

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

Tema:

**Diseño de una red de transporte DWDM con longitudes de onda
de 400Gbps para la ciudad de Guayaquil**

Autor:

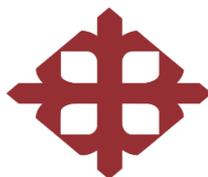
Luis Eduardo Lanchi Rueda

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de
Magister en Telecomunicaciones

Tutor:

MSC. Manuel Romero Paz

Guayaquil, a los 21 días del mes septiembre del 2020



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Ing. Luis Eduardo Lanchi Rueda, como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones.

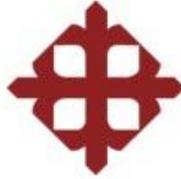
Guayaquil, a los 21 días del mes septiembre del 2020

TUTOR

MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MSc. Manuel Romero Paz



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Luis Eduardo Lanchi Rueda

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación **“Diseño de una red de transporte DWDM con longitudes de onda de 400Gbps para la ciudad de Guayaquil”** previa a la obtención del Título de Magíster en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, a los 21 días del mes septiembre del 2020

EL AUTOR

Lanchi Rueda, Luis Eduardo



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

AUTORIZACIÓN

Yo, Lanchi Rueda, Luis Eduardo

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“Diseño de una red de transporte DWDM con longitudes de onda de 400 Gbps para la ciudad de Guayaquil”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 21 días del mes septiembre del 2020

EL AUTOR

Lanchi Rueda, Luis Eduardo

REPORTE DE URKUND

URKUND

Lista de fuentes Bloques Luis Córdoba Rivadeneira (luis_cordova)

Documento: [TI Lanchi Luis.docx](#) (D78432115)
Presentado: 2020-08-31 22:13 (-06:00)
Presentado por: Luis Córdoba Rivadeneira (l.cordovar@yahoo.com)
Recibido: luis.cordova.uces@analysis.orkund.com

3% de estas 48 páginas, se componen de texto presente en 3 fuentes.

Categoría	Enlace/nombre de archivo
	SISTEMAS DE TRANSMISIÓN ÓPTICOS PROYECTO 5 DWDM.docx
	Tesis Diciembre PBB.Final.docx
	Documento Reducido Tesis David Cando.docx

Sistema de Posgrado Maestría en Telecomunicaciones Tema:
Diseño de una red de transporte DWDM con longitudes de onda de 400Gbps para la ciudad de Guayaquil Autor:
Luis Eduardo Lanchi Rueda
Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de Magister en Telecomunicaciones
Tutor: MSc. Manuel Romero Paz
Guayaquil, a los 15 días del mes de mayo del 2020
SISTEMA DE POSGRADO CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Ing. Luis Eduardo Lanchi Rueda, como requerimiento parcial para la obtención del
Grado Académico de Magister en Telecomunicaciones.
Guayaquil, a los 15 días del mes de Mayo del 2020 TUTOR

MSc. Manuel Romero Paz
DIRECTOR DEL PROGRAMA

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por guiarme en cada proyecto de vida, en especial a mis padres Luis y Dolores, que siempre han estado a mi lado con palabras de aliento y motivación evitando que decaiga y sobre todo brindándome su confianza y dándome consejos, A mis hermanas y, a todos los amigos, compañeros y personas que me apoyaron de una a otra manera, que fueron una ayuda fundamental en la elaboración de la presente tesis.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a DIOS por guiarme en cada paso de mi vida, llenarme de sabiduría e iluminar mi mente y sobre todo por poner en vida a mi familia y amigos que ha sido mi soporte durante todo el periodo de estudio.

A mis padres que han sido mi ejemplo de superación por inculcarme buenos valores humanos y brindarme su apoyo permanente que ha hecho que me convierta en una persona de bien.

A la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, a la Facultad de educación técnica para el desarrollo y cada uno de sus catedráticos que depositaron sus conocimientos técnicos que permitieron mi formación profesional de cuarto nivel.

Un agradecimiento especial al MSc Manuel Romero por sus valiosos consejos y sugerencias para el desarrollo del presente proyecto de tesis.

