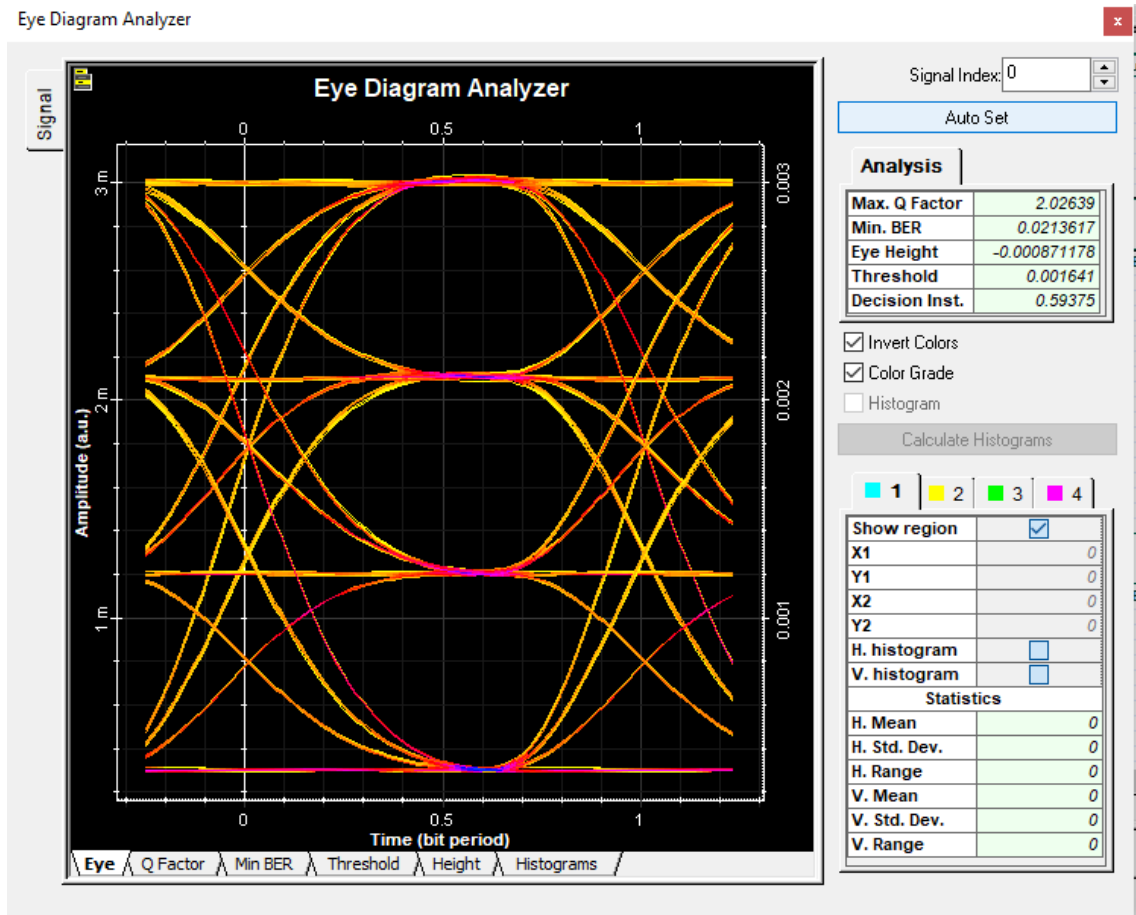
Se demostró como con la multiplexación M-WDM y la modulación PAM4 se alcanza el límite recomendado para la capacidad que debe llevar una sola fibra en un sentido.

El hecho de haber escogido realizar las simulaciones con multiplexación de diferentes canales ópticos en lugar de haber realizado tantos enlaces punto a punto como canales (12 para M-WDM) se justifica por el simple hecho de implementar algunas de las tecnologías estudiadas

en la presente investigación, en la vida real esta decisión depende principalmente de la economía de la empresa que implemente el fronthaul.

