



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Análisis del desempeño de la tecnología UDWDM en redes de fibra óptica mediante simulación de parámetros de transmisión para evaluar el impacto del ancho de banda disponible

Trabajo de Titulación para optar al título de:
Ingeniero en Telecomunicaciones

Autor:

Zumba Calle, Juan Paul

Tutor:

Ing. José Luis Jinez Tapia, MsC

Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Juan Paul Zumba Calle, con cédula de ciudadanía 0605876051, autor (a) (s) del trabajo de investigación titulado: Análisis del desempeño de la tecnología UDWDM en redes de fibra óptica mediante simulación de parámetros de transmisión para evaluar el impacto del ancho de banda disponible, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 6 de julio de 2026.



Juan Paul Zumba Calle

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Ing. José Luis Jinez Tapia catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: Análisis del desempeño de la tecnología UDWDM en redes de fibra óptica mediante simulación de parámetros de transmisión para evaluar el impacto del ancho de banda disponible, bajo la autoría de Juan Paul Zumba Calle; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 6 días del mes de febrero de 2026.



Ing. José Luis Jinez Tapia

C.I: 0602899007

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Análisis del desempeño de la tecnología UDWDM en redes de fibra óptica mediante simulación de parámetros de transmisión para evaluar el impacto del ancho de banda disponible**”, presentado por Juan Paul Zumba Calle con cédula de identidad 0605876051, bajo la tutoría de Mg. José Luis Jinez Tapia; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a los 25 días del mes de junio de 2026

PhD. Ciro Diego Radicelli García.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

Firma



PhD. Marlon Danilo Basantes Valverde.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Firma



PhD. Eduardo Daniel Haro Mendoza.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Firma





CERTIFICACIÓN

Que, ZUMBA CALLE JUAN PAUL con CC: 0605876051, estudiante de la Carrera de TELECOMUNICACIONES, Facultad de INGENIERÍA; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "Análisis del desempeño de la tecnología UDWDM en redes de fibra óptica mediante simulación de parámetros de transmisión para evaluar el impacto del ancho de banda disponible", cumple con el 6%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio COMPILATIO porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 10 de junio de 2026



Mgs. José Luis Jinez Tapia
TUTOR(A)

DEDICATORIA

Con profundo agradecimiento, dedico este trabajo a Dios, por iluminar mi camino, darme fortaleza en los momentos difíciles y permitirme alcanzar una de mis metas, demostrando que todo es posible si tenemos disciplina.

A mis padres, por su amor incondicional, sus enseñanzas, esfuerzo y apoyo constante y ejemplo para mí. Gracias por creer en mí y motivarme a seguir adelante en cada etapa de mi formación.

Juan Paul Zumba Calle

AGRADECIMIENTO

A mi familia, especialmente a mis padres, les agradezco profundamente su amor incondicional y su apoyo constante. Su fe en mí ha sido el motor que me permitió completar este camino. A mis hermanos, por sus palabras de aliento, y a mis abuelos, por su presencia y cariño, gracias por ser mi pilar en los momentos difíciles. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, gracias por brindarme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente. Mi gratitud también va a mi tutor, cuyo apoyo y disposición fueron esenciales para la culminación de esta tesis. Aprecié profundamente su confianza en mi trabajo y el ambiente de aprendizaje que me ofrecieron.

A mis amigos y compañeros, gracias por su compañía y apoyo. Ustedes fueron mi red de contención y su amistad me ayudó a mantener el ánimo en los momentos más duros. Creando confianza y creatividad para formar mejores proyectos. Cada uno de ustedes contribuyó a que este proceso fuera más llevadero y significativo.

Juan Paul Zumba Calle

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	15
1.1 Antecedentes	15
1.2 Planteamiento del Problema	16
1.3 Justificación.....	17
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivo General.....	18
1.4.2 Objetivos Específicos.....	18
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
2.1 Estado del Arte	18
2.2 Marco Teórico.....	19
2.2.1 Fibra Óptica.....	19
2.2.2 Componentes de la Fibra Óptica	20
2.2.3 Tipos e identificación de la fibra óptica.....	21
2.2.4 Parámetros de transmisión en fibra óptica	22
2.2.5 Parámetros de medición en fibra óptica.....	26
2.2.6 Red Óptica Pasiva.....	27
2.2.7 Multiplexación en Fibra Óptica.....	28
2.2.2 CWDM.....	28
2.2.3 DWDM.....	30
2.2.4 UDWDM.....	31
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	34
3.1 Tipo de Investigación	34
3.2 Métodos de la Investigación	34
3.3 Escenario de Pruebas.....	35

3.4	Hipótesis	36
3.4.1	Hipótesis de Investigación <i>H_i</i>	36
3.4.2	Hipótesis Nula <i>H₀</i>	36
3.5	Operacionalización de Variables	36
3.6	Población y Muestra	36
3.6.1	Población	36
3.6.2	Muestra	37
3.7	Diseño de Sistema Óptico	38
3.7.1	Componentes del sistema simulado	38
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		44
4.1	Distancia 5 Km. Banda C para Fibra G.652. Potencia de transmisor de 2.5dBm	44
4.2	Distancia 50 Km. Banda C para Fibra G.652. Potencia de transmisor de 2.5dBm	46
4.3	Distancia 100 Km. Banda C para Fibra G.652. Potencia de transmisor de 2.5dBm	49
4.4	Análisis Estadístico	51
4.4.1	Análisis Escenario UDWDM	51
4.4.2	Análisis Escenario UDWDM y DWDM	54
4.4.3	Análisis del comportamiento del ancho de banda efectivo por canal y la calidad de señal recibida	63
4.4.4	Validación de Hipótesis	67
CONCLUSIONES		69
REFERENCIAS		70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables de estudio	36
Tabla 2. Tabla de frecuencias seleccionadas para cada canal.....	44
Tabla 3. Datos de enlace con fibra G.652 a 5 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	46
Tabla 4. Datos de enlace con fibra G.652 a 50 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	48
Tabla 5. Datos de enlace con fibra G.652 a 100 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	50
Tabla 6. Estadísticos descriptivos	51
Tabla 7. Estadísticos descriptivos	53
Tabla 8. Prueba de Shapiro-Wilk para mostrar la normalidad de las variables	55
Tabla 9. Resultados de Prueba de Mann–Whitney U.....	55
Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis	57
Tabla 11. Correlación de Spearman.....	59
Tabla 12. Comparación de medianas de acuerdo con su tecnología.....	62
Tabla 13. Comparación de medianas de acuerdo con la distancia del enlace.....	62
Tabla 14. Condiciones de comportamiento de ancho de banda efectivo a partir de parámetros de simulación	63
Tabla 15. Resumen de comportamiento del ancho de banda delimitados en zonas.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Leyes que rigen la transmisión por Fibra óptica [5].....	19
Figura 2. Componentes de la Fibra óptica [5].	20
Figura 3. Ventanas de trabajo de la Fibra Óptica [6].....	21
Figura 4. Clasificación de los efectos no lineales presentes en la Fibra Óptica [7].....	25
Figura 5. Esquemas de arquitecturas de fibra óptica [6].....	27
Figura 6. Multiplexación por división de longitud de onda [8].....	28
Figura 7. Multiplexación por división de longitud de onda ligeras [8].....	29
Figura 8. Multiplexación por división de longitud de ondas densa [8].....	31
Figura 9. Representación de la Multiplexación por división ultra densa de longitud de ondas [8] ..	32
Figura 10. Esquema de actividades del escenario de pruebas	35
Figura 11. Esquema en bloques del diseño de simulación para los 8 canales	38
Figura 12. Bloques de Transmisión del Sistema Óptico	39
Figura 13. Esquema del Sistema de Transmisión Multiplexado por WDM.....	40
Figura 14. Etapa de transmisión con Filtro Gaussiano.....	41
Figura 15. Etapa de Amplificación y Demultiplexación del Sistema	42
Figura 16. Etapa de Recepción y Conversión a Señal Eléctrica	43
Figura 17. Etapa de Recepción del Sistema UDWDM de 8 Canales.....	43
Figura 18. Espectro óptico del canal 1 del enlace con fibra G.652 a 5 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.	45
Figura 19. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 5 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.	45
Figura 20. a) Diagrama de Ojo, b) Factor Q relativos a fibra G.652 a 5 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	46
Figura 21. Espectro óptico del canal 1 del enlace con fibra G.652 a 50 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.	47
Figura 22. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 50 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	47
Figura 23. a) Diagrama de Ojo, b) Factor Q relativos a fibra G.652 a 50 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	48
Figura 24. Espectro óptico del canal 1 del enlace con fibra G.652 a 50 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.	49
Figura 25. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 100 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.....	49
Figura 26. a) Diagrama de Ojo, b) Factor Q relativos a de fibra G.652 a 100 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	50

Figura 27. a) Diagrama de Ojo, b) Factor Q relativos a de fibra G.652 a 100 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	52
Figura 28. a) Diagrama de Ojo, b) Factor Q relativos a de fibra G.652 a 100 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	53
Figura 29. Conjunto de datos para el análisis combinando ambas tecnologías	54
Figura 30. Diagrama de cajas entre BER vs Tecnología.....	56
Figura 31. Diagrama de cajas entre Q-factor vs Tecnología	56
Figura 32. Diagrama de cajas entre Eye Height vs Tecnología.....	57
Figura 33. Diagrama de cajas BER vs Tramo	58
Figura 34. Diagrama de cajas entre Q-Factor y Tramo.....	58
Figura 35. Diagrama de cajas Eye Height vs Tramo	59
Figura 36. Diagrama de dispersión entre el BER y la Distancia.....	60
Figura 37. Diagrama de dispersión entre Q-factor y la Distancia.....	61
Figura 38. Diagrama de dispersión entre Eye Height y la Distancia	61
Figura 39. Evolución del Q-factor por canal en función de la distancia del enlace.....	64
Figura 40. Evolución del logaritmo del BER por canal en función de la distancia del enlace.	65
Figura 41. Evolución logarítmica de la altura de ojo (EyeHeight) por canal en función de la distancia del enlace.....	66

RESUMEN

El presente estudio analiza el desempeño de la tecnología Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing (UDWDM) en redes de fibra óptica mediante la simulación de parámetros críticos de transmisión, con el fin de evaluar el impacto del ancho de banda disponible y del espaciado espectral entre canales. Para ello, se modeló un sistema óptico UDWDM en una herramienta de simulación especializada, incorporando métricas como OSNR, BER, atenuación, Q-Factor y el Diagrama de Ojos, y se comparó su rendimiento frente a configuraciones DWDM convencionales.

Los resultados obtenidos evidencian diferencias estadísticamente significativas entre ambas tecnologías. Mientras que DWDM presenta una mayor integridad de señal en enlaces de corto alcance, UDWDM demuestra una superior resiliencia y estabilidad operativa en distancias extendidas, lo que confirma su idoneidad para escenarios de alta densidad espectral. Asimismo, se determinó que la distancia del enlace es el factor de mayor influencia sobre la apertura del Ojo, debido a los efectos acumulativos de atenuación y dispersión, siendo este deterioro más lineal y controlable en sistemas UDWDM.

Finalmente, se realiza una validación estadística de los resultados, que permiten concluir que, aunque DWDM optimiza la calidad en tramos cortos, UDWDM se posiciona como la alternativa más eficiente para maximizar el uso del ancho de banda en enlaces de largo recorrido, manteniendo niveles de BER dentro de los límites normativos.

Palabras Clave: UDWDM, DWDM, Diagrama de Ojos, Red Óptica, BER

Abstract

This study analyzes the performance of Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing (UDWDM) technology in fiber optic networks by simulating critical transmission parameters to evaluate the impact of available bandwidth and spectral spacing between channels. For this, a UDWDM optical system was modeled using a specialized simulation tool, incorporating metrics such as OSNR, BER, attenuation, Q-factor, and the Eye Diagram, and its performance was compared to conventional DWDM configurations.

The results obtained show statistically significant differences between the two technologies. While DWDM exhibits greater signal integrity in short-range links, UDWDM demonstrates superior resilience and operational stability over extended distances, confirming its suitability for high-spectral-density scenarios. Furthermore, it was determined that link distance is the most influential factor on the Eye Diagram, due to the cumulative effects of attenuation and dispersion, with this deterioration being more linear and controllable in UDWDM systems.

Finally, a statistical validation of the results is performed, leading to the conclusion that, although DWDM optimizes quality over short distances, UDWDM is the most efficient alternative for maximizing bandwidth utilization over long-distance links, while maintaining BER levels within regulatory limits.

Keywords: UDWDM, DWDM, Eye Diagram, Optical Network, BER



Reviewed by:

Geovanny Armas Pesántez, B.A. Mgs.

EFL PROFESSOR

ID. N°: 0602773301

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En el mundo actual, la transmisión de datos y comunicaciones a alta velocidad constituyen un aspecto importante en el desarrollo económico, social y cultural de la sociedad. El volumen de datos transmitido a través de redes de fibra óptica se ha incrementado considerablemente en los últimos años, lo que ha generado una creciente demanda de tecnologías que permitan manejar este tráfico de manera eficiente.

Para abordar el creciente número de usuarios y garantizar la transmisión de información a larga distancia y alta velocidad, se han explorado nuevas técnicas de multiplexación de longitud de onda para mejorar la conectividad global. Las nuevas tecnologías aparecen por la urgente necesidad de ofrecer servicios de datos, video y voz de buena calidad, al mismo tiempo que sean económicamente viables, escalables y tengan suficiente ancho de banda para cubrir las necesidades de los usuarios [1].

La mayoría de las personas, y el hecho de que muchos lugares estén destinados tanto para trabajar como para vivir, necesitan una conexión de internet muy fuerte y confiable que pueda servir para diferentes cosas, como trabajar desde casa o entretenerse online. Sin embargo, la infraestructura existente y los desafíos de los entornos urbanos pueden dificultar la instalación de una red de fibra óptica hasta la vivienda.

En este ámbito, las redes ópticas pasivas (PON) son esenciales para el desarrollo y la mejora de las redes de fibra óptica. Usan métodos de multiplexación para dividir el ancho de banda y enviar varias señales al mismo tiempo por medio de una sola fibra.

Las técnicas de multiplexación evolucionan constantemente a través de diversas variantes. Estas incluyen técnicas como la multiplexación por división de longitud de onda (WDM), la multiplexación por división de longitud de onda gruesa (CWDM) y la multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM), donde cada tecnología ofrece particularidades en la eficiencia de posibilitar un mayor número de canales por fibra y un mejor ancho de banda [1].

Los operadores de telecomunicaciones actuales, han logrado aumentar la capacidad del canal modernizando la tecnología de multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM) en sus equipos de transmisión. Específicamente, mediante la sustitución de equipos con una capacidad máxima de un puerto que solo podía admitir 10 Gbit/s, hacia equipos mucho más costosos que pueden manejar por puerto volúmenes de hasta 100 Gbit/s.

La modernización utiliza el método de conexión cruzada, lo que logra que la red cuente con suficientes reservas para cubrir las demandas futuras [2].

Sin embargo, en análisis realizados sobre rendimiento de la tecnología UDWDM en una red PON con el software OptSim, y el uso de tres escenarios de evaluación, donde la distancia de transmisión se varió de 10 a 20 km, los usuarios estaban conectados a la red, la velocidad de transmisión fue de 10 a 17 Gbps y el espaciamiento entre canales fue de 25 GHz, 20 GHz y 15 GHz, se demuestra que la tecnología UDWDM puede mejorar significativamente la capacidad y la eficiencia de la red PON, permitiendo un mayor número de usuarios y velocidades de datos más altas, siempre que se considere un espaciamiento entre canales adecuado. El análisis de los resultados de la simulación reveló que ciertos parámetros de transmisión influyen significativamente en el rendimiento de los sistemas UDWDM. A medida que aumenta la distancia entre canales, varios fenómenos pueden afectar el rendimiento del sistema de comunicación óptica, como i) interferencia óptica entre canales, que conduce a mayores tasas de error y se ve afectada por el nivel de potencia óptica de los canales, longitud de onda, relación señal-ruido, dispersión modal y dispersión cromática [1] 3].

1.2 Planteamiento del Problema

Según el ministerio de Telecomunicaciones del Ecuador en los últimos años, las telecomunicaciones experimentan crecimientos radicales y Ecuador evidencia una tendencia exponencial de crecimiento. La tasa de penetración de Internet en Ecuador se situó en el 83.6% de la población total a principios de 2024. Dentro de la Estrategia Ecuador Digital 2.0, el Plan Nacional de Desarrollo de Banda Ancha representa una estrategia de conectividad dirigida a la estructuración de una sociedad que avanza hacia la Revolución Digital [3].

El requerimiento de mayor ancho de banda está siendo cada vez mayor debido a que en la actualidad se realizan con más frecuencia videollamadas, descargas, transmisión de video en vivo, el internet en casas inteligentes, generando que el aumento de ancho de banda sea mayor garantizando así la eficiencia y velocidad de transmisión de datos en múltiples dispositivos [4].

Para evaluar la tecnología UDWDM en una red de fibra óptica es necesario determinar su comportamiento mediante simulación lo cual presenta un desafío a medida

que se añaden más canales, surgen limitaciones en la escalabilidad, lo que puede causar problemas de interferencia y diafonía (crosstalk)

1.3 Justificación

La creciente demanda de ancho de banda, impulsada por el video de alta definición, el Internet de las cosas y otras aplicaciones que consumen ancho de banda, ha estimulado la necesidad de redes de acceso óptico de banda ancha de alta capacidad. Las redes ópticas pasivas (PON) actualmente implementadas emplean una técnica de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), que puede proporcionar una capacidad de red agregada de solo 10 Gb/s y evolucionar rápidamente a una contraparte de 50 Gb/s. Mientras tanto, el último estándar ITU-T llamado PON 2 de próxima generación (NG-PON2), pretende emplear técnicas de multiplexación por división de tiempo y longitud de onda (TWDM) para mejorar la capacidad de red agregada [3]. Como resultado, se han realizado trabajos de investigación intensivos en redes ópticas pasivas de multiplexación por división de longitud de onda ultradensa (UDWDM-PON), con la ayuda de la detección coherente simplificada.

La necesidad de mejorar la capacidad de enviar datos por medio de cables de fibra óptica ha sido un reto para los científicos y empresas que fabrican tecnología. Aunque estos cables pueden transmitir información a velocidades muy altas, miles de veces más rápido que los cables tradicionales, los sistemas actuales no logran usar toda la potencia disponible. Uno de los problemas más importantes en las redes de fibra óptica es el costo elevado de instalar los equipos necesarios.

La tecnología UDWDM, que significa Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing, es un método para enviar señales por medio de fibra óptica. Esta técnica junta varios canales de luz en un solo cable de fibra, lo que permite enviar al mismo tiempo sonido, imágenes e información en distintos tipos de formatos.

El estudio de la tecnología UDWDM ha sido muy importante para entender cómo el tráfico de voz, video y datos afecta a una red de fibra óptica. Su propósito es aumentar el flujo de datos en redes de fibra óptica, pero cada una tiene propiedades y ventajas distintas que pueden afectar la elección de la tecnología más adecuada para una red en particular.

La necesidad de estudio de esta tecnología como desafío técnico significativo de una solución preparada para el futuro de redes de acceso óptico de próxima generación, UDWDM es una tecnología creciente, aún se requiere más investigación, y análisis para

garantizar su viabilidad y eficacia en entornos de producción a gran escala. El mercado global de redes ópticas muestra tendencias y pronóstico global 2022-2026 en crecimiento de demanda de ancho de banda [5].

Por las cualidades de la fibra óptica, como una capacidad de banda ancha mayor y velocidades más rápidas que otras tecnologías, se puede enviar audio y vídeo de muy alta calidad, transmitir datos en tiempo real y disfrutar de otros beneficios. En el área económica, al tener conexiones de fibra óptica, las pequeñas empresas mejoran los servicios que ofrecen y mejoran su calidad, gracias al acceso a internet de alta velocidad. Esto les permite expandir sus servicios al exterior, lo que ayuda a promover las exportaciones.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar el desempeño de la tecnología UDWDM en redes de fibra óptica mediante simulación de parámetros de transmisión para evaluar el impacto del ancho de banda disponible.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Simular una red de transmisión óptica UDWDM, mediante el modelado de los parámetros físicos de transmisión (OSNR, BER, atenuación).
- Estudiar cómo el ancho de banda que hay en cada canal afecta a la calidad de la señal que se recibe a distintas distancias del enlace.
- Evaluar el rendimiento del sistema UDWDM con las configuraciones de DWDM tradicionales, en cuanto a capacidad, margen de error y estabilidad en la transmisión.
- Analizar cómo el espacio entre canales afecta la eficiencia del uso del espectro y la interferencia entre canales del sistema, usando datos obtenidos en simulaciones y realizando un análisis estadístico.

CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Estado del Arte

Para la evaluación del desempeño de las redes de UDWDM, y su impacto en las redes de fibra óptica se han realizado múltiples estudios en la actualidad, como es el caso del análisis “Design and performance analysis of 1.28Tbps ultra-dense wavelength division multiplexing in free space optical networks under diverse weather conditions”, donde se evaluó el rendimiento del sistema UDWDM-FS, e investigó las diversas configuraciones de canal manteniendo una separación entre canales de 0,2 nm/25 GHz para determinar la fiabilidad y la viabilidad del sistema para las comunicaciones ópticas. La fiabilidad y la precisión de los resultados se confirmaron con base en el factor de calidad (QF), la tasa de error de bit (BER) y la relación señal-ruido óptica (OSNR), con una atenuación que varió de 0,22 dB/km en aire despejado a 273,39 dB/km en niebla densa a lo largo de diferentes distancias de enlace de hasta 5 km. Los resultados obtenidos muestran que el sistema propuesto demostró un rendimiento óptimo con $QF \geq 4$, un valor mínimo de BER de 10^{-5} y valores mínimos de OSNR de 32 dB a 1 km a 14 dB a 5 km en aire despejado, 18,2 dB a 1 km para niebla ligera y 21,8 dB a 0,1 km para niebla densa. Se puede concluir que, si bien los sistemas UDWDM-FSO pueden alcanzar altas velocidades de datos y mantener un rendimiento sólido en condiciones climáticas favorables, su eficiencia se ve significativamente comprometida en condiciones climáticas adversas con valores de atenuación altos [3].

De igual forma, en el artículo “Link Optimization and Performance Analysis of a 40 Gbps DQPSK Modulated Ultra DWDM System with 32 Orthogonally Polarized channels” se presenta una implementación y análisis de un sistema UDWDM modulado por DQPSK con polarización alternativa, con la finalidad de evaluar su resiliencia a la distorsión por exceso de potencia (XPM) y la no linealidad de la fibra. Se estudia numéricamente un sistema UDWDM con 32 canales, cada uno operando a 40 Gbps y espaciado a 25 GHz, para un sistema de comunicación óptica de larga distancia utilizando el simulador OptiSystem para estimar las penalizaciones de OSNR y mitigar los efectos de XPM. Para ello se estimaron los principales factores perjudiciales encontrados en el diseño del enlace para evaluar el rendimiento del sistema en términos de valor Q para diferentes números de canales y con variada potencia de entrada. Como resultado, se obtiene un rendimiento aceptable para el formato DQPSK hasta una distancia de enlace de 1500 km, que ofrece un rendimiento

superior a potencias de lanzamiento más altas gracias a su mejor eficiencia espectral, lo que le permite tolerar las degradaciones inducidas por la dispersión. Las observaciones del presente análisis son útiles para tener presentes las diversas complejidades que implican estos enlaces de alta velocidad, a la hora de realizad una simulación. Sin embargo, brinda una margen para elegir la fibra más adecuada para transmitir señales moduladas en DQPSK con ciclo de trabajo variable. Dado que hasta la fecha se han realizado muy pocos experimentos con sistemas UDWDM, los factores limitantes fundamentales y sus soluciones en estos sistemas no están claramente definidos, especialmente al transmitir a velocidades de datos superiores a 40 Gb/s. Por lo tanto, se infiere que, a estas velocidades de datos, es necesario abordar las graves limitaciones de dispersión cromática y dispersión en modo de polarización antes de abordar las penalizaciones inducidas por la no linealidad óptica [4].

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Fibra Óptica

La fibra óptica es una guía de onda dieléctrica que opera en frecuencias ópticas. Es un hilo diminuto, flexible y transparente de vidrio o plástico que tiene un diámetro parecido al de un cabello humano. Su funcionalidad es transmitir información a través de señales lumínicas y puede recorrer largas distancias.

El principio de funcionamiento de la transmisión en la fibra óptica, está regido por 2 leyes físicas fundamentales, como se aprecia en la Figura 1.

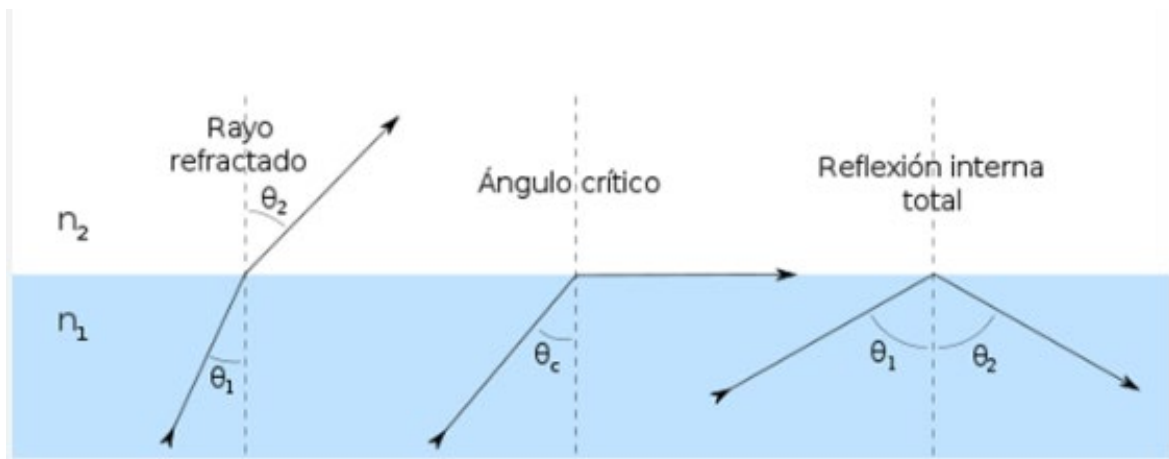


Figura 1. Leyes que rigen la transmisión por Fibra óptica [5]

- **Ley de Refracción:** La Ley de Snell, como también se le conoce en el campo de la física, indica la razón matemática existente entre los senos de los ángulos de incidencia θ_a y de refracción θ_b , en donde estos ángulos son medidos desde la normal hacia la superficie de separación entre los medios y es igual al inverso de

la razón de los índices de refracción. Esta ley se puede representar por la Ecuación (I).

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b \quad (1)$$

- **Ley de Reflexión:** Es otra de las leyes físicas fundamentales de la óptica, e indica que el ángulo de reflexión θ_r , es igual al ángulo de incidencia θ_a para todas las longitudes de onda, así como para cualquier par de materiales. Se representa por la Ecuación Ecuación (II).

$$\theta_r = \theta_a \quad (2)$$

El principio de funcionamiento de la fibra óptica se basa en la reflexión interna total. La luz viaja de un material más denso ópticamente, que tiene un índice de refracción n_1 , a otro más liviano, con un índice de refracción n_2 . Cuando la luz llega a la frontera entre estos dos materiales, se refracta de manera que no puede salir al otro lado, por lo que se refleja completamente. Por lo tanto, el haz de luz queda completamente encerrado en el medio más denso (el núcleo) y se mueve dentro de él [5].

2.2.2 Componentes de la Fibra Óptica

La fibra óptica tiene tres componentes principales: el núcleo (core), el revestimiento (cladding) y el recubrimiento (coating). La luz se transmite a través del núcleo, el cual está envuelto por un revestimiento que evita la dispersión de la luz. El recubrimiento ofrece protección contra el deterioro y al factor humedad. Un diagrama transversal se muestra en la Figura 2.

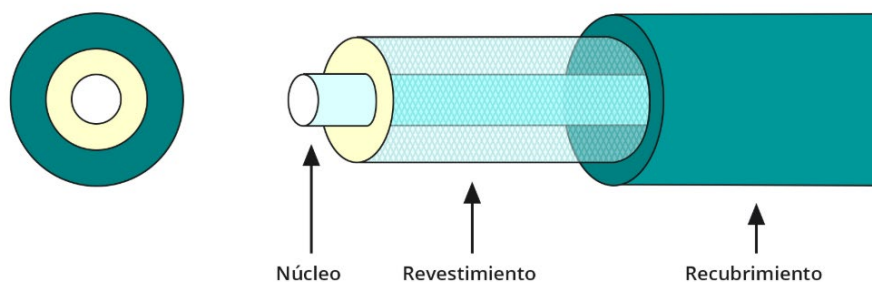


Figura 2. Componentes de la Fibra óptica [5].

Normalmente se usan dos tipos de fuentes de luz para crear las señales: los LED, que son diodos emisores de luz, y los láseres semiconductores. Estas fuentes tienen diferentes características, identificadas principalmente por la longitud de onda que se necesite, para lo

cual se colocan interferómetros Fabry-Perot o Mach-Zehnder entre la fuente y la fibra. Los interferómetros Fabry-Perot son cavidades resonantes sencillas que están formadas por dos espejos paralelos. La luz llega a los espejos perpendicularmente. La longitud de la cavidad permite que ciertas longitudes de onda entren dentro de un número entero de veces. Los interferómetros Mach-Zehnder dividen la luz en dos caminos, los cuales recorren distancias ligeramente diferentes. Luego, estos caminos se vuelven a unir en el final y solo están en fase para ciertas longitudes de onda.

2.2.3 Tipos e identificación de la fibra óptica

La fibra óptica tiene características especiales que la hacen única, por eso se han creado varios tipos según diferentes factores, como la longitud de onda que usa, el índice de refracción, cómo se transmite la luz, los materiales que se usan, la forma en que se fabrica o el diseño general.

2.2.3.1 Según longitud de onda

Las diferentes fibras ópticas se diferencian según las longitudes de onda que pueden transmitir. Hay tres longitudes principales, también llamadas «ventanas de trabajo»: 850 nm (la primera ventana), 1300 nm (la segunda ventana) y 1550 nm (la tercera ventana).

La atenuación de la luz que pasa por el vidrio depende de la longitud de onda de la luz (así como de algunas propiedades físicas del vidrio). Se define como la relación entre la potencia de la señal de entrada y la de salida. Para el tipo de vidrio que se utiliza en las fibras ópticas, la atenuación se muestra la Figura 3.

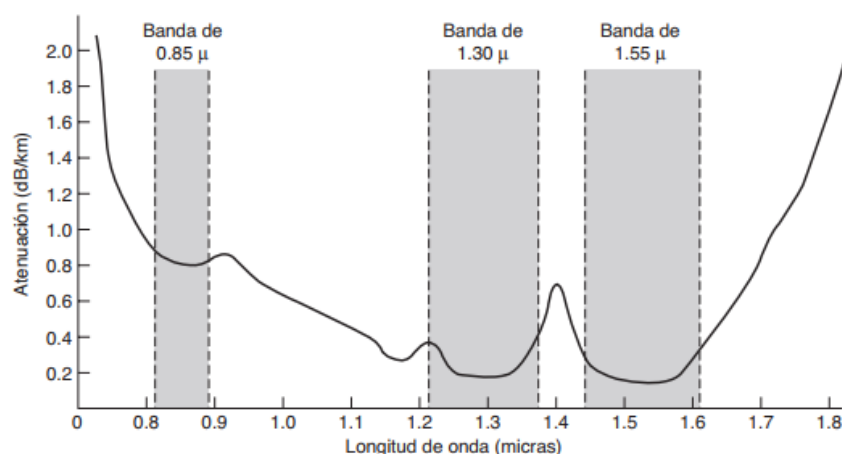


Figura 3. Ventanas de trabajo de la Fibra Óptica [6]

2.2.3.2 Según distribución del índice de refracción

La identificación de la fibra óptica se puede realizar en función del índice de refracción, que es cómo se compara la velocidad de la luz en el espacio vacío con la velocidad de la luz dentro de un material. Según esta clasificación existen dos tipos de fibra: la fibra con índice escalonado y la fibra con índice gradual.

- **Fibra de índice escalonado**

En este caso, el índice de refracción en el núcleo es igual en toda su extensión y es más alto que el del revestimiento. La fibra de múltiples modos con índice escalonado puede tener problemas de distorsión modal. Este tipo de fibra es más barato.

- **Fibra de índice gradual**

El índice de refracción del núcleo varía de forma suave y fluida (no abrupta). A pesar de ello, el valor en toda la distribución del núcleo es mayor que en el revestimiento (cuyo índice de refracción sí que es constante). El índice más alto se ubica en el centro de la fibra. Respecto a la fibra de índice escalonado, este presenta poca distorsión modal, permite un ancho de banda de entre 200 MHz/km y 600 MHz/km. Sin embargo, tiene poca eficiencia de acoplamiento de luz, y es más costosa.

2.2.4 Parámetros de transmisión en fibra óptica

2.2.4.1 Ancho de banda

El ancho de banda de una fibra óptica indica cuánta información puede enviarse en un momento determinado. Este parámetro se ve afectado por cómo se dispersa la luz y por el estado de calidad de la fibra. Las fibras de mejor calidad pueden manejar más ancho de banda, lo que permite enviar datos a velocidades más rápidas.

2.2.4.2 Longitud de onda

La longitud de onda de la luz que se usa para transmitir información también es un dato muy importante. Las ondas de diferentes longitudes pueden perder intensidad y dividirse de forma diferente, lo que influye en la elección de la longitud adecuada para cada tipo de comunicación. Estos parámetros son esenciales para crear, poner en marcha y cuidar los sistemas de comunicación que usan fibra óptica, garantizando que cumplan con los requisitos de funcionamiento necesarios para las aplicaciones actuales.

2.2.4.3 Potencia de la señal

La potencia de la señal en sistemas de comunicación óptica, identifica la energía de la luz que se envía en un tiempo determinado, y se mide en watts (W) o milivatios (mW). Esta medida es muy importante para garantizar que la transmisión de datos sea clara y en los niveles adecuados. Normalmente se usa una escala llamada decibelios-milivatios (dBm), donde 0 dBm representa 1 mW. Se busca un buen equilibrio entre la potencia que se envía (Tx) y la que se recibe (Rx), para que sea suficiente pero no demasiado alta, evitando así problemas como la pérdida o la distorsión de la señal [5].

2.2.4.4 Codificación

Las señales eléctricas que transportan distintas formas de información son buscadas cuando se transforman en señales ópticas para enviarlas, y luego se interpretan en el receptor óptico, donde vuelven a convertirse en señales eléctricas. Los tipos de codificación más utilizadas en el dominio óptico son: no retorno a cero (NRZ) y retorno a cero (RZ).

2.2.4.5 Tasa de Bits errado (BER)

La tasa de bits errados (BER) es igual a la tasa de bits errados en un total de bits transmitidos, los valores de BER de 10^{12} son características de la Red Óptica Sincrónica (Sonet) y 10^{15} para redes de DWDM, el valor 10^{15} representa 1 bit errado en 10^{15} bits transmitidos. [5]

2.2.4.6 Ruido

El ruido se presenta en sistemas ópticas que incluyen procesos de aplicación. El OSNR (relación señal ruido óptico) especifica la razón entre la potencia neta de la señal y la potencia neta del ruido.

2.2.4.7 Atenuación

La atenuación es la pérdida de fuerza de la señal óptica al recorrer la fibra y se mide en decibeles (dB). Cuanto mayor sea esta pérdida, más corto será el tramo que se puede usar [7].

Esta pérdida puede ocurrir debido a dos tipos de causas: internas y externas. Los factores intrínsecos son aquellos que tienen que ver con la forma en que se fabrica la fibra, como la presencia de impurezas en el material, formas geométricas incorrectas del núcleo o materiales que absorben o reflejan parte de la luz.

Los factores extrínsecos son problemas que se añaden después, como fallos en la instalación, curvaturas grandes o pequeñas, conexiones mal hechas, suciedad en los conectores o empalmes, dispositivos como splitters o atenuadores, entre otros. Todos estos elementos van reduciendo la fuerza de la señal [8].

2.2.4.8 Dispersión y Efectos no lineales

La dispersión es el efecto que ocurre cuando los pulsos de luz que viajan por una fibra óptica se expanden porque las diferentes partes del pulso se mueven a velocidades distintas. Esto hace que lleguen al receptor en tiempos diferentes, lo que puede causar retrasos y pérdida de información [8].

Este efecto hace que sea difícil distinguir entre los pulsos, especialmente cuando se envía la señal a largas distancias, lo que reduce la cantidad de datos que se pueden enviar y puede causar problemas al transmitir información.

- **Dispersión Modal**

Efecto que aparece específicamente en las fibras multimodo, donde la luz se mueve por varios caminos o “modos” dentro del núcleo de la fibra. Cada camino tiene una distancia diferente en su recorrido, lo que hace que la luz llegue al final de la fibra en momentos distintos, y presente como un desfase óptico [8].

- **Dispersión Cromática**

Sucede cuando las diferentes longitudes de onda de la luz viajan a velocidades distintas dentro de la fibra. Esto es frecuente incluso en fibras de un solo modo y se debe a los materiales que conforman la fibra así como a su forma geométrica.

- **Dispersión por Modo de Polarización (PMD)**

Esta forma de dispersión se genera por imperfecciones o asimetrías en la fibra, lo que hace que diferentes estados de polarización de la luz se propaguen a velocidades distintas.

En el caso de la no linealidad en fibra óptica se refiere a fenómenos que ocurren cuando la intensidad de la señal óptica es lo suficientemente alta como para que las propiedades de la fibra dependan de esa intensidad, en lugar de ser una respuesta lineal y predecible [7]. Estos efectos son cruciales en las comunicaciones por fibra óptica, ya que pueden causar degradación de la señal. Una clasificación de estos efectos se presenta en la Figura 4.

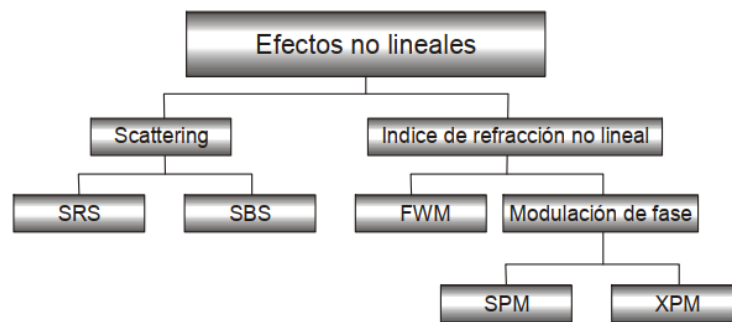


Figura 4. Clasificación de los efectos no lineales presentes en la Fibra Óptica [7]

Modulación de Fase Inducida (SPM): Se presenta debido a que una parte del índice de refracción de la fibra depende de la intensidad de la señal; este índice no lineal causa un desplazamiento de fase que está en proporción con la intensidad del pulso. Por esta razón, las diferentes partes del pulso experimentan cambios de fase distintos, lo que genera un “chirp” en el pulso [7][8].

Modulación de Fase Cruzada (XPM): Se forma cuando dos o más canales ópticos se envían al mismo tiempo por la fibra óptica, usando la técnica WDM, porque el índice de refracción que experimenta una onda no solo depende de su propia intensidad, sino también de la intensidad de otras ondas que viajan junto con ella en el mismo canal, debido a cómo se afectan entre sí.

Mezcla de Cuarta Onda (FWM): Cuando dos o más señales de luz con frecuencias diferentes (canales WDM distintos) viajan por una fibra óptica, pueden mezclarse y formar nuevos efectos de interferencia en la señal; esto sucede porque el material de la fibra cambia su comportamiento al interactuar con la luz, lo que provoca un tipo de propagación que no sigue una línea recta.

IXPM e IFWM: El IXPM y el IFWM se generan principalmente en enlaces que utilizan fibra de alta dispersión, como el SSMF, y son especialmente relevantes para tasas de transmisión de 40 Gb/s o más alta. Este efecto se nota más claramente en señales con modulación de amplitud, produciendo un pulso falso en el tiempo asignado, donde se envía un 0[7].

Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS): La dispersión estimulada de Brillouin aparece con niveles de potencia de entrada más bajos que los requeridos para que se manifieste la dispersión estimulada de Raman. Este fenómeno no lineal, al igual que la SRS, se produce por la generación de una onda conocida como onda de Stokes, la cual se propaga

en sentido contrario al de la onda incidente y posee una frecuencia inferior a la de la luz original.

Dispersión Estimulada de Raman (SRS): La luz de mayor frecuencia puede ceder parte de su energía a la luz de menor frecuencia, lo que provoca un deterioro de la señal en sistemas que utilizan varias longitudes de onda (WDM).

2.2.5 Parámetros de medición en fibra óptica

2.2.5.1 Factor Q

El Factor Q es una medida que indica qué tan buena es la señal en un sistema de comunicaciones ópticas digitales. Permite estimar la tasa de error de bits (BER) sin tener que medir los errores uno por uno.

