



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**Incidencia de los efectos lineales en la calidad de las
comunicaciones ópticas basadas en la multiplexación UDWDM**

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones**

Autor:

Soria Culqui, Franco Ismael

Tutor:

Ing. Carlos Peñafiel Ojeda PhD.


Riobamba, Ecuador. 2023

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, Franco Ismael Soria Culqui, con cédula de ciudadanía 1600635088, autor del trabajo de investigación titulado: “**Incidencia de los efectos lineales en la calidad de las comunicaciones ópticas basadas en la multiplexación UDWDM**”, 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, 07 de noviembre del 2023



Franco Ismael Soria Culqui


C.I:160063508-8

**DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE
TRIBUNAL;**

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Incidencia de los efectos lineales en la calidad de las comunicaciones ópticas basadas en la multiplexación UDWDM**”, presentado por Franco Ismael Soria Culqui, con cédula de identidad número 160063508-8, certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 07 de noviembre 2023.

Klever Torres, Msc.
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE
GRADO**



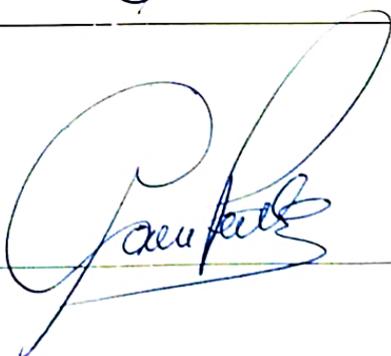
Marco Nolivos, Msc.
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
GRADO**



Antonio Meneses, PhD.
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
GRADO**



Carlos Peñafiel, PhD.
TUTOR



CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Incidencia de los efectos lineales en la calidad de las comunicaciones ópticas basadas en la multiplexación UDWDM**”, presentado por Franco Ismael Soria Culqui, con cédula de identidad número 160063508-8, bajo la tutoría de PhD. Carlos Peñafiel Ojeda; 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 07 de noviembre 2023

Presidente del Tribunal de Grado
Msc. Klever Torres



Miembro del Tribunal de Grado
Msc. Marco Nolivos



Miembro del Tribunal de Grado
PhD. Antonio Meneses





Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-02.20
VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **SORIA CULQUI FRANCO ISMAEL** con CC: **160063508-8**, estudiante de la Carrera **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **INCIDENCIA DE LOS EFECTOS LINEALES EN LA CALIDAD DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS BASADAS EN LA MULTIPLEXACIÓN UDWDM**", cumple con el 2%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 01 de noviembre de 2023



Ing. Carlos Peñafiel Ph.D.
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

A Dios, por darme salud y sabiduría durante este arduo proceso académico y permitirme culminar con éxito esta meta propuesta.

A mi madre, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios que hicieron posible mi educación; su dedicación y valores han sido mi guía a lo largo de este camino.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos, inspirarme y brindarme orientación académica; su impacto ha sido fundamental para mi desarrollo intelectual.

A mis amigos y seres queridos, quienes me han acompañado con paciencia y aliento en los momentos desafiantes; su amistad ha sido un regalo invaluable durante este proceso académico.

Franco Ismael Soria Culqui

AGRADECIMIENTO

A Dios y a mi familia, por su amor incondicional y su constante apoyo para superar los desafíos que surgieron a lo largo de este viaje académico, que hoy en día se ha convertido en una hermosa realidad.

Agradezco también a mi tutor Ing. Carlos Peñafiel PhD y revisores Marco Nolivos Msc, y Antonio Meneses PhD por sus valiosas sugerencias y comentarios constructivos que han enriquecido el contenido de este trabajo de titulación.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Chimborazo que me abrió las puertas del saber, la excelencia académica de esta institución ha sido una fuente constante de inspiración y motivación a lo largo de mi trayectoria.

A todas las personas que de una u otra manera me han guiado y orientado en la culminación de esta meta.

A todos ellos gracias....

Franco Ismael Soria Culqui

ÍNDICE GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

RESUMEN

ABSTRACT

1.	CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1	Antecedentes	17
1.2	Planteamiento del Problema	18
1.3	Justificación	19
1.4	Objetivos.....	20
1.4.1	Objetivo General.....	20
1.4.2	Objetivos Específicos	20
2.	CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO	21
2.1	Estado del Arte.....	21
2.2	Marco Teórico.....	22
2.2.1	Fibra Óptica	22
2.2.2	Redes PON.....	26
2.2.3	Multiplexación por División de Longitud de Onda	27

2.2.4	Efectos Ópticos en las Redes de Fibra Óptica	31
3.	CAPITULO III. METODOLOGÍA.....	34
3.1	Tipo de Investigación.....	34
3.2	Métodos de la Investigación	34
3.3	Escenario de Prueba.....	34
3.4	Hipótesis y Operacionalización de Variables	36
3.4.1	Hipótesis de Investigación Hi	36
3.5	Diseño del Sistema Óptico.....	38
3.5.1	Dimensionamiento del Sistema	38
3.5.2	Equipo de Capa Óptica	43
3.5.3	Equipo de Capa Eléctrica.....	46
3.5.4	Fibra Óptica G652 y G655.....	47
3.6	Simulación del Sistema Óptico.....	50
4.	CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
4.1	Simulación de Escenarios de Prueba	60
4.1.1	Banda C para Fibra G.652 con una Distancia de 20 Km y potencia de transmisor de 2.5dBm.....	60
4.1.2	Banda C para Fibra G.652 con una Distancia de 40 Km y potencia de transmisor de 2.5dBm.....	62
4.1.3	Banda C para Fibra G.652 con una Distancia de 80 Km y potencia de transmisor de 2.5dBm.....	65
4.1.4	Banda C para Fibra G.652 con una Distancia de 120 Km y potencia de transmisor de 2.5dBm.....	67
4.2	Análisis de Resultados de Simulación por Tipo de Fibra	70
4.3	Análisis Estadístico.....	78
4.3.1	Comprobación de Hipótesis Simulación Fibra G.652	78
4.3.2	Comprobación de Hipótesis Simulación Fibra G.655	80

5.	CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
5.1	Conclusiones	83
5.2	Recomendaciones	84
	ANEXOS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Leyes que rigen la transmisión por Fibra óptica [15]	22
Figura 2. Componentes de la fibra óptica [16].	23
Figura 3. Cubierta para Cable de Fibra Óptica [18]	24
Figura 4. Estructura de un Cable de Fibra Óptica [18].	25
Figura 5. Red óptica Pasiva (PON) [19].	26
Figura 6. Esquema de arquitectura WDM-PON [23].	28
Figura 7. Espaciamiento de frecuencias en DWDM y CWDM [26].	28
Figura 8. Esquema de multiplexación CWDM [27].	29
Figura 9. Esquema de Multiplexación DWDM [27]	30
Figura 10. Ejemplo de multiplexación UDWDM [25].	30
Figura 11. Elementos de una red UDWDM [28]	31
Figura 12. Fenómeno de dispersión cromática [29]	32
Figura 13. Comparación de atenuación según el material guiado [31]	33
Figura 14. Planificación para el Desarrollo del Proyecto	35
Figura 17. Diagrama de Presupuesto óptico del Sistema (a) 20km (b) 40km (c) 80km (d) 120km.	40
Figura 18. Plataforma de Transporte óptico Optix OSN 6800	43
Figura 19. Área de tarjetas del sistema Optix OSN 6800 [25]	44
Figura 20. a.) Tarjeta M40V b.) Tarjeta D40	45
Figura 21. Sistema Optix OSN 8800 [34]	46
Figura 22. Cable de Fibra Óptica SM G652D [35]	47
Figura 23. Bloques de Transmisión del Sistema Óptico	52
Figura 24. Esquema del Sistema de Transmisión Multiplexado por WDM.	53
Figura 25. Etapa de transmisión con Filtro Gaussiano	53
Figura 26. Niveles de Potencia de las señales de transmisión multiplexadas	54
Figura 27. Analizador WDM con potencia de señal, potencia de ruido y OSNR ...	54
Figura 28. Etapa de Amplificación y Demultiplexación del Sistema.	55
Figura 29. Espectro de la Señal Demultiplexada.	56
Figura 30. Analizador WDM de la señal demultiplexada	56
Figura 31. Etapa de Recepción y Conversión a Señal Eléctrica.	57
Figura 32. Etapa de Recepción del Sistema UDWDM de 8 Canales	57

Figura 33. Diagrama de Ojo de la Señal Receptada (a) Canal 1 (b) Canal 8	59
Figura 34. Espectro óptico del enlace con fibra G.652 a 20 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.....	60
Figura 35. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 20 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.....	61
Figura 36. Diagrama de Ojo de enlace con fibra G.652 a 20 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C (a) Canal 1 (b) Canal 2 (c) Canal 3 (d) Canal 4 (e) Canal 5 (f) Canal 6 (g) Canal 7 (h) Canal 8	62
Figura 37. Espectro óptico del enlace con fibra G.652 a 40 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.....	63
Figura 38. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 40 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.....	63
Figura 39. Diagrama de Ojo con fibra G.652 a 40 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C. (a) Canal 1, (b) Canal 2, (c) Canal 3, (d) Canal 4, (e) Canal 5, (f) Canal 6, (g) Canal 7, y (h) Canal 8.	64
Figura 40. Espectro óptico del enlace con fibra G.652 a 80 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.....	65
Figura 41. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 80 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda	66
Figura 42. Diagrama de Ojo con fibra G.652 a 80 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C. (a) Canal 1, (b) Canal 2, (c) Canal 3, (d) Canal 4, (e) Canal 5, (f) Canal 6, (g) Canal 7, y (h) Canal 8.	67
Figura 43. Espectro óptico del enlace con fibra G.652 a 120 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.....	68
Figura 44. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 120 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.....	68
Figura 45. Diagrama de Ojo con fibra G.652 a 120 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C. (a) Canal 1, (b) Canal 2, (c) Canal 3, (d) Canal 4, (e) Canal 5, (f) Canal 6, (g) Canal 7, y (h) Canal 8.	69
Figura 46. Resultados obtenidos para las diferentes Distancias Banda C G652 (a) Factor Q (b) BER (c) OSNR.....	71
Figura 47. Resultados de las diferentes Distancias Banda C G655 (a) Factor Q (b) BER (c) OSNR	73

Figura 48. Resultados para las diferentes Distancias Banda L G652 (a) Factor Q (b) BER (c) OSNR	75
Figura 49. Resultado para las diferentes Distancias Banda L G655 (a) Factor Q, (b) BER (c) OSNR	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro de Operacionalización de las Variables	36
Tabla 2. Presupuesto óptico del sistema considerando los dos tipos de fibra	42
Tabla 3. Características de Optix OSN 6800 [33]	44
Tabla 4. Funciones para Cada Ranura del área de tarjetas [25].....	45
Tabla 5. Características del Equipo Optix OSN 8800 [34]	46
Tabla 6. Características de la Fibra óptica SM G652D [35]	48
Tabla 7. Características de la Fibra Óptica Silex SM G655 [36]	49
Tabla 8. Presupuesto Económico del Sistema	50
Tabla 9. Distribución de Frecuencias para los 8 canales de transmisión UDWDM en la Banda C y Banda L.....	51
Tabla 10. Parámetros Configurados para la Conexión de Fibra.....	55
Tabla 11. Datos de Canal 4 de enlace con fibra G.652 a 20 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C.....	61
Tabla 12. Datos de enlace con fibra G.652 a 40 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	65
Tabla 13. Datos de enlace con fibra G.652 a 80 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	66
Tabla 14. Datos de enlace con fibra G.652 a 120 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C	70
Tabla 15. Media de Datos Banda C Fibra G.652 2.5dBm.....	70
Tabla 16. Media de Datos Banda C Fibra G.655 2.5dBm.....	72
Tabla 17. Media de Datos Banda L Fibra G.652 2.5dBm	74
Tabla 18. Media de Datos Banda L Fibra G.655 2.5dBm	76
Tabla 19. Datos Estadísticos para Pruebas de Fibra G.652	79
Tabla 20. ANOVA del BER para la Fibra G.652	79
Tabla 21. Prueba de Tukey en fibra G652.....	80
Tabla 22. Datos Estadísticos Descriptivos de Pruebas Fibra G.655.....	81
Tabla 23. Análisis ANOVA para Fibra G.655	81
Tabla 24. Prueba Tukey en Fibra G655.....	82

RESUMEN

Los sistemas de transmisión ópticos permiten la comunicación a largas distancias, sin embargo, se debe considerar los diversos efectos que puede producirse en las señales transmitidas debido a los fenómenos ópticos. La dispersión cromática es un efecto producido en la fibra debido a la distancia de transmisión y puede provocar varios efectos dentro de la señal como es la atenuación y errores durante el envío de información. En el presente trabajo de investigación se presenta el análisis de los efectos producidos por la dispersión cromática en sistema UDWDM, para lo cual se utilizó el Software OptiSystem para presentar diversos escenarios de simulación que permitan medir la calidad de enlace diseñado. Para esto se realizó las mediciones de BER, OSNR y Factor Q en dos tipos de fibra con diferente coeficiente de dispersión cromática, la G652 y la G655, a distancias de 20, 40, 80 y 120km. Se pudo observar que existe una excelente calidad de enlace para ambos tipos de fibra en el Canal C y Canal L en distancias de 20 a 80 km; para distancias mayores los parámetros de BER, OSNR y Factor Q cambian drásticamente lo que ocasiona una baja calidad de enlace.

Palabras claves: Dispersión, Cromática, UDWDM, BER, OSNR, Canal, Enlace

ABSTRACT

This research study presents an analysis of the effects produced by chromatic dispersion in the UDWDM system. Optical transmission systems allow communication over long distances, however, one must consider the various effects that can occur in the transmitted signals due to optical phenomena. Chromatic dispersion is an effect produced in the fiber due to the transmission distance and can cause several effects within the signal such as attenuation and errors during the sending of information. For this reason, OptiSystem software was used to present various simulation scenarios to measure the quality of the designed link. For this purpose, BER, OSNR, and Q-Factor measurements were performed on two types of fiber with different chromatic dispersion coefficients, G652 and G655, at distances of 20, 40, 80, and 120km. It could be observed that there is an excellent link quality for both types of fiber in the C-channel and L-channel at distances from 20 to 80 km; for longer distances, the BER, OSNR, and Q-factor parameters change drastically resulting in poor link quality.

Keywords: Dispersion, Chromaticity, UDWDM, BER, OSNR, Channel, Link



MARCO ANTONIO
AQUINO ROJAS

Reviewed by:
Mgs. Marco Antonio Aquino
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 1753456134

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La evolución de las tecnologías y las redes de acceso, principalmente en la fibra óptica, es un tema de suma importancia en los sistemas de comunicaciones, debido a la integración de este medio de transmisión. Las operadoras de telecomunicaciones basadas en Redes Ópticas Pasivas (PON) esperan obtener el máximo provecho para el uso de ancho de banda haciendo que esto signifique mayor velocidad en el transporte de datos y mejor rendimiento de los enlaces, para conseguir la coexistencia con equipos de la planta exterior y por ende lograr incremento de rentabilidad económica al tener más cantidad de usuarios usando la red, con buenos parámetros de calidad que no limiten la experiencia del usuario respecto a la eficiencia de la red [1].

Por otro lado, no se puede evitar considerar la explotación de nuevas tecnologías de información y comunicación (TICs), esto con el objetivo de poder caminar hacia la convergencia y modelo de Ciudades Inteligentes, trayendo consigo el despliegue de sensores y receptando una mayor cantidad de datos. Se debe tomar en cuenta que no solo estos dispositivos generan un flujo alto de información, sino que también el uso de aplicaciones de video en vivo y *streaming* requieren de una alta demanda del ancho de banda de la red.

Una red WDM-PON básicamente dispone de varias portadoras o señales sujetas a diferente longitud de onda, esto con el objetivo claro y básico de poder ser lo más útil para sacar el provecho a este medio y lograr la transmisión de información. Así también, tolera separar, enrutar y conmutar longitudes bajo la señal enviada permitiendo ventajas como transparencia en los protocolos, aumento de la tasa de bits, seguridad a nivel de la capa física y la facilidad de actualización y gestión de red [2].

La Multiplexación por División de Longitud de Onda Ultra Densa (UDWDM) es una versión mucho más actualizada que WDM, siendo esta la que presenta mejores resultados debido a su eficiencia espectral en las bandas de 1525 a 1625 nm con canales de 25, 50, 100, 200 y 400 GHz pudiendo utilizar hasta 160 de estas señales intermedias, soportando así un mayor número de usuarios en las redes de distribución óptica (ODN's) [3]; razón por la cual en este proyecto de investigación se iniciará con el estudio teórico referente a los temas de multiplexación y comunicación óptica que utilizan actualmente las operadoras de servicios de telecomunicaciones para poder generar redes de acceso a los usuarios que poseen esta necesidad, generando una calidad de transmisión y servicio; así como analizando los diferentes factores que influyen dentro de este tipo de enlaces.

1.2 Planteamiento del Problema

Una de las principales vías de transmisión usados en la actualidad para el envío y recepción de información es la fibra óptica, que es uno de los medios guiados que brindan gran capacidad de ancho de banda. Es fundamental mencionar que cada día se tiene avances tecnológicos que permiten obtener el máximo provecho de este medio guiado. Cabe recalcar que el avance tecnológico ha permitido mejoras en el rendimiento, modulación y transmisión de información, sin embargo, el hecho de usar equipos que emiten varias señales bajo una misma portadora suele generar errores en el envío, recepción e incluso en la recuperación de la señal original. Estos suelen ser producidos cuando un bit transmitido como “0” es detectado como “1” y viceversa. Los sistemas de comunicaciones actuales trabajan con tasas de detección y corrección de errores inferiores a 10⁻⁶ bits, en donde estas técnicas son implementadas en los receptores [4].

Por otro lado, la dispersión cromática provoca un ensanchamiento del pulso generando dos posibles condiciones: reducción de frecuencia de transmisión y la disminución de la distancia entre los datos transmitidos. Estos problemas dan lugar a la interferencia, pues si la primera condición es muy alta y la segunda muy larga, los pulsos consecutivos pueden llegar a traslaparse [5]. Por lo tanto, se puede decir que este fenómeno describe la tendencia para diferentes longitudes de onda que viajan a través de una fibra óptica, por lo que si los pulsos se expanden en el tiempo provocan una distorsión que produce una baja velocidad de transmisión, causando que la calidad de la comunicación sea ineficiente y por ende el aprovechamiento de los recursos no se dé de manera óptima.

Por tal razón, este proyecto pretende realizar un estudio de los fenómenos lineales que nos permitirá estimar el impacto de la dispersión cromática en una red de transmisión, de manera que se logre que los pulsos transmitidos conserven la mayor parte de su energía en un intervalo de tiempo asignado, para lograr identificar y determinar la máxima tasa de bits por segundo que pueden ser enviados a lo largo de una fibra [3]. La identificación de estos factores determinará el rendimiento del sistema de comunicaciones, y si es posible conseguir una mejora de eficiencia resolviendo o mitigando al máximo las causas principales que afectan a los enlaces DWDM.

1.3 Justificación

El crecimiento y la comercialización de productos de consumo masivo que brindan nuevos servicios como video, telemedicina, IPTV, videoconferencia y aplicaciones multimedia están impulsando a las empresas de telecomunicaciones a buscar nuevos enlaces de multiplexación a través de fibra óptica para satisfacer demandas masivas de ancho de banda [6]. Hoy en día, la humanidad se encuentra en una era en la que las comunicaciones digitales y en tiempo real están muy extendidas, y es necesario crear un medio de transmisión que pueda proporcionar una amplia banda de comunicación. La fibra óptica ha demostrado ser el medio de preferencia debido a su capacidad única para transmitir grandes cantidades de datos a velocidades más altas y con menos atenuación que otros medios de transmisión, lo que da como resultado una alta confiabilidad [7].

Para lograr proveer de varios Gbit/s de ancho de banda a cada usuario final, se ha implementado el uso de multiplexación por división de longitud de onda WDM (Wavelength Division Multiplexed), misma que provee de varias ventajas como la transparencia del protocolo, la tasa de bits, una fácil actualización y gestión de seguridad a niveles de red y capa física. Sin embargo, además del alto costo que resulta su implementación, las señales ópticas que se transmiten a través de los sistemas WDM-PON están sujetas a degradación debido a los efectos de propagación de las fibras ópticas [8].

Estos efectos que se producen en los sistemas de fibra óptica actuales, son conocidos como la dispersión cromática y la dispersión del modo de polarización. Estos problemas que se presentan actualmente en el diseño y despliegue de este tipo de sistemas son la linealidad y no linealidad inherente a la modulación directa, siendo estas conocidas como las pérdidas que sufre el sistema al convertir una señal eléctrica en luz y viceversa; así también se puede mencionar la mezcla de señales no deseadas con las transmitidas lo que se conoce como ruido de intensidad variable presente en el enlace que incluye al ruido óptico y eléctrico [9].

El objetivo de esta investigación es analizar los niveles de incidencia de los efectos lineales, en la variación de la calidad de una comunicación óptica con técnica de Multiplexación UDWM, a través del uso del simulador de redes ópticas *OptiSystem*. Para lograr esto, se realizará el diseño de la red contemplando la transmisión de datos en las que se pueda añadir la aparición de estos fenómenos, ya que como en todas las señales que viajan por la fibra también se presentan pérdidas que degradan la señal. Los efectos lineales surgen en potencias menores de 10 dBm a la entrada del medio y son la Atenuación y Dispersión [3].

Este estudio permitirá identificar y evaluar las posibles alternativas para solucionar los requerimientos de la red en caso de que surjan los inconvenientes mencionados anteriormente, de manera que se puedan considerar y poder actuar frente a los resultados obtenidos desde la etapa del diseño, sugiriendo y analizando cambios de fabricantes, arquitectura e incluso de equipos de red, esto para reducir la incidencia negativa en las comunicaciones, disminuyendo el error y la mala calidad en la recepción de los datos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar la incidencia de los efectos lineales usando un simulador para medir la calidad de las comunicaciones ópticas de redes basadas en la multiplexación UDWDM, con el fin de promover mejoras en las etapas de diseño, despliegue e implementación de una red PONm.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar un estudio del estado del arte referente a los efectos lineales en los enlaces de fibra óptica.
- Determinar los elementos activos y pasivos, así como los parámetros que intervienen en un enlace de comunicación óptica con multiplexación UDWDM mediante el software OptiSystem.
- Generar simulaciones en la herramienta OptiSystem con variación de parámetros como distancia, velocidad de transmisión, atenuación de fibra y banda de transmisión, mismas que permitan evaluar el comportamiento y los efectos lineales en el sistema de comunicación UDWDM.
- Analizar el desempeño de la transmisión simulada al aplicar efectos lineales que afecten la calidad del enlace óptico.

2. CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Estado del Arte

Existen diversos trabajos de investigación que relacionan los efectos que produce la dispersión crónica en las redes de comunicación por fibra óptica, entre los que se puede mencionar el trabajo propuesto por Udayakumar, Khanaa y Saravanan [10], mismo que trata de compensar la dispersión cromática utilizando técnicas de conjugación de fase óptica y red de Bragg de fibra. En este se analizó el efecto de la dispersión cromática en un enlace de fibra óptica en donde se obtuvo una simulación utilizando la rejilla de Fiber Bragg variando su período y el coeficiente de linealidad [10]. De la misma manera, en el trabajo realizado por Bashir y Kumar [11] presenta una revisión de todos los enfoques principales de la dispersión cromática, así como la caracterización de la rejilla de Bragg en la fibra para la compensación de la dispersión en donde se utiliza el espectro de reflexión y el análisis de respuesta de retardo de grupo [11].

Por otro lado, en el estudio realizado por Nguyen, Rottenberg, Gorza, Louveaux, & Horlin [12], se presentan métodos de compensación de dispersión cromática (CD) utilizando un número de subportadoras para poder realizar el seguimiento del ruido de fase (PN). El ecualizador de muestreo que se utilizó en este trabajo en conjunto con un estimador adaptativo permitió compensar el rendimiento entre CD y PN en un sistema de transmisión terrestre de larga distancia FBMC/OQAM, con un ancho de línea láser de 400 KHz y un enlace óptico de 1000 Km [12].

Por otro lado, en el artículo de Terra [13], se presenta una técnica novedosa que permite medir la dispersión cromática (CD) en fibras ópticas. Esta técnica se basa en una oscilación optoelectrónica (OEO) de frecuencia relativamente baja para proporcionar un método rápido, preciso y de costo relativamente bajo para la medición de CD que se puede implementar fácilmente en instrumentos comerciales. La configuración propuesta se implementa para medir CD en fibras monomodo normales con longitudes de 40 km, 10 km y 1 km. Además, se implementa para medir CD en 400 m de fibra desplazada de dispersión distinta de cero para probar la capacidad del sistema para resolver pequeños retrasos cromáticos [13].