Figura 39

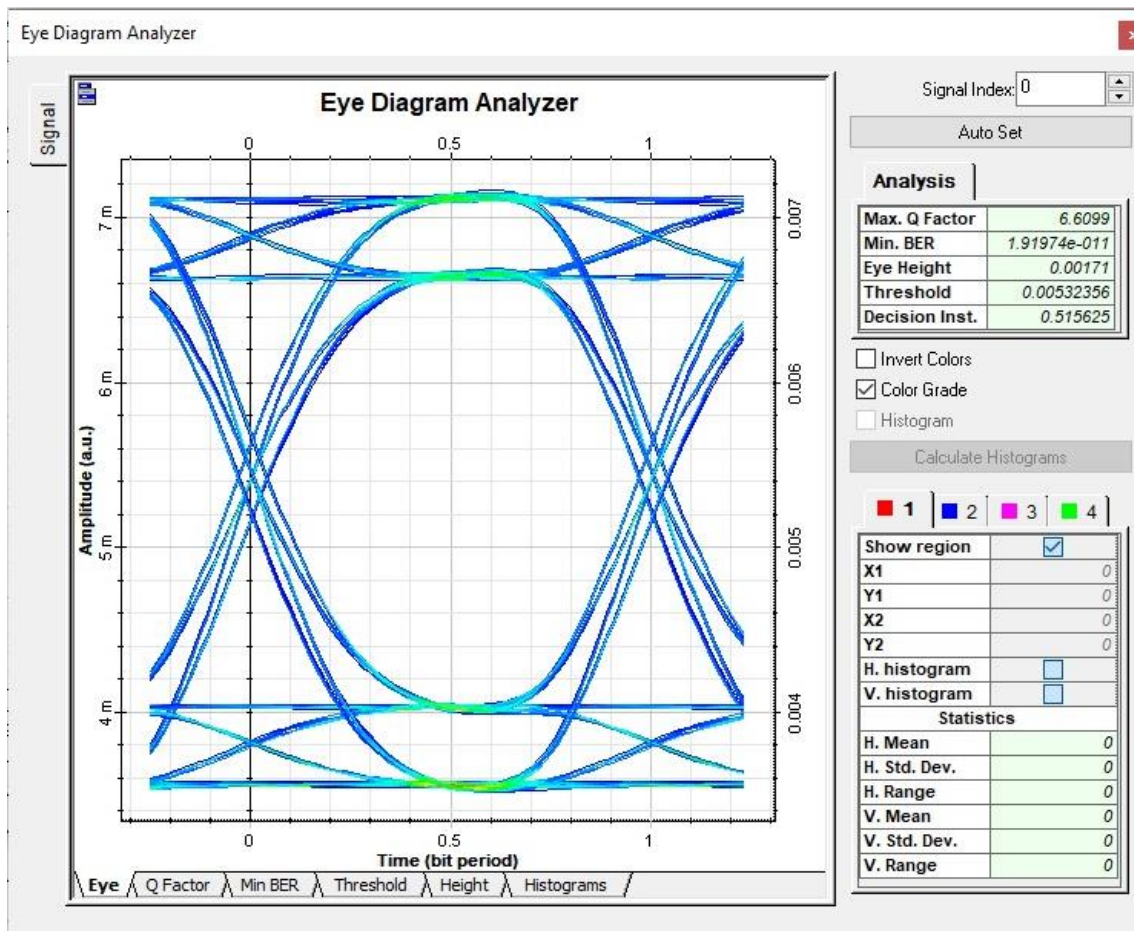
Diagrama de ojo en recepción del canal 1 con moduladores con misma potencia de transmisión



Nota: Se puede observar cómo las líneas de los bits junto a los ojos no convergen en un punto central y el máximo factor Q es 3 veces menos que el conseguido con potencias diferentes como se muestra en la figura 40. Elaboración propia.

Figura 40

Diagrama de ojo en recepción del canal 1 con moduladores con diferentes potencias de transmisión



Nota: Se puede observar cómo las líneas de los bits tienden a converger en el centro lo que aumenta el factor Q al triple del modelo explicado anteriormente connotado mejor calidad en la señal. Elaboración propia.

De no haber realizado esto, las líneas no convergen, dificultando la capacidad de decisión del receptor y por lo tanto disminuyendo finalmente el máximo factor Q denotando menor calidad en la señal como se observa en la Figura 39.

8 Conclusiones

- Para la implementación de redes de móviles 5G se necesita el despliegue masivo de una red de transporte óptica que interconecte las diferentes entidades como RRH, CUs y DUs dentro de la arquitectura de este tipo de redes.
- Los requisitos técnicos como distancia máxima, cantidad de enlaces y tipo de fibra de la interfaz óptica para la transmisión de información en redes móviles 5G varían según la ubicación en la arquitectura de la red, ya sea en la fronthaul, midhaul o backhaul.
- La elección de las tecnologías de modulación y multiplexación de señales en la interfaz óptica de las redes 5G está determinada por las exigencias de la red y por el presupuesto disponible del proveedor de servicios de comunicaciones móviles.
- La arquitectura, y tecnologías de la red de transporte óptica 5G se encuentran estandarizadas de tal manera que exista convergencia entre distintos proveedores y servicios.
- Se demostró mediante simulación como con las tecnologías de modulación y multiplexación aplicadas en la interfaz óptica 5G se pueden conseguir altas tasas de transmisión a través de un solo canal físico.
- Se evidenció mediante las simulaciones como dependiendo de la tecnología de multiplexación utilizada, sus longitudes de onda asociadas y velocidades de enlace que se encuentran estandarizadas, se puede variar el data rate conseguido para un fronthaul óptico de redes móviles 5G.