Según literatura técnica sobre sistemas ópticos, el factor Q:

- Evalúa la mínima OSNR necesaria para alcanzar una BER específica.
- Se calcula a partir de la diferencia entre los niveles medios de “1” y “0” y la suma de sus desviaciones estándar.
- Es ampliamente utilizado en herramientas como OptiSystem, que implementan el cálculo mediante la expresión clásica:

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3)$$

Donde:

μ_1, μ_0 = niveles medios de potencia para bits 1 y 0

σ_1, σ_0 = desviaciones estándar (ruido)

Interpretación:

- $Q > 6$ significa $BER \approx 10^{-9}$ (buena calidad)
- Q entre 3 y 6 significa sistema degradado
- $Q < 3$ significa BER inaceptable

2.2.5.2 Diagrama de Ojo

El diagrama de ojo es una representación temporal de múltiples símbolos superpuestos. Permite evaluar visualmente:

- Ruido
- Jitter
- Distorsión por dispersión
- Penalizaciones no lineales

2.2.6 Red Óptica Pasiva

Una red de fibra óptica PON (Passive Optical Network) es una tecnología de acceso de banda ancha que utiliza una infraestructura de fibra formada únicamente por elementos pasivos en todo el trayecto entre la central y los usuarios finales, sin necesidad de equipos activos intermedios[7].

Los elementos principales que la constituyen son:

- Terminal óptica (OLT) ubicada en la central,
- Divisor pasivo(splitter) que divide la señal óptica en varias señales, ubicada en las cajas NAP de distribución, y
- Unidad de red óptica (ONU) ubicada en el domicilio del usuario

La estructura básica de la red óptica pasiva (PON), en la modalidad según los estándares, así como la estructura PON más común en redes reales, se muestra en la Figura 4.

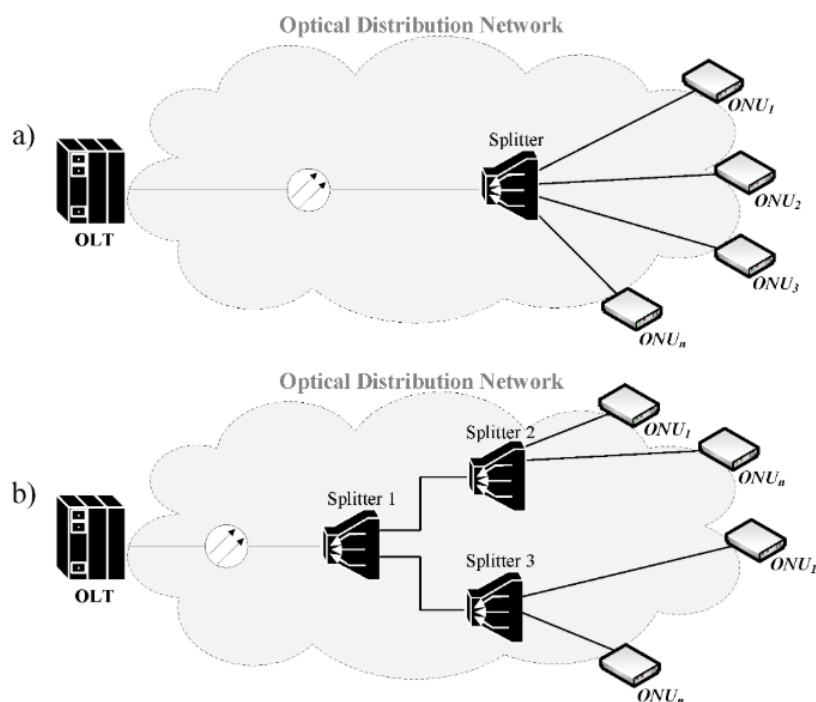


Figura 5. Esquemas de arquitecturas de fibra óptica [6]

Desde la central local sale una red principal de fibras ópticas que, al pasar por distintos multiplexores, se divide en varias ramificaciones. Estas ramificaciones se comunican en ambos sentidos con la red principal, pero no entre sí [6][7].

- En el sentido descendente (downstream), la señal enviada desde la central se reparte entre todos los usuarios y mantiene un nivel de potencia constante.

- En el sentido ascendente (upstream), la transmisión desde los usuarios hacia la central se realiza en forma de ráfagas, es decir, cada usuario dispone de un intervalo de tiempo asignado para enviar sus datos. Este esquema de acceso se conoce como TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo, *Time Division Multiple Access*).

2.2.7 Multiplexación en Fibra Óptica

La multiplexación óptica, conocida como WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), es una técnica que permite transmitir simultáneamente varias señales a través de una única fibra óptica utilizando distintos colores de luz, cada uno asociado a una longitud de onda diferente. Estas señales se generan a partir de fuentes luminosas como láseres o LED. Gracias a este método, se aprovecha de manera más eficiente el amplio ancho de banda disponible en la fibra óptica, posibilitando el envío de diferentes tipos de información al mismo tiempo sin que interfieran entre sí[4].

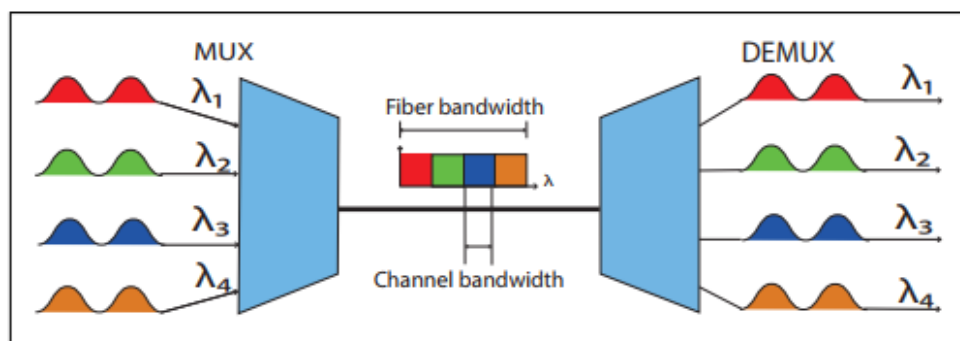


Figura 6. Multiplexación por división de longitud de onda [8]

El mecanismo de WDM es una tecnología técnicamente compleja, pero con una idea bastante sencilla: combinar múltiples rayos de luz y generar un único rayo de luz, a través de un dispositivo llamado multiplexor y hacer la operación inversa en un demultiplexor. Combinar y dividir haces de luz se resuelve fácilmente con un prisma [4].

Variantes de multiplexaciones ópticas

- CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)
- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

2.2.2 CWDM

CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*), o multiplexación por división en longitudes de onda amplias, es una técnica de transmisión sobre fibra óptica que forma parte de la familia WDM. Esta tecnología comenzó a utilizarse a inicios de la década de 1980 para el transporte de señales de video (CATV) a través de fibras multimodo[8].

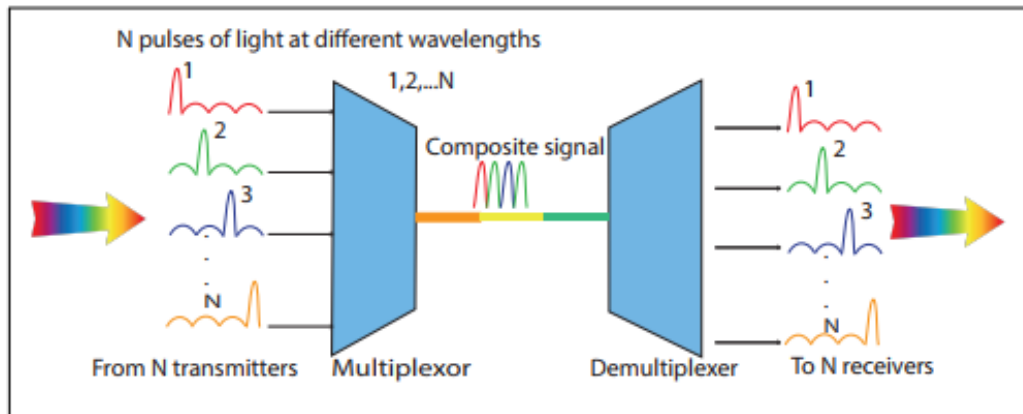


Figura 7. Multiplexación por división de longitud de onda ligera [8]

La CWDM está diseñada especialmente para zonas metropolitanas, ofreciendo una alta capacidad de ancho de banda a un costo mucho más bajo. Esto se debe a que utiliza componentes ópticos menos complejos, con una capacidad y distancia limitadas, lo que la hace más competitiva para aplicaciones a corta distancia. Al contar con un menor número de canales, más ampliamente espaciados, se adapta mejor a distancias cortas y medianas, además de tener un costo de implementación más reducido.

2.2.2.1 Características

- El espaciamiento entre canales es de 2 500 GHz (equivalente a 20 nm), lo que permite emplear láseres con una mayor anchura espectral.
- Se pueden combinar entre 8 y 18 canales ópticos-longitudes de onda, definidas en el rango de 1270 a 1610 nm
- Soporta velocidades de alrededor de 2,5 Gbps.
- Permite redes de hasta 80 km de alcance.
- Se utilizan láseres específicos, como el DBF (láseres de realimentación distribuidos) que no poseen peltier ni termistor.
- Usa filtros ópticos de banda ancha, multiplexores y demultiplexores basados en TFF (tecnología de película delgada).
- Un mayor espaciamiento entre las longitudes de onda, lo que significa que, si hay alguna variación en la onda central debido a imperfecciones en los láseres causadas por procesos de fabricación menos estrictos, esta onda seguirá dentro de la banda permitida.

- Permite un espectro óptico más amplio, lo que brinda la posibilidad de utilizar un mayor número de canales sin que estos se reduzcan por la distancia entre ellos.

2.2.3 DWDM

DWDM significa Multiplexación por división densa de longitudes de onda, e identifica una técnica de transmisión de señales a través de fibra óptica usando la banda C (1550 nm), mediante las que se transporta múltiples señales de luz en un solo cable, utilizando portadoras ópticas de diferente longitud de onda. Es decir, utiliza un gran número de canales estrechamente espaciados para aumentar la capacidad de la red. Es ideal para largas distancias y redes troncales. Esta técnica de multiplexación es una forma de FDM (Multiplexación por División en Frecuencia).

Los equipos DWDM adquieren varias señales de datos y las transforman en haces de luz láser, cada uno funcionando en una frecuencia un poco diferente dentro del espectro infrarrojo. Estas luces, separadas por apenas 0.8 nanómetros (o incluso menos en sistemas más modernos), viajan al mismo tiempo sin mezclarse, como si fueran instrumentos en una orquesta que tocan notas distintas sin causar desorden. Pudiera hacerse el símil a un rayo de luz del arcoíris, lo que en longitudes de onda no visibles al ojo humano. Cuando llegan al lugar destino, un demultiplexor vuelve a separar esas longitudes de onda, entregando cada señal al receptor adecuado.

Los sistemas DWDM actuales pueden gestionar entre 40 y 96 canales, aunque las implementaciones más avanzadas superan los 160 canales por fibra. Si se considera que cada canal puede transmitir 100 Gbps o más, las capacidades totales que superan los 10 Terabits por segundo en una sola hebra de vidrio del grosor de un cabello humano [8]. Este aspecto se puede inferir de la Figura 8, donde el haz de luz coloreado y grueso da la idea de que puede transmitir una gran cantidad de servicios simultáneamente como, por ejemplo, voz, video y datos.

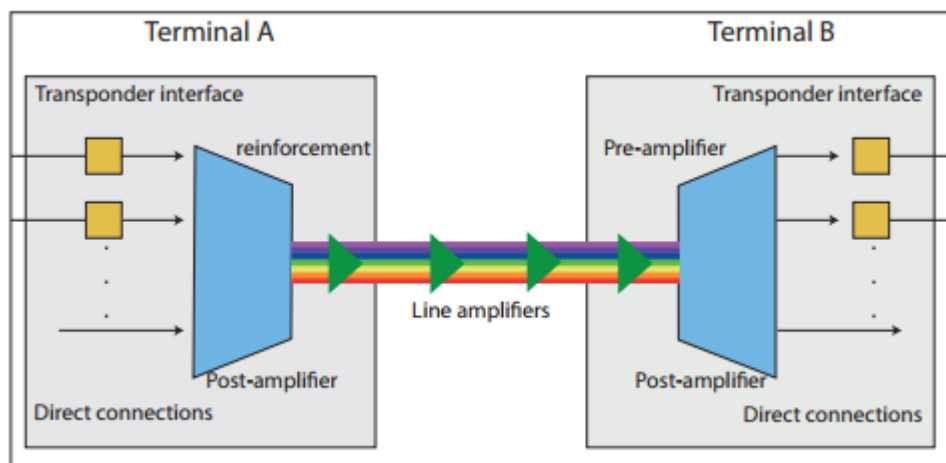


Figura 8. Multiplexación por división de longitud de onda densa [8]

2.2.3.1 Características

- **Alta densidad de canales:** DWDM puede empaquetar hasta 96 o más canales en una sola fibra óptica, gracias al uso de longitudes de onda muy juntas. Esto permite transmitir un mayor volumen de datos y aprovechar al máximo la infraestructura de fibra existente [8]
- **Transmisión de larga distancia:** Es ideal para redes metropolitanas y de larga distancia porque utiliza amplificadores ópticos avanzados y tiene bajas pérdidas de señal. Esto permite transmitir datos a través de tramos de fibra más largos sin necesidad de convertir la señal de luz a eléctrica [7][8].
- **Eficiencia espectral:** Al permitir transmitir más canales por una misma fibra, DWDM aumenta la eficiencia del espectro, lo que significa que los operadores pueden aprovechar mejor el ancho de banda disponible de la fibra óptica.
- **Espaciado de longitud de onda:** Los canales se colocan muy juntos, con separaciones típicas de 0,8 nm, 0,4 nm o incluso 0,2 nm. La configuración exacta se establece siguiendo la recomendación ITU-T G.694.1.
- **Uso de la banda C:** La mayoría de los sistemas DWDM funcionan en la banda C (1525–1565 nm) del espectro óptico, ya que es la zona con menor atenuación, lo que asegura un rendimiento óptimo de la transmisión.

2.2.4 UDWDM

UDWDM (*Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing*) es una tecnología que mejora la eficiencia espectral en redes de fibra óptica al reducir el espacio entre los canales de longitud de onda. Aunque su implementación requiere equipos más complejos, esta

dificultad se compensa con la capacidad de transmitir un mayor número de canales, llegando hasta 1 022 longitudes de onda por fibra. Además, estos sistemas pueden cubrir distancias de hasta 100 km y operar en las bandas C, S o L [9].

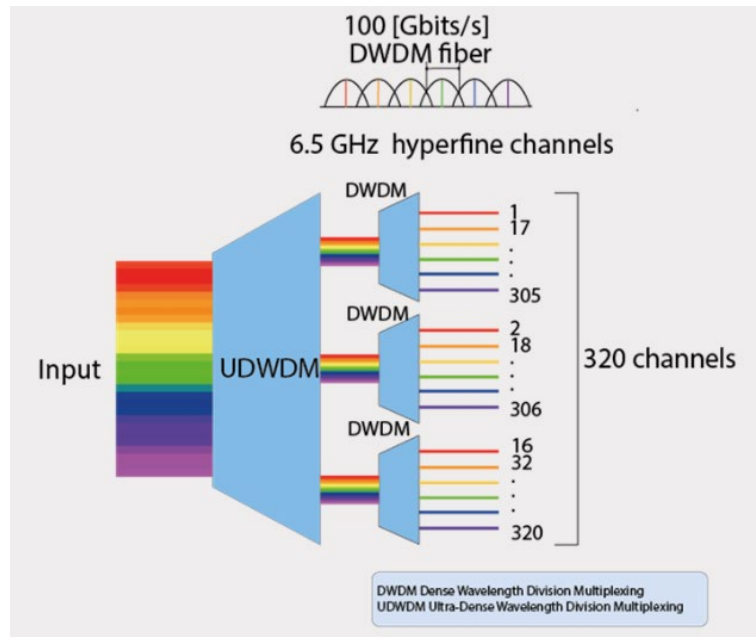


Figura 9. Representación de la Multiplexación por división ultra densa de longitud de ondas [8]

Es una de las tecnologías más actuales para redes de acceso y se basa en WDM PON. Aprovecha mejor un solo canal de fibra óptica, logra ahorros de costos y mejora la eficiencia espectral en un sistema de comunicación [9].

2.2.4.1 Características clave de UDWDM

- **Espaciado de canal reducido:** UDWDM reduce el espaciado entre los canales WDM a 10 GHz o menos, lo que permite un aumento considerable en el número de señales transmitidas en comparación con DWDM tradicional [9].
- **Mayor eficiencia espectral:** Al disminuir los espacios de guarda entre canales, UDWDM aumenta la eficiencia en el uso del espectro óptico disponible
- **Mayor capacidad de transmisión:** UDWDM permite implementar redes ópticas con mayor capacidad de ancho de banda y velocidades de transmisión más altas para soportar la creciente demanda de los usuarios
- **Implementación y mantenimiento más económicos:** La mayor eficiencia espectral de UDWDM permite un uso más eficiente de la infraestructura de fibra óptica existente [9].

2.2.4.2 Ventajas

- Mejora considerablemente la capacidad de transferencia de datos entre dos puntos en la red de fibra óptica. Esto se debe principalmente a la capacidad de enviar varias señales dentro de una sola y a las altas velocidades de transmisión que puede soportar.
- Permite transportar cualquier tipo de señal en cada canal óptico. De esta forma, sin necesidad de una estructura común para transmitir las señales, se pueden utilizar distintas longitudes de onda para enviar información síncrona, analógica o digital, por medio de la misma fibra [9].
- Permite aprovechar la longitud de onda como una dimensión adicional, junto con el tiempo y el espacio, en el diseño de redes de comunicación.

2.2.4.3 Desventajas

- Los componentes ópticos son más sofisticados debido a la necesidad de utilizar filtros ópticos, y láser que soporte una tolerancia a longitudes de onda compactas. Es por ello que dicha tecnología tiene un precio más elevado.
- Un dispositivo externo de acoplamiento es usado para acoplar la mezcla de las diferentes señales ópticas. Tiene menor espacio para una tolerancia con respecto a la dispersión de las longitudes de onda [9].

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de Investigación

El presente proyecto de investigación consiste en la simulación de una red UDWDM y la variación de los parámetros de transmisión para evaluar el impacto sobre el ancho de banda disponible. La investigación, se compone de:

- **Investigación Documental:** El proyecto se centra en recopilar información sobre trabajos relacionados con los parámetros y características clave de la tecnología UDWDM, tomando como referencia tesis, artículos científicos e informes de organismos reguladores de telecomunicaciones. A partir de este análisis, se definirán criterios técnicos, como la capacidad de ancho de banda, el número de canales y su espaciamiento, la distancia de transmisión y la eficiencia espectral, así como parámetros de rendimiento, incluyendo la tasa de error de bits y la latencia, que servirán de base para la simulación posterior.
- **Investigación Experimental:** Se realizan una serie de simulaciones dentro del programa de redes ópticas OPTISYSTEM para analizar el comportamiento de los parámetros de transmisión del sistema óptico

3.2 Métodos de la Investigación

Los métodos e instrumentos empleados para alcanzar los objetivos y resultados de la presente investigación se describen a continuación:

- **Fuentes de información**

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, sustentado en un estudio bibliográfico que permite identificar, analizar y comprender las características fundamentales de un sistema de comunicaciones UDWDM-PON. Esta revisión teórica proporciona el marco conceptual necesario para interpretar los resultados obtenidos en las simulaciones.

- **Instrumentos**

Para el desarrollo del proyecto se emplea el software especializado OptiSystem, herramienta que permite diseñar y simular la arquitectura de la red y evaluar el comportamiento de un sistema de comunicación UDWDM-PON. A través de este entorno se analizan parámetros clave y se observan los efectos generados por diferentes configuraciones y condiciones de operación.

- **Observación**

Se aplican técnicas de observación sistemática para examinar y evaluar los resultados experimentales obtenidos en las simulaciones. Este proceso facilita una interpretación precisa de los parámetros analizados y contribuye a validar el comportamiento del sistema bajo estudio.

3.3 Escenario de Pruebas

En el presente proyecto de investigación se desarrolla el diseño, la simulación y el análisis de los efectos lineales presentes en una red UDWDM, con el objetivo de evaluar la calidad del enlace óptico mediante la medición de parámetros como el BER, la potencia de transmisión (TX), la potencia de recepción (RX), el OSNR, entre otros indicadores relevantes.

Para ello, se implementa un conjunto de simulaciones en OptiSystem, en las cuales la distancia del enlace se varía desde 5 km hasta 100 km, con incrementos de 5 km. Esta variación progresiva permite analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de atenuación y dispersión, identificando los límites operativos y el desempeño del esquema UDWDM en escenarios de corta, media y larga distancia.