A mis amigos y compañeros de estudios los cuales me apoyaron durante este trayecto de formación.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

MSc. Manuel Romero Paz
Tutor

MSc. Manuel Romero Paz
Director del Programa

MSc. Luis Córdova Rivadeneira
REVISOR

MSc. Edgar Quezada Calle
REVISOR

Resumen

Se estudian las redes de transmisión ópticas basadas en la multiplexación por división de longitud de onda densa, con capacidades de ancho de banda para el soporte de nuevas demandas de transporte como consecuencia de la diversificación de servicios, aplicaciones a las que pueden acceder los usuarios y la evolución de las redes de acceso de nueva generación, tales como X-GPON y servicio móvil avanzado de quinta generación (5G). Este proyecto de investigación es exploratorio ya que se investigan las tecnologías y estándares DWDM, para obtener el estado del arte de las redes de nueva generación con capacidades de longitudes de onda de 400 Gbps, que posibiliten la convergencia de distintos servicios de telecomunicaciones mediante el estándar OTN; también es preexperimental considerando que se utiliza un simulador para validar los parámetros ópticos que indican que el diseño planteado y la arquitectura de red propuesta se puede implementar. El resultado y aportación es el dimensionamiento de las tarjetas activas de la capa de red óptica/eléctrica y los componentes pasivos necesarios para el transporte de una red DWDM con capacidades de transporte de 400 Gbps, una vez obtenido el dimensionamiento de todos los elementos de red, se realiza el balance de potencias ópticas y la obtención de la relación señal ruido, mediante la simulación del comportamiento de los parámetros ópticos en el programa Optisystem. Finalmente se selecciona el equipamiento de un proveedor de redes de nueva generación que cumpla con los requisitos propuestos en el presente proyecto.

Palabras clave: DWDM, ROADM, OTN, OCH, ASON, 400G, 16QAM

Abstract

Optical transmission networks based on dense wavelength division multiplexing are studied, with bandwidth capabilities to support new transport demands as a consequence of the diversification of services, applications that users can access and the evolution of next-generation access networks, such as X-GPON and fifth-generation advanced mobile service (5G). This research project is exploratory since DWDM technologies and standards are investigated, to obtain the state of the art of new generation networks with wavelength capacities of 400 Gbps, which allow the convergence of different telecommunications services through the standard OTN; It is also pre-experimental considering that a simulator is used to validate the optical parameters that indicate that the proposed design and the proposed network architecture can be implemented. The result and contribution is the dimensioning of the active cards of the optical / electrical network layer and the passive components necessary for the transport of a DWDM network with transport capacities of 400 Gbps, once the dimensioning of all the network elements has been obtained. , the optical power balance is carried out and the signal-to-noise ratio is obtained, by simulating the behavior of the optical parameters in the Optisystem program. Finally, the equipment of a new generation network provider is selected that meets the requirements proposed in this project.

Keywords: DWDM, ROADM, OTN, OCH, ASON, 400G, 16QAM

Índice General

CERTIFICACIÓN.....	2
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	3
AUTORIZACIÓN.....	4
REPORTE DE URKUND.....	5
DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTOS	7
Resumen	9
Abstract	10
Índice General	11
Índice de Tablas.....	16
1.1 Introducción.....	17
1.2 Justificación	18
1.3 Planteamiento del Problema	19
1.4. Objeto de Estudio.....	20
1.5 Objetivos:	21
1.5.1 Objetivo General	21
1.5.2 Objetivos Específicos	21
1.6 Hipótesis	21
1.7 Metodología.....	22
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DE LAS REDES DE TRANSMISION OPTICA	
DWDM.....	23
2.1 Antecedentes de las comunicaciones ópticas	23
2.1.1 La fibra óptica.....	23
2.1.2 Ventanas de operación de las comunicaciones ópticas.....	26
2.1.3 Tipos de Fibra óptica	26
2.1.3.1 Fibra óptica monomodo	27
2.1.3.2 Fibra óptica multimodo.....	30
2.1.4 Fenómenos que afectan a la Fibra óptica	32

2.1.4.1 Atenuación	32
2.1.4.2 Dispersión Modal	33
2.1.4.3 Dispersión por modo de polarización.....	33
2.1.4.4 Dispersión Cromática	35
2.1.4.5 Compensación de la Dispersión Cromática	35
2.2 Técnicas de Multiplexación en redes ópticas	36
2.2.1 OTDM.....	36
2.2.2 WDM	37
2.2.2.1 Elementos generales de un sistema WDM	37
2.2.2.2 Categorías WDM.....	44
2.3 Redes de transporte ópticas DWDM	45
2.3.1 Orígenes y evolución de la tecnología DWDM	45
2.3.2 Modelo general de un sistema DWDM.....	46
2.3.3 Modelo de transmisión de un sistema DWDM.....	48
2.3.4 Ventanas de operación y número de canales	48
2.3.5 Fenómenos de las redes DWDM.....	50
2.3.5.1 Atenuación.....	50
2.3.5.2 Dispersión.....	50
2.3.5.3 Relación señal-ruido.....	50
2.3.5.4 Tasa de bits errados (BER).....	50
2.3.6 Tipos de nodos en redes DWDM	51
2.3.6.1 OTM.....	51
2.3.6.2 OLA	51
2.3.6.3 REG.....	52
2.3.6.4 OADM.....	52
2.3.6.5 ROADM	53
2.3.7 Topologías en sistemas DWDM.....	53
2.3.7.1 Topología punto a punto	54
2.3.7.2 Topología anillo	54
2.3.7.3 Topología en Malla.....	55
2.3.8 Modelos de Protecciones	55
2.3.8.1 Protección SNC/N	55
2.3.8.2 Protección ASON	56
2.3.8.3 Protección Client 1+1	57