9 Recomendaciones

- Para poder realizar las simulaciones utilizando técnicas de modulación ópticas avanzadas como PAM4 es necesario contar con la última versión del software Optisystem 19.
- Para futuros estudios en este campo de estudio se recomienda realizar la implementación de los moduladores PAM4 propuestos a fin de corroborar con su implementación lo demostrado en simulaciones respecto a calidad de la señal a transportar.
- Para futuros estudios se recomienda incorporar las longitudes de onda pertenecientes a GPON FTTH dentro de las simulaciones a fin de analizar la calidad de los canales a transportar y así demostrar la convivencia de las señales de un fronthaul óptico 5G con las redes de distribución de FTTH mencionadas.

10 Bibliografía

- Abdalla, A. M., Elfergani, Issa., Rodriguez, Jonathan., & Teixeira, Antonio. (2020). *Optical and Wireless Convergence for 5G Networks*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Acosta, M. (2018). *EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE TÉCNICAS DE MODULACIÓN DIRECTA Y EXTERNA UTILIZANDO LOS EQUIPOS DEL LABORATORIO DE COMUNICACIONES ÓPTICAS DEL DETRI*.
- Addams, S. (2019). *25G WDM-PON for 5G Fronthaul Transmission*. <https://www.fiber-optical-networking.com/25g-wdm-pon-5g-fronthaul-transmission.html>
- Alkhansa, R., Artail, H., & Gutierrez-Estevez, D. M. (2014). LTE carrier aggregation for future 5G systems: A feasibility study and research challenges. *Procedia Computer Science*, 34, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.068>
- Alzate, F. (2018). Retos en la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica. In *Revista en Telecomunicaciones e Informática* (Vol. 1, Issue 2).
- Balero, I. K., César, L., Mateus, A. P., Adolfo, G., & Leguizamón, P. (2021). *Sistema de transporte óptico para el segmento fronthaul en una red 5G NR*.
- Bismark. (2019, June 5). *Red 5G y cómo se compara con antiguas redes - Bismark Colombia*. <https://bismark.net.co/red-5g-y-como-se-comparan-con-antiguas-redes/>
- Carrillo, A. P. (2018). *Diseño de un sistema de radio sobre fibra óptica para ondas milimétricas en redes móviles 5G*.
- Charlene. (2021). *Tipos de fibras ópticas para las redes 5G*. <https://community.fs.com/es/blog/5-types-of-optical-fibers-for-5g-networks.html>
- China Telecom. (2020). *5G-Ready OTN Technical White Paper*.
- Cifarelli, F. (2022). *Redes 5G “La fibra óptica como cimiento del 5G.”*
- Davis, S. (2021). *Semtech habilita la implementación 5G PAM4 Front Haul 5G de 50 Gbps con la primera solución 5G Front Haul Tri-Edge CDR IC de la industria - Semiconductor*

Digest. <https://www.semiconductor-digest.com/semtech-to-enable-50gbps-pam4-front-haul-5g-wireless-deployment-with-industrys-first-5g-front-haul-tri-edge-cdr-ic-solution/>

F, G. (2022). *¿Qué es PAM4 y cuáles son las diferencias entre PAM4 y NRZ? | Comunidad FS*. <https://community.fs.com/es/blog/pam4-for-400g-ethernet-applications.html>

Fluke Networks. (2019). *What's the Deal with OM5 Cable Standards – WBMMF?* https://es.flukenetworks.com/blog/cabling-chronicles/what-is-the-deal-with-om5?mkt_tok=eyJpIjoiWkdJNE1HRTVOelEwWmpWayIsInQiOiJ4VIJ2MkdwUXliQUV6Q2ZjU05SbFpsY29PMDVEXC9RZ2haRGJHNjJcL0d4TXNOOXICNk80VEh4dkZJUlpDWW9PRWQyYUxkTko5ME51N0NRNjZBng5WGZyUWVQcnV0WUZCcFwvbkVYNVRUMVVSU2NhUkVidlQT21TanZxWjdVaHhPWj9

FOM, F. ópticas de M. (2021). *El despliegue de la fibra óptica en la red 5G*.