Finalmente, en el trabajo realizado por Vinoth, et. al. [14], se proporcionan dos modelos de redes Fiber-to-the-x (FTTx), una híbrida de multiplexación por división de longitud de onda densa y multiplexación por división de longitud de onda gruesa (DWDM/CWDM) con un alto ancho de banda asignado al receptor, y la otra de híbrida de multiplexación por división de longitud de onda ultra densa y multiplexación por división de longitud de onda gruesa (UDWDM/CWDM) con alta capacidad de red. Se demostró el efecto de la dispersión cromática de la fibra sobre la calidad de la señal y se discutió el comportamiento de la red con respecto al cambio de la separación entre canales DWDM y la relación entre la separación entre canales y la tasa de bits del sistema [14].

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Fibra Óptica

La fibra óptica es un medio guiado a través del cual las señales ópticas se transmiten como información. Las fibras ópticas pueden transmitir estos datos desde sistemas de alta capacidad a largas distancias porque la señal de entrada se convierte en pulsos cortos de luz, lo que permite que los datos se transmitan a cientos de kilómetros sin el uso de amplificadores, siendo esta una gran ventaja sobre los cables de cobre.

La velocidad de propagación de la luz a través de un medio físico depende del material sobre el cual está fabricado. En el espacio libre, la velocidad de la luz es de 300 millones de metros por segundo. El índice de refracción es una propiedad material que determina la velocidad a la que la luz viaja a través de un medio [15].

Para comprender el comportamiento de la luz en las fibras ópticas, es necesario mencionar dos leyes de las cuales se menciona a continuación y se puede observar en la *Figura 1*.

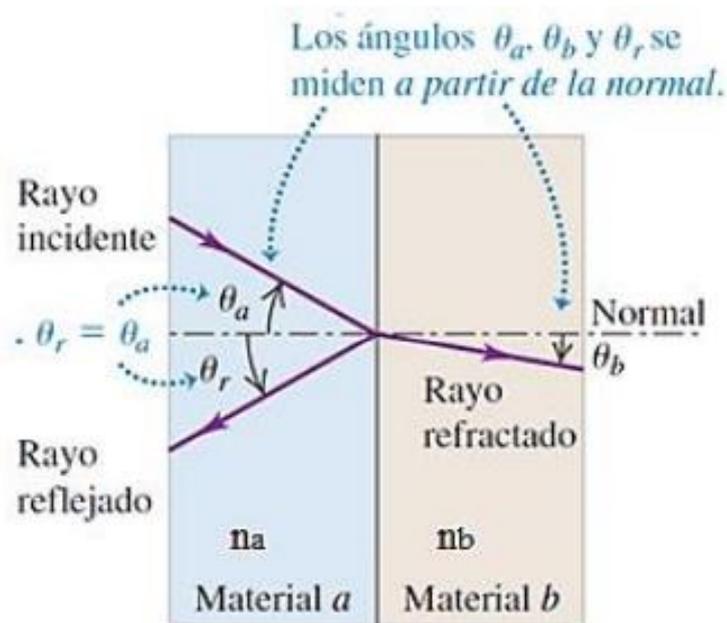


Figura 1. Leyes que rigen la transmisión por Fibra óptica [15]

- **Ley de Refracción:** También conocida como Ley de Snell indica que la razón de 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 Ecuación (1).

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b \quad \text{Ecuación (1)}$$

- **Ley de Reflexión:** Esta ley 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 le Ecuación Ecuación (2).

$$\theta_r = \theta_a \quad \text{Ecuación (2)}$$

2.2.1.1 Componentes de la Fibra Óptica

La fibra óptica está compuesta por dos capas de protección y una capa de transmisión o también llamada núcleo. Como se observa en la *Figura 2*, la primera capa es un cilindro de recubrimiento de plástico, mientras que la segunda es una capa o cubierta que protege al núcleo y a su vez, debido a su bajo índice de refracción evita el escape de la luz. Finalmente, el núcleo es la parte de la fibra que posee el índice de refracción de luz más alto, y es el medio por el cual se transmite la información [16].

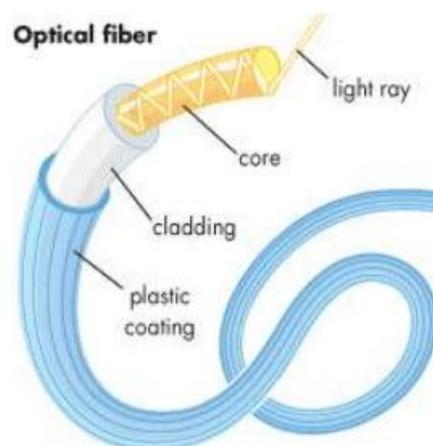


Figura 2. Componentes de la fibra óptica [16].

Los sistemas de comunicación que utilizan fibra óptica están constituidos por una parte de transmisión, un medio de transmisión y el receptor. El transmisor recibe una señal eléctrica de voltaje que genera una corriente, que a su vez permite la activación de una fuente de luz la cual emite más o menos intensidad. Una vez generadas las señales de luz, son enviadas por el medio de transmisión (fibra óptica) hasta llegar al receptor, el cual es un detector óptico que recibe la señal de luz enviada por el transmisor y la convierte en una señal eléctrica para lograr obtener los datos transmitidos [17].

2.2.1.2 Características de la Fibra Óptica

2.2.1.2.1 Cobertura Especial

Constituye una cubierta especial que va directamente sobre el núcleo del cable a alta presión, lo que da como resultado un borde helicoidal en la superficie interna de la cubierta del cable a la que se unen los subcables. Esta cobertura posee cerca de un 25% más de material que las cubiertas tradicionales utilizadas en otro tipo de cables. En la se puede observar la comparación entre una cubierta normal y una especial para fibra óptica [18].

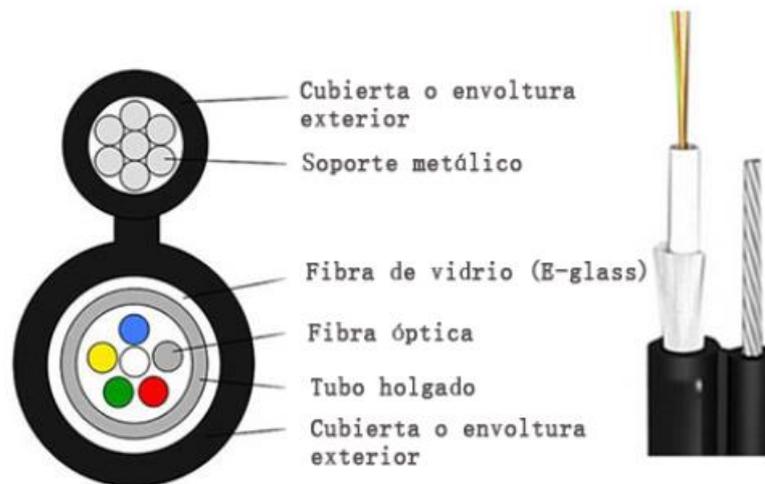


Figura 3. Cubierta para Cable de Fibra Óptica [18]

Los avances recientes en la protección contra combustibles han reducido los riesgos que plantean las instalaciones de fibra óptica más antiguas con cubiertas de material inflamable y rellenos de gel combustible. Estos materiales pueden no cumplir con los requisitos de la normativa de instalación, presentar riesgos adicionales y también pueden presentar desafíos costosos y difíciles en la remediación posterior al incendio. Los nuevos avances en esta área y el diseño de cables eliminan estos riesgos y cumplen con los estándares de instalación [18].

2.2.1.2.2 Empaquetado de Alta Densidad

Al utilizar el máximo número de fibras en el menor diámetro posible, las instalaciones en las que los cables deben pasar por curvas pronunciadas o espacios reducidos se hacen más rápidas y sencillas. El resultado es un cable con 72 fibras estructurales ultradensas, un 50% más pequeñas en diámetro que los cables tradicionales [18].

2.2.1.2.3 Características Técnicas

Una fibra óptica consta de una región cilíndrica en la que tiene lugar la propagación, denominada núcleo, y una región exterior y coaxial con el núcleo. Esta región es esencial para el funcionamiento del mecanismo de propagación y se denomina revestimiento o cladding. La capacidad que una fibra para poder transmitir información depende de tres factores que son:

- Diseño geométrico de la Fibra
- Propiedades del material
- Anchura espectral de la fuente de luz

En la Figura 4 se puede observar un tipo de fibra óptica comercial en donde para dimensiones más pequeñas que los soportes existentes. Un cable de 10 fibras tiene un diámetro de aproximadamente 8 o 10 mm, el cual se puede comparar con uno igual o superior a un cable coaxial de 10 hilos.

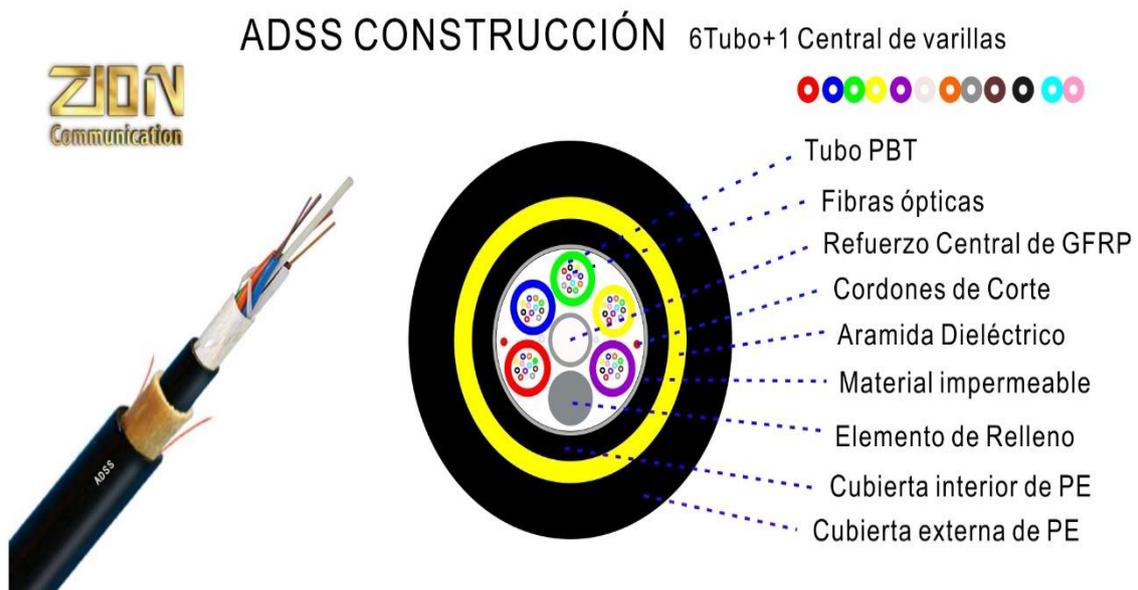


Figura 4. Estructura de un Cable de Fibra Óptica [18].

2.2.1.2.4 Características Mecánicas

Las fibras ópticas no tienen suficientes propiedades de tracción para usarse directamente como elementos resistivos colocados en cables compuestos por múltiples conjuntos de fibras. La investigación en componentes optoelectrónicos y fibras ópticas ha mejorado mucho la calidad funcional del sistema, siendo necesarias cubiertas y protectores de calidad que puedan proteger la fibra. La sensibilidad a la flexión y la microflexión, la resistencia mecánica y las propiedades de envejecimiento deben tenerse en cuenta para lograr este objetivo.

Otro objetivo es lograr minimizar las pérdidas de cable adicionales y las variaciones de atenuación dependientes de la temperatura. Estas diferencias pueden estar diseñadas para mejorar otras propiedades, como la resistencia mecánica, la calidad de la conexión, el factor de relleno (número de fibras por mm²) o el costo de fabricación [18].

2.2.2 Redes PON

Una solución atractiva para aumentar el ancho de banda y la velocidad de transmisión de las redes de nueva generación es utilizar redes ópticas pasivas (PON) de alta velocidad para satisfacer las necesidades de estas. PON es una infraestructura de acceso bidireccional convergente con topologías punto a multipunto de fibra óptica para consumidores, clientes residenciales y empresas. Cuenta con un sistema tolerante a fallas con bajos costos de operación debido al uso de elementos pasivos en la infraestructura de red. La muestra está conformada una red PON. Una terminal de línea óptica (OLT) significa un transmisor óptico, una unidad de red óptica (ONU) significa un receptor óptico y una red de distribución óptica (ODN) es fibra derivada de un divisor [19].

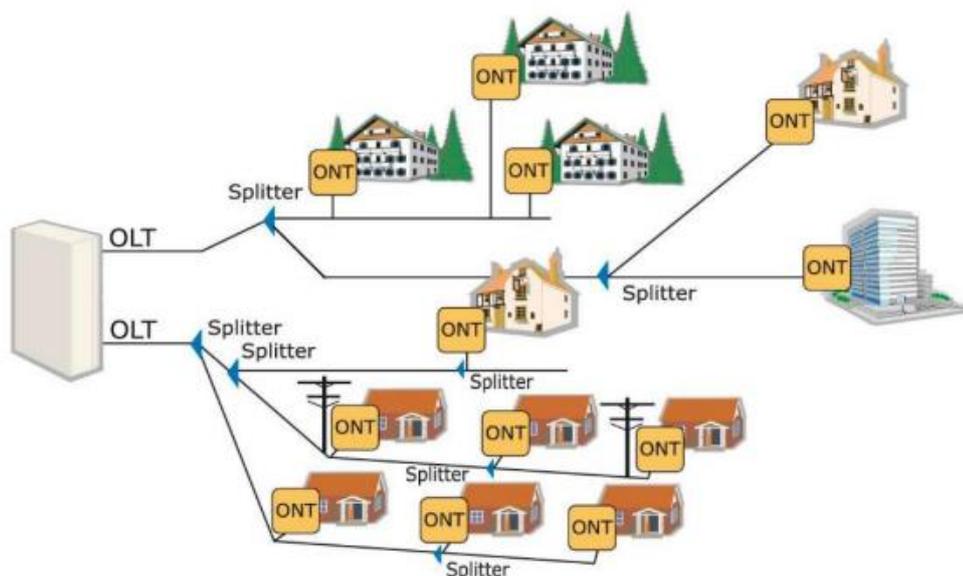


Figura 5. Red óptica Pasiva (PON) [19]

2.2.2.1 Características de las Redes PON

Las redes PON deben tener en cuenta la gran velocidad y calidad que los servicios requieren, entre estas características se detallan los siguientes requisitos necesarios para tomarlos en cuenta:

- **Área de cobertura:** Existe mayor distancia entre el usuario y la central por lo que la atenuación es alta.
- **Número de usuarios por fibra:** Mientras más usuarios se tengan deben existir mayor cantidad de divisores y por lo tanto mayores pérdidas de potencia.
- **Convergencia:** Debe ser posible converger la misma red de acceso el servicio de áreas residenciales, empresariales y servicios móviles, principalmente porque que las velocidades solicitadas son diferentes con distintos parámetros de calidad.

2.2.2.2 Tipos de Redes PON

La tecnología de las redes PON tienen la característica de que el ancho de banda no es dedicado, sino que es multiplexado para la misma fibra en los puntos de acceso de red de los usuarios. Existen diversos tipos de redes PON dependiendo de sus características, a continuación, se presentan las variantes de este tipo de red [20]:

- **APON:** Basan su transmisión de canal descendente en ráfagas de celdas (ATM) de 53 Bytes colocando un identificador de 3 Bytes para el equipo ONT.
- **BPON:** Son redes de banda ancha basadas en la tecnología APON.
- **EPON/GEPON:** Combina el protocolo Ethernet con topologías de redes PON punto a multipunto.
- **GPON:** Son redes basadas en fibra óptica para el envío de datos hasta una distancia de 20km y proporciona servicio hasta a 64 usuarios finales.

La tecnología GPON es capaz de transmitir información por el método de multiplexación dividida por tiempo (TDM), Ethernet y tráfico ATP con una velocidad de descarga de 2.4 Gbps y una velocidad de carga de 1.2 Gbps. La operación y mantenimiento de este tipo de redes es mucho más sencilla para los operadores debido a que poseen administración remota del equipo de usuario (ONT), descarga de actualizaciones, configuración de parámetros entre otras herramientas [21].

2.2.3 Multiplexación por División de Longitud de Onda

La multiplexación mediante WDM es una arquitectura cuya base es la división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing) [4]. Las ONT/ONU poseen longitudes de ondas propias, sin embargo, la fibra se encuentra compartida con todas las ONTs/ONUs. La arquitectura presenta ventajas frente a la multiplexación por tiempo (TMD) referente a la eficiencia que se genera en la fibra, además de ser capaz de realizar conexiones punto a punto (P2P), esta arquitectura, WDM, ofrece cobertura a largo alcance, un mejor QoS presentando

menor latencia [22]. Esta tecnología opera entre los 1300nm y 1600nm, en la Figura 6 se presenta el diagrama de comunicación en donde se aprecia que se transporta la información a distintas longitudes de onda utilizando una sola fibra a la vez, de manera que en el receptor se pueden filtrar o demultiplexar ópticamente la información [23].

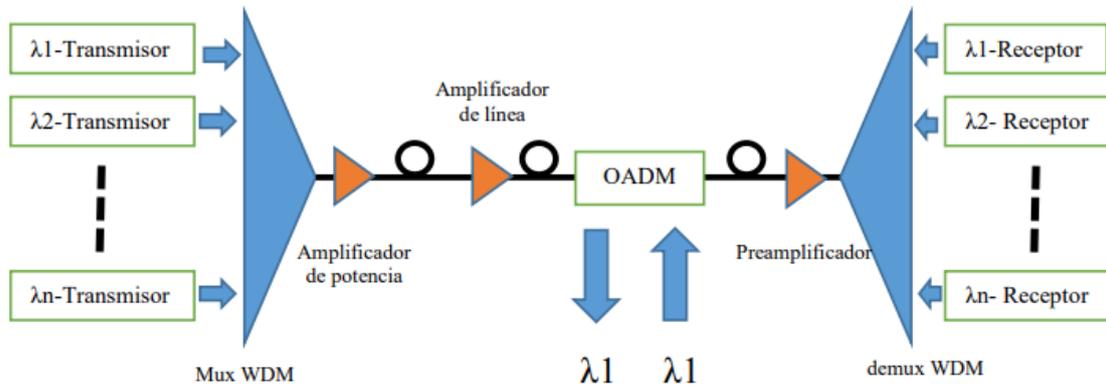


Figura 6. Esquema de arquitectura WDM-PON [23]

WDM tiene relación con FDM debido a que utilizan el mismo medio físico para la transmisión. En TDM la capacidad de transmisión está representada por la suma resultante de las señales de entrada, en WDM se transportan de manera independiente cada una de las señales de entrada. Esto significa que cada uno de los canales tiene su ancho de banda respectivo, así también las señales llegan al mismo instante por lo que es factible realizar una división y ser transmitidos en diferentes “slots” temporales [24].

2.2.3.1 Tipos de WDM

Por su amplia utilización dentro de las comunicaciones a través de fibra óptica es importante destacar que existen dos tipos principales de arquitectura de multiplexación por división de onda (WDM) a continuación, en la Figura 7 se presenta un diagrama del espacio en frecuencias para DWDM y CWDM [25].

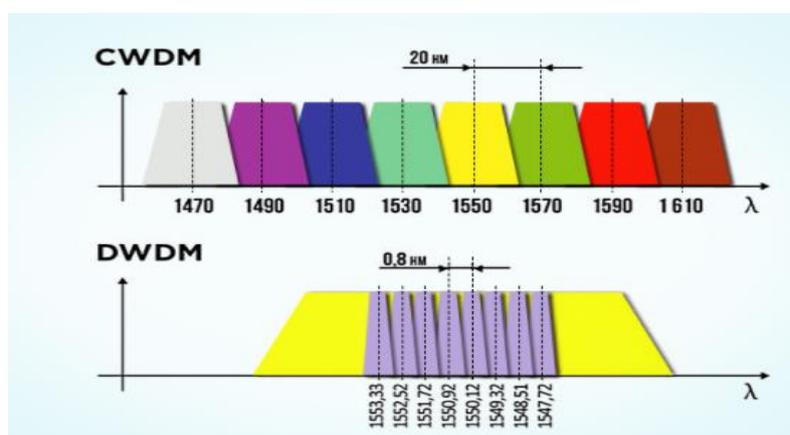


Figura 7. Espaciamiento de frecuencias en DWDM y CWDM [26]

2.2.3.1.1 CDWM

Esta multiplexación es más utilizada por las redes de tipo metropolitana (MAN) y redes de acceso. Como característica principal se utilizan 18 canales que tienen un rango de longitud de onda comprendido entre 1270 y 1610 nm, además utiliza un espaciado de canal de 20nm, mientras que el ancho de cada canal es de 13nm, conservando 7nm como banda guarda [25]. La Figura 8 muestra un esquema de la multiplexación CWDM.

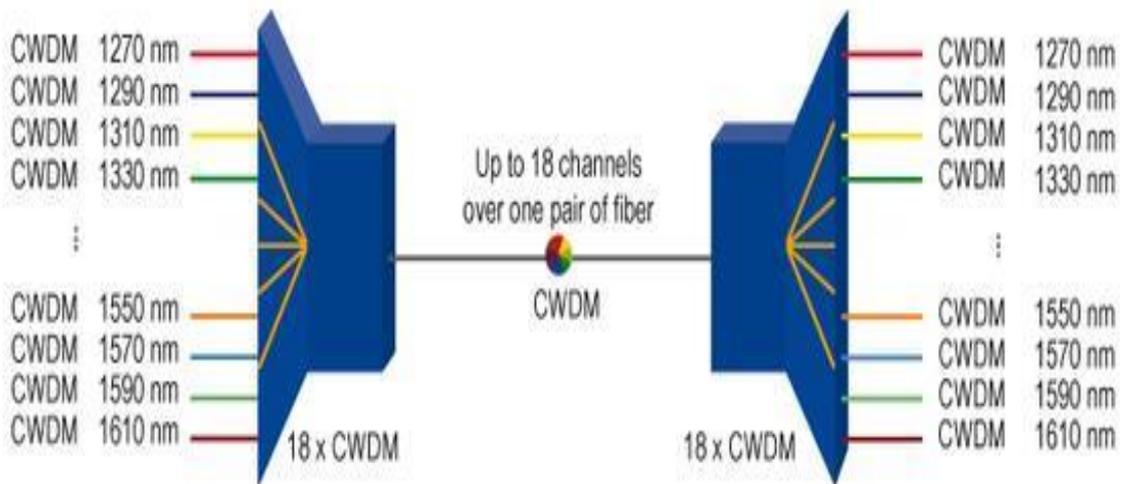


Figura 8. Esquema de multiplexación CWDM [27]

2.2.3.1.2 DWDM

Se lo conoce como de alta o ultra larga distancia, su principal característica es que utiliza hasta 160 longitudes de onda con un espaciamiento de 12.5GHz a 100GHz, cada canal puede soportar 40Gbps y se pueden alcanzar hasta 2500km de distancia [17]. Este tipo de tecnología utiliza un espaciado entre canales más pequeño con valores que oscilan entre 0.8 y 0.4 nm, esto permite un mayor tráfico de información, sin embargo, esto genera una desventaja, que es la elevación del costo de implementación pues este tipo de transceptores son más costosos debido a su sofisticación [25]. La Figura 9 muestra el esquema básico de la multiplexación DWDM.

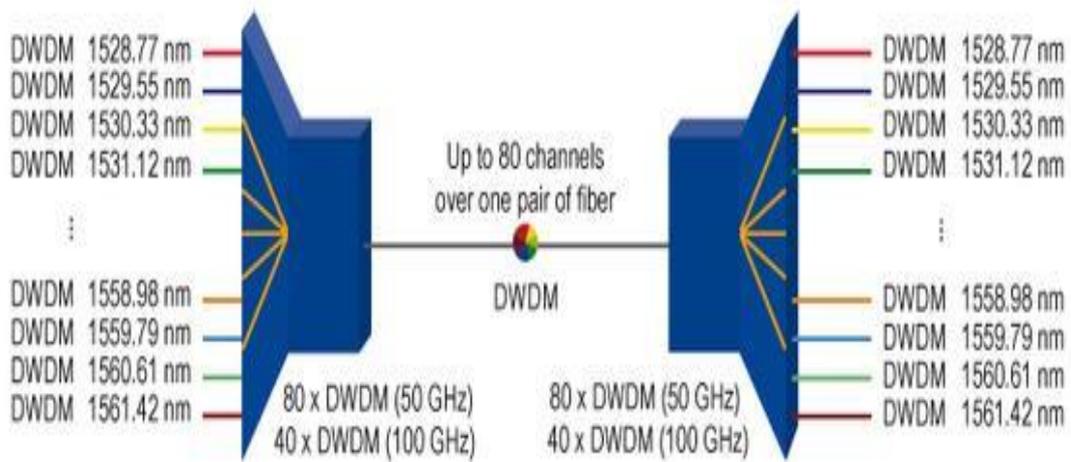


Figura 9. Esquema de Multiplexación DWDM [27]

2.2.3.1.3 UDWDM

La aparición de una tercera tecnología dentro de la multiplexación por longitud de onda, ha generado expectativa y busca el aprovechamiento óptimo del ancho de banda que se puede utilizar en el medio guiado. A esta se la conoce como multiplexación por división de onda ultra densa (UDWDM). El espaciado de canales en esta tecnología es mucho menor, presentando complejidad en la adaptación de equipos para su uso, sin embargo, todo esto se ve compensado en el aprovechamiento del aumento de canales de transmisión, hasta 1022 longitudes de onda por cada hilo de fibra. Pueden llegar a tener coberturas de hasta 100Kms de distancia, con capacidades de transmisión por las bandas C, S o L. La Figura 10 muestra el esquema ejemplo de la multiplexación UDWDM.