2.3.8.4 Protección intra board 1+1	58
2.3.9 OTN	58
2.3.9.1 Arquitectura OTN.....	60
2.3.9.2 Jerarquía de Multiplicación de OTN	62
2.3.9.3 Encabezado y estructura de la Trama	63
2.3.10 Modulación multinivel.....	64
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA PROPUESTA	66
3.1 Definir la ubicación de los nodos y la topología de Red a implementar.....	66
3.2 Tipos de fibra a utilizar y cálculos de las atenuaciones de los enlaces ópticos	67
3.3 Tipos de servicios a ser transportados	68
3.4 Número de longitudes de onda a ser transmitidas por cada dirección DWDM	69
3.5 Elementos y dimensionamiento de tarjetas de la capa: óptica – eléctrica de un Nodo ROADM	69
3.6 Selección de elementos pasivos y conexiones de fibras	71
3.7 Tipos de protecciones y configuraciones	73
3.8 Dimensionamiento de NE-ID e IP.....	73
3.9 Balance de potencias ópticas.....	74
3.10 Simulación de los parámetros ópticos en Optisystem en dependencia del arreglo óptico.....	83
3.11 Selección de los proveedores de equipos de los proveedores DWDM.....	85
CAPÍTULO 4: ANALISIS DE RESULTADOS	89
4.1 Arreglo de tarjetas y arquitectura planteada.	89
4.2 Máxima distancia alcanzada por el sistema propuesto	90
4.3 Resultados de las simulaciones	91
4.4 Equipamiento a utilizar.....	99
Conclusiones	101
Recomendaciones	103
GLOSARIO	104
BIBLIOGRAFIA.....	107

Índice de Figuras

Figura 2. 1 Estructura de la Fibra óptica	23
Figura 2. 2 Principio de Reflexión	24
Figura 2. 3 Reflexión de una onda	25
Figura 2. 4 Efecto de la reflexión interna total.....	25
Figura 2. 5 Fibra monomodo	27
Figura 2. 6 Dispersión en la fibra ITU G.655	30
Figura 2. 7 Propagación en fibra Multimodo	31
Figura 2. 8 Fibra Multimodo de índice escalonado	31
Figura 2. 9 Fibra Multimodo de índice gradual	32
Figura 2. 10 Atenuación de la Fibra óptica.....	33
Figura 2. 11. Efecto de la dispersión modal	33
Figura 2. 12. Retardo entre la onda lenta y rápida para el caso de una fibra ideal y una fibra real	34
Figura 2. 13. Multiplexación OTM sincrónica	37
Figura 2. 14. Esquema de multiplexación DWDM	37
Figura 2. 15. Conversores de longitud de onda WDM	39
Figura 2. 16. Estructura de un fotodetector.	41
Figura 2. 17 Esquema de un receptor coherente	41
Figura 2. 18 Funcionamiento básico de un amplificador óptico	42
Figura 2. 19 Funcionamiento de un amplificador EDFA.....	43
Figura 2. 20 Ganancia individual y combinada de los amplificadores EDFA y RAMAN	44
Figura 2. 21 Espectro especificado para CWDM.....	44
Figura 2. 22 Evolución de las redes DWDM.....	46
Figura 2. 23 Estructura general DWDM para N longitudes de onda	47
Figura 2. 24 Cros conectora Óptica DWDM	48
Figura 2. 25. Modos de transmisión DWDM	48
Figura 2. 26 Esquema de un nodo OTM	51
Figura 2. 27 Esquema de un nodo OLA	52
Figura 2. 28. Esquema de un nodo Regenerador	52
Figura 2. 29. Esquema de un OADM fijo.....	53
Figura 2. 30 Configuración de un nodo ROADM.....	53
Figura 2. 31 Topología Punto a Punto.....	54