Hogan, H. (2022a). *How Optical Networks Are Enabling the 5G Advantage | Features | March 2022 | Photonics Spectra*. https://www.photonics.com/Articles/How_Optical_Networks_Are_Enabling_the_5G_Advantage/a67729

INCIBE-CERT. (2019). *5G para la nueva industria conectada | INCIBE-CERT*. <https://www.incibe-cert.es/blog/5g-nueva-industria-conectada>

Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2022, February 9). *El Pleno del IFT aprueba modificar 18 títulos de concesión de Telcel para ofrecer servicios 5G*. <https://www.ift.org.mx/comunicacion-y-medios/comunicados-ift/es/el-pleno-del-ift-aprueba-modificar-18-titulos-de-concesion-de-telcel-para-ofrecer-servicios-5g-0>

Kaminow, I. P., & Willner, A. E. (2018). *Optical fiber telecommunications*.

Lavallée, B. (2020). *Las redes 4G/5G backhaul en primer plano - Ciena MX*. https://www.ciena.com.mx/insights/articles/spotlight-on-4g-5g-backhaul-networks_es_LA.html

- Liu, X. (2019). *Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era*.
- Lopez, I. (2020). *Valor agregado que aportan los beneficios tecnológicos de una red 5G y casos prácticos de aplicaciones que pudieran ser implementadas por WOM S.A en la región metropolitana*.
- Martínez, C. (2017). *¿Qué es SWDM?* . <https://www.conelectronica.com/fibra-optica/redes-opticas/que-es-om5>
- Next-Generation Optical transport network Forum. (2018). *5G-Oriented OTN Technology 5G-Oriented OTN Technical White Paper 5G-Oriented OTN Technology White Paper*.
- Oñate, I. (2016). *Fibra óptica multimodo OM5 tipo WBMMF*. <https://www.fibraoptica hoy.com/fibra-optica-multimodo-om5/>
- Pachón de la Cruz, Á. (2004). *Evolución de los sistemas móviles celulares GSM*.
- Papioannou, S. (2019). 5G small-cell networks leveraging optical technologies with mm-wave massive MIMO and MT-MAC protocols. *Proc. SPIE Broadband Access Commun. Technol. XII*.
- Rainbow, J. (2022, July 27). *SpaceX requests spectrum to upgrade Starlink mobile services - SpaceNews*. SpaceX Requests Spectrum to Upgrade Starlink Mobile Services. <https://spacenews.com/spacex-requests-spectrum-to-upgrade-starlink-mobile-services/>
- RF Wireless World. (2019). */Direct-modulation-vs-External-modulation*. <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Direct-Modulation-vs-External-Modulation.html>.
- Rivadeneira, S. (2019). *ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO MEDIANTE SIMULACIÓN DE LOS MODULADORES ÓPTICOS EXTERNOS*.
- Rodríguez, A. (2021). *La fibra óptica en redes 5G: el futuro se acerca - Página 2 de 3 - fibroptica hoy.com*. <https://www.fibraoptica hoy.com/la-fibra-optica-en-redes-5g-el-futuro-se-acerca/2/>

- Rodriguez, J. (2022). *Diseño de red SCM/DWDM con detección coherente para aplicaciones 5G en banda milimétrica*.
- Sepúlveda, J. (2016). *Redes Móviles Primera Generación AMPS - YouTube*.
<https://www.youtube.com/watch?v=9uBCFqk4f7k>
- Shruti, J. (2019). *Mobile VNI Forecast 2017-2022: 5G emerges and is here to stay!! - Cisco Blogs*. <https://blogs.cisco.com/sp/mobile-vni-forecast-2017-2022-5g-emerges>
- SIEMENS. (n.d.). *Conexiones Industriales 5G | Temas clave | Siemens Spain*. Retrieved August 8, 2022, from <https://new.siemens.com/es/es/empresa/temas-clave/5g-industrial.html>
- Soriano, A. (2022). ▷ *Principales diferencias entre el 4G y el 5G*.
<https://comparaiso.es/comparativas/diferencias-4g-5g>
- VIAVI. (2022). *Arquitectura de las redes 5G. Núcleo de red, redes RAN y arquitectura de seguridad para la tecnología 5G*. <https://www.viavisolutions.com/es-es/arquitectura-de-la-tecnologia-5g>
- Villatoro, F. (2013). *Terabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers - La Ciencia de la Mula Francis*. <https://francis.naukas.com/dibujo20130628-terabit-scale-orbital-angular-momentum-mode-division-multiplexing-in-fibers/>
- Walton, A. (2019). ▷ *Qué es Frame Relay y cómo funciona» Redes CCNA*.
<https://ccnadesdecero.es/frame-relay/>
- Xiang, L. (2019). *Optical Communications in the 5G Era*.
- Zeb, K., Zhang, X., & Lu, Z. (2019). High Capacity Mode Division Multiplexing Based MIMO Enabled All-Optical Analog Millimeter-Wave over Fiber Fronthaul Architecture for 5G and beyond. *IEEE Access*, 7, 89522–89533.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926276>