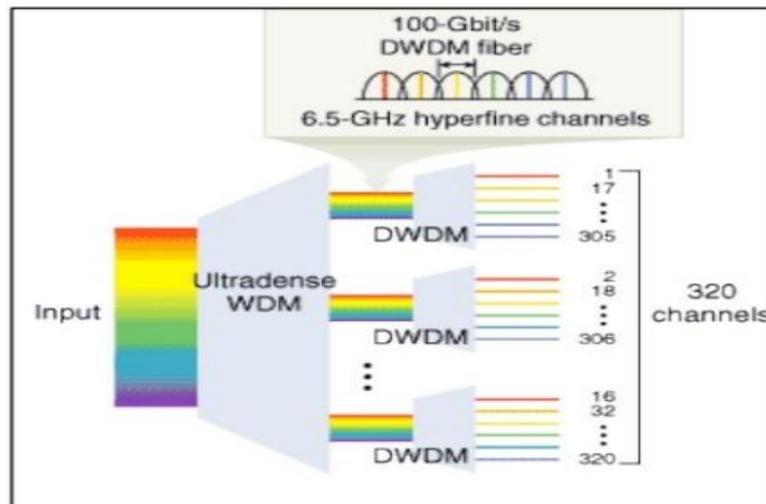


Figura 10. Ejemplo de multiplexación UDWDM [25]

En la Figura 11, se presenta un diagrama de los principales elementos que conforman una red UDWDM y a continuación se detallan cada uno de ellos [28].

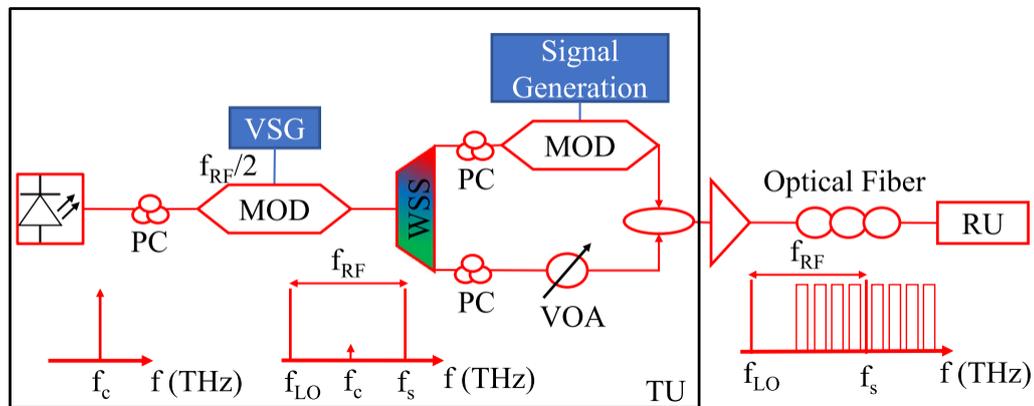


Figura 11. Elementos de una red UDWDM [28]

- **Fuentes Ópticas:** Transforman la señal eléctrica en señal luminosa con una determinada longitud de onda, el dispositivo encargado de realizar este proceso se conoce como Láser.
- **Multiplexadores:** Realizan la combinación de señales de luz que provienen de cada fuente óptica para transmitir por medio de la fibra óptica.
- **Demultiplexadores:** Realizan la separación de las señales en el destino basándose en la longitud de onda de cada señal.
- **Medio de transmisión:** La fibra óptica debe presentar menor atenuación y no se pueden usar fibras multimodo. Típicamente se usa la fibra monomodo G.655 o NZDS debido a los bajos niveles de dispersión en longitudes de onda de 1530nm y 1565nm.
- **Fotodetectores:** Transforman la señal demultiplexada en una señal eléctrica, es necesario el uso de un filtro óptico sintonizable para descartar las señales que no llevan información.
- **Amplificadores:** Se implementan en determinadas distancias a lo largo de la transmisión y se encargan de reconstruir señales.

2.2.4 Efectos Ópticos en las Redes de Fibra Óptica

Todos los dieléctricos producen efectos lineales y no lineales. Esto es causado esencialmente por niveles de potencia excesivos aplicados al dieléctrico, provocando la presencia de fuertes campos electromagnéticos. Como la fibra óptica es este tipo de medio, está sujeta a estos efectos cuando se expone a una alta potencia óptica para la transmisión.

La dispersión cromática es el fenómeno producido debido al cambio de velocidades de los pulsos lumínicos descomponiendo el ancho espectral en las diferentes longitudes de

onda, mismas que son receptadas en diferentes tiempos por el fotoreceptor lo que genera un cambio o diferencia referente a la onda original. Resultando en un error al momento de leer el pulso de luz. Este fenómeno se expresa en $\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, la cantidad de este dependerá del tipo de fibra utilizada y la distancia de transmisión [29]. En la Figura 12 se observa el comportamiento de la dispersión cromática en la fibra óptica.

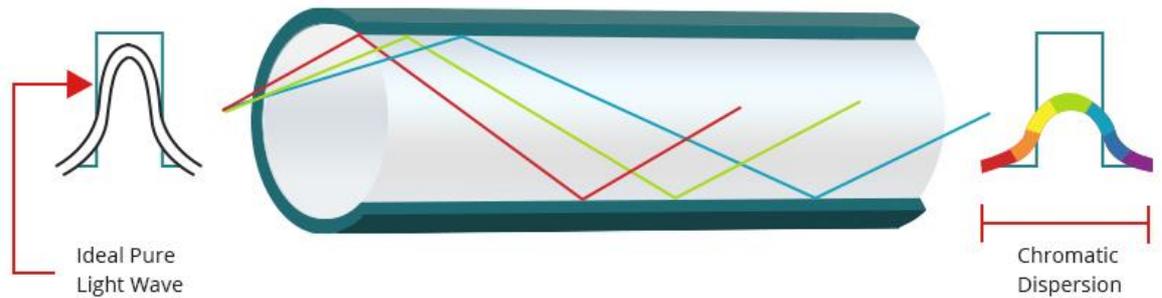


Figura 12. Fenómeno de dispersión cromática [29]

En un sistema de transmisión por fibra óptica es importante determinar la calidad del enlace óptico ya que en los sistemas WDM-PON las señales son afectadas por los efectos lineales y no lineales de la propia fibra óptica [30].

2.2.4.1 Efectos Lineales

Si al ingreso de la fibra se tienen potencias menores a 10dBm se generan efectos de orden lineal como lo muestran Báez, Torres, Puerto, Guevara, & Moreno [3]:

- **Atenuación:** Factor de importancia que limita el rendimiento de los sistemas ópticos reduciendo la potencia de transmisión que pasa a lo largo de la fibra y se expresa en dB [3]. La composición, estructura y fabricación de la fibra inciden en la aparición de este fenómeno. Existen dos tipos de atenuación, las pérdidas producidas por factores propios y las pérdidas producidas por factores externos. La Figura 13 muestra la comparativa de atenuaciones inherentes por el material del medio guiado.

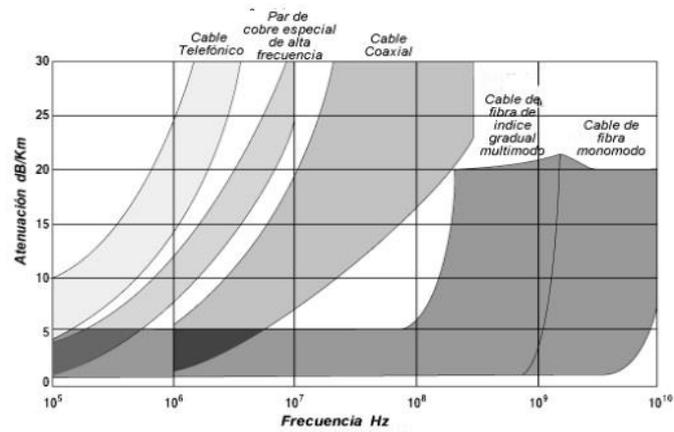


Figura 13. Comparación de atenuación según el material guiado [31]

Las pérdidas por factores propios pueden ser por [29]:

- **Absorción:** problemas o situaciones que son inherentes a la fabricación de la fibra utilizada, es decir, causado por impurezas presente en la composición de la fibra óptica, cuando el haz de luz golpea en una de estas, es posible que el dato sea absorbido o se esparza.
- **Dispersión:** Se generan a partir de la reflexión en el material, producidas en el proceso de fabricación.

Las pérdidas por factores externos se deben a la deformación mecánica de la fibra, existe una pérdida de luz debido a que no se completa la reflexión de la luz al interior de la fibra [30].

3. CAPITULO III. METODOLOGÍA.

3.1 Tipo de Investigación

El presente proyecto de investigación consiste en analizar los efectos lineales producidos en una red de comunicaciones ópticas basadas en UDWDM, por lo que se utilizan los siguientes tipos de investigación para lograr los objetivos planteados en la problemática.

- **Investigación Aplicada:** Se utilizan los conocimientos adquiridos durante la investigación, obteniendo respuestas a las hipótesis planteadas a lo largo del desarrollo.
- **Investigación Documental:** La propuesta del proyecto se basa en la obtención de información acerca de trabajos relacionados con el tema de investigación de efectos lineales y diseño de redes UDWDM como lo son tesis, artículos científicos e informes de las entidades reguladoras de telecomunicaciones.
- **Investigación Experimental:** Se realizan una serie de simulaciones dentro del programa de redes ópticas OPTISYSTEM para lograr comprobar los efectos analizados en la parte teórica del proyecto y así obtener las conclusiones y recomendaciones finales.

3.2 Métodos de la Investigación

Los métodos e instrumentos necesarios para lograr los resultados de la presente investigación son los que se presentan a continuación:

- **Fuentes de Información:** El presente proyecto se lleva a cabo mediante un enfoque cualitativo apoyado de un estudio bibliográfico, lo que permitirá identificar las características de un sistema de comunicaciones UDWDM PON.
- **Instrumentos:** Para el desarrollo de la presente investigación se utilizan simulaciones realizadas en un software especializado llamado OptiSystem, para diseñar una red, y analizar los efectos producidos en un sistema de comunicación UDWDM PON.
- **Observación:** Para este proyecto se utilizan las técnicas de observación para poder evaluar y analizar los resultados experimentales realizados en la simulación de la red y poder obtener más precisión en los parámetros analizados.

3.3 Escenario de Prueba

En el presente proyecto de investigación se basa en el diseño, simulación y análisis de los efectos lineales que se producen en una red UDWDM y verificar la calidad del enlace con la medición de parámetros como el BER, la potencia de TX, RX, entre otros. Como se observa en la Figura 14, para lograr los objetivos planteados en el proyecto se requieren de las 6 etapas que se muestran y se detallaran a continuación.



Figura 14. Planificación para el Desarrollo del Proyecto

En la primera etapa se realiza la planificación de tiempos necesarios para el cumplimiento de todos los objetivos de estudio. En la segunda etapa se realiza una recopilación de información sobre redes ópticas UDWDM, así como de los efectos lineales que se producen en la transmisión de información por este medio. Una vez determinadas las características más importantes y elementos que conforman estos tipos de redes, se procede a la tercera etapa que es el diseño de la red de comunicación basada en la multiplexación UDWDM considerando los parámetros determinados en la investigación bibliográfica. Como cuarta etapa se realiza la simulación de la red diseñada utilizando el Software especializado *OptiSystem*. Como quinta etapa se realizarán las pruebas dentro del simulador, variando ciertos parámetros de la red y produciendo efectos lineales. Finalmente se realiza un análisis de los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas para determinar la calidad del enlace óptico y plantear posibles mejoras.

3.4 Hipótesis y Operacionalización de Variables

3.4.1 Hipótesis de Investigación H_i

¿Los efectos lineales dentro de un enlace óptico determinan la calidad de un enlace de transmisión diseñado por UDWDM?

3.4.1.1 Hipótesis Nula H_o

¿Los efectos lineales dentro de un enlace óptico no determinan la calidad de un enlace de transmisión diseñado por UDWDM?

3.4.1.2 Variable Independiente

Efectos Lineales

3.4.1.3 Variable Dependiente

Calidad del Sistema de Comunicación óptica en multiplexación UDWDM PON

3.4.1.4 Operacionalización de las Variables

En la Tabla 1 se puede observar la matriz de operacionalización de las variables involucradas en el desarrollo del proyecto.

Tabla 1. Cuadro de Operacionalización de las Variables

Variable Dependiente	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Calidad del sistema de comunicación óptica en multiplexación UDWDM PON	Son las características que permiten comparar los datos transmitidos y recibidos en el sistema mediante ciertos parámetros.	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de transmisión. - Ancho de banda. - Sincronismo - Potencia de Tx. - Potencia de Rx 	Computador Software OptiSystem
Variable Independiente	Concepto	Indicadores	Instrumentos
Efectos Lineales	Son características que posee la fibra óptica al momento de transmitir información	Dispersión Crómica	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculos matemáticos - Software OptiSystem

3.4.1.5 Población y Muestra

3.4.1.5.1 Población

La población es determinada de acuerdo al total de los datos obtenidos en las simulaciones, mismas que serán pruebas con características aleatorias de acuerdo a los diferentes parámetros de atenuación dentro del sistema de transmisión de las señales [32]. Cabe recalcar que la población tiende a ser infinita, debido a que se pueden realizar un sin número de simulaciones, sin embargo, según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T) y su documento llamado “Consideraciones de Diseño e ingeniería de sistemas ópticos”, se puede tomar como referencia los parámetros de ajuste para las pruebas de una Red DWDM que indican lo siguiente:

- Se debe realizar pruebas con penalización de potencia equivalente a: 0.5, 1 y 2.
- Velocidad Binaria NRZ sin fluctuación: 2.5 Gbits/s.
- Distancias para fibra G.652: I (<25km), S (<40km), L(<80km), V(<120km)

Tomando en cuenta estos parámetros, la población obtenida sería de 36 pruebas o simulaciones [32].

3.4.1.5.2 Muestra

Para un correcto análisis de las situaciones que intervienen en las señales transmitidas en DWDM y poder realizar un correcto análisis de los efectos que ocasionan los efectos lineales en este tipo de comunicaciones es importante que la muestra tenga un nivel de confianza cercano al 100%, en este caso se ha escogido un 95% y un margen de error del 5%; esto nos da un tamaño de muestra de 33 simulaciones para la realización del proyecto.

$$\text{nivel de confianza} = 95\% \rightarrow \text{PuntuaciónZ} = 1,96$$

$$\text{StdDev} = 0,5$$

$$\text{margenError} = 5\% = 0,05$$

$$n = \frac{N * (\text{PuntuaciónZ})^2 * \text{StdDev} * (1 - \text{StdDev})}{(\text{PuntuaciónZ})^2 * (N - 1) + (\text{margenError})^2 * \text{StdDev} * (1 - \text{StdDev})}$$

$$n = \frac{36 * (1,96)^2 * 0,5 * (1 - 0,5)}{(0,05)^2 * (36 - 1) + (1,96)^2 * 0,5 * (1 - 0,5)}$$

$$n = \frac{34,57}{0,0875 + 0,95}$$

$$n = \frac{34,57}{1,04}$$

$$n = 33,24 \approx 33$$

3.5 Diseño del Sistema Óptico

Para realizar un correcto diseño del sistema, se requiere determinar las pérdidas de potencia que puede sufrir la señal dentro de la OLT, para esto se realiza el dimensionamiento del sistema en donde se tomará en cuenta el balance óptico, la relación de splitteo, la cantidad de empalmes y los componentes a ser utilizados de tal manera que se logre garantizar una buena calidad de señal a cada uno de los usuarios dentro del rango óptimo en términos de potencia y ancho de banda considerados.

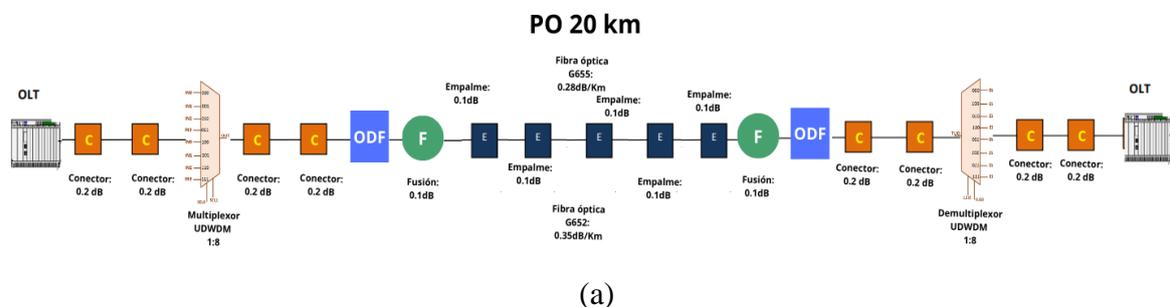
3.5.1 Dimensionamiento del Sistema

Para el diseño del sistema óptico se plantea la distancia máxima de transmisión de 120Km, tomando en cuenta que se analizarán las atenuaciones en los tramos de 20 km, 40 km, 80 km y 120 km, considerando una atenuación de 28 dBm máxima y una potencia en el transmisor de 2.5 dBm, en donde se debe cumplir la relación que se presenta a continuación.

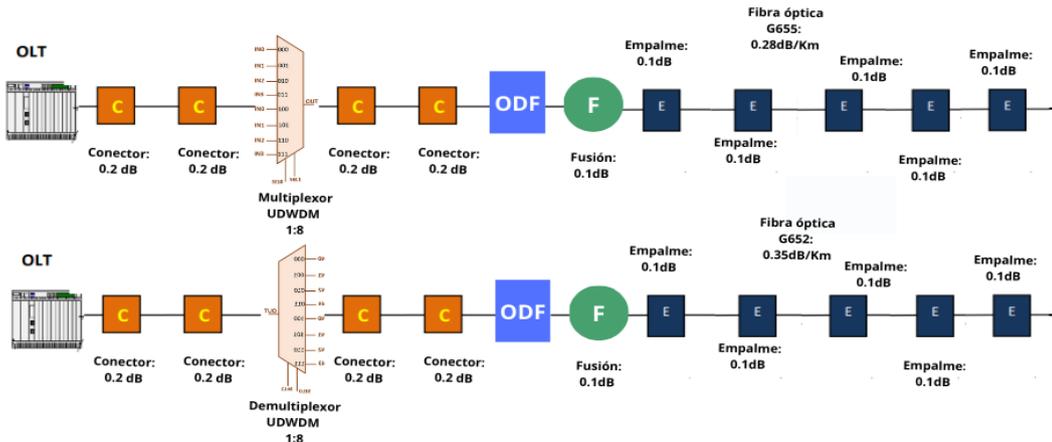
$$A_t \leq 28\text{dbm} + 2.5\text{dBm}$$

$$A_t \leq 30.5\text{ dBm}$$

Para determinar la cantidad de empalmes y presupuesto óptico del sistema, se debe considerar la estructura general del enlace diseñado. Dentro de esto se toma en cuenta el OLT en donde se multiplexará por medio de UDWDM 8 canales de información, la cantidad de bobinas necesarias para cumplir cada una de las distancias de análisis, tomando en cuenta que cada una de ellas cubre 4 km como distancia máxima, los empalmes entre cada bobina y el demultiplexor UDWDM en la OLT de recepción, tal y como se observa en la *Figura 15*.

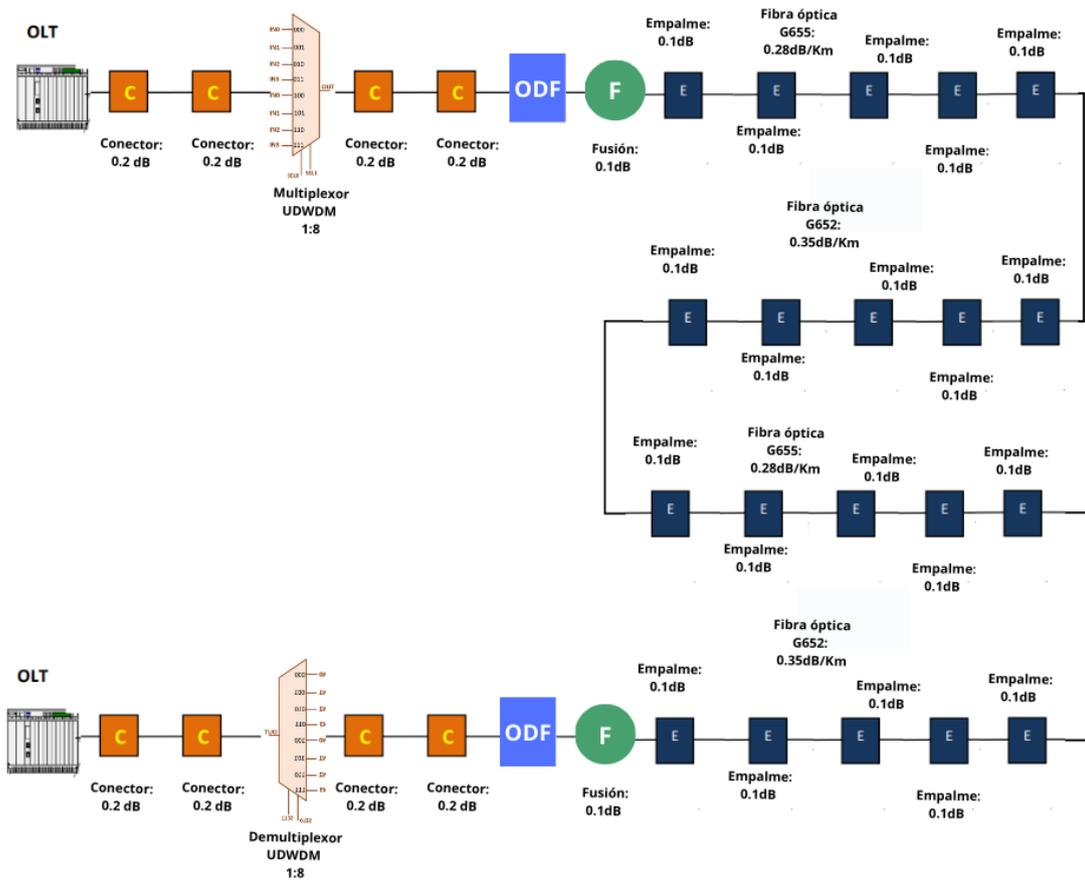


PO 40 km



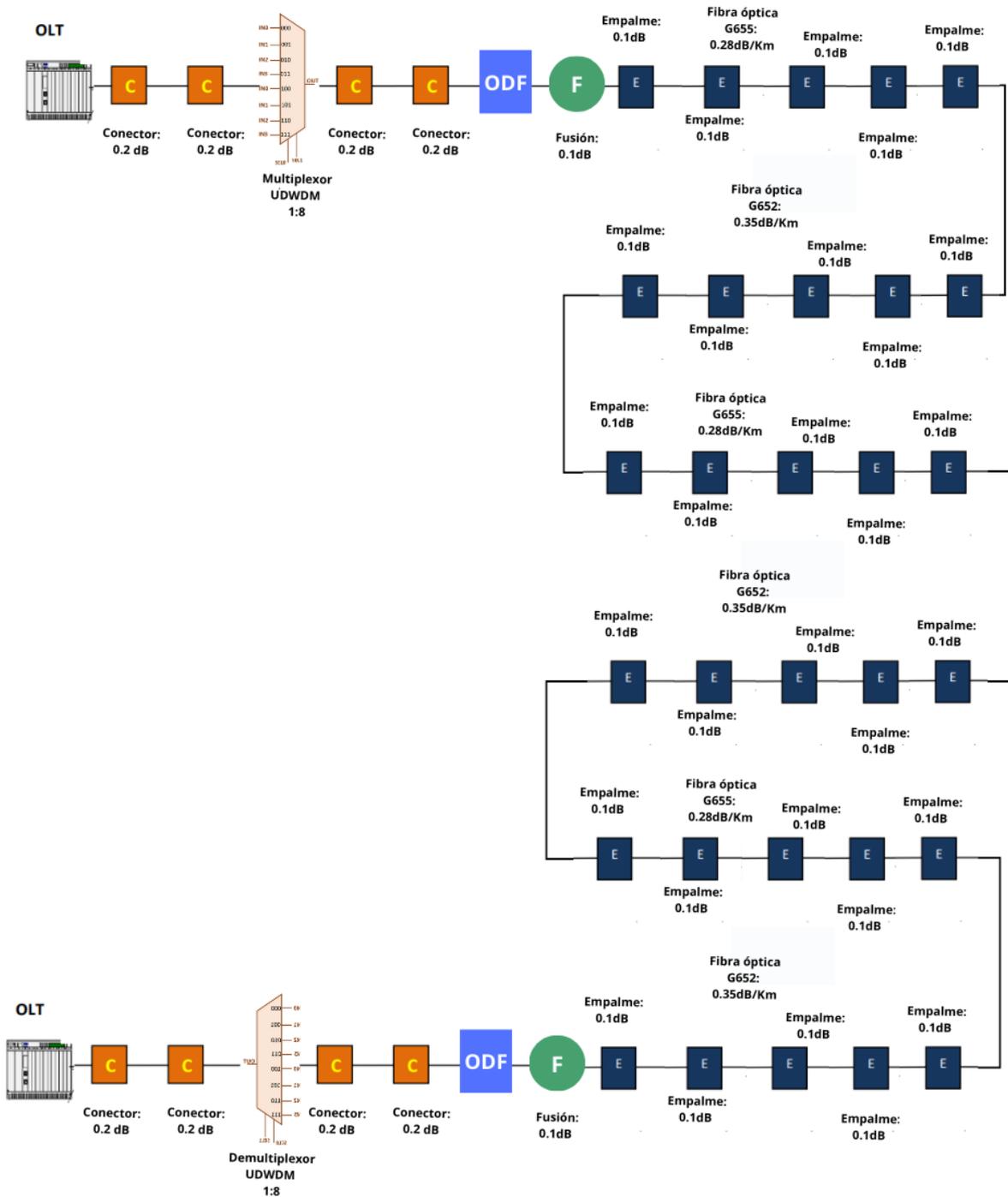
(b)

PO 80 km



(c)

PO 120 km



(d)

Figura 15. Diagrama de Presupuesto óptico del Sistema (a) 20km (b) 40km (c) 80km (d) 120km

Para el cálculo total del presupuesto óptico en cada uno de los casos de estudio, se considera la atenuación de cada una de las fibras seleccionadas y los coeficientes de cada uno de los componentes, considerando una atenuación por empalmes de 0.1dB como indica [35] y utilizando conectores LC de la marca MEXFO SER con una atenuación de 0.2dB [33], mismos que poseen una férula de 1.25 mm. En la siguiente ecuación se presenta el cálculo del presupuesto óptico.

$$A(dB) = \alpha L + \alpha_e x + \alpha_c y + \alpha_s z \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

α Es el coeficiente de atenuación de la Fibra

L Longitud del Enlace Diseñado

α_s Atenuación por Empalme

x Número total de Empalmes

α_c Atenuación por Conectores

y Número de Conectores de línea del Enlace

Obteniendo:

$$A_{G652}(dB) = 0.35 * 20 + 8 * 0.2 + 7 * 0.1$$

$$A_{G652_{20km}}(dB) = 9.3 dB$$

$$A_{G655}(dB) = 0.28 * 20 + 8 * 0.2 + 7 * 0.1$$

$$A_{G655_{20km}}(dB) = 7.9 dB$$

En la Tabla 2 se puede evidenciar el presupuesto óptico generado para cada una de las Fibras seleccionadas en las diferentes distancias de análisis considerando la cantidad de empalmes requeridos en cada una de ellas, obteniendo una diferencia de 1.4 dB entre cada una de estas debido a que la Fibra G655 posee menor coeficiente de atenuación por cada kilómetro, considerando el caso de la primera distancia [36] [37].