Figura 10. Esquema de actividades del escenario de pruebas

Primeramente, se lleva a cabo la planificación del tiempo requerido para cumplir todos los objetivos del estudio. En la segunda etapa se recopila información sobre redes ópticas UDWDM, así como sobre los efectos lineales presentes durante la transmisión de información en este tipo de sistemas. Una vez identificadas las características más relevantes

y los elementos que conforman estas redes, se procede a la tercera etapa, correspondiente al diseño de la red de comunicación basada en multiplexación UDWDM, considerando los parámetros establecidos en la investigación bibliográfica.

Luego se realiza la simulación de la red diseñada utilizando el software especializado OptiSystem. En la quinta etapa se ejecutan pruebas dentro del simulador, variando distintos parámetros de la red y evaluando su comportamiento a medida que se incrementa la distancia de transmisión. Finalmente, se lleva a cabo un análisis de los resultados obtenidos en cada simulación y se realiza una comparativa con una red DWDM.

3.4 Hipótesis

3.4.1 Hipótesis de Investigación H_i

¿Los parámetros de transmisión como la distancia y potencia de transmisión afectan de forma considerable el ancho de banda resultante en una red UDWDM?

3.4.2 Hipótesis Nula H_0

¿Los parámetros de transmisión como la distancia y potencia de transmisión no afectan de forma considerable el ancho de banda resultante en una red UDWDM?

3.5 Operacionalización de Variables

Tabla 1. Variables de estudio

Variables	Tipo	Descripción	Indicador	Instrumento de medición
Distancia	Independiente	Longitud física que separa el transmisor del receptor a través del cable de fibra.	km	OptiSystem
BER, FactorQ	Dependiente	Rango específico para garantizar un buen rendimiento de la transmisión.	-	OptiSystem

3.6 Población y Muestra

3.6.1 Población

La población se define en función del conjunto total de datos generados durante las simulaciones, las cuales consisten en pruebas con características aleatorias según los distintos parámetros de atenuación presentes en el sistema de transmisión de señales. Es importante señalar que esta población tiende a ser infinita, ya que es posible ejecutar un número ilimitado de simulaciones. No obstante, de acuerdo con la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T) y su documento “Consideraciones de diseño e ingeniería de

sistemas ópticos”, es posible utilizar como referencia los parámetros de ajuste establecidos para las pruebas en una red DWDM, los cuales señalan lo siguiente:

- Es necesario la realización de pruebas con penalización de potencia equivalente a: 0.5, 1 y 2.
- Velocidad Binaria NRZ sin fluctuación: 2.5 Gbits/s.
- Distancias de simulación: 5 Km, 10 Km, 15 Km, 20 Km, 25 Km, 30 Km, 35 Km, 40 Km, 45 Km, 50 Km, 55 Km, 60 Km, 65 Km, 70 Km, 75 Km, 80 Km, 85 Km, 90 Km, 95 Km, 100 Km.

Tomando en cuenta estos parámetros, la población obtenida sería de:

$$3 \text{ penalizaciones} \times 20 \text{ distancias} \times 3 \text{ repeticiones} = 180 \text{ pruebas}$$

3.6.2 Muestra

Para garantizar un análisis adecuado de las condiciones que afectan a las señales transmitidas en sistemas UDWDM y evaluar correctamente el impacto de los efectos lineales en este tipo de comunicaciones, es fundamental trabajar con una muestra que ofrezca un nivel de confianza elevado. En este estudio se ha seleccionado un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, lo que determina un tamaño de muestra de 180 simulaciones para el desarrollo del proyecto.

Utilizando la fórmula de poblaciones finitas:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p(1 - p)}{Z^2(N - 1) + E^2 \cdot p(1 - p)} \quad (4)$$

Donde:

N= tamaño de la población = 180

Z=nivel de confianza del 95% = 1.96

p= máxima variabilidad = 0.5

E= margen de error del 5% = 0.05

En este caso la población es grande, por lo que la fórmula converge hacia el tamaño de una población infinita, reduciéndose la ecuación a:

$$n_{\infty} = \frac{Z^2 \cdot p(1-p)}{E^2} = \frac{3.8416 \cdot 0.25}{0.0025} = 384$$

3.7 Diseño de Sistema Óptico

El diseño de la red UDWDM requiere un análisis riguroso de las pérdidas de potencia y la integridad espectral. Para ello, el dimensionamiento del sistema integra el balance óptico frente a la técnica de saltos de frecuencia, considerando la arquitectura de 8 fuentes de datos independientes (una por canal). La validación del modelo se realiza mediante simulaciones en un rango de 5 a 100 km, con incrementos de 5 km, asegurando que la potencia y el ancho de banda por canal garanticen una transmisión óptima.

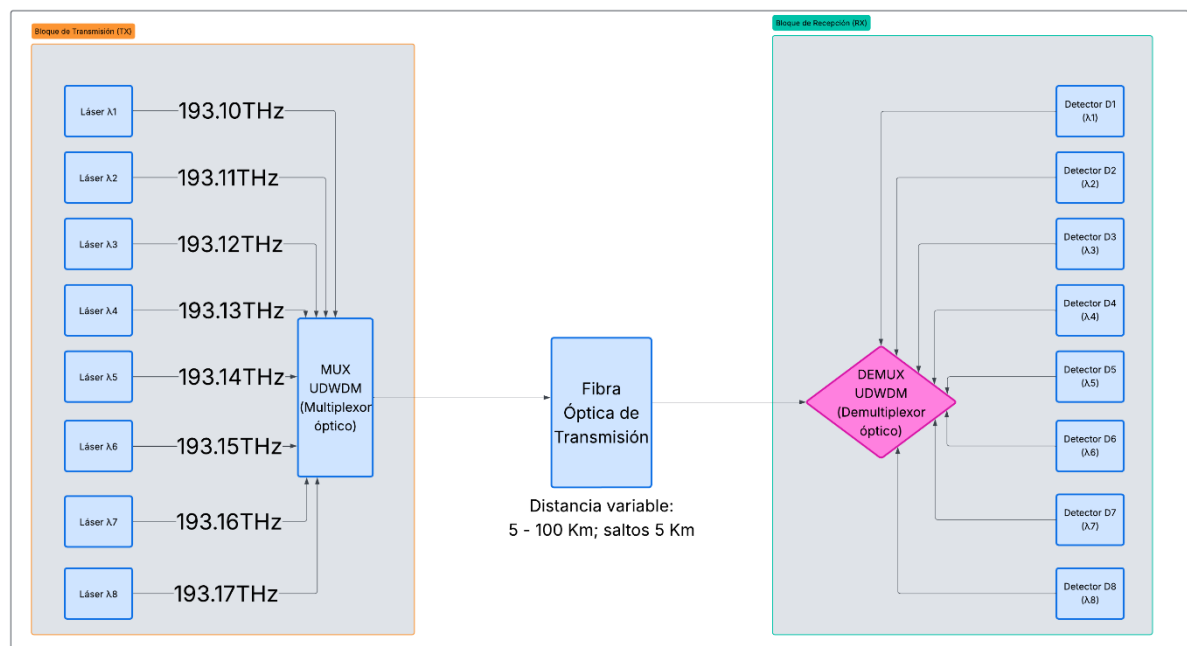


Figura 11. Esquema en bloques del diseño de simulación para los 8 canales

3.7.1 Componentes del sistema simulado

Para la transmisión de la señal óptica dentro del software OptiSystem se requieren de la integración de los siguientes elementos:

Generador de Datos

Este módulo posibilita la creación de datos pseudoaleatorios, permitiendo ajustar parámetros como la cantidad de bits por símbolo (nivel de la señal óptica), la tasa de baudios y la longitud de la secuencia a enviar. Esta última se alinea con la velocidad de transmisión del sistema, que en el caso de las bandas C y L se establece en 2.5 Gb/s.

Generador de Pulso NRZ:

Este módulo permite emular un generador de pulsos que convierte la señal proveniente del Generador de Datos en una señal eléctrica con dos niveles de tensión, definidos según el bit transmitido. Al tratarse de un generador de tipo no retorno a cero (NRZ), cuando se recibe un uno lógico, la salida adopta un nivel de tensión bajo durante la

duración del bit; en cambio, si el bit recibido es un cero lógico, la salida se mantiene en un nivel de tensión alto.

Láser de Onda Continua (CW):

Este módulo posibilita la implementación de un láser de onda continua, en el cual es posible ajustar la frecuencia central, pudiendo introducirse en unidades de THz o nm. Además, posibilita determinar la potencia de salida del láser, ya sea en mW o dBm. Para esta aplicación específica, se ha fijado en 2,5 dBm.

Modulador de Amplitud Mach – Zehnder:

Este dispositivo actúa como modulador tanto de amplitud como de fase, y permite detectar las variaciones de fase entre dos haces de luz. Su uso es habitual en sistemas WDM gracias a su amplio ancho de banda y a su adecuada respuesta en fase incluso en rangos de frecuencia del orden de los GHz. A través de este módulo se introduce la señal óptica continua (CW) junto con la señal eléctrica generada por el modulador NRZ, lo que posibilita transformar el haz de luz en trenes de pulsos que transportan la información proveniente del Generador Pseudoaleatorio.

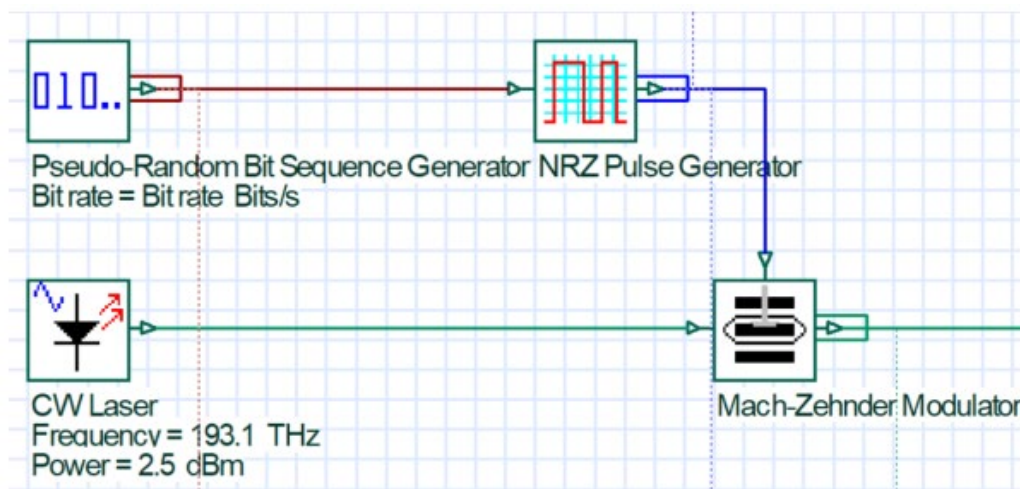


Figura 12. Bloques de Transmisión del Sistema Óptico

Tras definir el Canal Primario, se duplican los módulos necesarios y se asigna a cada láser óptico la longitud de onda que le corresponde, hasta completar los ocho canales contemplados en el diseño. Posteriormente, las señales generadas por cada modulador Mach–Zehnder se integran para realizar la multiplexación. Para ello se emplea un multiplexor WDM 8x1, donde se ajustan las frecuencias de cada canal con el fin de obtener la señal combinada. En la Figura 13 se muestra el esquema de bloques que representa el proceso de multiplexación de los ocho canales.

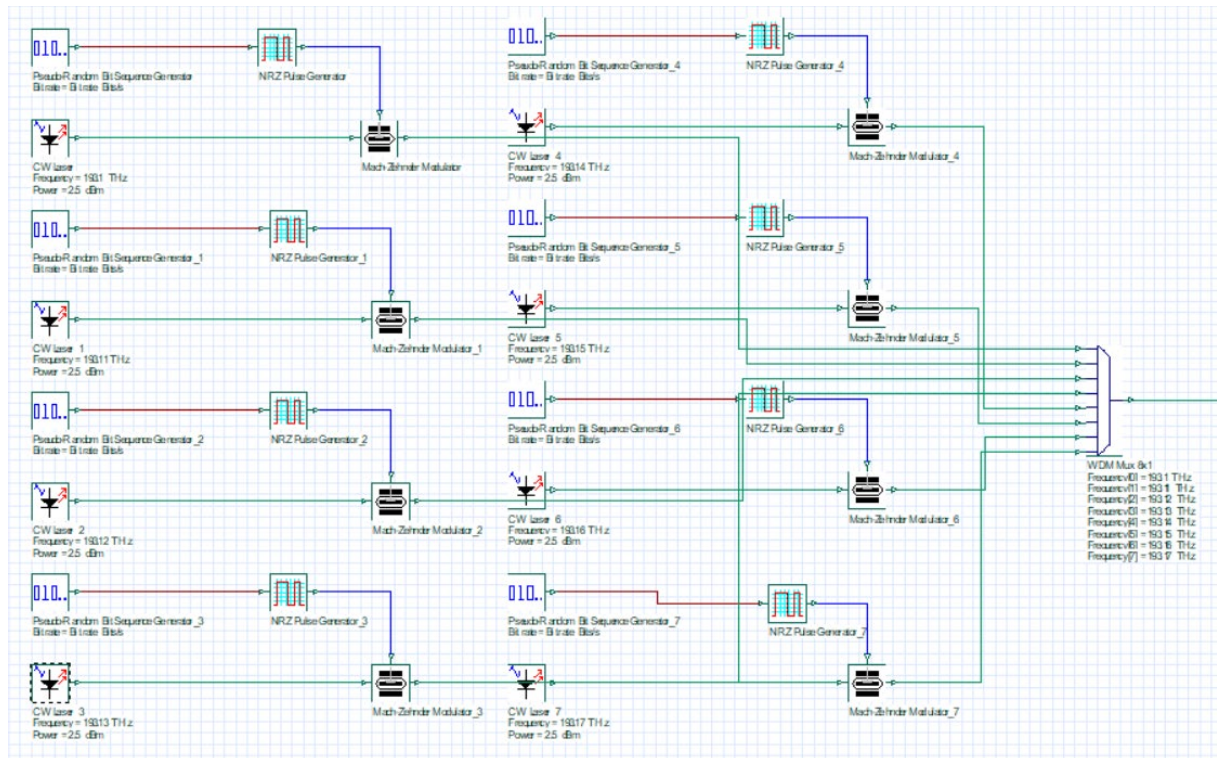


Figura 13. Esquema del Sistema de Transmisión Multiplexado por WDM

Es necesario incorporar un filtro previo a la entrada del multiplexor con el fin de atenuar las señales y equilibrar sus niveles de potencia. Para ello, se emplea un filtro óptico gaussiano pasa banda en cada una de las salidas del modulador, configurado con la frecuencia central correspondiente a la longitud de onda asignada a cada canal. En la Figura 14 se presenta el diagrama de bloques donde se muestra la implementación de este filtro.

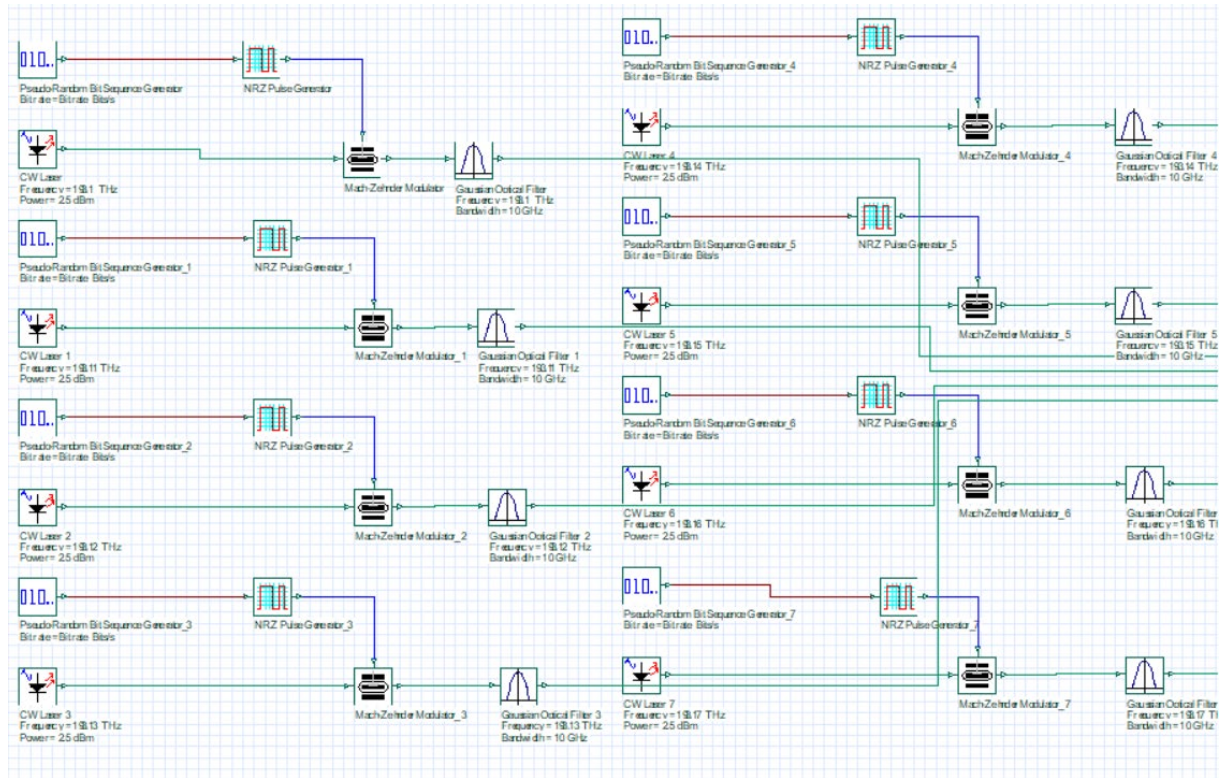


Figura 14. Etapa de transmisión con Filtro Gaussiano

Dado que el enlace más extenso, considerado en la simulación alcanza los 100 km, se optó por incorporar un amplificador óptico de 12 dB con el fin de compensar la pérdida de potencia de la señal y reducir tanto la atenuación como el OSNR en el punto de recepción. A continuación, se integra un demultiplexor 1x8 como parte del proceso de recepción, tal como se muestra en la Figura 15. Una vez separadas las señales, se emplean nuevamente un Analizador de Espectro Óptico y un analizador de señales WDM para evaluar las potencias recibidas a lo largo del enlace.

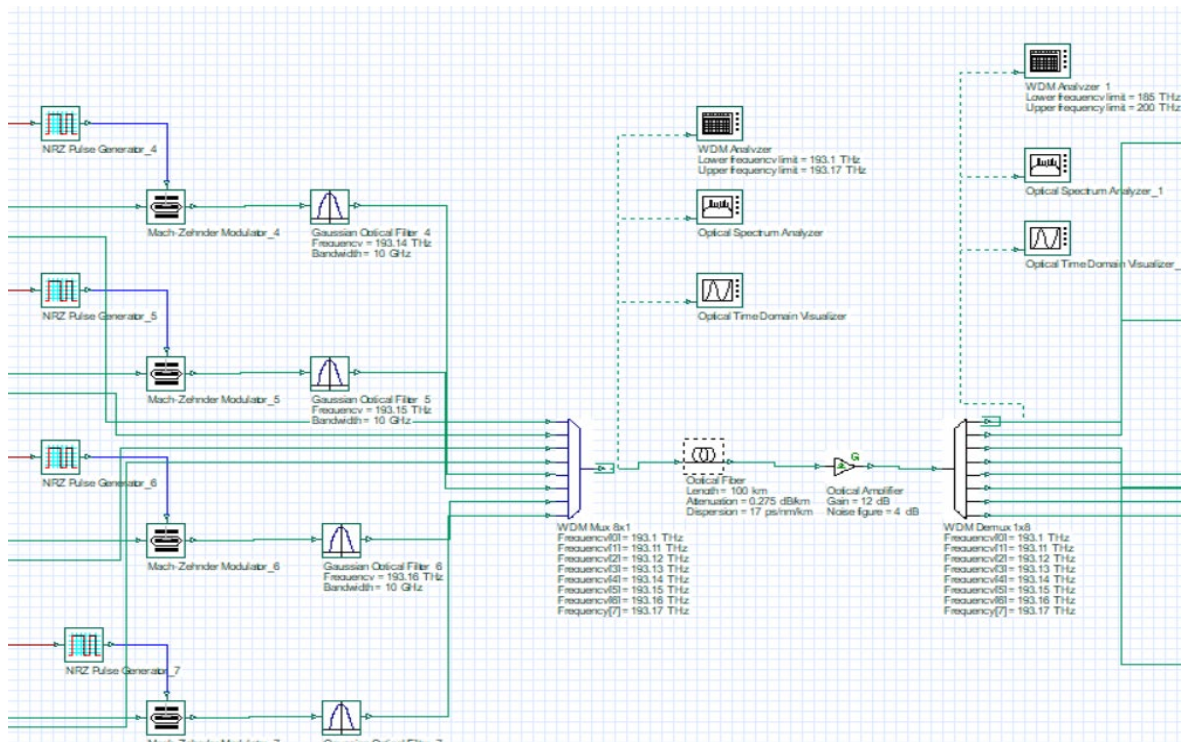


Figura 15. Etapa de Amplificación y Demultiplexación del Sistema

Para la fase de recepción de las señales demultiplexadas es necesario incorporar varios elementos que permitan recuperar los datos transmitidos a través del enlace óptico. A continuación, se describen los componentes requeridos para convertir las señales ópticas en señales eléctricas digitales:

Filtro Óptico Gaussiano:

Este filtro se utiliza para mitigar la interferencia entre canales adyacentes, ya que en un sistema UDWDM la separación entre longitudes de onda es de solo 10 GHz, lo que puede provocar solapamientos. Por ello, se ajusta la frecuencia de corte de cada filtro según la longitud de onda asignada a cada canal.