Figura 2. 32 Topología Anillo	55
Figura 2. 33 Topologías DWDM en un entorno metropolitano	55
Figura 2. 34 Transporte de servicios sobre OTN	59
Figura 2. 35 Módulo de transporte óptico	61
Figura 2. 36 Estructura de línea de OTN.....	61
Figura 2. 37 Jerarquía de Multiplexación de OTN.....	63
Figura 2. 38. Estructura de la trama OTN	63
Figura 2. 39 Esquemas de modulación óptica para sistemas de 10G y 40G	64
Figura 2. 40 Modulaciones utilizadas en sistemas coherentes DWDM	65
Figura 3. 1 Topología a implementa	67
Figura 3. 2 Esquema Flex-grid	69
Figura 3. 3 Diagrama de bloques la interconexión de los equipos de la capa óptica y eléctrica	70
Figura 3. 4 Diagrama de un sistema ROADM con tres direcciones	71
Figura 3. 5 Diagrama de un sistema ROADM con dos direcciones	71
Figura 3. 6 Esquema de conexión de los equipos DWDM y los elementos pasivos	72
Figura 3. 7 Diagrama de conexión de escenario 1 de un sistema ROADM	76
Figura 3. 8 Diagrama de conexión del escenario 2 de un sistema ROADM	78
Figura 3. 9 Diagrama de conexión del escenario 3 de un sistema ROADM	80
Figura 3. 10 OTU origen definido en Optisystem.	83
Figura 3. 11 Esquema del transmisor 16 QAM.....	84
Figura 3. 12 Esquema de modulación definido en Optisystem.	84
Figura 3. 13 Tratamiento de la señal en el receptor Coherente.	85
Figura 3. 14 Equipos de la plataforma Optix 9800	87
Figura 3. 15 Equipos de la plataforma 1830 PSS.....	88

Índice de Tablas

Tabla 2. 1 Ventanas de operación de la Fibra óptica	26
Tabla 2. 2 Resumen de la recomendación ITU G.652.	28
Tabla 2. 3 Comparaciones de las características de curvatura de la fibra G.657 ..	30
Tabla 2. 4 Coeficientes de PMD.....	35
Tabla 2. 5 Comparaciones entre CWDM y DWDM	45
Tabla 2. 6. Ventanas ópticas según la ITU-T.....	49
Tabla 2. 7. Distribución de frecuencias para la banda C: 40/80 canales.	49
Tabla 2. 8 SLAs manejados por ASON	57
Tabla 3. 9 Atenuación de los enlaces de fibra óptica	68
Tabla 3. 10 Servicios a ser configurados por la red DWDM	69
Tabla 3. 11 Tipos de protecciones de la Red	73
Tabla 3. 12 Direccionamiento NE ID e IP.....	74
Tabla 3. 13 Características comunes de los equipos ópticos	75
Tabla 3. 14 Especificaciones de Plataforma OSN 9800	86
Tabla 4. 15 Distancia máxima que pueden alcanzar los enlaces DWDM.....	91
Tabla 4. 16 Tarjetas y equipos de la capa óptica de la topología diseñada	100

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Durante los últimos años se ha evidenciado un aumento en los requerimientos de ancho de banda para el transporte de datos en la red a consecuencia de la diversificación de servicios y aplicaciones a las que pueden acceder los usuarios, lo cual hace necesario que los proveedores y empresas de telecomunicaciones piensen en la implementación de sistemas de transmisión capaces de soportar el gran flujo creciente de datos, permitiendo a su vez la convergencia y transporte de todos los servicios de forma transparente.

La investigación de las comunicaciones ópticas empezó desde el siglo pasado cuando Alexander Graham Bell, inventor del teléfono, patentó uno óptico el cual llamó “Photophone”, la limitante de este experimento era el uso de la luz solar o blanca que es la que vemos, este haz de luz confuso contiene todas las lambdas y se desplaza por el espacio libre, pero el verdadero inicio de los sistemas de comunicación utilizando fibra óptica como medio de transporte tuvo su despliegue con el desarrollo del láser en la década de los setenta, a partir de entonces se han desarrollado distintas tecnologías que han posibilitado el despliegue de redes de transmisión utilizando los beneficios de la fibra óptica como medio de transporte, actualmente la más usada por la mayoría de empresas de telecomunicaciones es SDH (Synchronous Digital Hierarchy), que permite alcanzar una capacidad máxima de enlace de 10 Gbps o un STM-64 (Synchronous Transport Module) usando un método de transmisión unidireccional a una fibra, frente a esta capacidad limitada los sistemas de transmisión han evolucionado a WDM (Wavelength Division Multiplexing) que permite superar esta limitante de Ancho de Banda.