Tabla 2. Presupuesto óptico del sistema considerando los dos tipos de fibra

Componente	Número de empalmes	Atenuación por Empalmes por Fusión	Numero de conectores	Atenuación por Conectores	Atenuación por Kilómetro de Fibra	Km de fibra	Total
Fibra Óptica G652 20 km	7	0.1 dB	8	0.2 dB	0.35dB	20Km	9.3dB
Fibra Óptica G652 40 km	12	0.1 dB	8	0.2 dB	0.35 dB	40Km	16.80dB
Fibra Óptica G652 80 km	22	0.1dB	8	0.2 dB	0.35 dB	80Km	31.8dB
Fibra Óptica G652 120 km	32	0.1dB	8	0.2 dB	0.35 dB	120Km	46.80dB
Fibra Óptica G655 20 km	7	0.1dB	8	0.2 dB	0.28 dB	20Km	7.9dB
Fibra Óptica G655 40 km	12	0.1 dB	8	0.2 dB	0.28 dB	40Km	14dB
Fibra Óptica G655 80 km	22	0.1dB	8	0.2 dB	0.28 dB	80Km	26.2dB
Fibra Óptica G655 120 km	32	0.1dB	8	0.2 dB	0.28 dB	120Km	38.4dB

Analizando los resultados obtenidos, y con la consideración mencionada anteriormente de que la atenuación del sistema no debe superar los 30.5 dB, se indica que el presupuesto óptico que cumple con la condición inicial en la fibra G652 sirve para distancias de 20 y 40 km, mientras que para la fibra G655 sirve para distancias de 20, 40 y 80 km.

3.5.2 Equipo de Capa Óptica

Para la capa óptica se requiere de un equipo que cumpla con los parámetros necesarios del enlace. En este caso se ha escogido el equipo Optix OSN 6800 del fabricante Huawei en cual se observa en la Figura 16, este equipo permite la comunicación entre redes troncales, locales y metropolitanas. Funciona como multiplexor inteligente para diferentes servicios que requieren del uso de la tecnología WDM con grandes cantidades de transmisión. Incorpora tecnología UDWDM y DWDM, las cuales permiten la transmisión de 80 canales con espaciamiento de hasta 100GHz entre frecuencias a velocidades de 2.5, 10, 40 y 100 Gb/s. En la Tabla 3 se puede observar las características principales de este equipo utilizado para la multiplexación y demultiplexación de las señales.

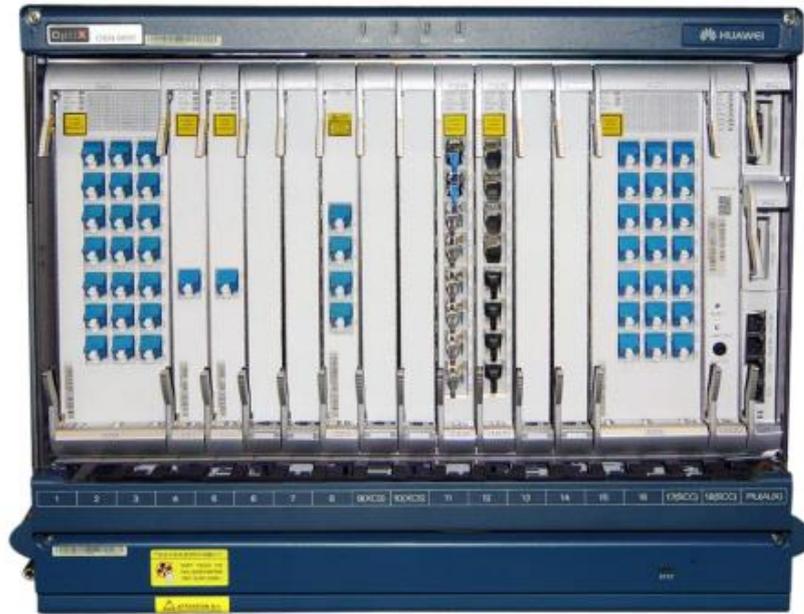


Figura 16. Plataforma de Transporte óptico Optix OSN 6800

Tabla 3. Características de Optix OSN 6800 [33]

Descripción	Valor
Dimensiones	497mm x 295 mm x 400 mm
Slots de Servicio	17
Longitud de Onda Máxima	DWDM 80 canales, CWDM 8 canales
Rango de Longitud de Onda	Banda C: 1529.16 nm a 1560.61 nm Banda S, C, L: 1471 nm a 1611 nm
Velocidad de Transmisión	2.5 Gb/s, 10 Gb/s, 40 Gb/s, 100 Gb/s
Servicios Soportados	SDH, SONET, Ethernet, SAN, OTN, Video

Este dispositivo consta de un gabinete, fuente de alimentación, ventiladores, DCM y tarjetas; siendo esta última área en donde se conectan las unidades multiplexadoras, demultiplexadoras y las tarjetas de servicio o XCS, teniendo 21 espacios para la colocación de cada una de estas en sus diferentes aplicaciones. En la Figura 17 y Tabla 4 la se muestra la configuración y posición para cada una de las tarjetas.

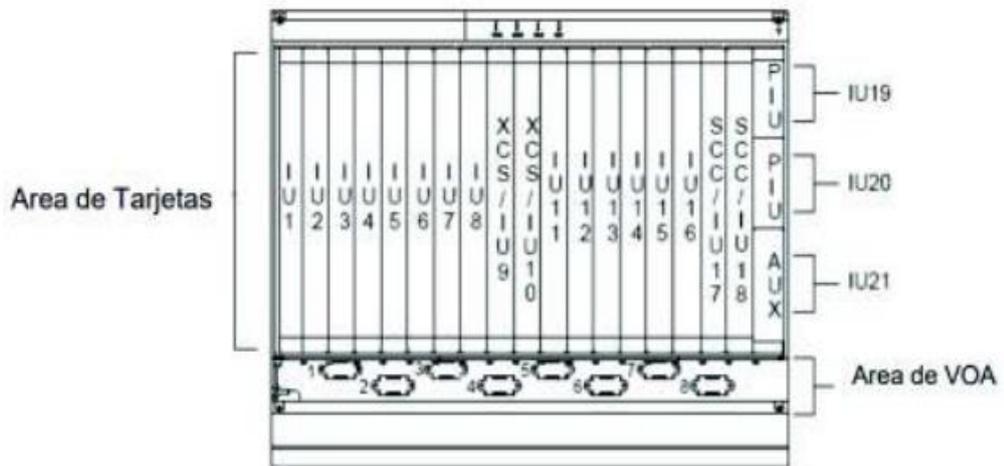


Figura 17. Área de tarjetas del sistema Optix OSN 6800 [25]

Tabla 4. Funciones para Cada Ranura del área de tarjetas [25]

Número de Ranura	Funcionamiento
IU1 – IU18	Tarjetas de Servicio
IU11 – IU16	Tarjetas de Servicio
IU9 – IU10	XCS
IU17	SCC
IU19 – IU20	Unidad de Interfaz de Energía o PIU
IU21	Tarjeta Auxiliar

Las unidades de multiplexación y demultiplexación se conectan en las ranuras de servicio IU1 a IU16 y son conocidas como el módulo M40V y D40 respectivamente. La Unidad Multiplexora M40V posee 40 canales WDM y poseen un atenuador variable (VOA), con rangos de 0 a 15dB de sensibilidad en cada uno de los puertos (M01 – M40). Por otro lado, la Unidad Demultiplexora posee 40 canales WDM dentro de la banda C. En la Figura 18 se pueden observar las unidades M40V y D40.

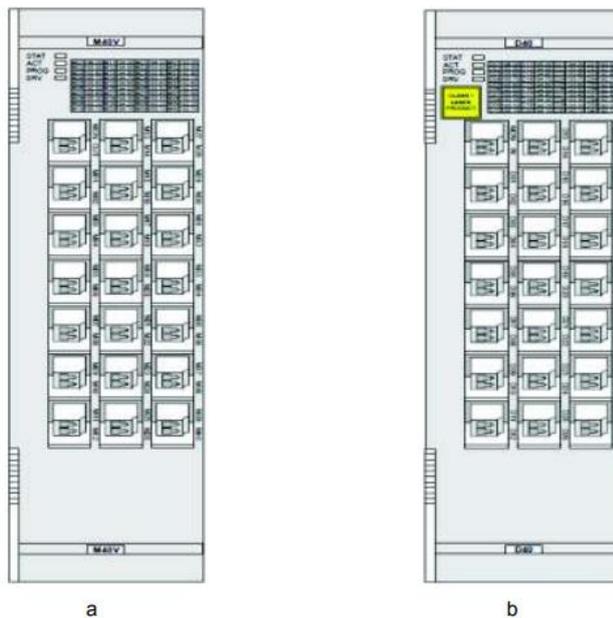


Figura 18. a.) Tarjeta M40V b.) Tarjeta D40

3.5.3 Equipo de Capa Eléctrica

Para la capa eléctrica se ha seleccionado el equipo Optix OSN 8800, esta plataforma posee una velocidad que puede ser de 100 Gb/s o 200 Gb/s y son utilizadas para la implementación en redes WDM/OTN metropolitanas y troncales. Este equipo ofrece varias ventajas como el cross-conexión eléctrica en el rango de los Tb/s, sistema de protección y acceso a servicios con un rango de velocidad desde los 100 Mb/s a 100 Gb/s. En la se puede observar los componentes que conforman el Optix OSN 8800, en donde se identifica el gabinete, fuente de alimentación, DCM y tarjetas de servicio. En la se pueden observar las principales características de este sistema.



Figura 19. Sistema Optix OSN 8800 [34]

Tabla 5. Características del Equipo Optix OSN 8800 [34]

Descripción	Valor
Dimensiones	498mm x 295 mm x 450 mm
Slots de Servicio	16
Longitud de Onda Máxima	DWDM 96 canales, CWDM 8 canales
Rango de Longitud de Onda	Banda C: 1529.16 nm a 1567.13 nm Banda S, C, L: 1471 nm a 1611 nm
Velocidad de Transmisión	2.5 Gb/s, 10 Gb/s, 40 Gb/s, 100 Gb/s, 200 Gb/s, 400 Gb/s
Servicios Soportados	SDH, SONET, Ethernet, SAN, OTN, Video

Este equipo está diseñado para su uso en aplicaciones de transmisión a largas distancias. Posee modulación ePDM y QPSK, los cuales poseen una reducción de la mitad en la tasa de baudios de una señal manteniendo la velocidad de transmisión sin ninguna alteración. Esto permite que se reduzca el ancho de banda espectral a la mitad. En la modulación QPSK puede codificar dos bits por cada símbolo, realizando la asignación de los bits mediante el código Grey. Así también, posee una detección coherente que permite obtener un mejor OSNR y sensibilidad en el receptor; que en conjunto con los amplificadores ópticos híbridos (RAU) disminuyen la cantidad de regeneradores eléctricos por su figura de ruido más pequeña.

Se debe considerar que UDWDM al ser una tecnología que continúa en investigación no existen muchos equipos comerciales para los cuales se pueda obtener una memoria técnica específica para dichas aplicaciones, sin embargo, los equipos mencionados con anterioridad permiten el fraccionamiento de longitudes de onda en los rangos permitidos para este tipo de aplicaciones [34].

3.5.4 Fibra Óptica G652 y G655

La interconexión del enlace óptico mediante el uso fibra se la realiza mediante el uso de dos tipos, en este caso se analizarán con las características de la fibra G652 y G655. Se ha seleccionado la fibra comercial de la marca Silex, como se observa en la Figura 20. El cable de Fibra Óptica Monomodo SM G652D está optimizada para el uso en longitudes de onda en un rango de 1260 nm a 1625 nm, siendo utilizadas en su mayoría en aplicaciones de redes metropolitanas y de acceso. Esta posee una dispersión cromática baja cerca de los 1310 nm y ligera atenuación en el punto máximo de 1383 nm. Con sus propiedades de amplio espectro operativo logra obtener una configuración adaptable para aplicaciones de voz, datos y video. Las principales características técnicas de este tipo de fibra se pueden observar en la Tabla 6.



Figura 20. Cable de Fibra Óptica SM G652D [35]

Tabla 6. Características de la Fibra óptica SM G652D [35]

Característica	Longitud de Onda	Valor
Diámetro de Campo Modal	1310 nm	9.2 ± 0.4 mm
	1550 nm	10.3 ± 0.5 mm
Coeficiente de Atenuación	1310 nm a 1383 nm	≤ 0.35 dB/Km
	1550 nm	≤ 0.24 dB/Km
	1525 nm a 1575 nm	-
Dispersión Cromática	1285 nm a 1330 nm	< 3 ps/nm*Km
	1550 nm	< 18 ps/nm*Km
	1530 nm a 1625 nm	-
Longitud de Onda Cero Dispersión		1300 nm – 1322 nm
Pendiente Dispersión Cero		≤ 0.092 ps/nm ² *Km
Índice de Refracción	1310 nm	1.467
	1550 nm	1.468
Longitud Onda de Corte	Cableado	≤ 1260 nm

Para el caso de la Fibra G655 de igual forma se escogió la provista por el fabricante Silex, esta tiene la ventaja de lograr una dispersión de 1550 nm cercana a 0 ps/nm*Km. Este tipo de fibra logra la supresión en mezcla de cuatro ondas. Así también posee una dispersión cromática en el rango de 1530 nm a 1560 nm (Banda C) reducida y controlada que permite que los amplificadores ópticos trabajen de mejor manera, así como de poseer un área de núcleo más amplia que la G652. En la Tabla 7 se puede observar las principales características de este tipo de fibra óptica Silex SM G655 Monomodo.

Tabla 7. Características de la Fibra Óptica Silex SM G655 [36]

Característica	Longitud de Onda	Valor
Diámetro de Campo Modal	1310 nm	-
	1550 nm	9.2 ± 0.5 mm
Coeficiente de Atenuación	1310 nm	≤ 0.40 dB/Km
	1383 nm	≤ 1.00 dB/Km
	1550 nm	≤ 0.25 dB/Km
	1625 nm	≤ 0.28 dB/Km
Dispersión Cromática	1310 nm	-6 ps/nm*Km
	1550 nm	8 ps/nm*Km
	1625 nm	12 ps/nm*Km
	1530 nm a 1565 nm	5.5 a 10 ps/nm*Km
	1565 nm a 1625 nm	7.5 a 13.8 ps/nm*Km
	1285 nm a 1330 nm	-10 a -3 ps/nm*Km
Longitud de Onda Cero Dispersión		≤ 1440 nm
Pendiente Dispersión Cero		0.052 ps/nm ² *Km
Índice de Refracción	1310 nm	14.682
	1550 nm	14.683
Longitud Onda de Corte	Cableado	≤ 1300 nm

Finalmente considerando cada uno de los componentes se realiza el presupuesto económico del sistema óptico tal y como se observa en la **Tabla 8**, en donde los componentes de mayor costo son los transmisores ópticos OSN6800 Y OSN 8800, así como la totalidad de la fibra a ocuparse, el valor total de la implementación es de \$102.284,19.

Tabla 8. *Presupuesto Económico del Sistema*

Elemento	Cantidad	Precio
Optix OSN 6800	1	\$ 39.900,00
Optix OSN 8800	1	\$ 39.900,00
Fibra óptica G.655	40 km	\$ 20.000,00
Amplificador Óptico	1	\$ 120,00
Conector LC	4	\$ 4,00
Costo de Instalación	1	\$ 2.000,00
Costo por Fusión	1	\$ 200,00
Splitter Primario	72	\$ 115,20
Caja de Empalmes	1	\$ 44,99
Total		\$102.284,19

3.6 Simulación del Sistema Óptico

La simulación del sistema óptico se le realiza mediante el uso del Software OptiSystem, el cual permite el diseño y análisis de las características del nivel de transmisión dentro de un sistema de comunicaciones ópticas. Dentro de este programa se colocan diversos tipos de bloques que representan las diferentes partes del sistema óptico a implementarse, colocando los parámetros específicos para cada una de estas variables. Para el caso del presente trabajo de investigación se realizará la simulación en base a dos escenarios diferentes para la Banda C y Banda L respectivamente.

Como primera etapa se colocan los elementos que forman parte de la etapa de transmisión, en donde se configuran las 8 diferentes frecuencias que van a transmitir los datos por UDWDM. En la Tabla 9, se indica el cuadro de frecuencias utilizadas con una longitud de onda inicial para la banda C de 193.1 THz o 1552.52 nm y para la banda L un valor de 191.49 THz o 1565.57 nm, y así, la distancia de separación entre frecuencias para el sistema de UDWDM se considera en los 10 GHz.

Tabla 9. Distribución de Frecuencias para los 8 canales de transmisión UDWDM en la Banda C y Banda L.

Canal	Banda C		Banda L	
	Frecuencia (THz)	Longitud de Onda (nm)	Frecuencia (THz)	Longitud de Onda (nm)
1	193.1	1552.52438115	191.49	1565.57761763
2	193.11	1552.443985293	191.5	1565.49586423
3	193.12	1552.363597763	191.51	1565.414119367
4	193.13	1552.283218557	191.52	1565.332383041
5	193.14	1552.202847675	191.53	1565.25065525
6	193.15	1552.122485115	191.54	1565.168935992
7	193.16	1552.042130876	191.55	1565.087225268
8	193.17	1551.961784956	191.56	1565.005523074

3.6.1.1 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 componente permite la generación de datos pseudo – aleatorios, en donde se puede modificar el número de bits por símbolo (nivel de señal óptica), la tasa de baudios y la longitud de la secuencia a transmitir. Esta última se sincroniza con la velocidad de transmisión del sistema que, para el caso de las Bandas C y L, será de 2.5 Gb/s.
- **Generador de Pulso NRZ:** Este componente permite simular un generador de pulsos, el mismo que transforma la señal de entrada entregada por el bloque Generador de Datos, en una señal eléctrica que en su salida posee dos niveles de tensión dependiendo del bit que sea transmitido. Al ser un generador de no retorno a cero (NRZ), al recibir una señal de uno lógico, la salida corresponde a un nivel bajo de tensión durante el tiempo de bit; de lo contrario, si se recibe una señal de cero lógicos, la salida corresponde a un nivel alto de tensión.
- **Láser de Onda Continua (CW):** Este componente permite implementar un láser de onda continua en donde se pueden configurar los parámetros de

frecuencia central que varía de canal a canal como se indicó en la Tabla 9 que puede ser ingresada en THz o nm; y la potencia de salida del láser que se expresa en mW o dBm, para el caso de esta aplicación se considera una potencia del láser de 2.5dBm.

- **Modulador de Amplitud Mach – Zehnder:** Este componente es un modulador de amplitud y fase permite identificar las variaciones de cambio de fase entre dos haces de luz, siendo muy utilizado en sistemas WDM debido a su amplio ancho de banda y repuesta en fase para altas frecuencias de GHz. Mediante este bloque se puede ingresar la señal óptica CW y la señal eléctrica entregada por el generador NRZ, permitiendo convertir la señal de luz en señales de pulsos codificados con la información del Generador Pseudo – Aleatorio.

En la Figura 21, se puede observar la conexión de los bloques mencionados anteriormente en el software OptiSystem establecida para el transmisor óptico.

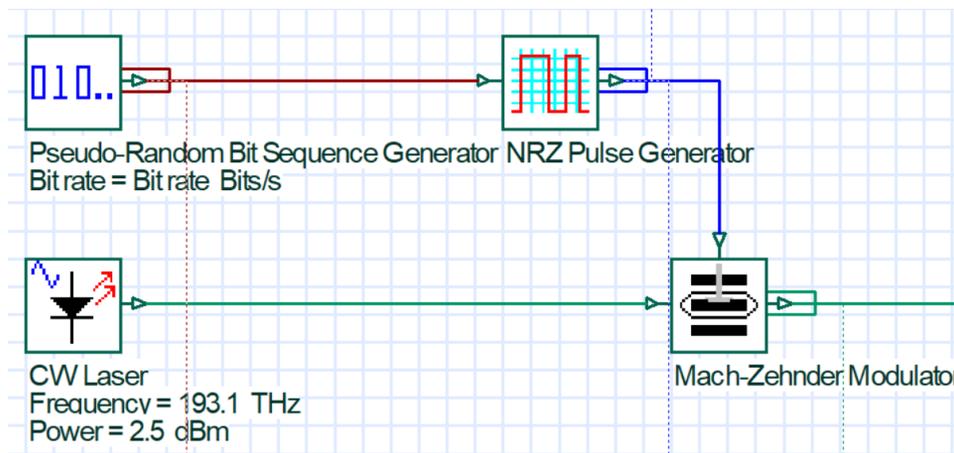


Figura 21. Bloques de Transmisión del Sistema Óptico

Una vez diseñado el Canal Primario, se procede a replicar los bloques y seleccionar la longitud de onda correspondiente a cada uno de los Láser ópticos hasta completar los 8 canales propuestos para el proyecto. Se procede a combinar las señales que salen de cada uno de los moduladores Mach – Zehnder para la multiplexación correspondiente. Para esto se utiliza un bloque de multiplexación WDM 8x1, en el cual se configuran las frecuencias de cada canal para obtener la señal de salida. En la Figura 22 se puede observar el diagrama de bloques que corresponden a la multiplexación de los 8 canales.