Fotodetector:

Su función consiste en transformar la señal óptica de cada canal en una señal eléctrica, lo que permite identificar los bits enviados desde la etapa transmisora.

Filtro Bessel Pasa Bajo:

Se incorpora un filtro eléctrico Bessel de tipo pasa bajo con el objetivo de minimizar el ruido introducido durante la transmisión. La frecuencia de corte se establece como 0.75 veces la tasa de bits del sistema.

Regenerador 3R:

Este módulo se encarga de procesar la señal eléctrica recibida, separando sus componentes de modulación para recuperar correctamente los bits transmitidos desde el inicio del enlace.

En la Figura 16 se presenta el conjunto de bloques que conforman la etapa de recepción del enlace óptico, los cuales deben implementarse para cada canal, tal como se muestra en la Figura 17.

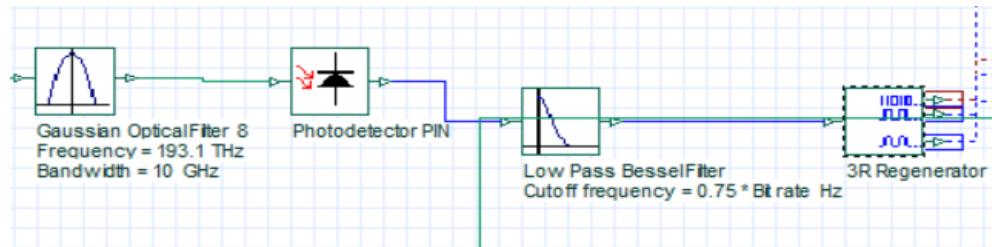


Figura 16. Etapa de Recepción y Conversión a Señal Eléctrica

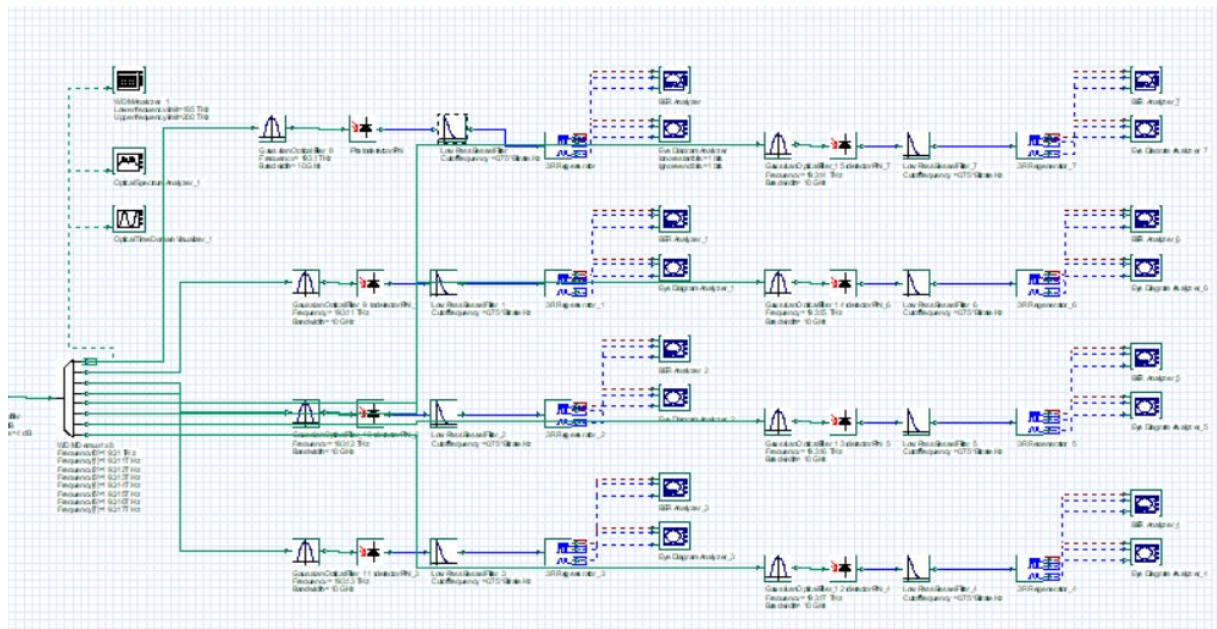


Figura 17. Etapa de Recepción del Sistema UDWDM de 8 Canales

Finalmente, para evaluar la calidad de la señal transmitida se incorpora el módulo BER Analyzer y Eye Diagram Analyzer, el cual permite examinar el comportamiento de la señal en recepción.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el presente trabajo, se diseña una simulación de una transmisión con 8 fuentes de datos, que tiene asignado cada una 1 canal diferente con su respectiva longitud de onda, en la banda C de operación (1530 a 1565 nm). El receptor recibe estas ocho señales ópticas UDWDM, separadas por 10 GHz entre sus frecuencias. Para evaluar los efectos lineales, se ha decidido realizar las pruebas de calidad de enlace a una velocidad de transmisión de 2,5 Gb/s y con una potencia de señal de 2,5 dBm, cumpliendo con los requerimientos establecidos por la normativa de la UIT [3].

Tabla 2. *Tabla de frecuencias seleccionadas para cada canal*

Canal	Frecuencia (THz)	Longitud de onda (nm)
1	193.10	1552.52
2	193.11	1552.44
3	193.12	1552.36
4	193.13	1552.28
5	193.14	1552.20
6	193.15	1552.12
7	193.16	1552.04
8	193.17	1551.96

Se realiza el análisis del comportamiento del enlace para distancias desde 5 Km – 100 Km, en saltos de 5 Km.

4.1 Distancia 5 Km. Banda C para Fibra G.652. Potencia de transmisor de 2.5dBm

Para una distancia de 5 km, como se muestra en la Figura 18 y la Figura 19, la señal obtenida a la salida del demultiplexor, en la etapa de recepción del enlace óptico, presenta mayor potencia en el canal 1, disminuyendo progresivamente en los demás canales hasta alcanzar un valor de -31,9 dBm.

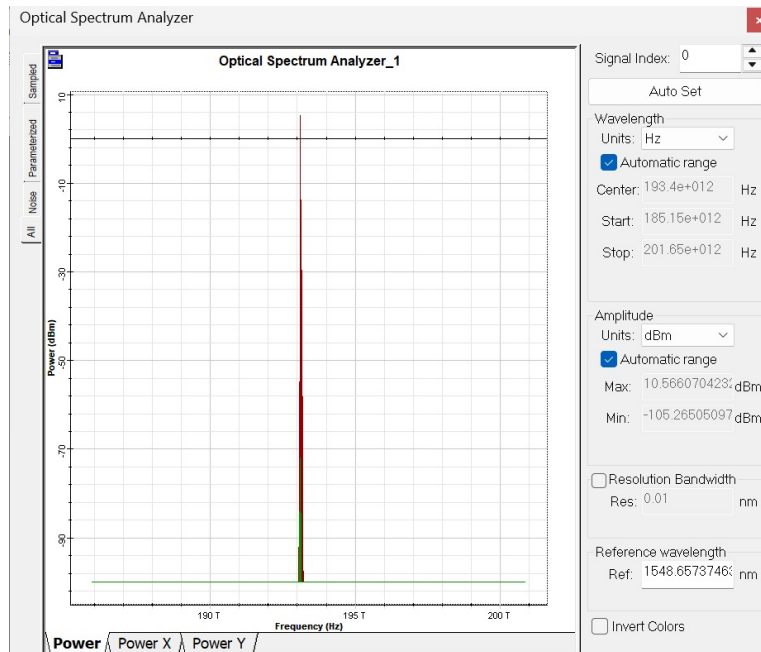


Figura 18. Espectro óptico del canal 1 del enlace con fibra G.652 a 5 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.

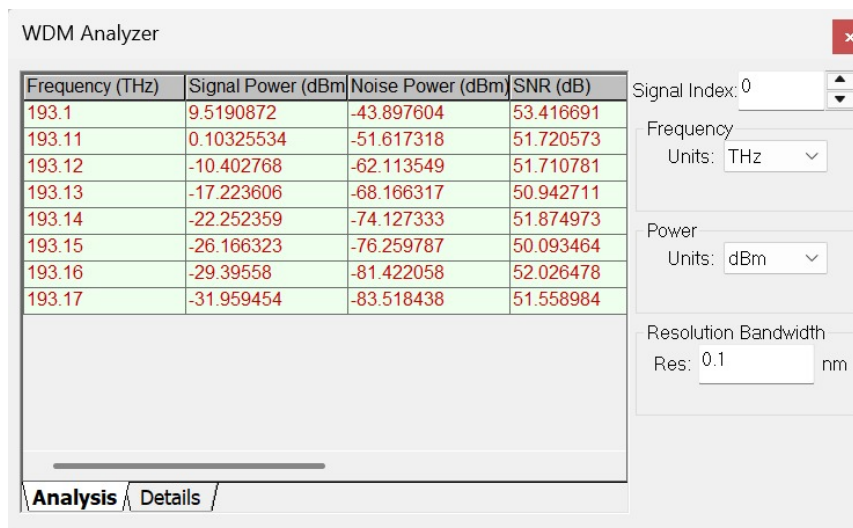


Figura 19. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 5 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.

Como se observa en el diagrama de Ojo de la Figura 20 y en la Tabla 3, se puede evidenciar que, en la distancia de 5 Km, el enlace de fibra óptica presenta un desempeño altamente eficiente. Los valores de BER, comprendidos entre 10^{-41} y 10^{-197} , indican una transmisión prácticamente libre de errores. El Q-factor varía entre 13,4 y 29,9, mostrando márgenes de señal adecuados; los canales C8, C1 y C2 presentan los mayores valores, mientras que C5, C6 y C7 muestran los menores, aunque aún dentro de rangos operativos seguros.

Tabla 3. Datos de enlace con fibra G.652 a 5 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Canal	BER	Q-factor	EyeHeight
C1	2,93E-97	20,8741	0,0169911
C2	1,45E-120	23,3058	0,0031915
C3	1,009E-71	17,8519	0,00268
C4	9,0023E-72	17,85	0,0028
C5	9,46E-44	13,7907	0,01524
C6	1,6724E-48	14,5536	0,01606
C7	1,7189E-41	13,4038	0,001535
C8	3,1094E-197	29,9283	0,0182041

El análisis de la altura del diagrama de Ojo evidencia diferencias en la apertura: canales como C8 y C6 tienen alta amplitud de señal y tolerancia frente a ruido, mientras que C2, C3, C4 y C7 presentan aperturas menores, lo que puede reducir el margen frente a degradaciones futuras.

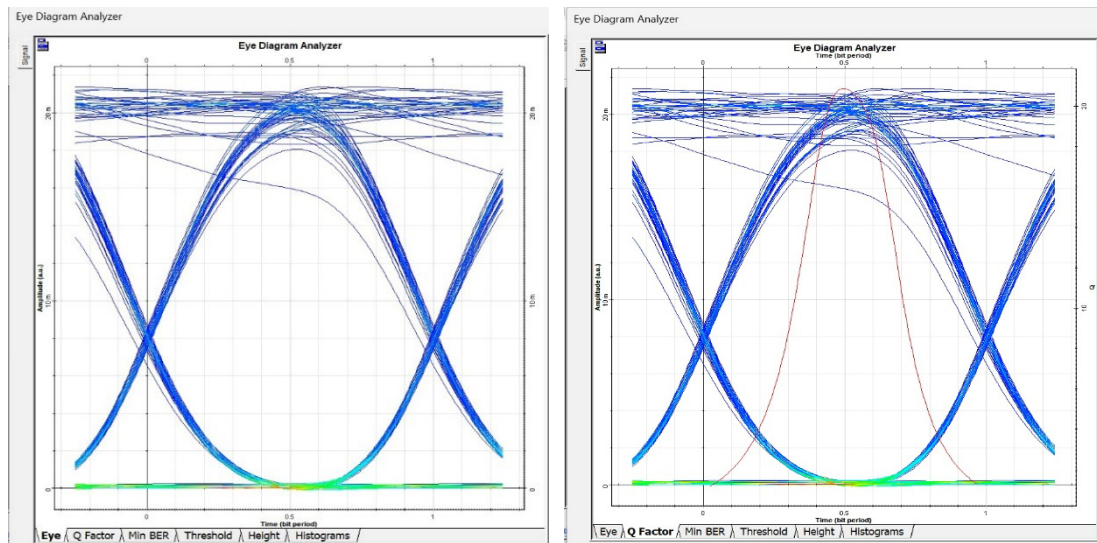


Figura 20. a) Diagrama de Ojo, b) Factor Q relativos a fibra G.652 a 5 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

4.2 Distancia 50 Km. Banda C para Fibra G.652. Potencia de transmisor de 2.5dBm

Para una distancia de 50 Km, se observa en la Figura 21 y la Figura 22, la señal obtenida de recepción del enlace óptico, a la salida del demultiplexor, se puede observar una mayor potencia en el canal 1 que va decayendo en cada uno de los demás canales hasta tener una potencia de -44.37dBm en el canal 8.

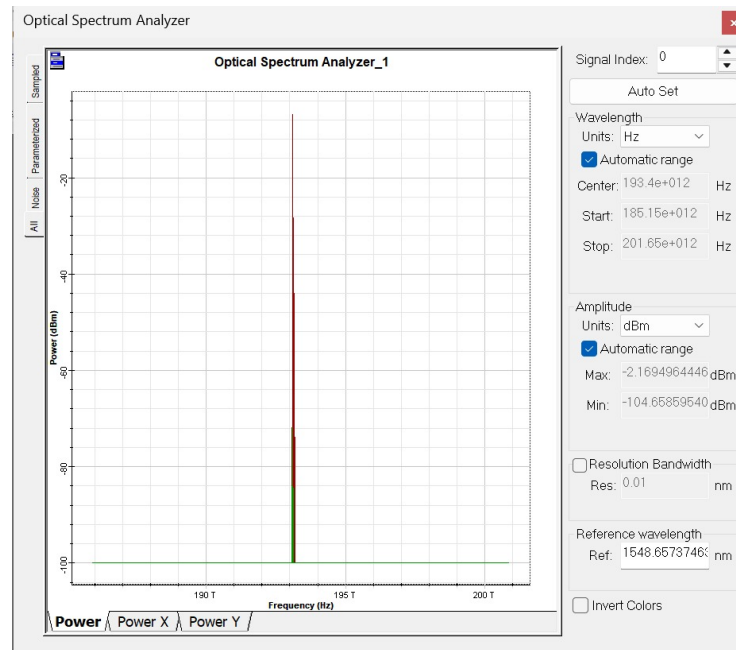


Figura 21. Espectro óptico del canal 1 del enlace con fibra G.652 a 50 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	SNR (dB)
193.1	-2.6465563	-43.897604	41.251047
193.11	-12.234484	-51.617318	39.382834
193.12	-22.864164	-62.113549	39.249384
193.13	-29.660373	-68.166317	38.505944
193.14	-34.642621	-74.127333	39.484712
193.15	-38.349842	-76.259787	37.909945
193.16	-41.559569	-81.422058	39.862489
193.17	-44.376108	-83.518438	39.14233

Signal Index: 0
Frequency Units: THz
Power Units: dBm
Resolution Bandwidth Res: 0.1 nm

Analysis Details

Figura 22. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 50 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Para el tramo de fibra óptica de 50 km, los resultados indican que se puede mantener una transmisión funcional, aunque se observa una reducción significativa en los márgenes de calidad en comparación con el enlace de 50 km. Los valores de BER, comprendidos entre 10^{-22} y 10^{-57} , siguen siendo aceptables, pero reflejan un aumento relativo de errores probables debido a la mayor distancia, como se indica en la Tabla 4.

El Factor Q oscila entre 9,38 y 13,55, destacando el canal C8 con el mejor desempeño y el C6 con el peor. Estos valores reflejan que la relación señal–ruido se ha reducido, acercándose a niveles críticos para aplicaciones especialmente sensibles.

Tabla 4. Datos de enlace con fibra G.652 a 50 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Canal	BER	Q-factor	EyeHeight
C1	3,38874E-29	12,9021	0,00119992
C2	4,04401E-57	10,557	0,00086119
C3	5,37912E-25	11,7158	0,0017037
C4	1,01848E-36	11,1153	0,00012582
C5	5,14592E-22	10,2602	0,00737895
C6	1,83635E-34	9,3762	0,0051576
C7	5,06106E-26	10,8848	0,00519445
C8	2,65941E-22	13,5542	0,00047375

Sobre el análisis del diagrama de Ojo, en la Figura 24, se evidencia aperturas de ojo generalmente bajas, especialmente en C2, C4 y C8, con valores inferiores a 0,0012 en algunos canales, lo que indica reducción del margen frente a ruido, jitter y dispersión. Esto es consistente con efectos de dispersión cromática y atenuación acumulada propios de enlaces de mayor longitud, así como posibles desbalances de potencia entre canales WDM.

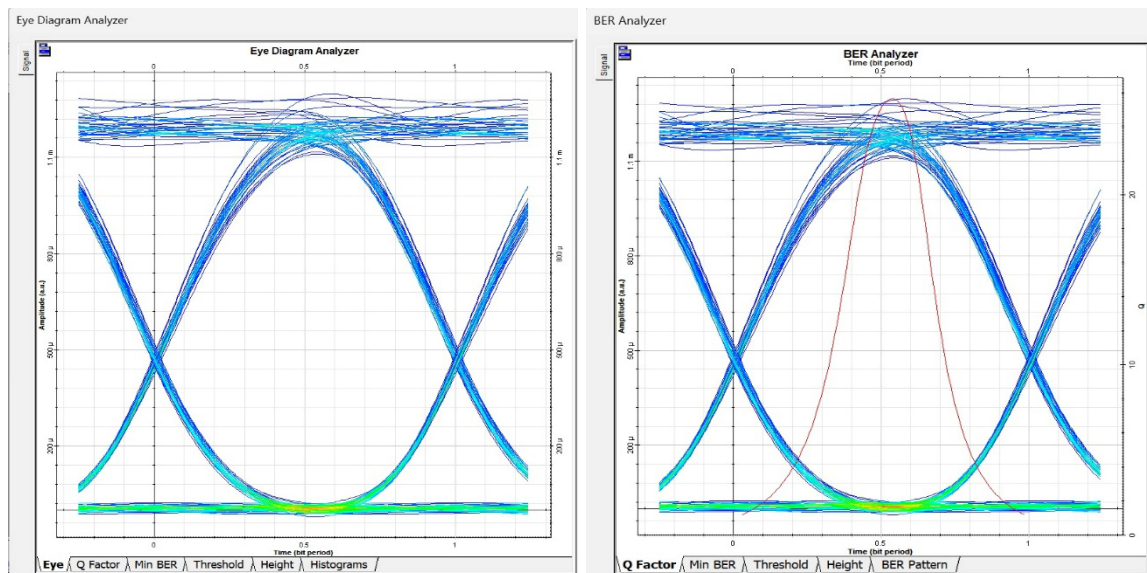


Figura 23. a) Diagrama de Ojo, b) Factor Q relativos a fibra G.652 a 50 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

4.3 Distancia 100 Km. Banda C para Fibra G.652. Potencia de transmisor de 2.5dBm

Para la distancia de 100 Km, se observa en la Figura 24 y la Figura 25, la señal obtenida de recepción del enlace óptico, a la salida del demultiplexor, se puede observar una mayor potencia en el canal 1 que va decayendo en cada uno de los demás canales hasta tener una potencia de -58 dBm en el canal 8.