Zoireff, G. (2018). *Optimización del desempeño de sistemas DMT en enlaces de comunicaciones por fibra óptica de alta capacidad.*

Zubimendi, P. (2019). *División de funciones en arquitecturas C-RAN.*

11 Anexos

Anexo 1 . Adaptación de los valores de potencia obtenidos a la recomendación 50GBASE-LR PAM4

A continuación se observan los valores de los láseres previamente escogidos con su correspondiente valor en mW.

Tabla 14

Valores de potencia de cada uno de los láseres escogidos

Láser	Potencia	
	dBm	mW
1	6	3,9810717055
2	4	2,5118864315
3	0	1

Nota: Se muestran sus correspondientes valores convertidos también a milivatios. Elaboración propia.

En virtud de estos valores y de la [Tabla 8](#) podemos obtener los valores de potencia en milivatios para cada uno de los símbolos generados.

Tabla 15

Potencia aportada por los láseres en cada una de las configuraciones que generarán los símbolos de PAM4

Símbolo	Potencia aportada en mW			Potencia de Símbolo generada
	Láser 1	Láser 2	Láser 3	
S ₀₀	0 mW	0 mW	0 mW	0 mW
S ₀₁	0 mW	0 mW	1 mW	1 mW
S ₁₀	3,98107171	2,5118864315	0 mW	6,492958137 mW
S ₁₁	3,98107171	2,5118864315	1 mW	7,492958137 mW

Nota: Se muestran sus correspondientes valores convertidos a milivatios. Elaboración propia.

De la Tabla anterior se puede obtener que la potencia máxima generada por símbolo es 7,492958137 mW o 8,7465330621 dBm si se transforma la cual corresponde a la potencia del símbolo 11:

$$P(S_{11}) = 7,492958137$$

Al compararlo con el nivel de potencia del láser 1

$$\frac{3,98107171 * 100}{7,492958137} = 53,116\%$$

Es decir que en los nuevos valores generados para la adaptación, el láser número 3 deberá aportar con el 53,116% de potencia total generada por símbolo S₁₁.

Se realiza un análisis similar aprovechando la presencia de un solo láser en el símbolo S₀₁.

$$P(S_{01}) = \frac{1 * 100}{7,492958137} = 13,346\%$$

El estándar 50GBASE-LR PAM4 ocupado en las simulaciones para un enlace a 25 Gbaudios PAM4 con una distancia máxima de 10 km especifica que la potencia máxima asignada a cada uno de los láseres será 5,3 dBm o 3,3884415614 mW si se transforma.

Por lo tanto las nuevas potencias de símbolos en relación al aporte generado por los láseres previamente analizado serán:

$$P(S_{11}) =$$

$$3,3884415614 \text{ mW} = 53,116\%$$

$$P(S_{11}) = \frac{3,3884415614 * 100}{53,116} = 6,3793236716 \text{ mW}$$

$$P(S_{01}) =$$

$$P(S_{01}) = 13,346\%$$

$$P(S_{01}) = \frac{13,346 * 6,3793236716}{100} = 0,8513845372 \text{ mW}$$

Al analizar la potencia de S_{11} según las aportaciones de energía de cada uno de los láseres podemos calcular el valor del Láser 2 en milivatios:

$$6,3793236716 \text{ mW} - 3,3884415614 \text{ mW} - 0,8513845372 \text{ mW} = 2,139497573 \text{ mW}$$

Con los valores calculados es posible encontrar finalmente el valor de cada una de las aportaciones de los láseres para conseguir símbolos con la potencia requerida que mantengan la relación de la misma como se describió al inicio de este apartado.

Tabla 16

Configuración obtenida para el aporte de potencia de los láseres que generarán los símbolos PAM4.