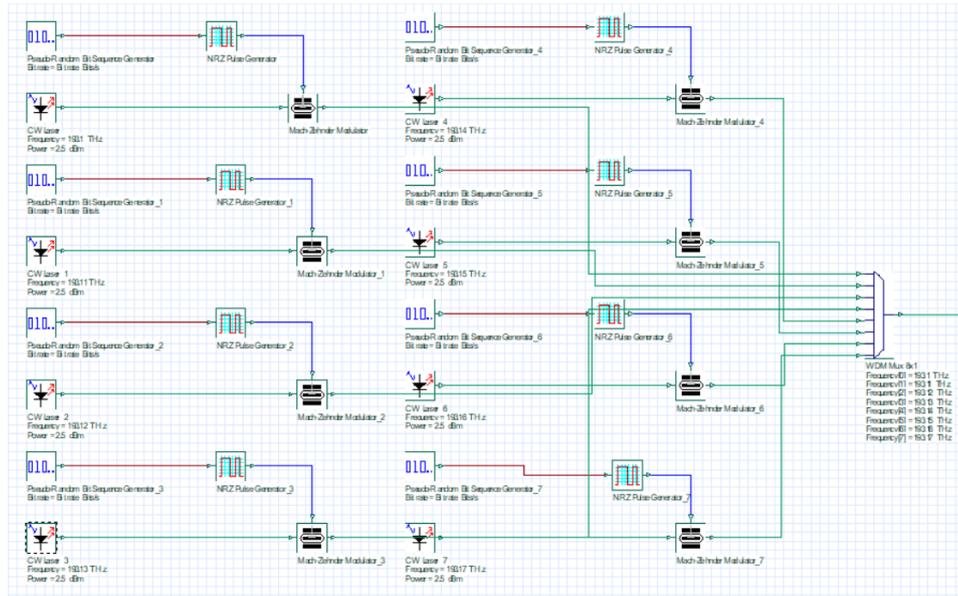


Figura 22. Esquema del Sistema de Transmisión Multiplexado por WDM

Se requiere de un filtro antes de la entrada del multiplexor para poder atenuar las señales y llevarlas a un nivel de potencia cercano entre ellas. Para esto se seleccionó un filtro óptico gaussiano pasa banda en cada una de las salidas del Modulador, con frecuencia central de cada una de las diferentes asignadas a cada longitud de onda. En la Figura 23 se puede observar el diagrama de bloque con el filtro implementado.

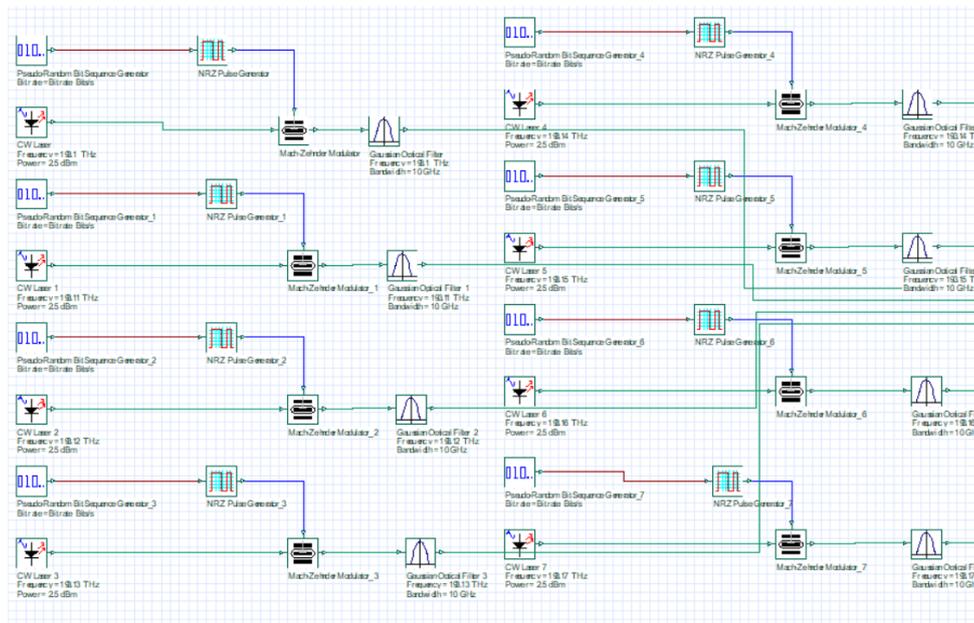


Figura 23. Etapa de transmisión con Filtro Gaussiano

Una vez ingresadas las 8 señales de entrada al multiplexor se utiliza el bloque de Optical Spectrum Analyzer y WDM Analyzer para identificar el nivel de potencia de las

señales, así como la cantidad de ruido en cada banda intermedia durante la etapa de transmisión. Como se indica en la Figura 24 y la Figura 25, se puede observar que el nivel de potencia de las señales se encuentra entre -5.836 y -0.745 dBm, y con una OSNR entre 1.99 y -4.97 dB.

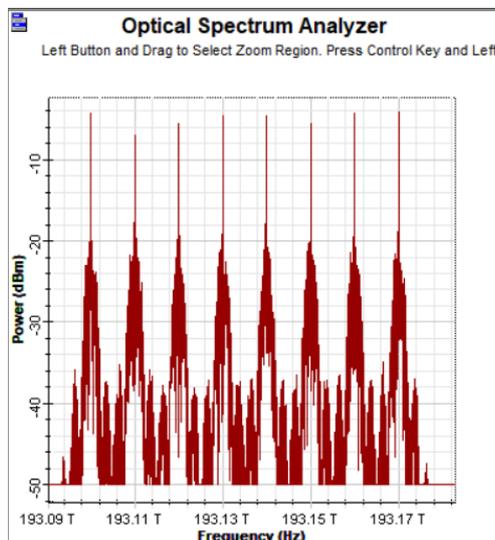


Figura 24. Niveles de Potencia de las señales de transmisión multiplexadas

WDM Analyzer		
Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
-2.3085094	-0.82388474	-1.4846246
-0.82077248	-2.8109397	1.9901672
-0.96817051	-1.0267548	0.058584317
-0.81643645	-1.0267548	0.21031837
-0.88381951	-1.0267548	0.14293531
-0.89552682	-1.0267548	0.13122801
-0.7452909	-1.6315245	0.88623358
-5.8367812	-0.86031932	-4.9764619

Figura 25. Analizador WDM con potencia de señal, potencia de ruido y OSNR

A continuación, se procede a la conexión de la fibra óptica del sistema en este caso, se va a realizar con dos tipos de fibra como se mencionó anteriormente, la G652 y la G655 a una distancia de 100Km. Para esto se deben colocar los parámetros de distancia, coeficiente de dispersión cromática y pérdidas en la banda de análisis. En la Tabla 10 se pueden observar los parámetros para cada una de las fibras analizadas.

Tabla 10. Parámetros Configurados para la Conexión de Fibra

Tipo de Fibra	Pérdidas en banda C	Coefficiente de dispersión cromática banda C	Pérdidas en banda L	Coefficiente de dispersión cromática banda L
G.652	0.275 dB/km	17 ps/nm*km	0.3 dB/km	17.2 ps/nm*km
G.655	0.35 dB/km	6 ps/nm*km	0.4 dB/km	7.82 ps/nm*km

Como el enlace tiene una distancia de 100 Km, se escogió colocar un amplificador óptico de 12 dB para que la señal transmitida tenga menor pérdida de potencia y así lograr disminuir la atenuación y OSNR resultante en la recepción. Después se procede a la colocación de un demultiplexor 1x8 como parte de la recepción de la señal óptica como se observa en la Figura 26. Una vez obtenidas las señales demultiplexadas se coloca nuevamente un Analizador de Espectro Óptico y un analizador de señales WDM para observar las potencias de las señales recibidas a través del enlace óptico.

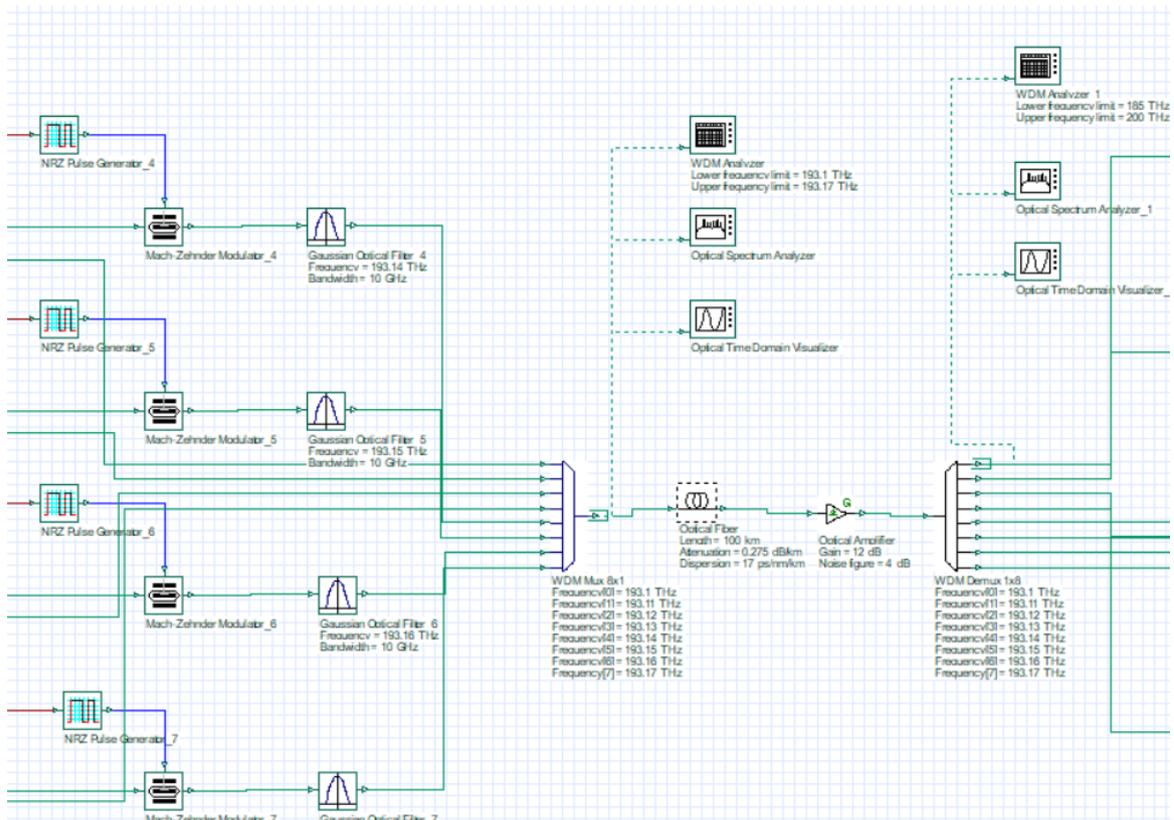


Figura 26. Etapa de Amplificación y Demultiplexación del Sistema

En la Figura 27 y la Figura 28, se pueden observar las señales obtenidas después de la demultiplexación, en donde se puede identificar que la potencia de la primera señal se

encuentra en -16.31dBm y la señal con frecuencia de 193.17 THz tiene una potencia de -57.98dB, disminuyendo de manera progresiva en las bandas intermedias.

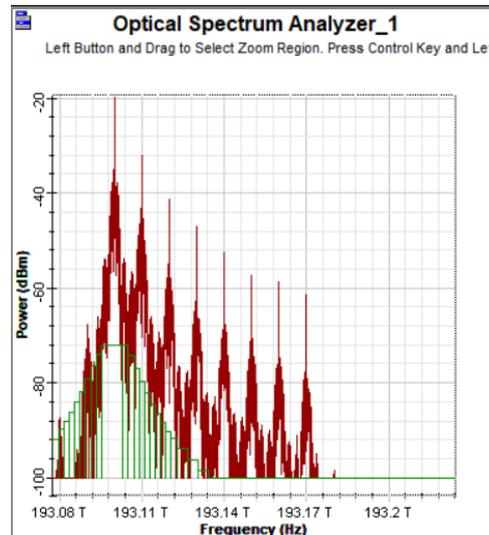


Figura 27. Espectro de la Señal Demultiplexada

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)
193.1	-16.316351	-43.897604
193.11	-26.040226	-51.617318
193.12	-36.758649	-62.113549
193.13	-43.353463	-68.166317
193.14	-48.399421	-74.127333
193.15	-52.439589	-76.259787
193.16	-55.153212	-81.422058
193.17	-57.986089	-83.518438

Figura 28. Analizador WDM de la señal demultiplexada

Para la etapa de recepción de las señales demultiplexadas se requieren de algunos componentes para poder obtener los datos recibidos mediante el enlace de transmisión. En este caso se indican a continuación los componentes necesarios para la transformación de las señales ópticas en señales eléctricas digitales.

Filtro Gaussiano Óptico: Este filtro permite reducir la interferencia entre bandas vecinas debido a que la frecuencia entre cada una de las longitudes de onda es de apenas 10GHz para el sistema UDWDM, por lo que puede existir solapamiento de las señales ópticas. Se coloca el filtro con una frecuencia de corte correspondiente a cada una de las asignadas para cada canal de transmisión.

Fotodetector: Este componente permite transformar la señal óptica recibida por cada canal, en una señal eléctrica para poder identificar los bits enviados por parte de la etapa de transmisión.

Filtro Bessel Pasa Bajo: Se coloca un Filtro Eléctrico de Tipo Bessel pasa bajo para poder reducir lo más posible el ruido insertado durante la transmisión de la señal. Este filtro se configura colocando una razón equivalente a $0.75 * \text{Bit Rate}$ como frecuencia de corte.

3R Regenerador: Este componente permite regenerar la señal eléctrica recibida para poder separar los componentes de la modulación y así poder identificar los bits de datos transmitidos desde el comienzo del enlace.

En la Figura 29 se puede observar los bloques que corresponden a la etapa de recepción del enlace óptico, se debe colocar cada uno de estos para cada canal como se observa en la Figura 30.

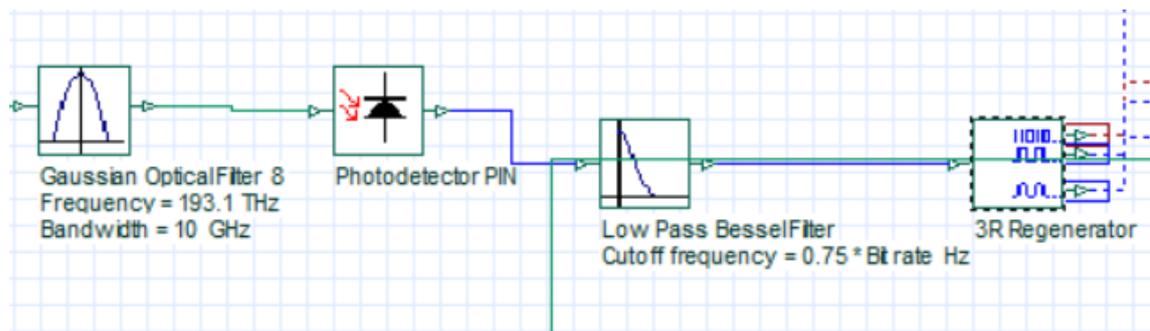


Figura 29. Etapa de Recepción y Conversión a Señal Eléctrica

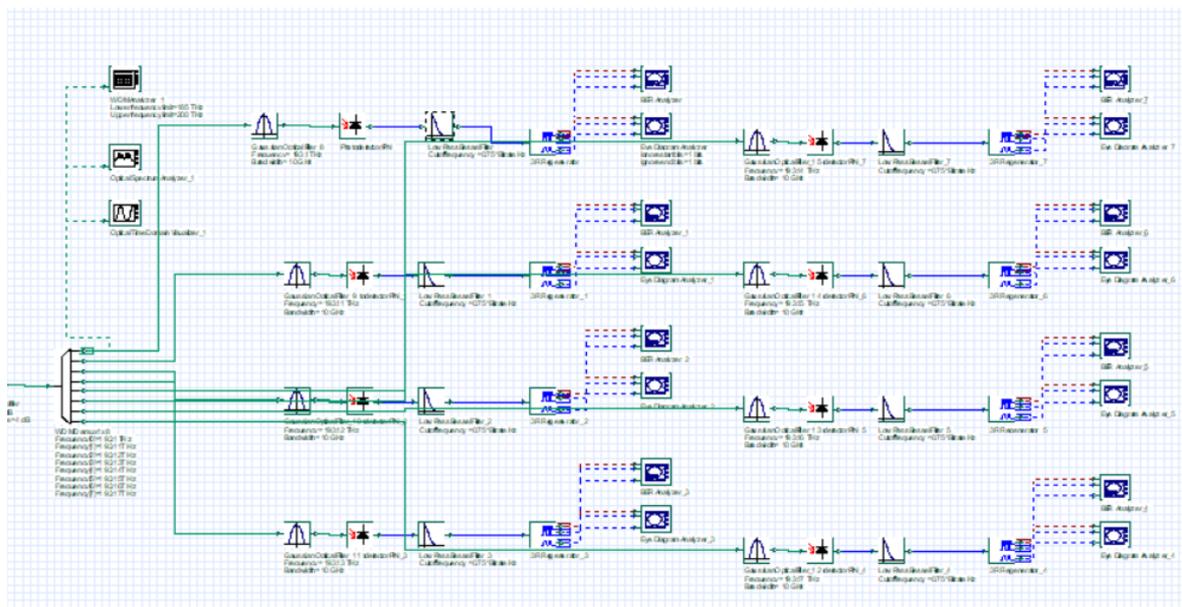
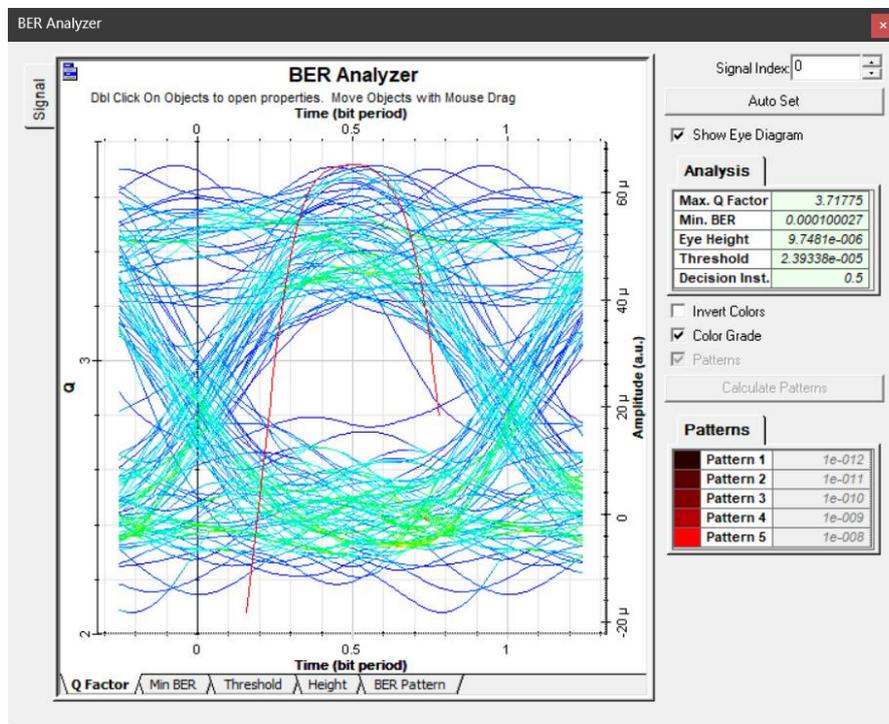
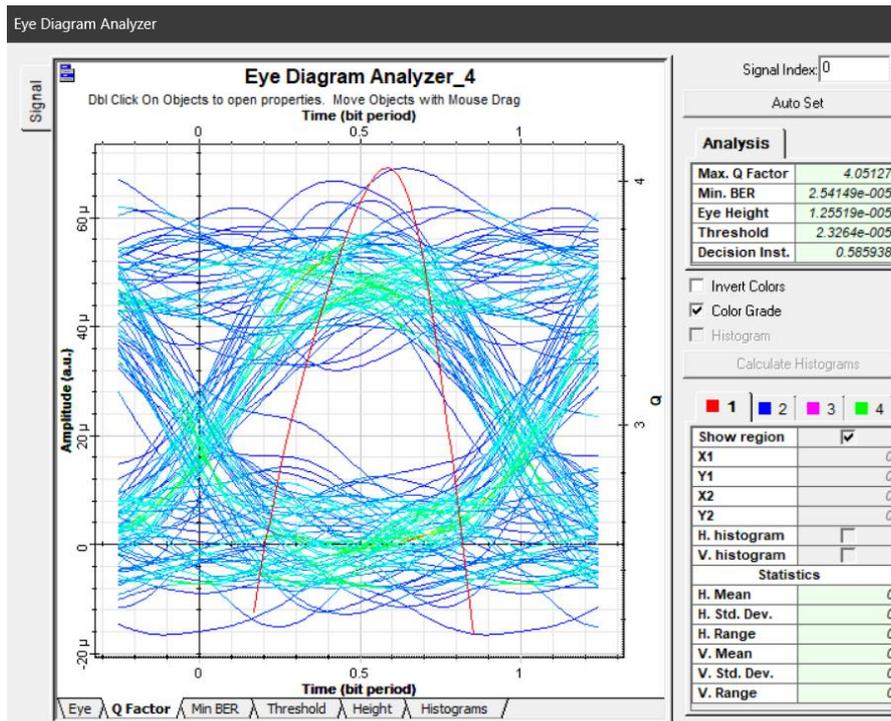


Figura 30. Etapa de Recepción del Sistema UDWDM de 8 Canales

Finalmente, para analizar la calidad de la señal obtenida durante la transmisión se colocan bloques de BER Analyzer y Eye Diagram Analyzer para poder observar el comportamiento de la señal recibida. En este caso se puede observar que para transmisión por 100Km de Fibra se tiene un Factor Q de 3.71 y BER de 0.00010 en el Canal 1 como se observa en la Figura 31(a). El diagrama de Ojo de este Canal Receptado hace notar que existe bastante interferencia de la señal y potencias muy bajas, esto debido a que por la distancia y a pesar de amplificador, los efectos de la dispersión cromática reducen la potencia recibida de la señal. Lo mismo pasa en el canal 8, en la Figura 31(b) se puede observar que se tiene un diagrama de ojo con poca amplitud lo que indica que la interferencia y errores durante la transmisión fue alto con respecto a la cantidad de bits transmitidos, con un Factor Q de 4.05 y BER de 2.5×10^{-5} .



(a)



(b)

Figura 31. Diagrama de Ojo de la Señal Recibida (a) Canal 1 (b) Canal 8

Como se puede observar, debido a la distancia y por las características del sistema al ser UDWDM, existe mayor incidencia de efectos lineales provocador por la dispersión cromática. Sin embargo, en la siguiente sección se pondrá a prueba el sistema y se identificará estos efectos bajo diversos escenarios de prueba.

4. CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Simulación de Escenarios de Prueba

El sistema óptico realizado en el presente trabajo de investigación la simulación de una transmisión por 8 canales con 8 longitudes de onda diferentes, en la banda C y banda L de operación. El receptor recibe estas 8 señales ópticas UDWDM con una separación de 10 GHz entre frecuencias. Por otro lado, para el análisis de los efectos lineales se ha escogido realizar las pruebas de la calidad de enlace con velocidad de transmisión de 2.5 Gb/s, con una potencia de señal de 2.5, 1, 0.5 dBm, pruebas que son necesarias según la normativa de la UIT [32]. La distancia del enlace para el diseño de los equipos y las simulaciones se considera de 100 Km, sin embargo, se realizan pruebas para distancias de 20km, 40Km, 80Km y 120Km.

4.1.1 Banda C para Fibra G.652 con una Distancia de 20 Km y potencia de transmisor de 2.5dBm.

Para una distancia de 20Km, se observa en la Figura 32 y la Figura 33, la señal obtenida a la salida del demultiplexor, es decir en la etapa de recepción del enlace óptico, en esta 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 -35.99dBm.

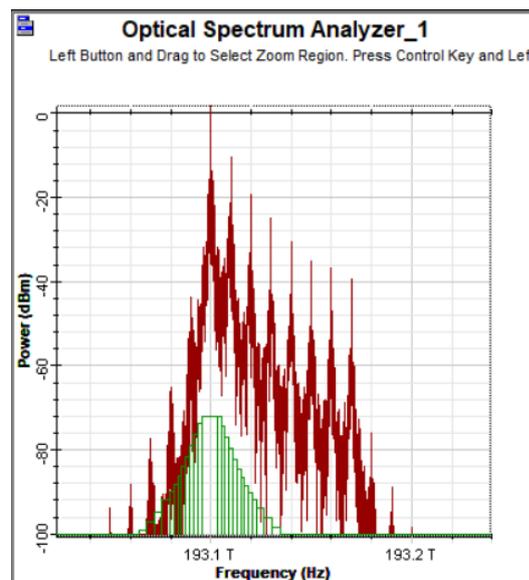


Figura 32. Espectro óptico del enlace con fibra G.652 a 20 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

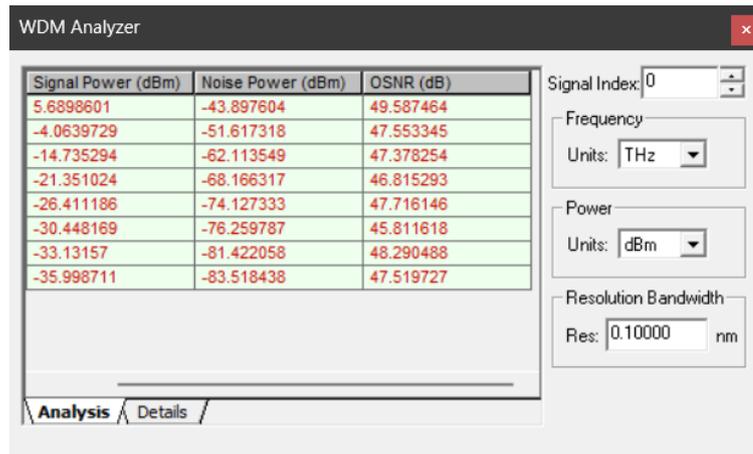


Figura 33. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 20 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Como se observa en los diagramas de ojo de la Figura 34 y en la Tabla 11, se puede evidenciar que, para la distancia analizada en este momento, los efectos de la dispersión cromática no afectan al enlace, teniendo un Factor Q de 25,91 y como mínimo de 12,036; también el BER se puede encontrar con muchos menos errores en las bandas de los extremos, mientras que las intermedias son mucho mayores. Finalmente, la OSNR para esta distancia es alta que está entre los 45,81 a 49,58 lo que indica un enlace óptimo para la transmisión.