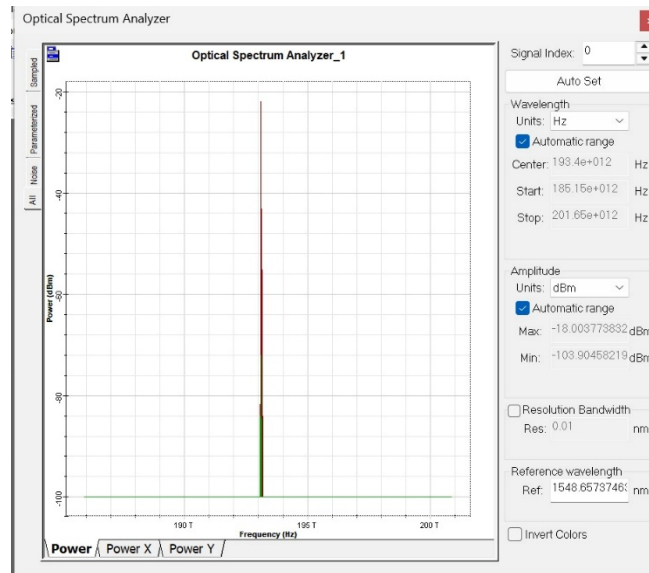


Figura 24. Espectro óptico del canal 1 del enlace con fibra G.652 a 50 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.

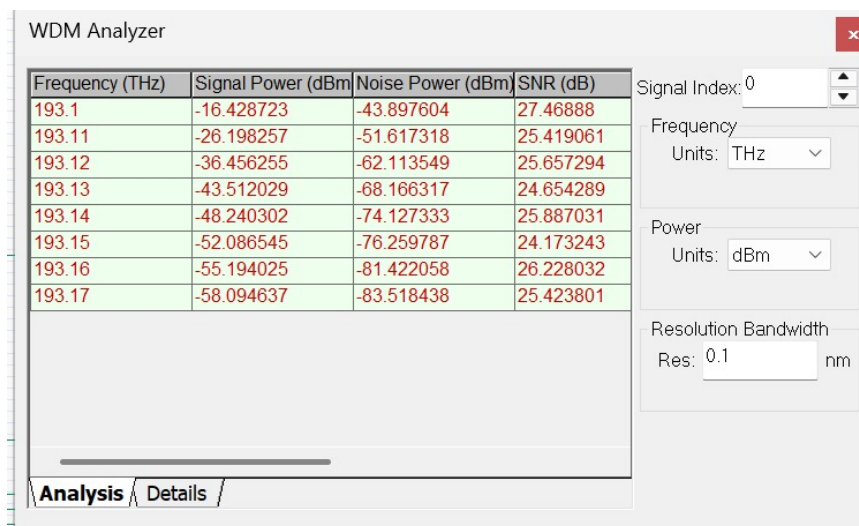


Figura 25. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 100 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

El análisis de los datos del enlace de fibra óptica de 100 km muestra una degradación significativa del rendimiento en comparación con los enlaces de 5 km y 50 km. Los valores de BER oscilan entre $2,6 \cdot 10^{-6}$ y $1,33 \cdot 10^{-4}$, lo que indica que, aunque la transmisión sigue

siendo posible, la probabilidad de errores aumenta notablemente y podría requerirse el uso de técnicas de corrección de errores activas para aplicaciones sensibles.

El Q-factor oscila entre 3,65 y 4,56, mostrando una separación señal–ruido reducido, y márgenes muy limitados; solo el canal C8 mantiene un valor ligeramente superior ($\approx 4,56$), mientras que los canales C3, C5 y C7 presentan los valores más críticos. Estos niveles se acercan al umbral mínimo requerido para una operación confiable sin regeneración o amplificación adicional

Tabla 5. Datos de enlace con fibra G.652 a 100 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Canal	BER	Q-factor	Eye Height
C1	0,000046627	3,9074	0,0000116
C2	3,89294E-05	3,9505	1,2105E-05
C3	0,000093034	3,7372	9,868E-06
C4	0,000053028	3,8735	0,0000114
C5	0,0000949	3,7316	9,3254E-06
C6	0,0000393	3,9485	0,000012
C7	0,000132921	3,6465	0,00000832
C8	0,0000026	4,5557	0,0000173

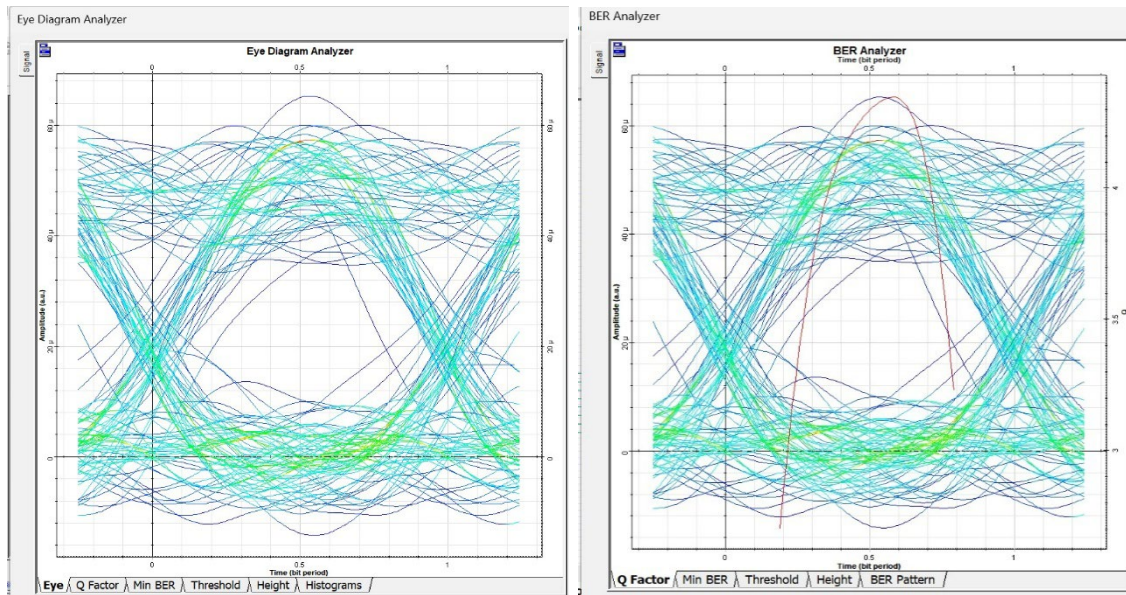


Figura 26. a) Diagrama de Ojo, b) Factor Q relativos a de fibra G.652 a 100 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Si se analiza el diagrama de Ojo, se observa que la altura es extremadamente baja (del orden de 10^{-5} a 10^{-5}), lo que indica aperturas de ojo muy cerradas y una alta vulnerabilidad frente a ruido, jitter, dispersión cromática y efectos acumulados de atenuación. Este comportamiento es consistente con efectos de dispersión, pérdida de

potencia y degradación OSNR típicos de enlaces de larga distancia sin amplificación intermedia.

4.4 Análisis Estadístico

4.4.1 Análisis Escenario UDWDM

Para el análisis estadístico de los datos recolectados, se emplea el software IBM SPSS, versión 26, con el fin de realizar la prueba ANOVA, la cual permite evaluar los datos obtenidos sobre múltiples observaciones, útil para determinar el comportamiento del sistema bajo las distancias de 5-100 km en cada una de las fibras analizadas para tecnología UDWDM.

Como primer paso, se lleva a cabo un análisis estadístico descriptivo calculando los valores mínimos, máximos, la media y la desviación estándar del conjunto de datos. Esto permite caracterizar el comportamiento general del sistema en términos de BER, Factor Q y altura del ojo (*EyeHeight*).

Tabla 6. Estadísticos descriptivos

Estadísticos descriptivos					
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación
BER	160	3,11E-197	2,00E-002	1,1945E-004	1,28000E-003
FactorQ	160	2.74060	30.87450	11.0313161	5.57552638
EyeHeight	160	8,32E-006	9,00E-002	7,0000E-003	1,57500E-002
N válido (por lista)	160				

De la Tabla 7, se tiene que el BER presenta valores comprendidos entre $3,11 \times 10^{-197}$ y 2×10^{-2} , con una media de $1,19 \times 10^{-4}$ y una desviación estándar de $1,28 \times 10^{-3}$. Este amplio rango podría indicar una fuerte variación del desempeño según la distancia del enlace, pero necesita validarse mediante otro análisis.

Por otra parte, el Factor Q varía entre 2,74 y 30,87, con un valor promedio de 11,03 y una desviación estándar de 5,58. Este amplio rango sugiere una transición entre condiciones óptimas y márgenes más estrechos a mayores distancias, reflejando la pérdida progresiva de la relación señal–ruido debido a posibles efectos acumulativos de atenuación y dispersión.

En cuanto al *EyeHeight*, los valores oscilan entre $8,32 \times 10^{-6}$ y 9×10^{-2} , con una media de 7×10^{-3} y una desviación estándar de $1,58 \times 10^{-2}$. La alta variabilidad y los valores mínimos muy bajos reflejan un cierre considerable del diagrama de ojo en enlaces de mayor distancia, lo que disminuye el margen frente a jitter, ruido y distorsión intersimbólica.

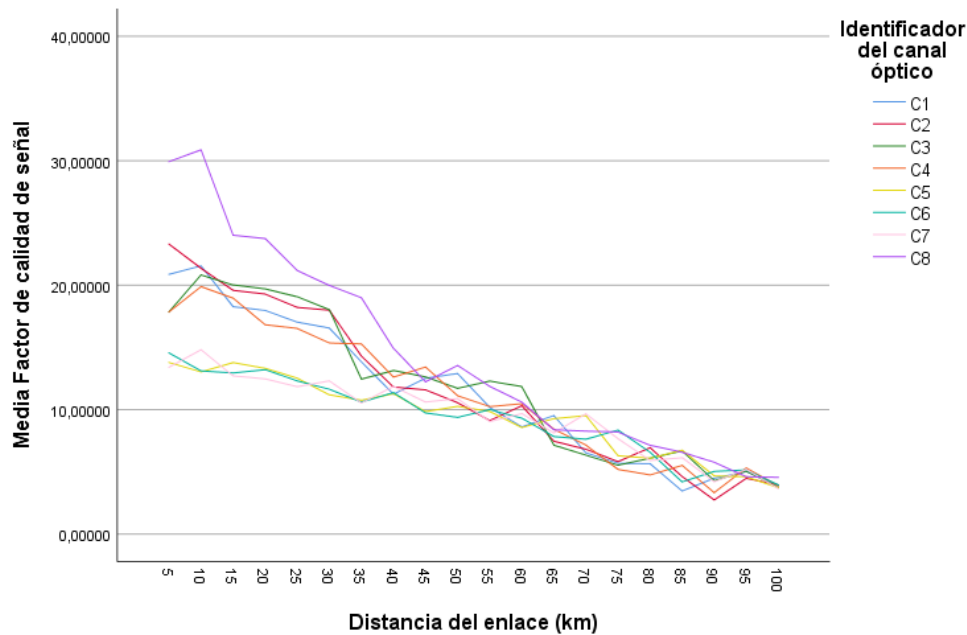


Figura 27. a) Diagrama de Ojo, b) Factor Q relativos a de fibra G.652 a 100 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Como se puede apreciar en la Figura 27, la tendencia general es que todas las curvas muestran una disminución progresiva del Q-factor conforme aumenta la distancia del enlace, lo que refleja la degradación esperada en sistemas ópticos UDWDM por efectos acumulativos como dispersión, atenuación y ruido.

A partir de 60 km, varios canales cruzan el umbral de $Q < 6$, lo que indica riesgo de errores y necesidad de algún tipo de compensación óptica, que no es objetivo del presente estudio.

El canal C8 mantiene el Factor Q más alto en todas las distancias, demostrando un desempeño sobresaliente. Los canales C1 a C4 muestran curvas estables hasta aproximadamente 40 km, después de lo cual su Q disminuye gradualmente, lo que indica un buen margen operativo. Por su parte, los canales C5 a C7 comienzan con valores de Q más bajos y presentan descensos más pronunciados, siendo considerados los más vulnerables.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: Factor de calidad de señal					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	4942,753 ^a	159	31,086	.	.
Intersección	19470,389	1	19470,389	.	.
Canal	376,699	7	53,814	.	.
Distancia	3927,091	19	206,689	.	.
Canal * Distancia	638,962	133	4,804	.	.
Error	,000	0	.		
Total	24413,142	160			
Total corregido	4942,753	159			
a. R al cuadrado = 1,000 (R al cuadrado ajustada = .)					

También se puede apreciar que la distancia tiene una suma de cuadrados elevada (3927.091), evidenciando que es el factor con mayor influencia sobre el Q-factor.

El canal también tiene un efecto notable (376,699), aunque menor en comparación con la distancia. Por otro lado, la interacción Canal $\times$ Distancia presenta un valor considerable (638,962), lo que indica que el impacto de la distancia sobre el Factor Q depende del canal específico.

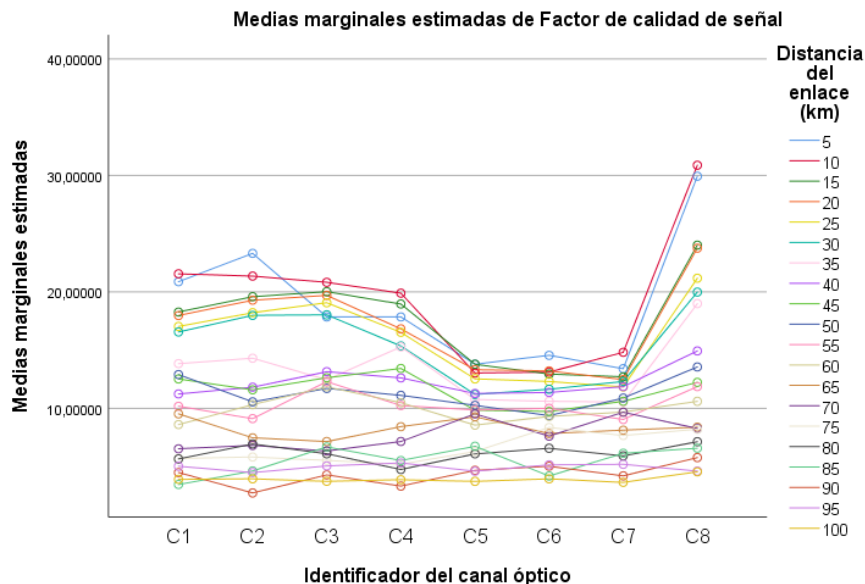


Figura 28. a) Diagrama de Ojo, b) Factor Q relativos a de fibra G.652 a 100 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Por tanto, del análisis realizado sobre el escenario UDWDM se puede identificar que la distancia del enlace es el factor más influyente en la calidad de señal. Los canales ópticos no se comportan igual, ya que algunos degradan más rápido que otros.

4.4.2 Análisis Escenario UDWDM y DWDM

Para realizar el análisis de resultados de los datos obtenidos en las simulaciones primero se preparan los datos para su análisis, y como punto de partida se hace necesario codificar los escenarios UDWDM y DWDM para facilitar el estudio, en donde:

- 1: DWDM
- 2: UDWDM

Para ello se crea un modelo de datos en la herramienta IBM SPSS, donde se relacionan los parámetros indicados, a través de una variable “Tecnología”, que indicará si es UDWDM y DWDM. El conjunto de datos se muestra en la Figura 29.

	 Tecnología	 Distancia	 Canal	 BER	 Qfactor	 EyeHeight
1	1	5	C1	0,000E+000	188,796	2,012E-002
2	2	5	C1	2,930E-097	20,874	1,699E-002
3	1	5	C2	0,000E+000	187,334	2,012E-002
4	2	5	C2	1,450E-120	23,306	3,191E-003
5	1	5	C3	0,000E+000	177,880	2,009E-002
6	2	5	C3	1,009E-071	17,852	2,680E-003
7	1	5	C4	0,000E+000	177,280	2,008E-002
8	2	5	C4	9,002E-072	17,850	2,800E-003
9	1	5	C5	0,000E+000	179,190	2,009E-002
10	2	5	C5	9,460E-044	13,791	1,524E-002
11	1	5	C6	0,000E+000	178,160	2,008E-002
12	2	5	C6	1,672E-048	14,554	1,606E-002
13	1	5	C7	0,000E+000	172,940	2,009E-002
14	2	5	C7	1,719E-041	13,404	1,535E-003
15	1	5	C8	0,000E+000	182,530	2,010E-002
16	2	5	C8	3,109E-197	29,928	1,820E-002

Figura 29. Conjunto de datos para el análisis combinando ambas tecnologías

Por tanto, se tienen registros donde se asocia para una misma distancia, el canal y la tecnología, con sus respectivos valores de BER, FactorQ y EyeHeight.

4.4.2.1 Prueba de normalidad

Para determinar el método estadístico paramétrico a utilizar en el análisis, es necesario realizar una prueba de normalidad, para determinar si los datos siguen (o no) una distribución normal.

La normalidad de las variables BER, Q-factor y Eye Height se evaluó mediante la prueba de Shapiro–Wilk.

H₀: Las variables BER, Q-factor y Eye Height presentan una distribución normal.

H₁: Las variables BER, Q-factor y Eye Height no presentan una distribución normal.

Tabla 8. Prueba de Shapiro-Wilk para mostrar la normalidad de las variables

Pruebas de normalidad				
1:DWDM 2:UDWDM		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
BER	1	0.574	160	1.05E-19
	2	0.821	160	1.01E-12
Q-factor	1	0.895	160	3.10E-09
	2	0.939	160	2.18E-06
Eye Height	1	0.693	160	7.11E-17
	2	0.473	160	1.16E-21

Los resultados presentados en la Tabla 9 muestran que ninguna de las variables siguió una distribución normal ($p \leq 0.05$) tanto en la tecnología DWDM como en UDWDM. En consecuencia, se optó por aplicar pruebas estadísticas no paramétricas para el análisis comparativo.

4.4.2.2 Prueba de Mann–Whitney U

La comparación del rendimiento entre las tecnologías DWDM y UDWDM se llevó a cabo usando la prueba no paramétrica de Mann–Whitney U, debido a que los datos no seguían una distribución normal. Los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas en los parámetros BER y Factor Q ($p < 0,001$), mientras que no se encontraron diferencias significativas en la métrica *Eye Height* ($p = 0,434$).

Tabla 9. Resultados de Prueba de Mann–Whitney U

Estadísticos de prueba			
	BER	Q-factor	Eye Height
U de Mann-Whitney	6221.000	4181.000	12153.000
Z	-8.053	-10.415	-0.782
Sig. asin. (bilateral)	8.09E-16	2.11E-25	0.43428187

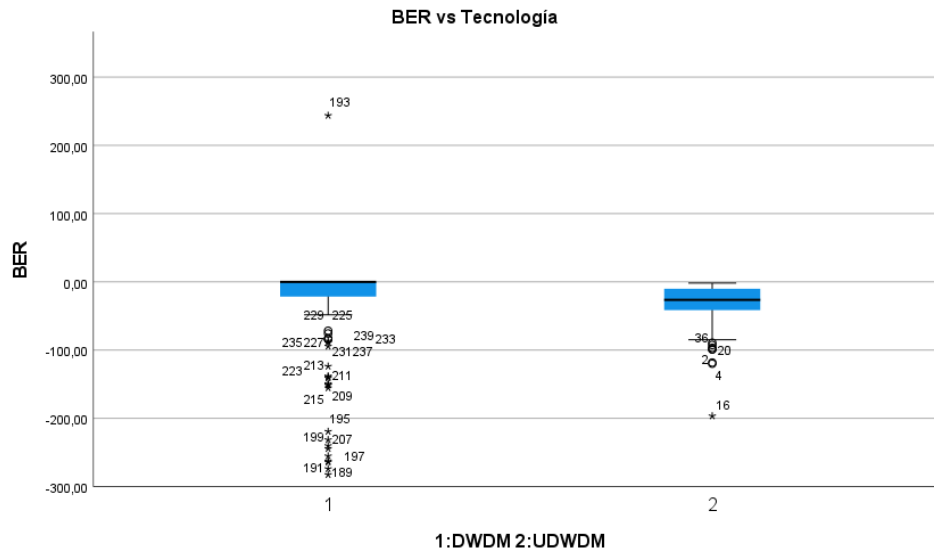


Figura 30. Diagrama de cajas entre BER vs Tecnología

Del diagrama de cajas de la Figura 30 se puede interpretar que la tecnología DWDM tiene una mayor variabilidad en el BER, ya que presenta muchos valores atípicos, mientras que UDWDM exhibe una distribución más concentrada y estable. Esto sugiere que UDWDM ofrece un comportamiento más consistente en términos de tasa de error de bit.