Símbolo	Potencia en mW			Potencia de Símbolo
	Láser 1	Láser 2	Láser 3	
S_{00}	0	0	0	0 mW
S_{01}	0	0	0,8513845	0,8513845 mW
S_{10}	3,3884415	2,139497	0	6,492958 mW
S_{11}	3,3884415	2,139497	0,8513845	6,3793237 mW

Nota: Se muestran sus correspondientes valores en milivatios. Elaboración propia.

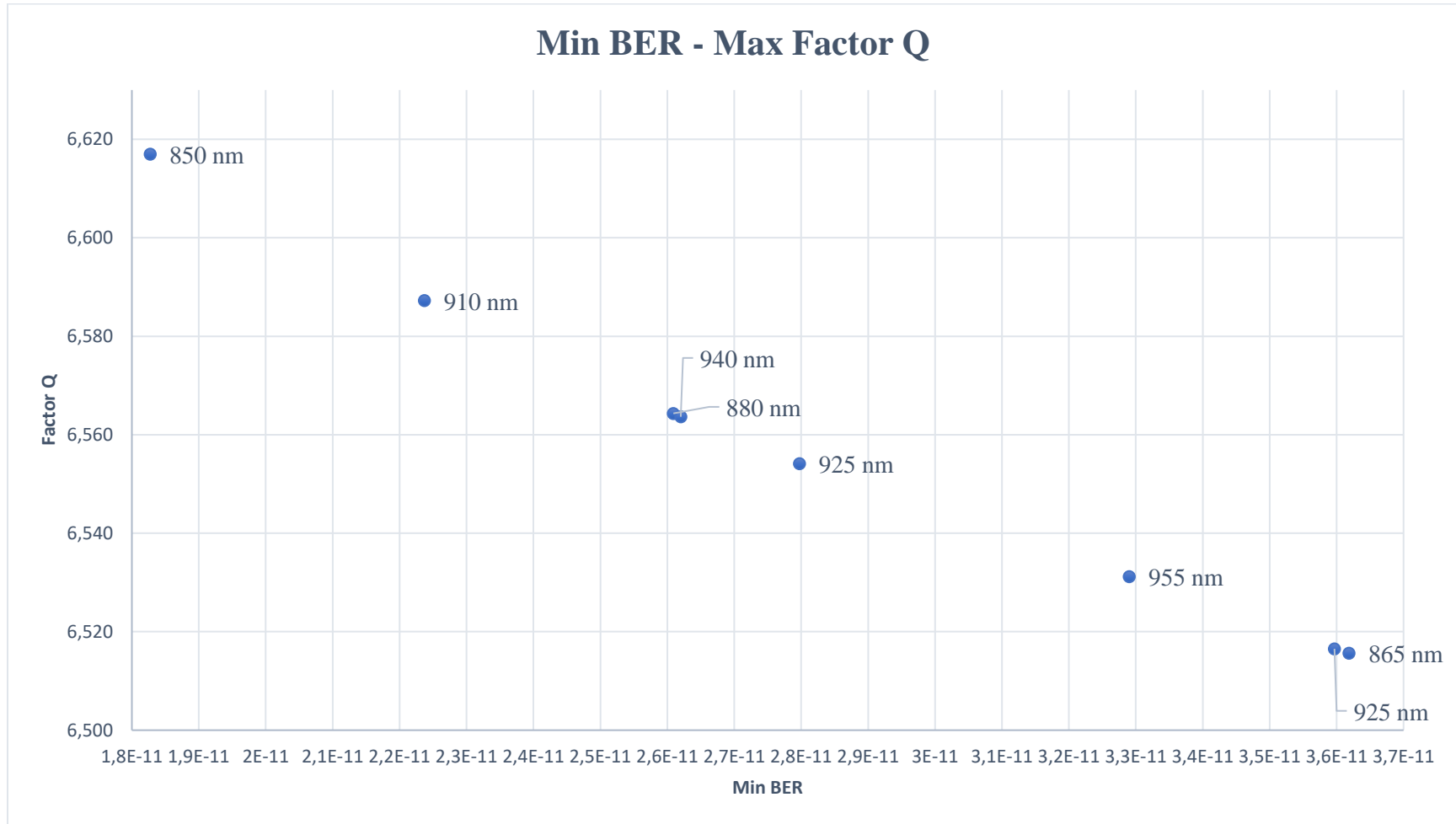
Finalmente, gracias a este análisis se consigue los valores en dBm y mW de cada uno de los láseres que cumplan con la norma **50GBASE-LR PAM4**.