Tabla 11. Datos de Canal 4 de enlace con fibra G.652 a 20 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Banda C - Fibra G.652 - 2.5dBm Power -20 KM			
Canal	Factor Q	B.E.R.	OSNR
1	25,91	1,61E-148	49,58
2	14,14	7,12E-46	47,55
3	12,06	5,34E-34	47,37
4	17,72	1,4E-49	46,81
5	12,51	1,99E-36	47,71
6	12,036	7,36E-34	45,81
7	13,5	4,7E-42	48,29
8	22,66	3,81E-114	47,51

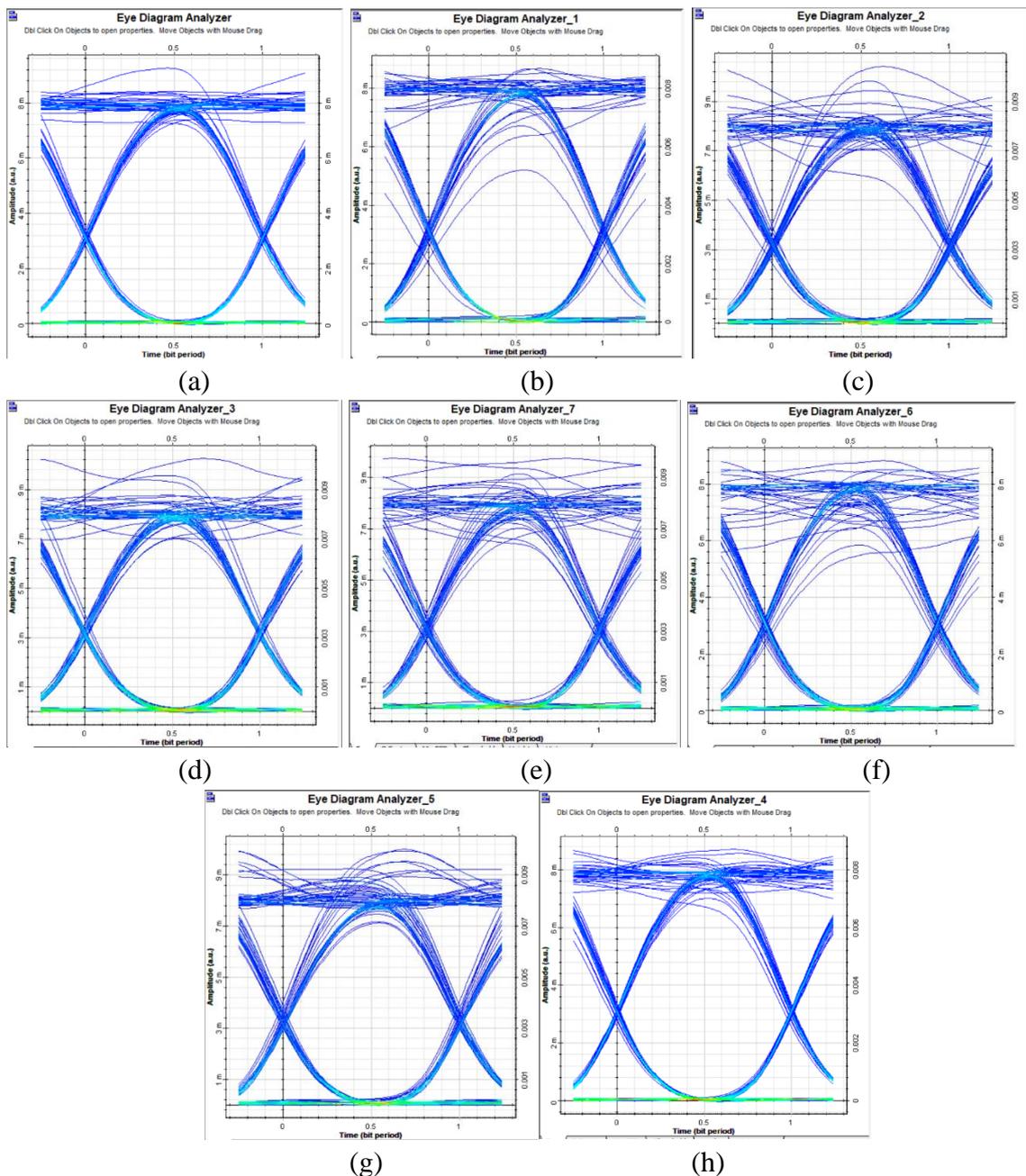


Figura 34. Diagrama de Ojo de enlace con fibra G.652 a 20 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C (a) Canal 1 (b) Canal 2 (c) Canal 3 (d) Canal 4 (e) Canal 5 (f) Canal 6 (g) Canal 7 (h) Canal 8

4.1.2 Banda C para Fibra G.652 con una Distancia de 40 Km y potencia de transmisor de 2.5dBm.

Para una distancia de 40Km, se observa en la Figura 35 y la Figura 36, la señal obtenida a la salida del demultiplexor, es decir en la etapa de recepción del enlace óptico, en esta 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 -83.51dBm.

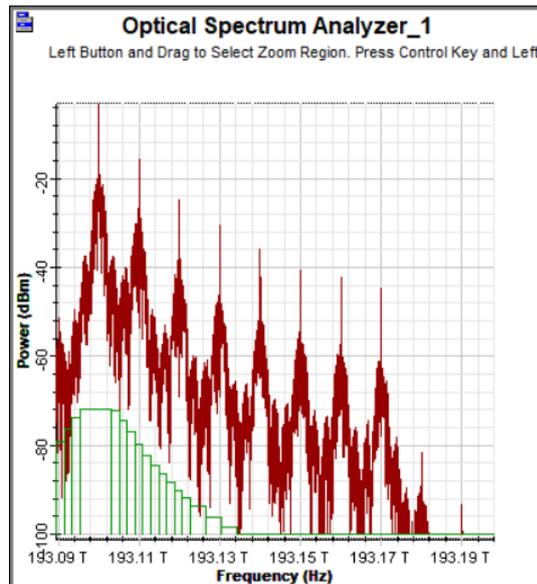


Figura 35. Espectro óptico del enlace con fibra G.652 a 40 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

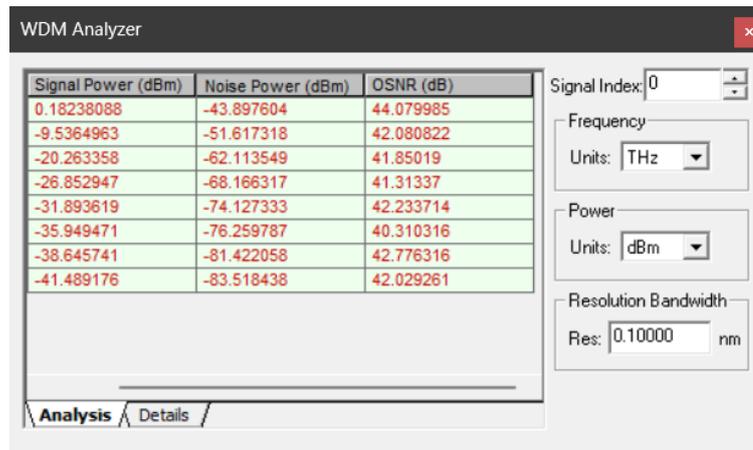


Figura 36. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 40 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

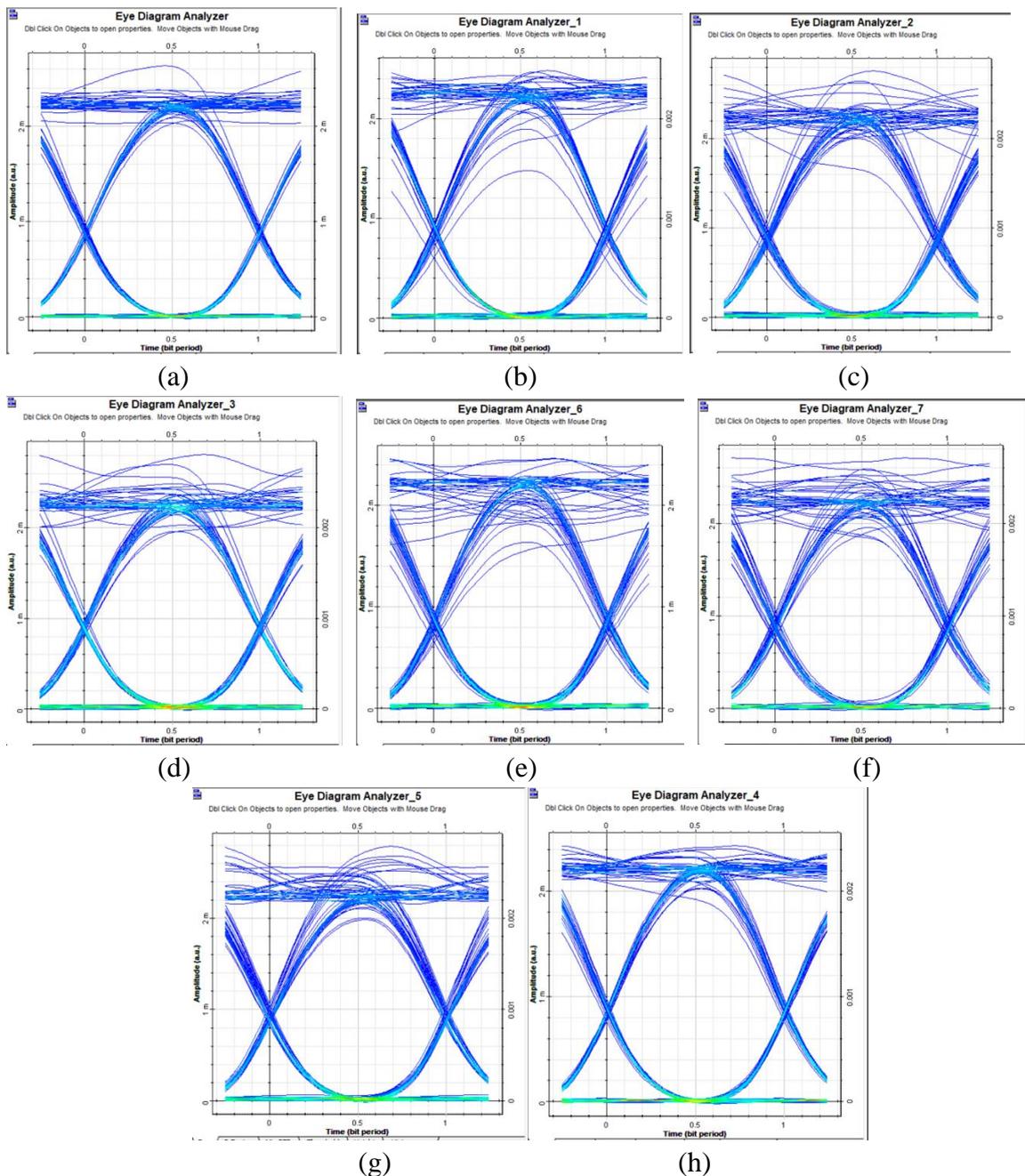


Figura 37. Diagrama de Ojo con fibra G.652 a 40 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C. (a) Canal 1, (b) Canal 2, (c) Canal 3, (d) Canal 4, (e) Canal 5, (f) Canal 6, (g) Canal 7, y (h) Canal 8.

Como se observa en los diagramas de ojo de la Figura 37 y en la Tabla 12, se puede evidenciar que para la distancia analizada en este momento, los efectos de la dispersión cromática no afectan de gran manera al enlace aún, teniendo un Factor Q de 25,14 y como mínimo de 11,85; también el BER se puede encontrar con muchos menos errores en las bandas de los extremos, mientras que las intermedias son mucho mayores. Finalmente, la OSNR para esta distancia es alta que está entre los 40,31 a 44,07 lo que indica un enlace óptimo para la transmisión.

Tabla 12. Datos de enlace con fibra G.652 a 40 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Banda C - Fibra G.652 - 2.5dBm Power - 40 KM			
Canal	Factor Q	B.E.R.	OSNR
1	25,14	5,43E-140	44,07
2	13,64	7,44E-43	42,08
3	13,18	3,29E-40	41,85
4	15,12	3,96E-52	41,31
5	12,55	1,24E-36	42,23
6	11,85	6,53E-33	40,31
7	14,48	5,12E-48	42,77
8	24,02	5,43E-128	42,02

4.1.3 Banda C para Fibra G.652 con una Distancia de 80 Km y potencia de transmisor de 2.5dBm.

Para una distancia de 80Km, se observa en la Figura 38 y la

Figura 39, la señal obtenida a la salida del demultiplexor, es decir en la etapa de recepción del enlace óptico, en esta 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 -83.51dBm.

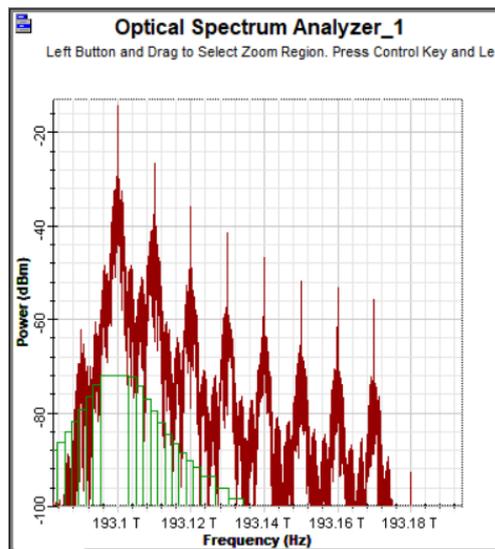


Figura 38. Espectro óptico del enlace con fibra G.652 a 80 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

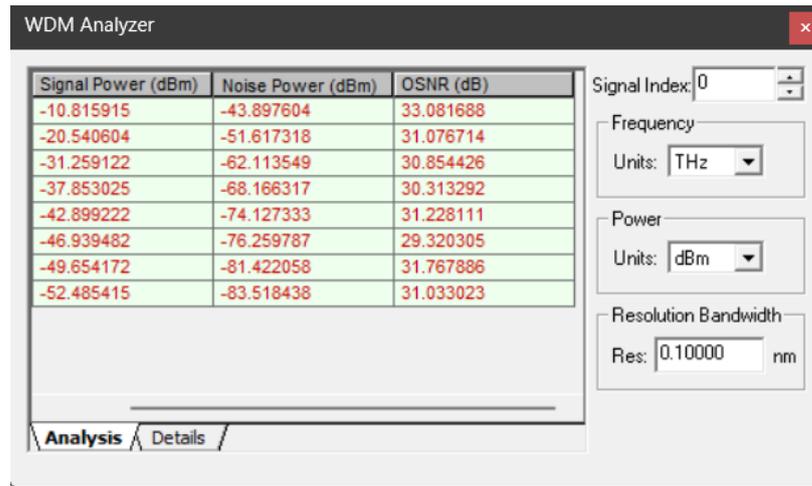


Figura 39. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 80 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda

Como se observa en los diagramas de ojo de la Figura 40 y en la Tabla 12, se puede evidenciar que para la distancia analizada en este momento, los efectos de la dispersión cromática comienzan a reducir más los parámetros de Factor Q ya menor que 10, mientras que el BER decayó a valores que van entre los $2,15 \times 10^{-19}$, también el BER se puede encontrar con muchos menos errores en las bandas de los extremos, mientras que las intermedias son mucho mayores. Finalmente, la OSNR para esta distancia es alta que está entre los 33,081 a 29,32 lo que indica un enlace que puede aún realizar transmisiones con poca tasa de error.

Tabla 13. Datos de enlace con fibra G.652 a 80 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Banda C - Fibra G.652 - 2.5dBm Power - 80 KM			
Canal	Factor Q	B.E.R.	OSNR
1	11,7	6,06E-32	33,081
2	8,91	2,15E-19	31,07
3	8,79	6,43E-19	30,85
4	9,43	1,78E-21	30,31
5	8,66	2,06E-18	31,22
6	8,97	1,21E-19	29,32
7	9,6	3,51E-22	31,76
8	12,6	1,03E-36	31,03

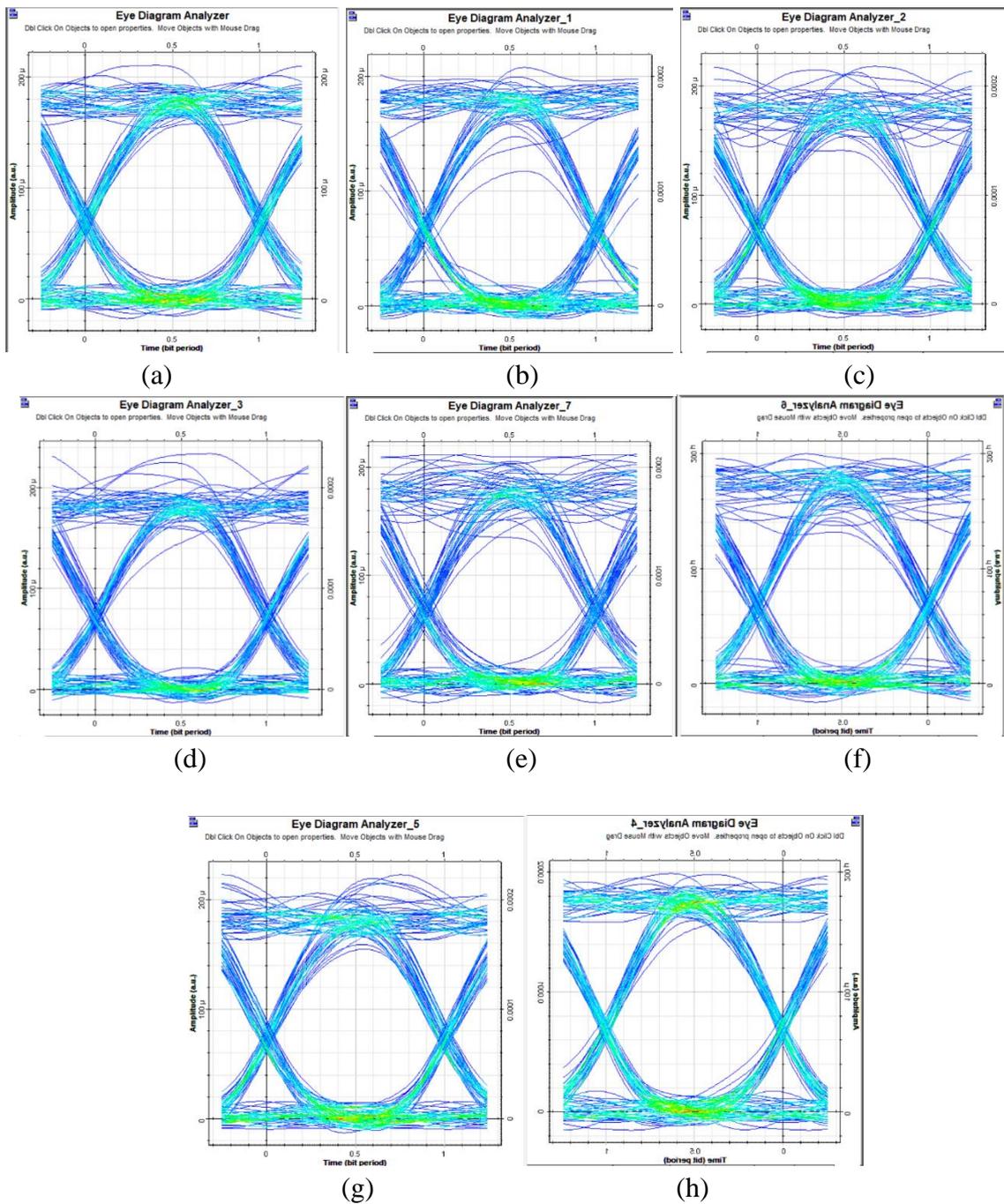


Figura 40. Diagrama de Ojo con fibra G.652 a 80 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C. (a) Canal 1, (b) Canal 2, (c) Canal 3, (d) Canal 4, (e) Canal 5, (f) Canal 6, (g) Canal 7, y (h) Canal 8.

4.1.4 Banda C para Fibra G.652 con una Distancia de 120 Km y potencia de transmisor de 2.5dBm.

Para una distancia de 120 Km, se observa en la Figura 41 y la Figura 42, la señal obtenida a la salida del demultiplexor, es decir en la etapa de recepción del enlace óptico, en esta 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 -83.51dBm.

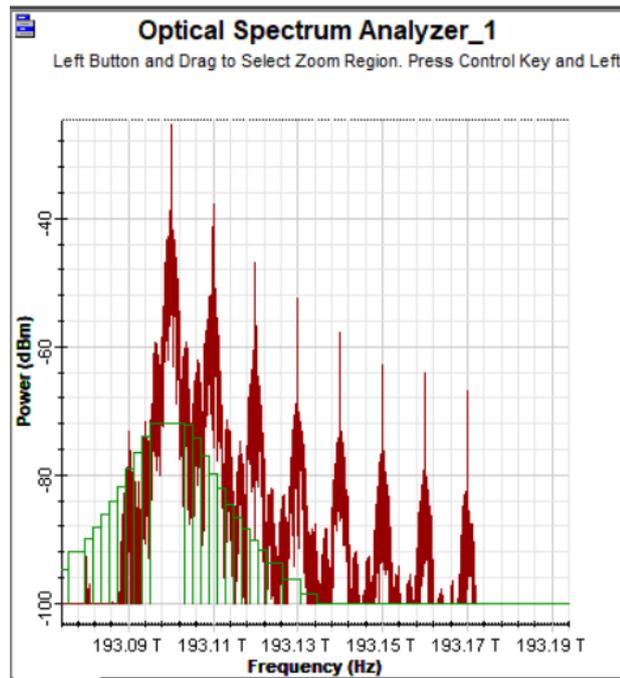


Figura 41. Espectro óptico del enlace con fibra G.652 a 120 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

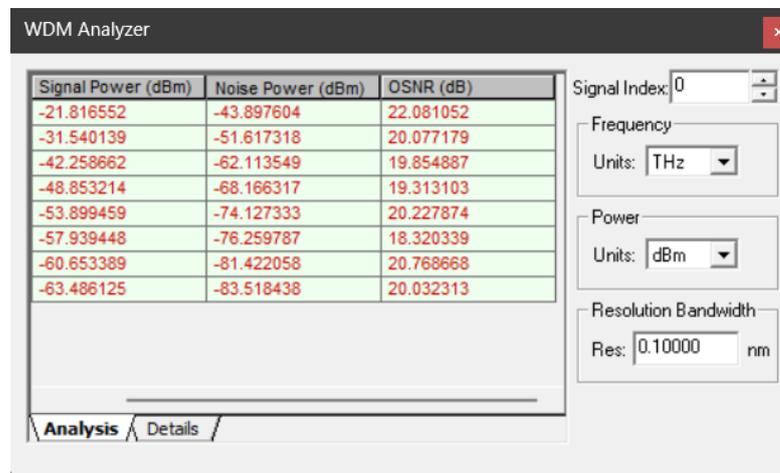


Figura 42. Análisis de Potencia de enlace con fibra G.652 a 120 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

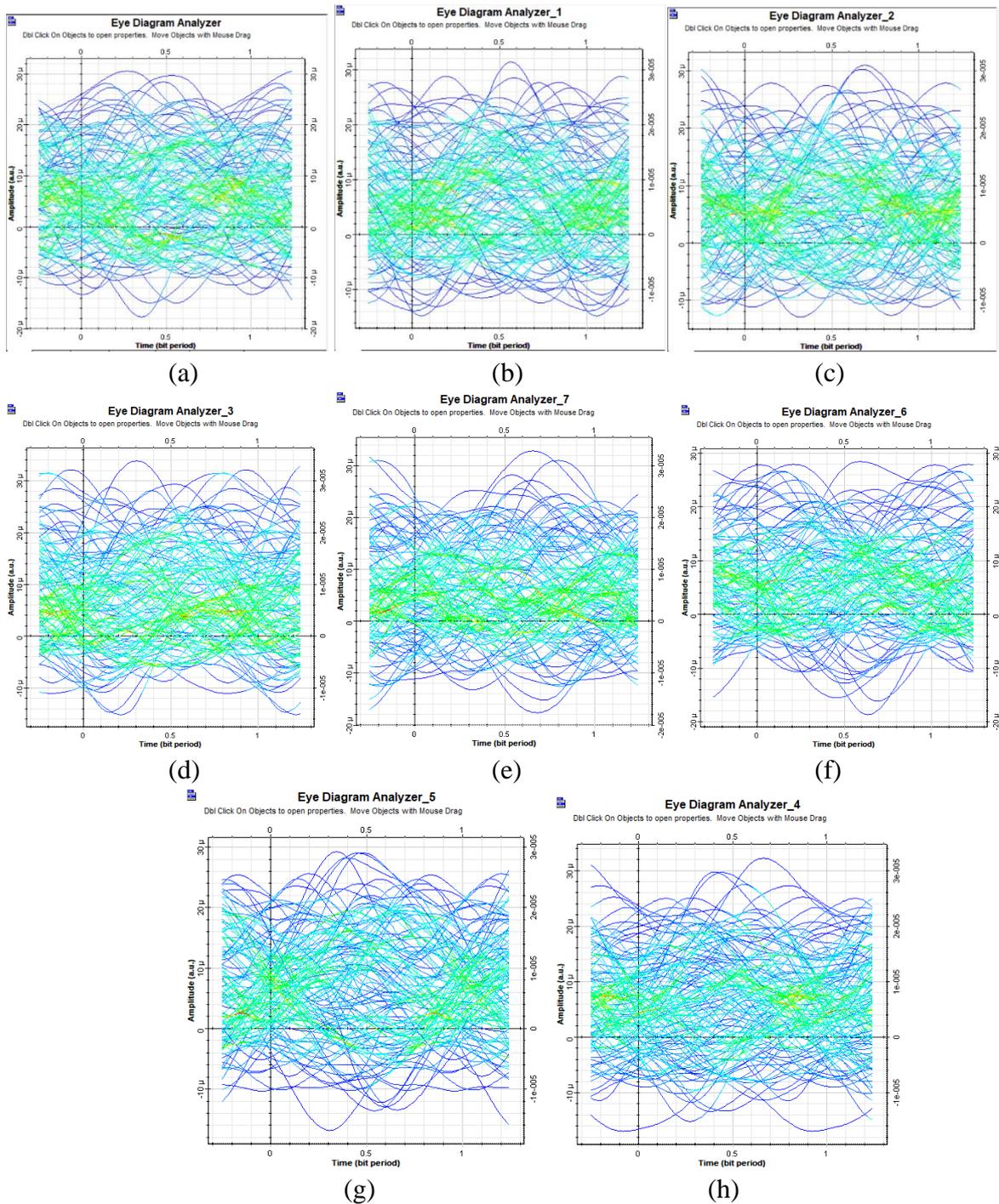


Figura 43. Diagrama de Ojo con fibra G.652 a 120 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C. (a) Canal 1, (b) Canal 2, (c) Canal 3, (d) Canal 4, (e) Canal 5, (f) Canal 6, (g) Canal 7, y (h) Canal 8.