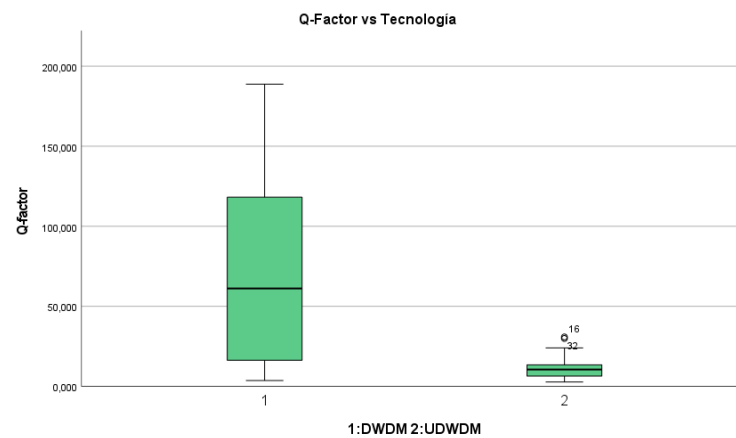


Figura 31. Diagrama de cajas entre Q-factor vs Tecnología

En el diagrama de cajas de la Figura 31 se muestra que la tecnología DWDM presenta valores mucho más altos de Q-Factor comparados con los arrojados por UDWDM, aunque con mayor variabilidad. En contraste, UDWDM exhibe valores más bajos, pero con mayor consistencia, lo que sugiere un desempeño más estable pero inferior en calidad de señal.

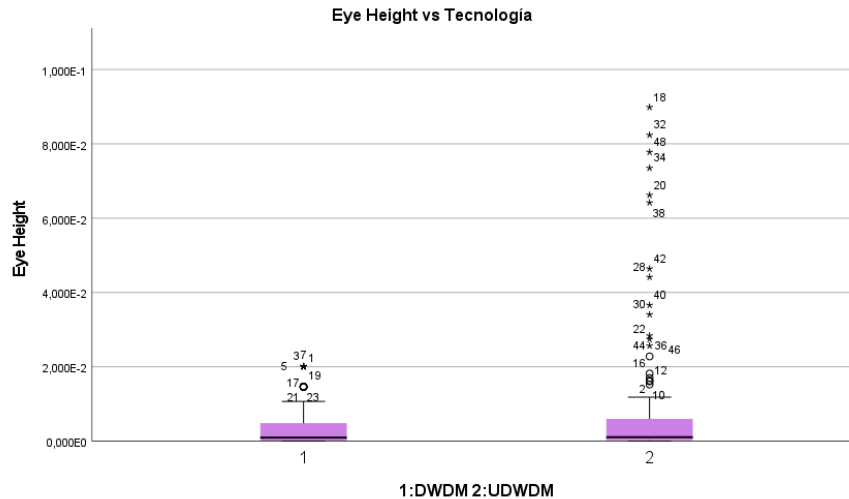


Figura 32. Diagrama de cajas entre Eye Height vs Tecnología

El diagrama de cajas de la Figura 32 evidencia que la tecnología UDWDM presenta valores significativamente mayores de Eye Height en comparación con DWDM, lo que indica una mejor apertura del Diagrama de Ojo y, por ende, una mayor calidad de señal. No obstante, UDWDM también exhibe una mayor dispersión en los valores observados.

4.4.2.3 Prueba de Kruskal-Wallis

Se hace uso de la prueba de Kruskal-Wallis para comparar como se relaciona cada variable en relación con la distancia, para esto primero creamos una variable llamada “Tramo”, en donde 1 representa corta distancia (≤ 20 km) y 0 representa a larga distancia.

El efecto de la distancia sobre el rendimiento del sistema se evaluó utilizando la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis. Los resultados muestran que no hay diferencias significativas en la BER entre enlaces cortos y largos ($p = 0,838$). Sin embargo, sí se observaron diferencias estadísticamente significativas en el Factor Q y el *Eye Height* ($p < 0,001$), lo que evidencia que la distancia influye en la calidad de la señal y en la apertura del diagrama de ojo.

Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis

Estadísticos de prueba			
	BER	Q-factor	Eye Height
H de Kruskal-Wallis	0.042	61.034	136.704
Sig. asin.	0.838	0.000	0.000

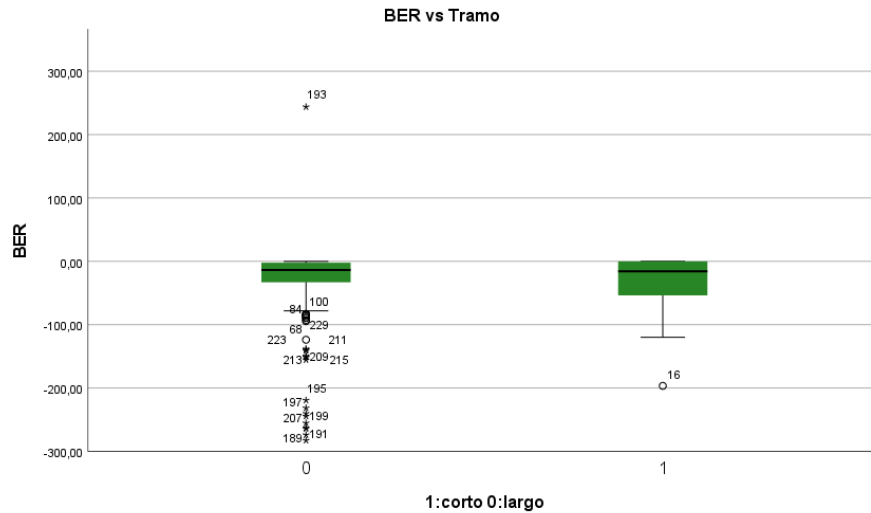


Figura 33. Diagrama de cajas BER vs Tramo

El diagrama de cajas de la Figura 33 evidencia que los tramos cortos presentan valores más bajos y estables de BER en comparación con los tramos largos, los cuales muestran una alta variabilidad y numerosos valores atípicos. Esto sugiere que la longitud del tramo influye significativamente en el desempeño del sistema.

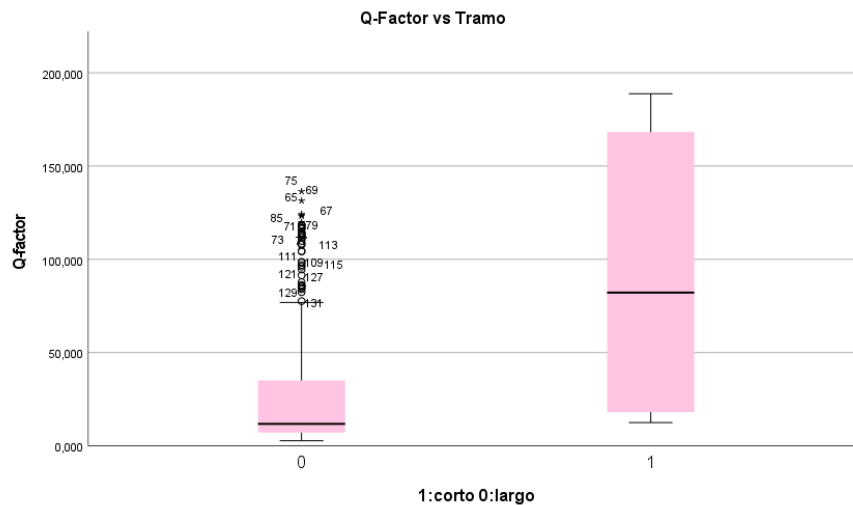


Figura 34. Diagrama de cajas entre Q-Factor y Tramo

El diagrama de cajas de la Figura 34 indica que los tramos (distancia) cortos presentan valores significativamente mayores de Q-Factor en comparación con los tramos largos, lo que evidencia una mejor calidad de señal. En contraste, los tramos largos muestran valores bajos de Q-Factor, con algunos valores atípicos positivos.

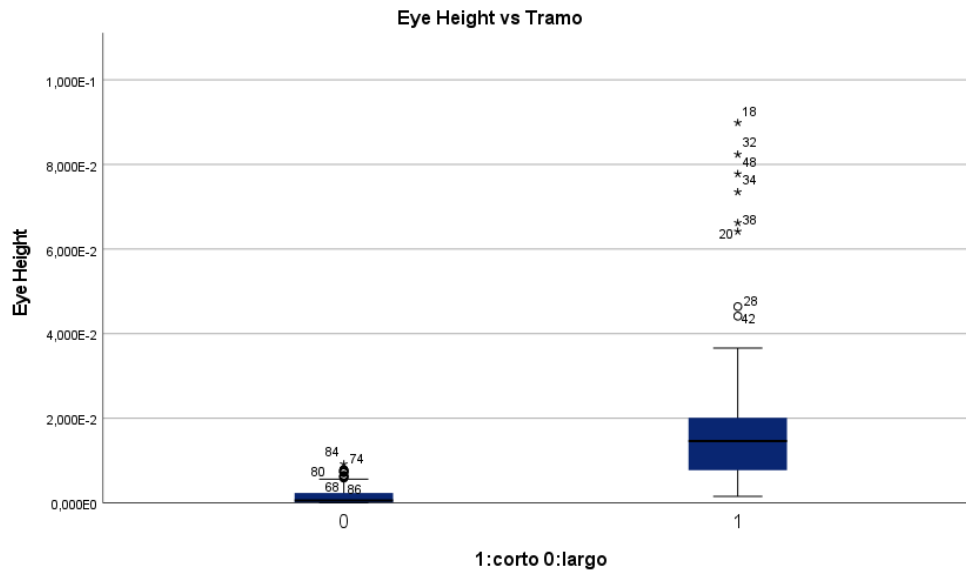


Figura 35. Diagrama de cajas Eye Height vs Tramo

El diagrama de cajas de la Figura 35 indica que los tramos cortos presentan valores significativamente mayores de Eye Height en comparación con los tramos largos, lo que evidencia un mejor desempeño del sistema en este tipo de configuración. En contraste, los tramos largos muestran valores de Eye Height considerablemente más bajos y con una variabilidad reducida, aunque se identifican algunos valores atípicos positivos. Asimismo, los tramos cortos presentan una mayor dispersión de los datos y la presencia de valores extremos, lo que sugiere una mayor heterogeneidad en el comportamiento de la variable analizada.

4.4.2.4 Análisis de correlación de Spearman

Se estudió la relación entre la distancia del enlace y los parámetros de desempeño utilizando el coeficiente de correlación de Spearman. Los resultados muestran que la distancia no tiene una relación estadísticamente significativa con la BER ($\rho = -0,038$, $p = 0,502$). En cambio, existe una fuerte correlación negativa con el Factor Q ($\rho = -0,746$, $p < 0,001$) y una correlación muy fuerte con el Eye Height ($\rho = -0,935$, $p < 0,001$), lo que refleja una degradación progresiva de la calidad de la señal a medida que el enlace se extiende.

Tabla 11. Correlación de Spearman

Correlaciones							
			Distancia	logBER	Q-factor	Eye Height	
			(km)				
Rho de Spearman	Distancia (km)	Coeficiente de correlación	1.000	-0.038	-0,746**	-0,935**	

	Sig. (bilateral)		0.502	0.000	0.000
	N	320	320	320	320
logBER	Coefficiente de correlación	-0.038	1.000	0,303**	0.052
	Sig. (bilateral)	0.502		0.000	0.356
	N	320	320	320	320
Q-factor	Coefficiente de correlación	-0,746**	0,303**	1.000	0,671**
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000		0.000
	N	320	320	320	320
Eye Height	Coefficiente de correlación	-0,935**	0.052	0,671**	1.000
	Sig. (bilateral)	0.000	0.356	0.000	
	N	320	320	320	320

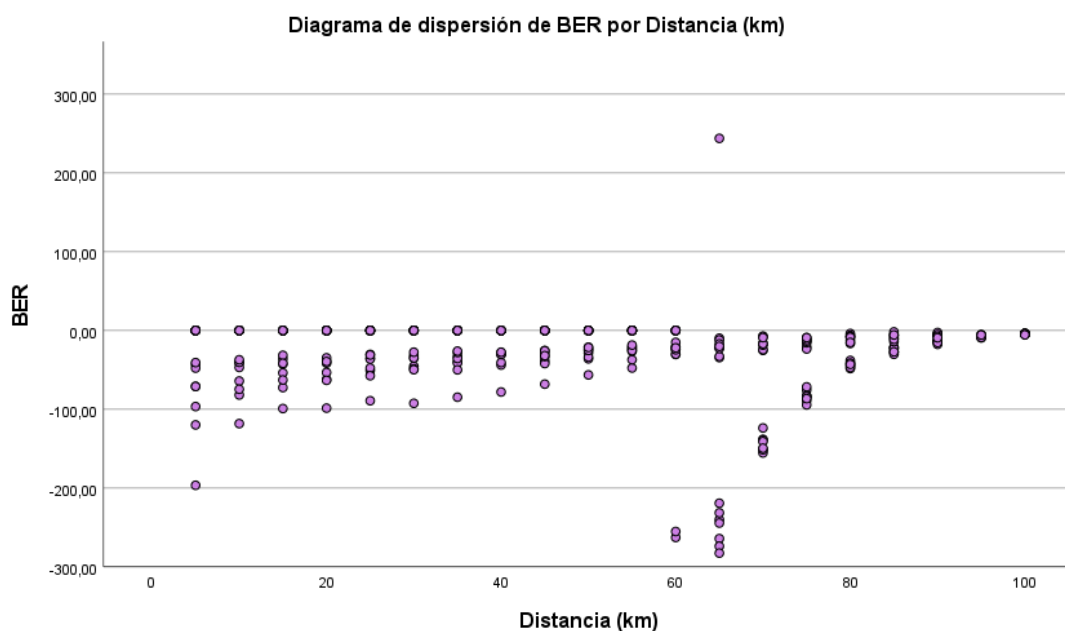


Figura 36. Diagrama de dispersión entre el BER y la Distancia

El diagrama de dispersión de la Figura 36 evidencia que el BER aumenta y presenta mayor variabilidad a medida que se incrementa la distancia de transmisión. Para distancias cortas, el BER se mantiene relativamente estable, mientras que en distancias intermedias y largas se observan valores atípicos y una mayor dispersión, lo que indica un deterioro progresivo de la calidad de la señal.

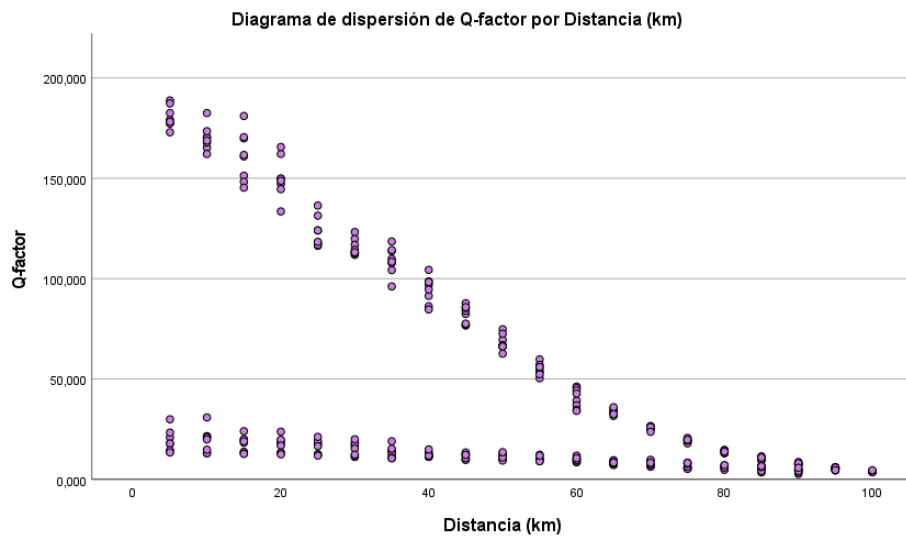


Figura 37. Diagrama de dispersión entre Q-factor y la Distancia

El diagrama de dispersión de la Figura 37 evidencia que el Q-factor disminuye de manera progresiva conforme aumenta la distancia de transmisión. Mientras que en distancias cortas se registran valores elevados de Q-factor, asociados a una alta calidad de señal, en distancias largas los valores se reducen significativamente, reflejando el deterioro del desempeño de la transmisión.

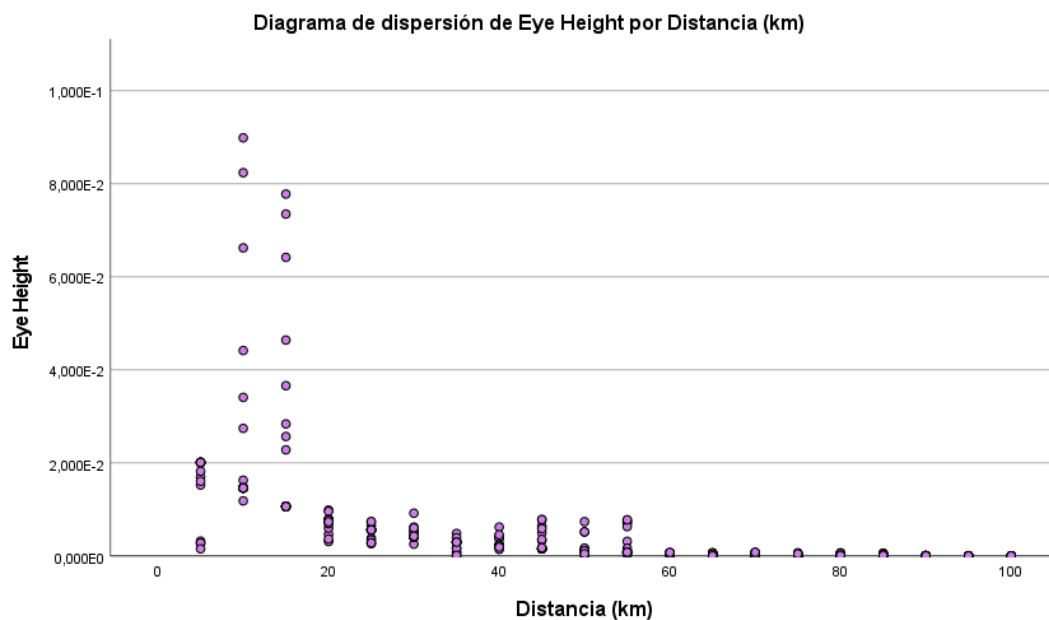


Figura 38. Diagrama de dispersión entre Eye Height y la Distancia

El diagrama de dispersión de la Figura 38 evidencia que el Eye Height disminuye de manera progresiva a medida que aumenta la distancia de transmisión. En enlaces cortos, los

valores son más altos y presentan mayor dispersión, mientras que en distancias intermedias y largas tienden a agruparse cerca de cero, reflejando una degradación significativa de la calidad de la señal.

4.4.2.5 Comparación de medianas

La comparación de medianas permitió analizar el comportamiento central de los parámetros de calidad de transmisión sin asumir normalidad en los datos. En cuanto a la BER, la tecnología UDWDM mostró una mediana notablemente menor que la de DWDM, lo que refleja una menor tasa de error de bits y, en consecuencia, un mejor desempeño general. Esta diferencia resultó estadísticamente significativa según la prueba de Mann–Whitney U ($p < 0,001$).

Tabla 12. Comparación de medianas de acuerdo con su tecnología

Descriptivos			
1:DWDM 2:UDWDM			Estadístico
BER	1	Mediana	0.0000
	2	Mediana	-26.2911
Q-factor	1	Mediana	61.20700
	2	Mediana	10.50905
Eye Height	1	Mediana	9.70000E-04
	2	Mediana	1.06368E-03

Por otro lado, el Q-factor mostró una mediana considerablemente mayor en la tecnología DWDM, evidenciando una mejor calidad de señal en comparación con UDWDM, diferencia que también resultó estadísticamente significativa ($p < 0.001$).

Respecto al *Eye Height*, aunque la mediana fue ligeramente mayor en UDWDM, la prueba estadística no mostró diferencias significativas entre las dos tecnologías ($p > 0,05$), lo que indica un comportamiento comparable en términos de apertura del diagrama de ojo.

Tabla 13. Comparación de medianas de acuerdo con la distancia del enlace

Descriptivos			
1:corto 0:largo			Estadístico
BER	0	Mediana	-13.6055
	1	Mediana	-15.7613
Q-factor	0	Mediana	11.82765
	1	Mediana	82.19175
Eye Height	0	Mediana	5.61451E-04
	1	Mediana	1.46200E-02

La comparación de medianas según la distancia del enlace permite evaluar el impacto de la distancia sobre los parámetros de desempeño del sistema. En el caso del BER, las medianas obtenidas para enlaces cortos y largos no presentaron diferencias estadísticamente significativas, lo que indica que la tasa de error de bit no se ve afectada de manera relevante por la distancia dentro del escenario simulado.

Por el contrario, el Factor Q disminuye de manera notable en enlaces largos, mientras que en tramos cortos presenta medianas considerablemente mayores. Este comportamiento se confirma con la prueba de Kruskal–Wallis, evidenciando que la distancia ejerce un efecto significativo sobre la calidad de la señal.

De manera similar, el *Eye Height* muestra una disminución considerable en enlaces largos, mientras que en tramos cortos las medianas son significativamente mayores, reflejando un cierre progresivo del diagrama de ojo a medida que se incrementa la distancia del enlace.