Tabla 17
Potencia readecuada de los láseres

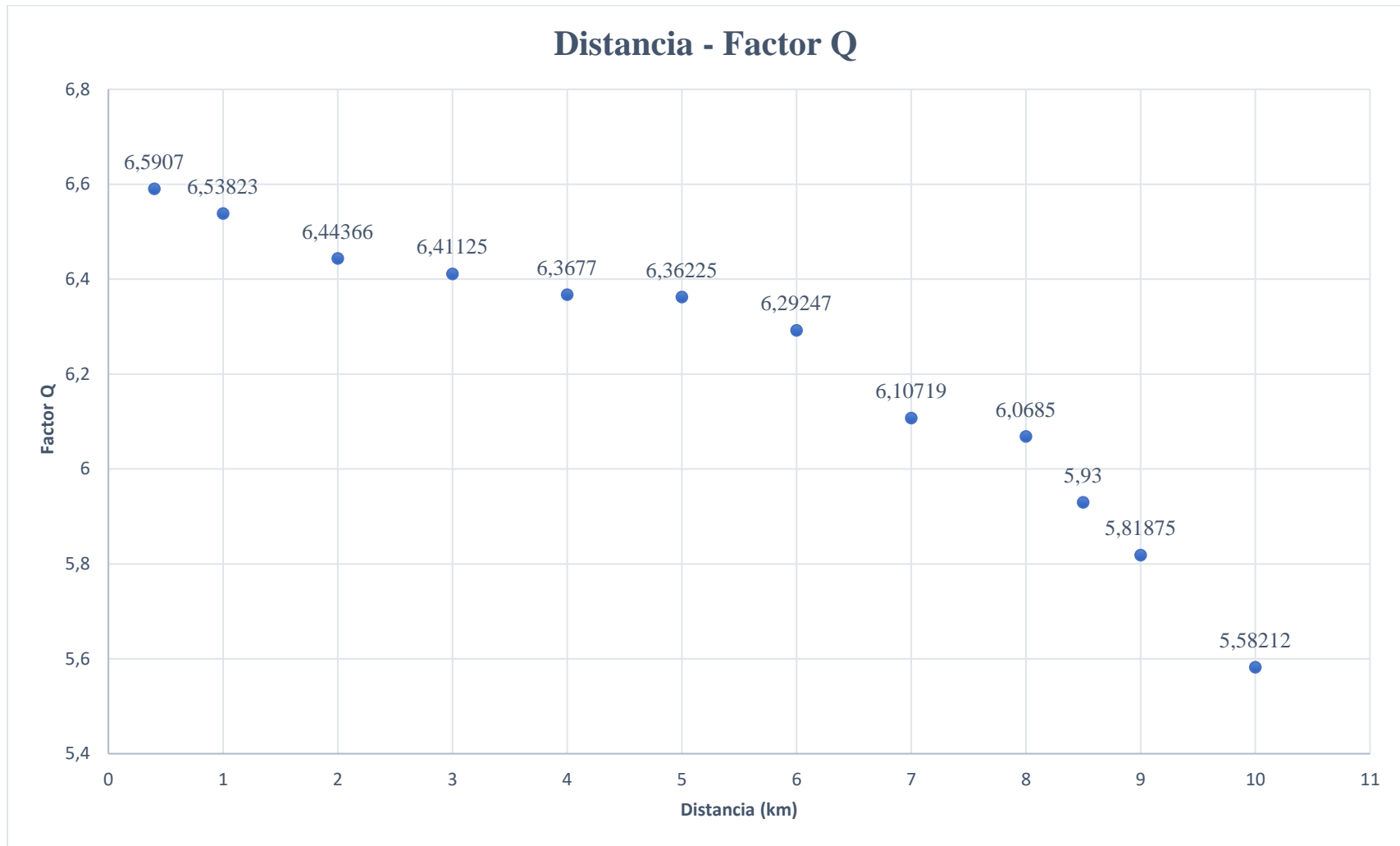
Láser	Potencia adaptada	
	dBm	mW
1	5,3	3,3884415
2	3,3031179	2,5118864
3	-0,6987424	0,8513845

Nota: Se muestran sus correspondientes valores en mW y dBm. Elaboración propia.