Como se observa en los diagramas de ojo de la Figura 43 y en Tabla 14, las señales a esta distancia poseen mucha distorsión y solapamiento, lo que ocasiona tener muchos errores durante la transmisión. El factor Q para este caso es de 0 y un BER de 1 con un OSNR de 19,31, esto indica que la dispersión cromática provocó el decaimiento de las señales transmitidas y este enlace no es apto para enviar información a esta distancia.

Tabla 14. Datos de enlace con fibra G.652 a 120 Km con 2.5dBm en la entrada para la banda C

Banda C - Fibra G.652 - 2.5dBm Power - 120 KM			
Canal	Factor Q	B.E.R.	OSNR
1	0	1	22,08
2	0	1	20,07
3	0	1	19,85
4	0	1	19,31
5	0	1	20,22
6	0	1	18,32
7	0	1	20,76
8	0	1	20,03

4.2 Análisis de Resultados de Simulación por Tipo de Fibra

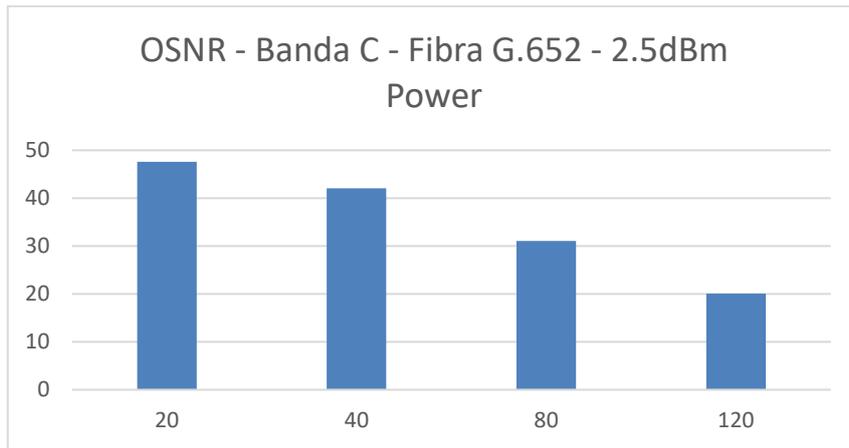
Para el análisis de los datos se procedió a calcular la media de los valores de Factor Q, BER y OSNR, para así poder determinar la relación entre calidad de señal y efectos producidos por la dispersión cromática con las simulaciones realizadas a las diferentes distancias.

En la Tabla 15, se puede observar que se tiene una relación entre las distancias de 20 y 40 km muy cercanas, es decir, la dispersión cromática no afecta de gran manera a estas distancias de transmisión.

Tabla 15. Media de Datos Banda C Fibra G.652 2.5dBm

Banda C - Fibra G.652 - 2.5dBm Power				
	20	40	80	120
Factor Q	16,317	16,2475	9,8325	0
B.E.R.	1,58999E-34	8,16405E-34	3,80141E-19	1
OSNR	47,57875	42,08	31,080125	20,08

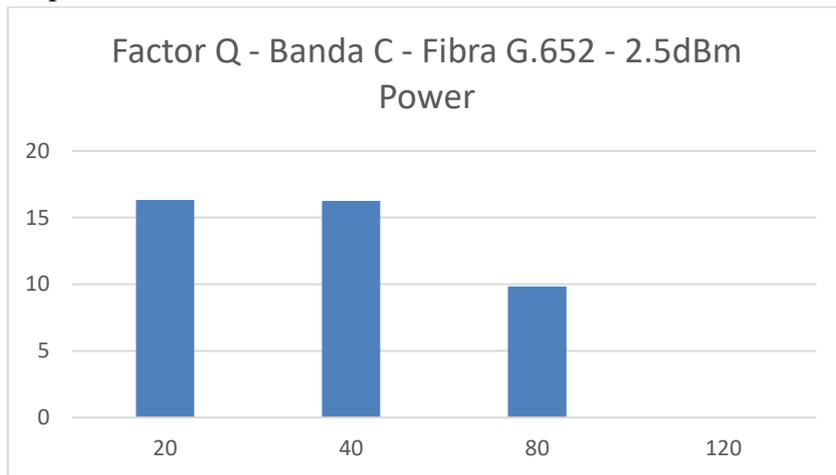
De la misma manera en la (b)



(c)

Figura 44. Resultados obtenidos para las diferentes Distancias Banda C G652 (a) Factor Q (b) BER (c) OSNR

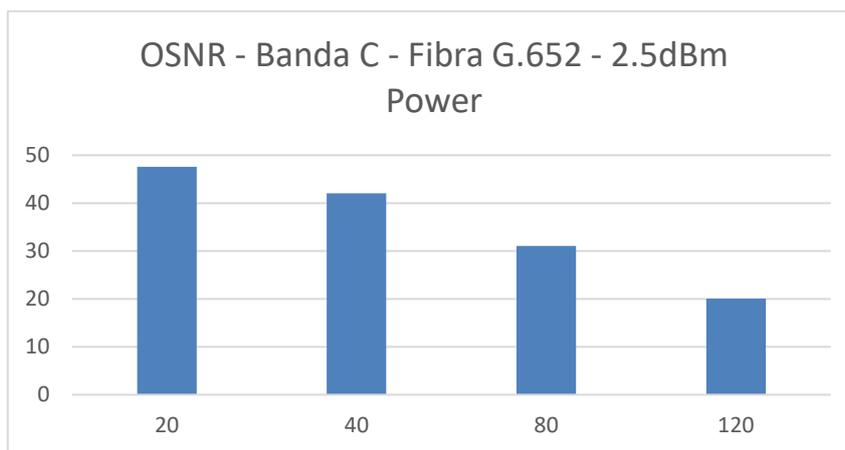
(a) se aprecia lo mencionado con anterioridad, sin embargo, se puede notar que el Factor Q decae un 30% a la distancia de 80Km y se hace 0 para la distancia de 120Km. Esto indica que la dispersión cromática tuvo efectos en el enlace, atenuando la señal.



(a)



(b)



(c)

Figura 44. Resultados obtenidos para las diferentes Distancias Banda C G652 (a) Factor Q (b) BER (c) OSNR

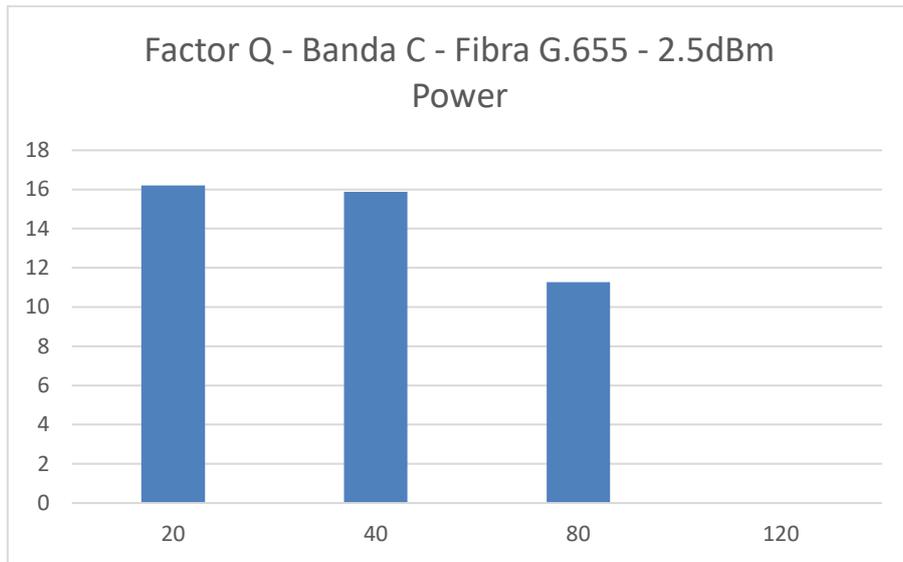
De igual forma, para este tipo de fibra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (b) se puede observar que el BER en las distancias de 20 y 40 Km es muy bajo tanto que no se puede apreciar debido a la diferencia con el BER en la transmisión de 80Km, que a pesar de ser bajo indica una mayor cantidad de bits errados durante el enlace considerando que la velocidad de transmisión son 2.5Gb/s, así también se observa que el BER para 120Km es demasiado alto en comparación con los 80Km llegando a 1, por lo que se descarta la transmisión a esta distancia.

Así también en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (c) se puede observar el OSNR promedio de todos los canales bajo los parámetros mencionados con anterioridad. Se puede observar que existe una excelente transmisión de potencia durante todo el enlace, sin embargo, esta variable va decayendo mientras la Fibra se extiende, siendo este un efecto primario de la dispersión cromática.

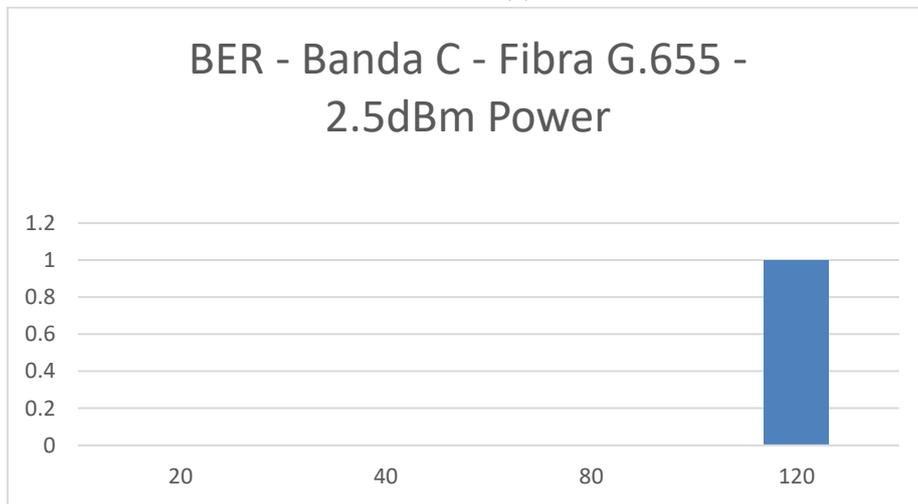
Por otro lado, en la Tabla 16 se puede observar que se tiene una relación entre las distancias de 20, 40 y 80 km muy cercanas, es decir, la dispersión cromática no afecta de gran manera a estas distancias de transmisión. En la Figura 45 (a), se puede observar que el Factor Q se encuentra en un rango de 10 a 20 para las distancias de 20 a 80 km. En la Figura 45 (b), se puede observar que el BER posee números muy altos para las distancias de 120 km; en la Figura 45 (a), se muestra la OSNR en donde se indica que para las distancias de 20 a 40 km se tiene una relación de entre 33.85 a 37.21.

Tabla 16. Media de Datos Banda C Fibra G.655 2.5dBm

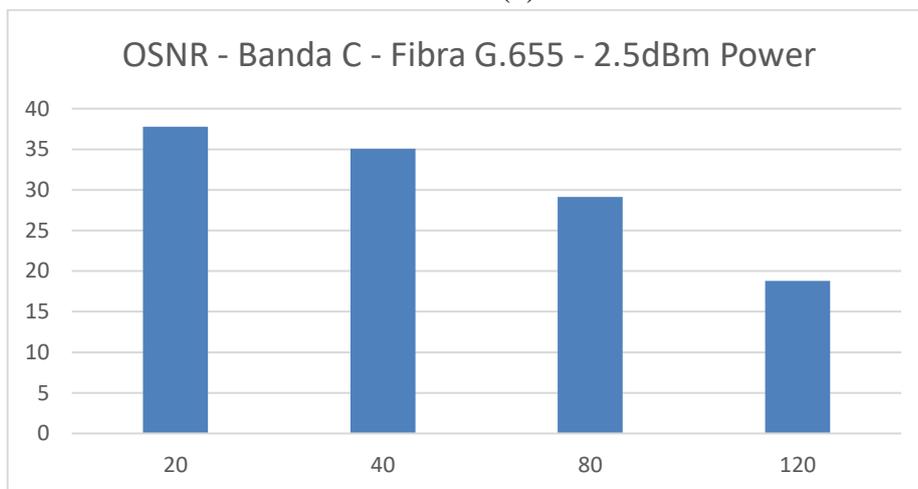
Banda C - Fibra G.655 - 2.5dBm Power				
	20	40	80	120
Factor Q	18,7175	15,10375	11,9025	0
B.E.R.	2,38875E-52	7,875E-45	3,00001E-17	1
OSNR	37,21	33,8525	29,67	17,03125



(a)



(b)



(c)

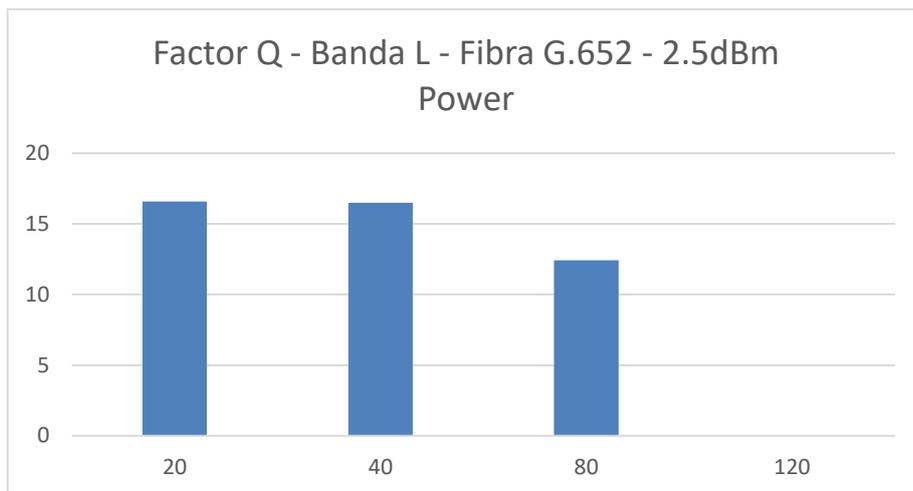
Figura 45. Resultados de las diferentes Distancias Banda C G655 (a) Factor Q (b) BER (c) OSNR

De la misma manera que para la banda C, en la Tabla 15 se puede observar que se tiene una relación entre las distancias de 20, 40 y 80 km muy cercanas, es decir, la dispersión cromática no afecta de gran manera a estas distancias de transmisión.

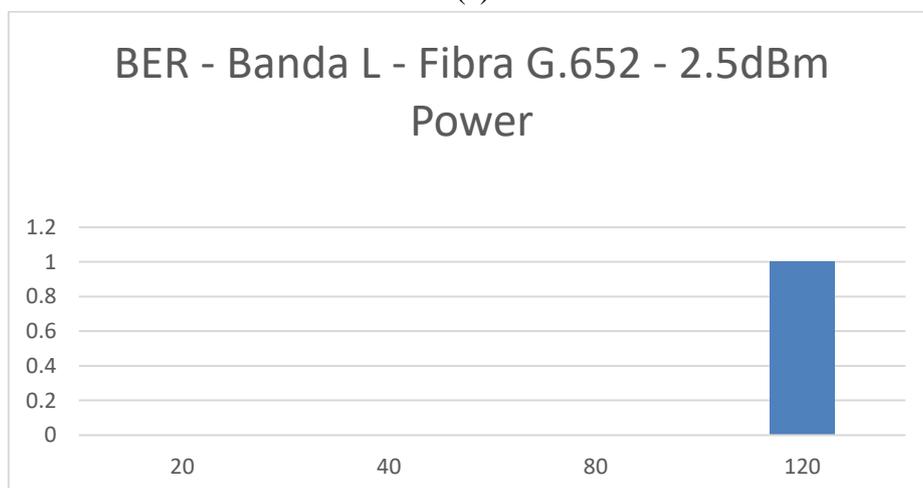
En la Figura 46 (a), se puede observar que el Factor Q tiene una cercanía dentro de la banda de análisis a las distancias de entre 20 a 80 km. En la Figura 46 (b) se puede observar que existe un BER ligeramente mayor que en el caso de la banda C; en la Figura 46 (c) se indica que la OSNR tiene un rango de entre 47 y 20 dentro de todo el rango de distancias.

Tabla 17. *Media de Datos Banda L Fibra G.652 2.5dBm*

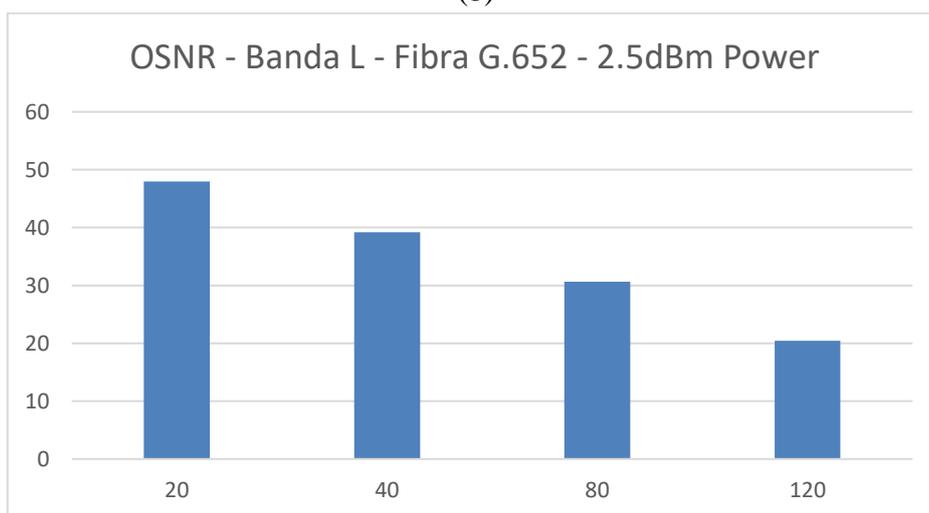
Banda L - Fibra G.652 - 2.5dBm Power				
	20	40	80	120
Factor Q	16,57875	16,1575	14,8125	0
B.E.R.	3,13358E-36	1,11354E-48	1,07505E-11	1
OSNR	47,9425	39,46875	28,68375	20,4325



(a)



(b)



(c)

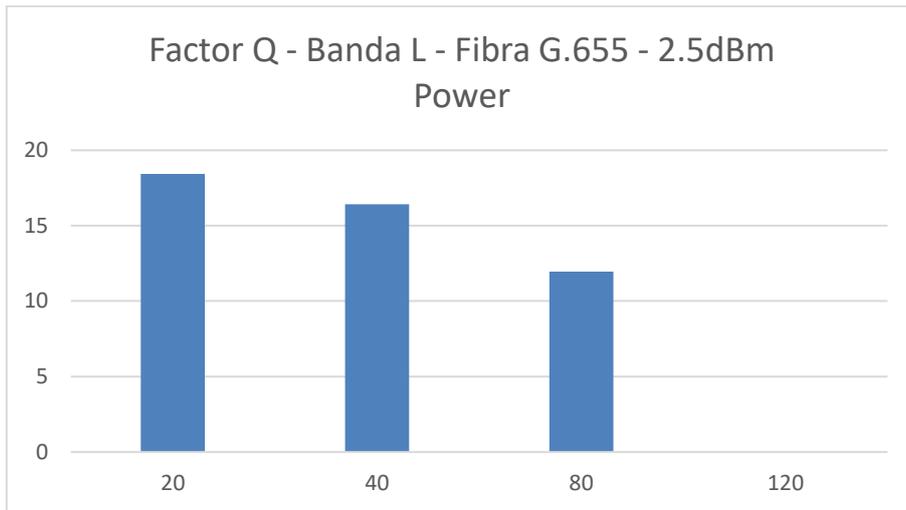
Figura 46. Resultados para las diferentes Distancias Banda L G652 (a) Factor Q (b) BER (c) OSNR

Finalmente, en la Tabla 18 se puede observar que se tiene una relación entre las distancias de 20 y 40 km muy cercanas, es decir, la dispersión cromática no afecta de gran manera a estas distancias de transmisión.

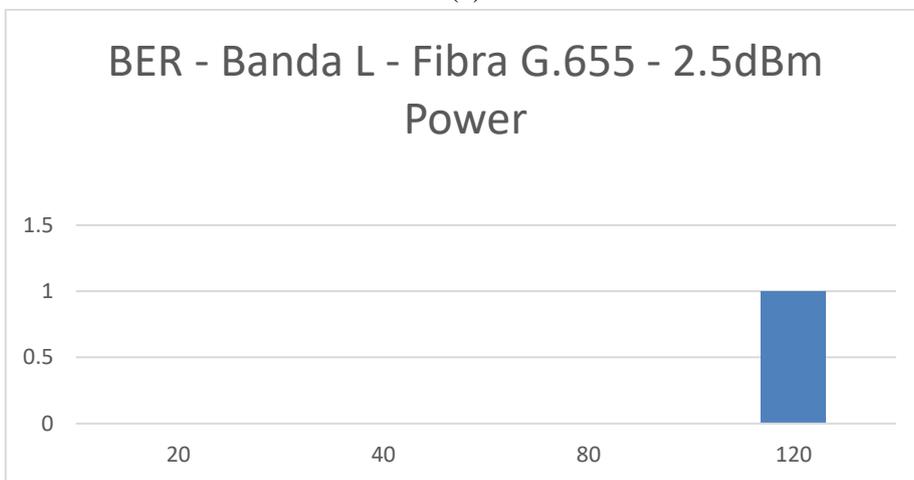
En la Figura 47 se puede observar que el Factor Q tiene valores de entre 19.42 a 11.16 en las distancias de 20 a 80 km; en **Tabla 18** se observa el BER mismo que tiene un valor alto para la distancia de 120km. Finalmente, en la *Figura 47* se observa la OSNR misma que tiene rangos de entre 19 y 44 para el rango de distancias de análisis.