4.4.3 Análisis del comportamiento del ancho de banda efectivo por canal y la calidad de señal recibida

El análisis conjunto del Factor Q, la BER y el *Eye Height* en función de la distancia del enlace permite describir con precisión el comportamiento de cada canal en el sistema UDWDM simulado, además de validar el modelo teórico de degradación progresiva del ancho de banda efectivo.

Tabla 14. Condiciones de comportamiento de ancho de banda efectivo a partir de parámetros de simulación

Ancho de banda	Efecto en el Ojo	Efecto en Q-factor	Efecto en BER	Impacto en la red
Insuficiente (filtro estrecho)	El ojo se cierra (ISI)	Q disminuye	BER aumenta	Retransmisiones, latencia
Excesivo (ruido fuera de banda)	El ojo se ensucia (ruido $\sigma \uparrow$)	Q disminuye	BER aumenta	OSNR degradada
Óptimo (ajuste con tasa de baudios)	Máxima apertura	Q máximo	BER mínimo	Red estable y escalable

De las condiciones anteriores se puede definir una premisa sencilla: Un ancho de banda óptimo estará condicionado por una mejor apertura del ojo, un valor alto del Factor Q, y una menor BER.

Aunque no se cuenten con los valores exactos del ancho de banda, las métricas de Q, *Eye Height* y BER permiten inferir cómo varía el ancho de banda efectivo de cada canal a medida que se incrementa la distancia.

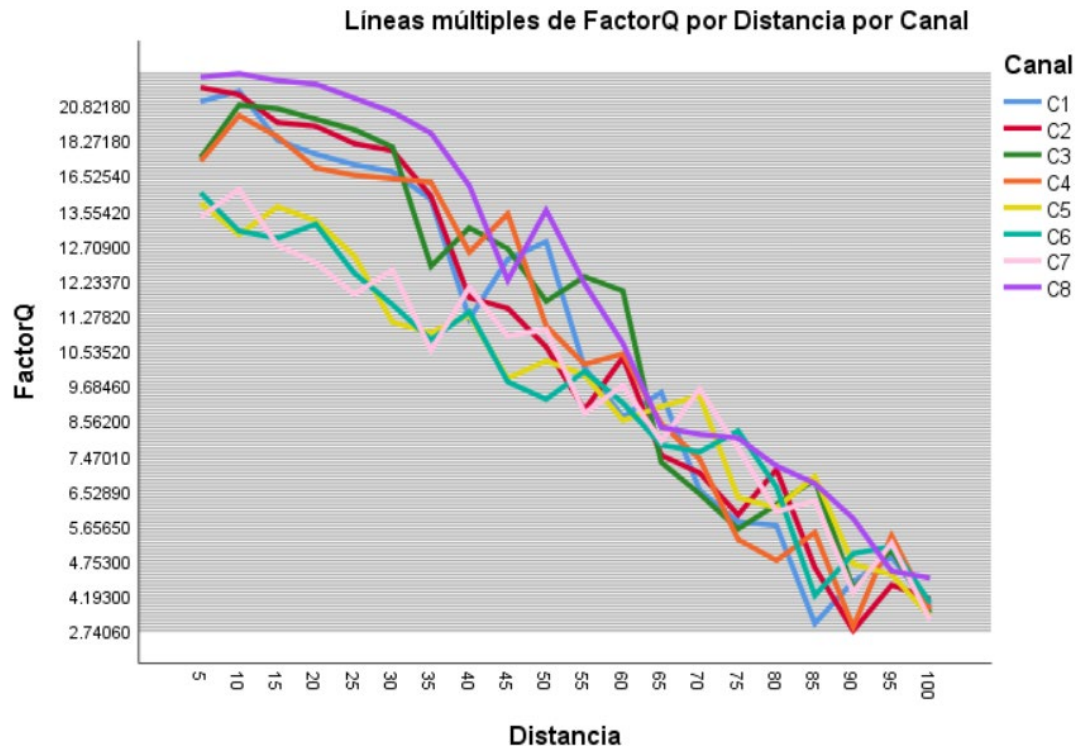


Figura 39. Evolución del Q-factor por canal en función de la distancia del enlace

Se observa una degradación progresiva del FactorQ con la distancia, lo que indica una reducción del ancho de banda efectivo disponible por canal. Todos los canales muestran una tendencia descendente en Q-factor conforme aumenta la distancia, aunque el BW nominal sea constante.

Ancho de banda en función de la distancia:

- Zona óptima (5–20 km): Factor Q superior a 20, con ancho de banda efectivo en condiciones óptimas.
- Zona de transición (25–60 km): Factor Q entre 12 y 20, indicando una degradación del ancho de banda.
- Zona insuficiente (65–100 km): Factor Q inferior a 6 en algunos canales, con ancho de banda insuficiente para un desempeño adecuado.

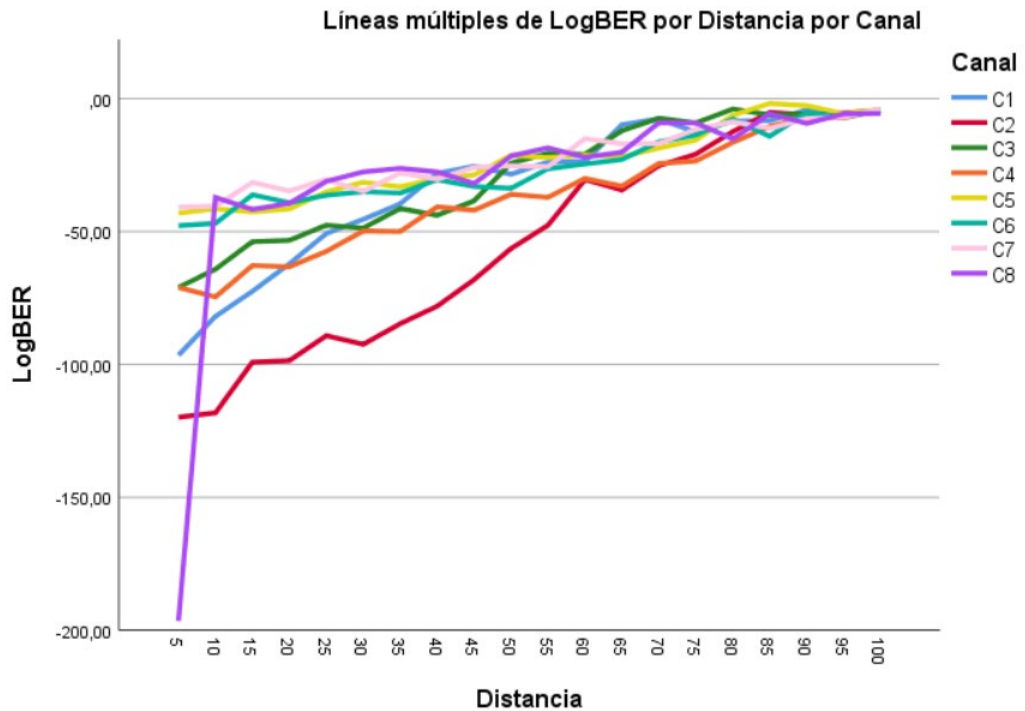


Figura 40. Evolución del logaritmo del BER por canal en función de la distancia del enlace.

Para evaluar la BER, los valores se normalizan y se representan en escala logarítmica, lo que permite observar con claridad la degradación progresiva de la calidad de la señal. Los canales C8, C2 y C1 mantienen BER extremadamente bajas a lo largo de todo el rango de distancias, lo que refleja una señal robusta y un ancho de banda efectivo óptimo. En cambio, los canales C5 y C7 muestran incrementos significativos a partir de los 70 km, alcanzando valores cercanos a -2 ($BER \approx 10^{-2}$), lo que evidencia una pérdida crítica de calidad. Estos resultados confirman el modelo teórico que relaciona la distancia, el ancho de banda efectivo y la calidad de la señal.

Ancho de banda en función de BER:

- Zona óptima (5–20 km): $BER < -100$
- Zona de transición (25–60 km): BER entre -50 y -10
- Zona insuficiente (65–100 km): $BER > -5$

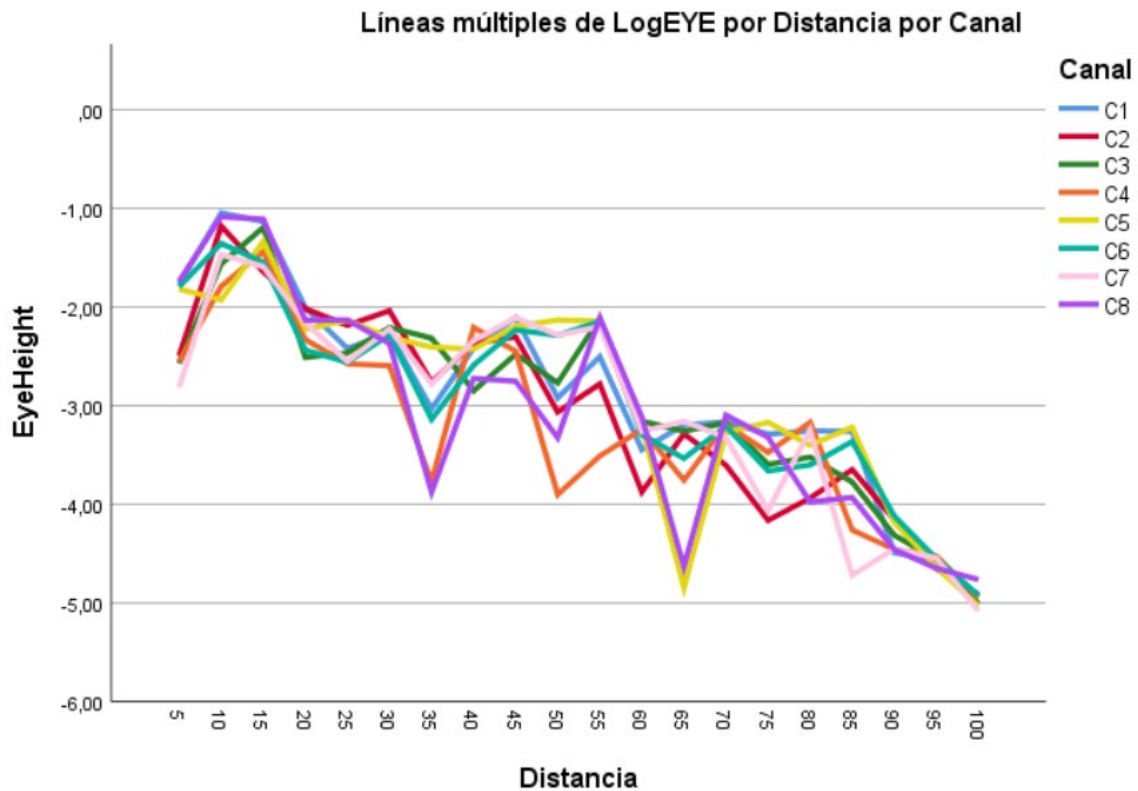


Figura 41. Evolución logarítmica de la altura de ojo (*EyeHeight*) por canal en función de la distancia del enlace.

Al analizar el ancho de banda en función de la apertura del ojo (*EyeHeight*), también se observa una disminución progresiva de *EyeHeight* a medida que aumenta la distancia. Esto refleja el cierre del ojo, lo que reduce la capacidad del receptor para diferenciar entre los bits 0 y 1.

Los tres gráficos confirman la hipótesis central del estudio: la distancia del enlace influye directamente en el ancho de banda efectivo, afectando los indicadores de calidad de la señal.

Correlacionando los 3 parámetros en una misma tabla, se podría definir tres zonas operativas:

Tabla 15. Resumen de comportamiento del ancho de banda delimitados en zonas

Zona	Distancia (km)	Q-factor	LogBER	LogEyeHeight	Estado BW efectivo
Óptima	5–20	>15		>–3	Adecuado
Transición	25–60	10–15	–50 a –10	–3 a –4	Degradado
Insuficiente	65–100		>–5		Crítico

Por tanto, aunque el ancho de banda del sistema no se varió explícitamente en la simulación, la evolución del Q-factor, la altura de ojo y el BER con la distancia permite

inferir el comportamiento del ancho de banda efectivo por canal. En distancias cortas, la señal opera en condiciones equivalentes a un ancho de banda óptimo, con máxima apertura del ojo y BER despreciable. A medida que aumenta la distancia, la dispersión y el ruido reducen el ancho de banda efectivo, provocando cierre del ojo, disminución del Q-factor y aumento del BER. En distancias superiores a 70 km, el sistema se comporta como si el ancho de banda disponible fuera insuficiente para la tasa de 2,5 Gbps, lo que limita la calidad de señal y la capacidad útil del enlace.

4.4.4 Validación de Hipótesis

“La tecnología UDWDM presenta una menor variación del desempeño (BER, Q-factor y Eye Height) en enlaces de larga distancia en comparación con DWDM, mientras que DWDM presenta valores promedio de calidad de señal significativamente superiores en enlaces de corta distancia.”

FactorQ

- **H0 (nula):** No existen diferencias estadísticamente significativas en el Q-factor entre las tecnologías DWDM y UDWDM.

En este caso de acuerdo con la prueba de Mann–Whitney U en donde ($p < 0.05$), se acepta la hipótesis nula.

- **H1 (alternativa):** Se observan diferencias estadísticamente significativas en el Factor Q entre las tecnologías DWDM y UDWDM.

BER

- **H0:** No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la BER entre las tecnologías DWDM y UDWDM.

En este caso de acuerdo con la prueba de Mann–Whitney U en donde ($p < 0.05$), se acepta la hipótesis nula.

- **H1:** Se identificaron diferencias estadísticamente significativas en la BER entre las tecnologías DWDM y UDWDM.

EyeHeight

- **H0:** La distancia del enlace no influye significativamente en la Eye Height del sistema.

En este caso de acuerdo con la prueba de Kruskal–Wallis y Spearmanen donde ($p < 0.05$ y $\rho = -0.935$), se acepta la hipótesis nula.

- **H1:** La distancia del enlace influye significativamente en la Eye Height del sistema.

Los resultados obtenidos muestran que el BER se mantiene estable frente al incremento de la distancia, lo que evidencia la robustez del sistema ante la degradación de la señal en el enlace. Sin embargo, métricas como el Q-factor y la Eye Height presentan una disminución significativa conforme aumenta la distancia, lo cual es coherente con los efectos de atenuación, dispersión cromática y ruido presentes en enlaces ópticos de larga distancia.

Se puede decir que a prueba de normalidad de Shapiro–Wilk evidenció que las variables BER, Q-factor y Eye Height no presentan una distribución normal, lo que justificó el uso de pruebas estadísticas no paramétricas, la comparación realizada mediante la prueba de Mann–Whitney U demostró que existen diferencias estadísticamente significativas entre las tecnologías DWDM y UDWDM en los parámetros BER y Q-factor, mientras que no se evidenciaron diferencias significativas en la Eye Height, en el análisis de Kruskal–Wallis se reveló que la distancia del enlace no afecta significativamente el BER, pero sí influye de manera significativa en el Q-factor y la Eye Height finalmente el análisis de correlación de Spearman confirmó una relación negativa fuerte entre la distancia y el Q-factor, así como una relación negativa muy fuerte entre la distancia y la Eye Height, evidenciando la degradación progresiva de la calidad de señal en enlaces de larga distancia.

En resumen, los resultados estadísticos respaldan la hipótesis principal del estudio, mostrando que la tecnología UDWDM mantiene un desempeño más estable en enlaces de larga distancia, mientras que DWDM ofrece una mejor calidad de señal en tramos cortos.

CONCLUSIONES

Se realizó la simulación de un sistema de comunicaciones ópticas mediante las tecnologías UDWDM y DWDM, que permitió la obtención de los diferentes parámetros de potencia recibida, BER, FactorQ y Diagrama de Ojos de la señal en recepción.

Se confirma que existen diferencias estadísticamente significativas en los parámetros de desempeño (Factor Q y BER) entre las tecnologías DWDM y UDWDM. Mientras que DWDM sobresale por ofrecer una mayor integridad de señal en enlaces de corto alcance, UDWDM muestra una mayor resiliencia y estabilidad en enlaces de larga distancia, lo que respalda su viabilidad para redes de alta densidad espectral.

La distancia del enlace constituye el factor de mayor impacto sobre el Diagrama de Ojos (Eye Height), y por ende la calidad general del sistema. El cierre progresivo del “Ojo” a medida que aumenta la distancia, evidencia que los efectos acumulativos de la atenuación y la dispersión limitan el umbral de detección, siendo este fenómeno más lineal y controlable en el entorno UDWDM para tramos extendidos.

La degradación de la señal multicanal no es uniforme a lo largo del espectro. Los canales centrales experimentan una caída de rendimiento más acelerada en comparación con los canales de los extremos, lo cual podría atribuirse a fenómenos no lineales como el Mezclado de Cuatro Ondas (FWM) y la Modulación de Fase Cruzada (XPM), que son más intensos cuando el espaciamiento de frecuencia es ultra-reducido, como es el caso de UDWDM.

Los resultados estadísticos permiten validar que DWDM es la solución óptima para maximizar la calidad en tramos cortos, pero UDWDM se posiciona como la tecnología preferente para optimizar la eficiencia del ancho de banda en infraestructuras de largo recorrido sin comprometer la estabilidad del BER por debajo de los límites normativos

REFERENCIAS

- [1] Brückner, V. (2024). Elements of Optical Networking: Basics and Practice of Glass Fiber Optical Data Communication. Alemania: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://www.redalyc.org/journal/5722/572278419004/572278419004.pdf>
- [2] I.U.V. Simanjuntak, S. Larasati, Y. Rahmawati S, and, D.A. Santika, Modernization of dense wavelength division multiplexing (DWDM) route Surabaya-Bangil to increase optical network capacity. Elkha. 14(2), 89 (2022). <https://doi.org/10.26418/elkha.v14i2.56003>
- [3] Manchay, N., Tipantuña, C., Arévalo, G., Arguero, B., Parra, C. (2024) Analysis of Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing (UDWDM) in a Passive Optical Network (PON) <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.1049>
- [4] Lucky S, Vaibhav M, Vinod K. (2016) Link Optimization and Performance Analysis of a 40 Gbps DQPSK Modulated Ultra DWDM System with 32 Orthogonally Polarized channels. <https://doi.org/10.1590/2179-10742016v15i4715>
- [5] Proditex-System. (2025) Fibra óptica: tecnología y aplicaciones esenciales en 2026. <https://proditex-system.es/fibra-optica-tecnologia-aplicaciones-2026/>
- [6] Tanenbaum, A., Wetherall, D. (2012) Redes De Computadoras. 5ta Edición. Pearson Educación.
- [7] Bohara, Vivek Ashok., R, Swaminathan. Optical and Wireless Access Networks. Suiza: Springer Nature Switzerland, 2025.
- [8] Hui, Rongqing. Introduction to Fiber-Optic Communications. Estados Unidos: Academic Press, 2025.
- [9] Ashenafi, F., Gelmecha, Jobir, D., Ram, S. (2025). Design and performance analysis of 1.28Tbps ultra-dense wavelength division multiplexing in free space optical networks under diverse weather conditions. Journal of Optics, Online First. doi:10.1007/s12596-025-02921-2
- [3] Sánchez, J. (2020) "Análisis de las técnicas de Multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y su simulación mediante OptiSystem". Obtenido de: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/14188/1/T-UCSG-POS-MTEL-160.pdf>.
- [4] Ceballos, G. (2022). "Qué es DWDM y cuál su relación con los grandes volúmenes de datos". Obtenido de: <https://blog.internexa.com/es/que-es-dwdm>.

- [5] Ministerio de Telecomunicaciones. (2020). "Notable crecimiento de la Banda Ancha en Ecuador". Obtenido de: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/notable-crecimiento-de-la-banda-ancha-en-ecuador/>. Consultado el 30 de junio de 2024.
- [6] Argüello, A. (2020). "Análisis del impacto de la migración de la técnica CWDM a DWDM en redes ópticas". Obtenido de: <https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/12720/1/UDLA-EC-TIRT-2020-28.pdf>.
- [7] Astudillo, J. (2020). "Manual para la caracterización de la fibra óptica en dwdm", Electrónica y telecomunicaciones. Obtenido de: <https://dspace.ups.edu.ec/UPS-CT003888>
- [8] Culqui, F. (2023) "Incidencia de los efectos lineales en la calidad de las comunicaciones ópticas basadas en la multiplexación DWDM". Obtenido de: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/12076/1/SORIA%20FRANCO%20%20Incidencia%20de%20los%20efectos%20lineales.pdf>.
- [9] Sayed, D y Silva, O. (2019). "Simulación de un anillo de red de transporte de fibra óptica comparando los métodos de multiplexación WDM y DWDM a través del software Optisim". Obtenido de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19512/1/CD-8904.pdf>.



Paul Zumba
ESTUDIANTE
C.I. 0605876051