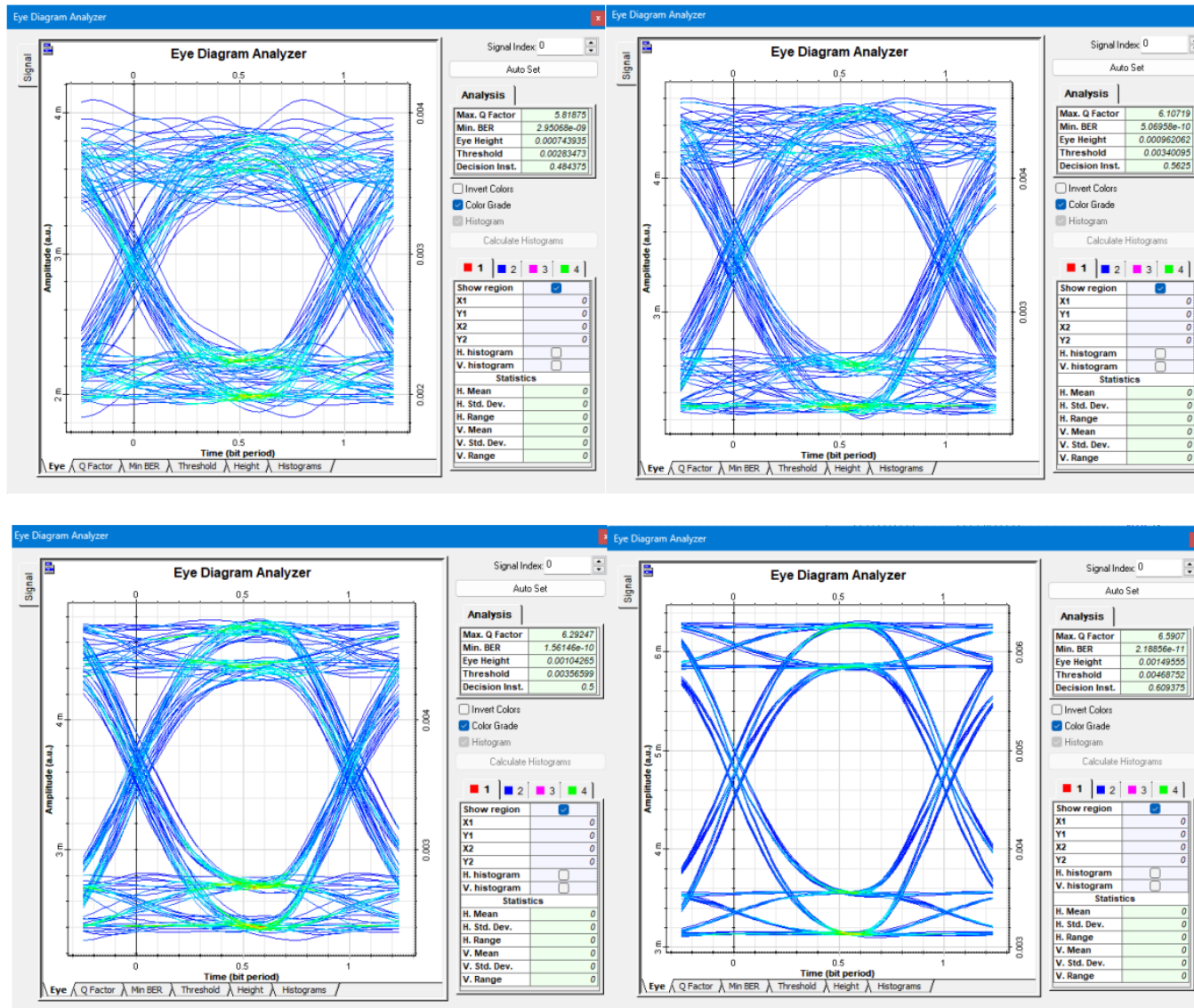
Anexo 2. Gráfica comparativa BER vs Factor Q obtenidos en SWDM PAM4



Anexo 3. Gráfica comparativa Degradación del factor Q conforme aumenta la distancia para la simulación SWDM PAM4



Anexo 4. Gráfica comparativa Diagramas de ojo correspondientes a diferentes valores del BER conseguidos en SWDM PAM4



Anexo 5. Certificado de traducción del resumen al idioma inglés

English Speak Up Center


Nosotros "*English Speak Up Center*"

CERTIFICAMOS que

La traducción del resumen de Trabajo de Titulación titulado "ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LA INTERFAZ ÓPTICA DE LAS COMUNICACIONES MÓVILES DE QUINTA GENERACIÓN." documento adjunto solicitado por el señor Ludgero Enrique Abad Torres con cédula de ciudadanía número 1104652217 ha sido realizada por el Centro Particular de Enseñanza de Idiomas "*English Speak Up Center*"

Esta es una traducción textual del documento adjunto. El traductor es competente y autorizado para realizar traducciones.

Loja, 7 de septiembre de 2023


Mg. Sc. Elizabeth Sánchez Burneo
DIRECTORA ACADÉMICA