Tabla 18. Media de Datos Banda L Fibra G.655 2.5dBm

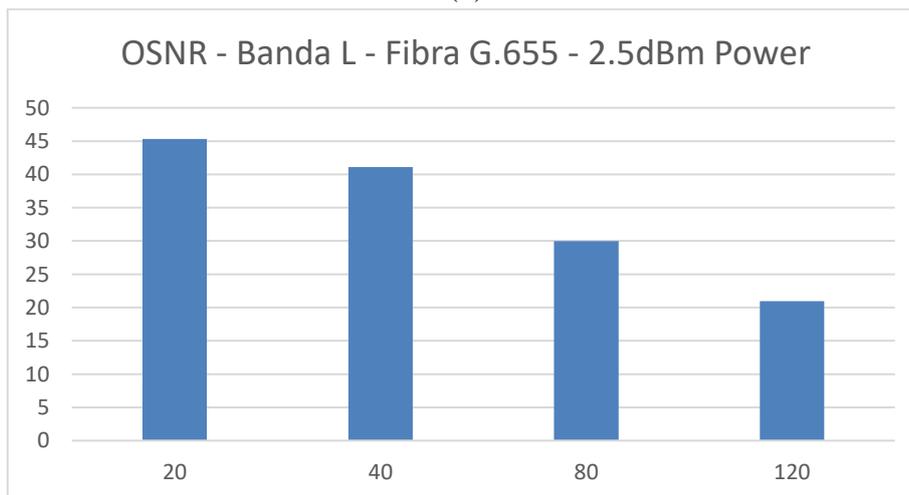
Banda L - Fibra G.655 - 2.5dBm Power				
	20	40	80	120
Factor Q	19,4225	16,6825	11,16	0
B.E.R.	1,1E-49	7,06625E-42	1,05943E-14	1
OSNR	44,34	43,02125	29,96375	19,5025



(a)



(b)



(c)

Figura 47. Resultado para las diferentes Distancias Banda L G655 (a) Factor Q, (b) BER (c) OSNR

4.3 Análisis Estadístico

Para realizar el análisis estadístico de los datos recolectados, se utiliza el software IBM SPSS en su versión 29, para realizar la prueba estadística de ANOVA, la cual permite evaluar los datos obtenidos sobre múltiples observaciones, útil para determinar el comportamiento del sistema bajo las distancias de 20, 40, 80 y 120 km en cada una de las fibras analizadas.

4.3.1 Comprobación de Hipótesis Simulación Fibra G.652

Para esta prueba de Hipótesis se realizaron 33 mediciones a las diferentes distancias de fibra óptica con respecto a los parámetros de la fibra G.652. Las distancias de la fibra son: 20, 40, 80, y 120 km y se analizaron los parámetros de BER para realizar la prueba de ANOVA.

Hipótesis Nula: H0

$$\mathbf{H0: } \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

Donde:

μ_1 media de BER obtenido por el sistema óptimo a una distancia de 20km.

μ_2 media de BER obtenido por el sistema óptimo a una distancia de 40km.

μ_3 media de BER obtenido por el sistema óptimo a una distancia de 80km.

μ_4 media de BER obtenido por el sistema óptimo a una distancia de 120km.

Hipótesis Alternativa: H1

H1: Existe i, j tal que $\mu_i \neq \mu_j$ para $i, j = 1, 2, 3, 4$

Los datos estadísticos descriptivos de las pruebas realizadas a la fibra óptica G.652 mediante la medición del BER, a las diferentes distancias de 20, 40, 80 y 120 km, tal y como se observa en la **Tabla 19**, obteniendo valores de media que van para las distancias de 20 y 40 km entre $4.053e-0.35$ y $2.014e-34$ respectivamente, para las de 80 km tiene un valor de $4.56e-11$, mientras que para 120 km el valor se eleva a 1.

Tabla 19. Datos Estadísticos para Pruebas de Fibra G.652

Estadísticos descriptivos								
	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media		Desv. estándar	Varianza
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico	Estadístico
BER FIBRA G.652 20KM	33	7,36E-034	8,97E-159	7,36E-034	4,0533E-035	2,79490E-035	1,58103E-034	,000
BER FIBRA G.652 40KM	33	6,53E-033	5,43E-140	6,53E-033	2,0410E-034	2,04061E-034	1,15434E-033	,000
BER FIBRA G.652 80KM	33	8,40E-010	1,03E-036	8,40E-010	4,5625E-011	3,21191E-011	1,81693E-010	,000
BER FIBRA G.652 120KM	33	0,00E+000	1,00E+000	1,00E+000	1,0000E+000	0,00000E+000	0,00000E+000	,000
N válido (por v b lista)								

Como se observa en la **Tabla 20**, el *Pvalor* obtenido en la prueba ANOVA es <0.115 por lo que cumple con la condición: $Pvalor = 0,115 > 0,05$, es decir que significativamente las medias son iguales y se acepta la hipótesis H_0 . Esto se produce debido a que no existe una dispersión significativamente elevada con respecto a las mediciones realizadas pese a que en las señales intermedias existe un solapamiento al momento de efectuar la transmisión lo que eleva el BER e impide que a esta distancia sea segura el envío y evita que sea seguro el envío de información.

Tabla 20. ANOVA del BER para la Fibra G.652

ANOVA BER G652					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,000	3	,000	2,018	,115
Dentro de grupos	,000	124	,000		
Total	,000	127			

Para comprobar la validez de la prueba ANOVA, se realizó un POS HOC de varianzas mediante la prueba de Tukey que se observa en la **Tabla 21**, en esta se indica que únicamente existe un subconjunto que relaciona la distribución de medias dentro del análisis por lo que estas son significativamente iguales.

Tabla 21. Prueba de Tukey en fibra G652

BER FIBRA G652

HSD Tukey^a

DISTANCIA	N	Subconjunto para alfa = 0.05
S		1
120,00	33	0,0000E+000
20,00	33	4,0533E-035
40,00	33	2,0410E-034
80,00	33	4,5625E-011
Sig.		,190

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 33,000.

4.3.2 Comprobación de Hipótesis Simulación Fibra G.655

Para esta prueba de Hipótesis se realizaron 33 mediciones a las diferentes distancias de fibra óptica con respecto a los parámetros de la fibra G.655. Las distancias de la fibra son: 20, 40, 80, y 120 km y se analizaron los parámetros de BER para realizar la prueba de ANOVA.

Hipótesis Nula: H0

$$H0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

Donde:

μ_1 media de BER obtenido por el sistema óptimo a una distancia de 20km.

μ_2 media de BER obtenido por el sistema óptimo a una distancia de 40km.

μ_3 media de BER obtenido por el sistema óptimo a una distancia de 80km.

μ_4 media de BER obtenido por el sistema óptimo a una distancia de 120km.

Hipótesis Alternativa: H1

H1: Existe i, j tal que $\mu_i \neq \mu_j$ para $i, j = 1, 2, 3, 4$

Los datos estadísticos descriptivos de las pruebas realizadas a la fibra óptica G.655 mediante la medición del BER, a las diferentes distancias de 20, 40, 80 y 120 km, tal y como se observa en la **Tabla 22**, obteniendo valores de media que van para las distancias de 20 y 40 km entre $1.40e-41$ y $1.54e-41$ respectivamente, para las de 80 km tiene un valor de $5.13e-11$, mientras que para 120 km el valor se eleva a 1.

Tabla 22. Datos Estadísticos Descriptivos de Pruebas Fibra G.655

Estadísticos descriptivos								
	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media		Desv. estándar	Varianza
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico	Estadístico
BER FIBRA G.655 20 KM	33	4,50E-040	1,20E-130	4,50E-040	1,4063E-041	1,40625E-041	7,95495E-041	,000
BER FIBRA G.655 20 KM	33	4,80E-040	1,00E-079	4,80E-040	1,5449E-041	1,49884E-041	8,47871E-041	,000
BER FIBRA G.655 20 KM	33	8,30E-010	2,40E-048	8,30E-010	5,1303E-011	3,39296E-011	1,91935E-010	,000
BER FIBRA G.655 120 KM	33	0,00E+000	1,00E+000	1,00E+000	1,0000E+000	0,00000E+000	0,00000E+000	,000
N válido (por lista)								

Como se observa en la **Tabla 23**, el *Pvalor* obtenido en la prueba ANOVA es 0.082 por lo que cumple con la condición: $Pvalor = 0,082 > 0,05$, es decir que significativamente las medias son iguales y se acepta la hipótesis H_0 . Esto se produce debido a que no existe una dispersión significativamente elevada con respecto a las mediciones ni siquiera en el caso de distancia de 120km que dentro de las señales intermedias existe un solapamiento al momento de efectuar la transmisión lo que eleva el BER e impide que a esta distancia sea segura el envío de información, de la misma manera que en el caso anterior.

Tabla 23. Análisis ANOVA para Fibra G.655

ANOVA					
BER FIBRA G655					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,000	3	,000	2,286	,082
Dentro de grupos	,000	124	,000		
Total	,000	127			

Para comprobar la validez de la prueba ANOVA, se realizó un POS HOC de varianzas mediante la prueba de Tukey que se observa en la **Tabla 24**, en esta se indica que únicamente existe un subconjunto que relaciona la distribución de medias dentro del análisis por lo que estas son significativamente iguales tal como en el caso anterior afirmando que existe una correcta medición de los datos.

Tabla 24. Prueba Tukey en Fibra G655

BER EN FIBRA G655

HSD Tukey^a

DISTANCI	N	Subconjunto para alfa = 0.05
AS		1
120,00	33	0,0000E+000
20,00	33	1,4063E-041
40,00	33	1,5449E-041
80,00	33	5,1303E-011
Sig.		,147

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 33,000.

5. CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se pudo determinar que para canales UDWDM se puede diseñar un circuito de transmisión y recepción de fibra óptica para el envío de información a cierta cantidad de distancia, dentro de esto, se ha logrado determinar que el rango óptimo para evitar los efectos de la dispersión cromática puede variar de entre los 20 a los 80 km con la fibra G655 para tener una calidad de transmisión que se considera óptima, mientras que para la fibra G652 el rango optimo es de los 20Km a 40Km.
- Se pudo observar los efectos de la dispersión cromática realizando las mediciones de BER, Factor Q y OSNR, en donde estos parámetros varían de acuerdo con la distancia del canal de fibra óptica, para distancias superiores a 80 km en la fibra G655 se identificó que existe un BER muy elevado que impide la correcta recepción de los datos, así como una relación OSNR que tiende a 0 lo que indica que la señal original tiene una componente muy baja con respecto al ruido ingresado en el canal.
- El diagrama de Ojo dentro del simulador OptiSystem permite la identificación del traslape de información recibida por medio del canal óptico, en donde se puede analizar el Factor Q, mismo que indica que las frecuencias del sistema UDWDM puedan estar recibiendo bits no deseados de la frecuencia contigua a la de análisis.
- El software OptiSystem permite la simulación de sistemas ópticos bajo diversas situaciones que componen una situación real, con las herramientas de medición y análisis se puede determinar la calidad de enlace de transmisión que se puede posteriormente implementar.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda analizar otros tipos de fibra óptica para poder simular en entornos de transmisión superiores a los 80km que se pudo lograr en el diseño del presente sistema.
- Se recomienda el uso del diagrama de ojo dentro del simulador para observar el comportamiento de las diferentes señales que componen cada canal de la etapa de transmisión y recepción.
- Se recomienda el uso del Software OptiSystem para la simulación de diferentes enlaces ópticos ya que permite la generación de diagramas que permiten identificar de manera correcta el funcionamiento de un sistema antes de implementarlo.
- Se recomienda la generación de un protocolo de pruebas con diferentes espaciamientos de longitudes de onda que se encuentre dentro del rango UDWDM para poder realizar una comparación entre frecuencias intermedias con diferente espaciado y así determinar la calidad de enlace bajo parámetros distintos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Sales, «Redes de acceso UDWDM operadas con láseres aleatorios de sintonía limitada,» 2017.
- [2] P. Yépez y L. Oñate, *Análisis de una red PON UDWDM bajo las influencias de los efectos no lineales.*, Quito: Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- [3] R. P. Báez, A. D. Torres, K. C. Puerto, D. Guevara y F. Moreno, *Metodología para evaluar los efectos lineales y no lineales en un sistema de radio sobre fibra óptica*, 2017.
- [4] C. Vargass, *Diseño y simulación de una red WDM para medir el efecto no lineal de la fibra denominado FOUR WAVE MIXING (FWM)*, Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo, 2018.
- [5] Á. González, *Análisis de atenuación, dispersión y automodulación de fase en sistemas de comunicaciones de único canal por fibra óptica a 10 Gb/s*, León Guanajuato: Centro de investigaciones en óptica, A.C., 2017.
- [6] W. Abad, «DISEÑO DE UNA RED DWDM TRONCAL PARA MINIMIZAR EL EFECTO DE DISPERSIÓN CROMÁTICA EN EL ENLACE DE FIBRA GUAYAQUIL - LOJA,» Guayaquil, 2020.
- [7] J. Santos, K. Puerto y D. Guevara, «Compensación de la dispersión cromática presente en la fibra óptica utilizando métodos de ecualización,» *Ingeniare*, n° 21, pp. 13-32, 2016.
- [8] J. Alvarez, «COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICOS COHERENTES MEDIANTE ALGORITMOS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES BASADOS EN FILTROS ADAPTATIVOS Y EN EL ALGORITMO BACK-PROPAGATION,» Medellín, 2017.
- [9] K. Puerto y B. Medina, «EFECTO DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN UN SISTEMA HÍBRIDO,» *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, n° 24, pp. 59-63, 2014.
- [10] R. Udayakumar, V. Khanaa y T. Saravanan, «Chromatic Dispersion Compensation in Optical Fiber Communication System and its Simulation,» *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 6, pp. 4763-4766, 2013.

- [1 A. Bashir y R. Kumar, «Chromatic dispersion compensation techniques and
1] characterization of fiber Bragg grating for dispersion compensation,» *Optical and
Quantum Electronics*, vol. 49, 2017.
- [1 T. Nguyen, F. Rottenberg, S. Gorza, J. Louveaux y F. Horlin, «Efficient Chromatic
2] Dispersion Compensation and Carrier Phase Tracking for Optical Fiber FBMC/OQAM
Systems,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, n° 14, pp. 2909-2916, 2017.
- [1 O. Terra, «Chromatic dispersion measurement in optical fibers using optoelectronic
3] oscillations,» *Optics & Laser Technology*, vol. 115, pp. 292-297, 2019.
- [1 K. Vinoth, P. Venkatesh, A. Nabih, A. E. A. Mohamed, S. Tabbour and M. El-Assar,
4] "DWDM Channel Spacing Effects on the Signal Quality for DWDM/CWDM FTTx
Network," *Journal of Optical Communications*, vol. 43, no. 4, pp. 593-603,
2022.
- [1 M. Díaz, «DISEÑO DE UN ENLACE DE FIBRA ÓPTICA POR CABLE
5] SUBMARINO ENTRE ECUADOR CONTINENTAL E INSULAR PARA ACCESO
A INTERNET,» Quito, 2020.
- [1 G. Loza y K. Yugcha, «Diseño e implementación de un módulo didáctico de red GPON
6] y arquitectura FTTH con infraestructura pasiva para uso de prácticas de laboratorio de
la asignatura de Comunicaciones Ópticas de la carrera de Tecnología Superior en Redes
y Telecomunicaciones,» Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga, 2022.
- [1 C. Carranco, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE FIBRA ÓPTICA
7] CON TECNOLOGÍA OTN-DWDM PARA LA PROVISIÓN DE SERVICIOS DE
DATOS, TELEVISIÓN POR CABLE Y TELEFONÍA A GRAN DISTANCIA,»
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, 2018.
- [1 I. Vargas, SISTEMAS DE FIBRA ÓPTICA, México: Prenti Hall., 2014.
8]
- [1 J. Arguello, «ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE RECEPTORES
9] ÓPTICOS COHERENTES Y NO COHERENTES PARA GFDM EN REDES PON,»
Riobamba, 2018.
- [2 J. Bonilla, «ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL OFDM AL
0] PASAR POR UN CANAL ÓPTICO CON RECEPTOR NO COHERENTE EN REDES
PON,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2020.

- [2 J. Vázquez, «Tecnología GPON: La Evolución Tecnológica de las Redes de
1] Comunicaciones.,» Universidad de Quintana Roo, Chetumal, 2020.
- [2 S. Bimlendu, J. Divya, N. Dushyanth y D. Suresh, «Recent advances in optical network
2] technologies and its role in telecommunication industry,» *International Journal of
Research*, vol. 15, 2017.
- [2 E. A. C. Cabrera, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED WDM INDUCIDA AL
3] EFECTO NO LINEAL DE LA FIBRA DENOMINADO STIMULATED BRILLOUIN
SCATTERING,» Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2018.
- [2 K. Samaniego, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED WDM INDUCIDA AL
4] EFECTO NO LINEAL DE LA FIBRA DENOMINADO CROSS PHASE
MODULATION.,» Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2019.
- [2 D. Sayed y O. Silva, *Simulación de un anillo de red de transporte de fibra optica
5] comparando los métodos de multiplexación WDM y UDWDM a través del Software
OPTSIM*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [2 Worton, «FS community,» 04 Septiembre 2018. [En línea]. Available:
6] <https://community.fs.com/es/blog/wdm-technology-basis-cwdm-vs-dwdm.html>.
[Último acceso: 04 Enero 2022].
- [2 C. Baumeister, «Pan Dacom Direkt,» [En línea]. Available:
7] https://www.pandacomdirekt.com/technologies/detail/cwdm.html?tx_contagged%5Bsource%5D=default&tx_contagged%5Buid%5D=171&. [Último acceso: 9 Setiembre
2022].
- [2 D. Konstantinou, T. A. Bressner, S. Romme y U. Johannsen, «5G RAN architecture
8] based on analog radio-over-fiber fronthaul over UDWDM-PON and phased array fed
reflector antennas,» *Optics Communications*, vol. 454, n° 124464, 2019.
- [2 J. V. BONILLA, «ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL OFDM AL
9] PASAR POR UN CANAL ÓPTICO CON RECEPTOR NO COHERENTE EN REDES
PON,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2020.
- [3 J. Carrión y E. Casa, «Análisis Técnico Comparativo e Implementación mediante
0] Simulación de los MUX/DEMUX WDM,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.

- [3 La Fibra Optica , «La Fibra Optica Ciencia y Tecnología,» 22 abril 2021. [En línea].
1] Available: <https://lafibraoptica Peru.com/la-atenuacion-de-la-fibra-optica/>. [Último acceso: 30 septiembre 2022].
- [3 U. I. d. Telecomunicaciones, «SERIE G: Sistemas y medios de transmisión, sistemas y
2] redes digitales. Consideraciones sobre diseño e ingeniería de sistemas ópticos.,» UIT,
2016.
- [3 Huawei, «Huawei OptiX OSN 6800 and Boards Datasheet,» 10 07 2023. [En línea].
3] Available: <https://www.router-switch.com/media/upload/product-pdf/huawei-optix-osn-6800-and-boards-datasheet.pdf>.
- [3 Huawei Router, «Huawei OptiX OSN 8800 and Boards Datasheet,» 11 07 2023. [En
4] línea]. Available: <https://www.router-switch.com/media/upload/product-pdf/huawei-optix-osn-8800-and-boards-datasheet.pdf>.
- [3 Silex, «Cable Fibra Optica Monomodo SM G652D,» 11 07 2023. [En línea]. Available:
5] <https://silexfiber.com/wp-content/uploads/2018/11/Datasheet-silexfiber-G652D-v01.pdf>.
- [3 Silex Fiber, «Cable Fibra Óptica SM G655 Monomodo,» 11 07 2023. [En línea].
6] Available: <https://silexfiber.com/producto/cable-fibra-optica-monomodo-sm-g655-g656/>.

ANEXOS

Wavelength

The most common peak wavelengths are 780 nm, 850 nm, 1310 nm, 1550 nm, and 1625 nm. La región de 850 nm, denominada la primera ventana, se empleó inicialmente por la compatibilidad con la tecnología de detección y LED original. Actualmente, la región de 1310 nm es popular porque ofrece pérdida y dispersión muy inferiores.

Puede también utilizar la región de 1550 nm, capaz de evitar la necesidad de repetidores. Generally, performance and cost increase as wavelength increases.

Las fibras multimodo y de modo único emplean diferentes tamaños o tipos de fibras. Por ejemplo, la fibra de modo único emplea 9/125 μ m, mientras que la fibra multimodo emplea 62,5/125 o 50/125. The different size fibers have different optical loss dB/km values. Fiber loss depends heavily on the operating wavelength. Practical fibers have the lowest loss at 1550 nm and the highest loss at 780 nm with all physical fiber sizes (for example, 9/125 or 62.5/125).

Al comenzar a calcular las distancias máximas para cualquier enlace óptico, tenga en cuenta las tablas 1 y 2:

Tabla 1: Para longitud de onda de 1310 nm

	Atenuación/kilómetro (dB/km)	Atenuación/conector óptico (dB)	Atenuación/junta (dB)	
Min	0,3	0,4	0,02	Las mejores condiciones
Average	0,38	0,6	0,1	Normal
Max	0,5	1	0,2	Worst situation

Tabla 2: Para longitud de onda de 1550 nm

	Atenuación/kilómetro (dB/km)	Atenuación/conector óptico (dB)	Atenuación/junta (dB)	
Min	0,17	0,2	0,01	Las mejores condiciones
Average	0,22	0,35	0,05	Normal
Max	0,4	0,7	0,1	Worst

Especificaciones Generales

CONECTOR MONOMODO				
ESPECIFICACIONES	UPC SÍMPLEX	UPC DÚPLEX	APC SÍMPLEX	APC DÚPLEX
Diámetro de bota para el cable	900 um		900 um	
	2 mm		2 mm	
	3 mm		3 mm	
Color del Housing	Azul		Verde	
Color de Bota 3mm	Azul	Azul y Blanco	Verde	Verde y Blanco
Color de Bota 2mm	Azul	Azul	Verde	Verde
Color de Bota 900mm	Blanca		Blanca	
Anillo de crimpeo 3mm	Metálico	Metálico	Metálico	Metálico
Anillo de crimpeo 2mm	Metálica con termofit blanco	Metálica con termofit amarillo y blanco	Metálica con termofit blanco	Metálica con termofit amarillo y blanco
Color de Tapón	Blanco			
Tipo de Férula	Plana		Cónica	
Diámetro de Férula	1.25 mm		1.25 mm	
Ángulo de Férula	0 ± 0.5°		8 ± 0.3°	
Perdida por Retorno	-55 dB		-65 dB	
Perdida por Inserción	0.20 dB		0.20 dB	
Diámetro Orificio Férula	125.5 um		125.5 um	
Concentricidad de la férula	±0.5 um			
Longitud de Onda	1260 nm ~ 1625 nm			
Longitud de Onda Típica	1310 nm y 1550 nm			
Temperatura Operacional	-25 °C ~ 70 °C			
Repetibilidad	500 Conexiones/Desconexiones ≤0.20dB			
Compatibilidad Fibras	Cualquier Fibra de Revestimiento de 125 um (Vidrio)			
Tipo de Conectorizado	Adhesivos por Horno y Anaeróbicos			

FIBRE OPTIC PLC SPLITTER

PLC (Planar Lightwave Circuit) stands for Planar Lightwave Circuit, PLC splitters are used to distribute or combine optical signals. It is based on planar lightwave circuit technology and provides a low cost light distribution solution with small form factor and high reliability.

PLC Splitters are installed in each optical network between the PON Optical Line Terminal (OLT) and the Optical Network Terminals (ONTs) that the OLT serves. Networks implementing BPON, GPON, EPON, 10G EPON, and 10G GPON technologies all use these simple optical splitters.



FEATURES

- 19" rack mount. Compact Design.
- Low Insertion Loss & Low PDL.
- Good Channel -to -Channel uniformity.
- Wide Operating Wave length (1260 nm to 1650 nm)
- SC & LC available.
- The body is made of cold rolled steel sheet, with electrostatic spraying.

COMPLIANCE

- ROHS, GR-1209-CORE-2001
- GR-1221-CORE-1999

DESIGN & MATERIALS

Mounting Type	Rack
Colour	Black or Beige or white
Material	Cold rolled carbon sheet steel with electrostatic spraying
Rack Type	Fixed
U Size	1U-12/24port, 2U-36/48port
Cable Port Max.	1-64
Environment Temperature- Relative	-40 °C to +85 °C

Cassete PLC Splitter [Spec With No Connector]												
Model	1x2	1x4	1x8	1x16	1x32	1x64	2x2	2x4	2x8	2x16	2x32	2x64
Wavelength	1260-1650											
IL (Typical dB)	3.6	7.0	10.2	13.3	16.5	20.0	4.0	7.1	10.5	14.0	17.0	21.0
IL (Max dB)	3.8	7.2	10.5	13.5	16.5	20.5	4.0	7.5	11.0	14.5	17.5	21.5
Uniformity (Typical dB)	0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	0.4	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8
Uniformity (Max dB)	0.6	0.8	1.0	1.4	1.6	1.9	0.6	0.8	1.0	1.4	1.6	1.9
PDL (Typical dB)	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.25	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.3
PDL (Max dB)	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3