Un sistema WDM básicamente permite el envío de varios canales ópticos con una capacidad y longitud de onda específica por la misma fibra óptica, estas lambdas se unifican en un multiplexor y se reparten en un demultiplexor, el aforo de la conexión dependerá del número de canales y la capacidad de cada uno, una evolución de los sistemas WDM tradicionales es DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), donde según la especificación de ITU-T (International Telecommunications Union – Telecommunications), se puede transportar hasta 160 canales ópticos en las bandas ópticas C y L, y con capacidades de 10Gbps, 40Gbps, 100Gbps, 400Gbps y hasta 1Tbps.

Actualmente debido a las ventajas y posibilidades que presentan las redes DWDM, han sido consideradas por varias compañías como una solución ante las grandes demandas de ancho de banda en las redes de transmisión por Fibra Óptica, el proyecto de investigación presentado en este documento tiene como finalidad entregar un diseño simulado de una red de transmisiones en un ambiente Metropolitano mediante la tecnología DWDM de 80 canales ópticos con capacidades de hasta 400Gbps; se analiza un escenario de estudio, los requerimientos de equipos en base a los parámetros de relación señal ruido y la dispersión presentados en las señales ópticas de estas capacidades. Así mismo en el diseño se estimará las distancias máximas que se puede alcanzar antes de requerir la instalación de un equipo OLA (Optical Line Amplifier), las tarjetas compensadoras de dispersión y el arreglo de amplificadores locales en las estaciones ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer), en dependencia de las pérdidas de inserción generadas por los componentes activos y adicional se realizara un análisis comparativo de las ventajas técnicas y comerciales que actualmente ofertan los distintos proveedores.

1.2 Justificación

El gran crecimiento de los productos informáticos, VoD (Video on Demand), telemedicina, videoconferencia, aplicaciones celulares, multimedia, etc., de acuerdo al reporte de CISCO de junio 2017, el tráfico IP (Internet Protocol) mundial será tres veces mayor en 2021, alcanzando 3,3 Zettabytes por año de los 1,2 Zettabytes de 2016, un aumento anual de 24%, en 2021 habría 4.600 millones de Internautas y 27.100 millones de terminales conectados, en comparación con 3.300 millones Internautas y 17.100 millones de equipos en 2016, esto hace que los proveedores de telecomunicaciones busquen nuevos métodos de transferencia a través de fibra óptica, para los requerimientos de banda.

Mayoritariamente DWDM conciernen a sistemas de 80 canales de 10Gbps, el aumento de las necesidades de flujo por redes exige a los empresas a usar toda su capacidad, saturando el espectro de la banda C, por lo que es posible emplear la L, según Huawei un sistema de 88 lambdas aumenta 10% comparado con el de 80 y los gastos crecerían 20%, además el alcance disminuye un 15%, los proveedores concuerdan que el uso de bandas más grandes no es la solución, es mejor desarrollar la velocidad de la lambda de 10Gbps a 40Gbps, 100Gbps, 400Gbps o 1Tbps.

Los proveedores de servicios de telecomunicaciones en los últimos años han crecido sustancialmente como producto de los nuevos servicios y tecnologías de acceso implementados, la capacidad de la red actual DWDM es de 10Gbps y 40Gbps, sin embargo el crecimiento de ancho de banda ha conllevado a las redes metropolitanas de enlaces que en el orden de 1Gbps, sean migrados a enlaces de 10Gbps ocupando un canal óptico por cada enlace; lo antes indicado obliga al crecimiento consecuente de la capacidad de transporte del Core de la red, es por eso que nace la eminente necesidad de desplegar una red de transmisiones con mayores capacidades de ancho de banda, que permitan levantar enlaces de 100GE y 400GE (Giga Ethernet) entre equipos de conmutación de capa 2 y 3, lo cual es posible con el despliegue de una red DWDM con canales de 100Gbps y 400Gbps.

Por último, el diseño y la simulación planteados en esta investigación es importante ya que servirá de prototipo a la hora de tomar una decisión en el campo técnico, referente al proveedor de equipos que cumpla con los requisitos y consideraciones necesarias para el despliegue de una red DWDM de 400Gbps, capaz de atender el constante crecimiento de tráfico y considerando la infraestructura de red actualmente desplegada por las empresas de Telecomunicaciones en el país.

1.3 Planteamiento del Problema

Actualmente se presenta una verdadera revolución digital, las demandas de ancho de banda para el acceso a los servicios en la red tiende a ser cada vez mayor, esto obliga a los proveedores a mejorar continuamente sus redes de transmisión, las redes DWDM mas desplegadas por los proveedores de servicios corresponden a sistemas de 80 canales ópticos con velocidades de 10Gbps a 40Gbps en la banda C, sin embargo estas capacidades ya no son suficientes para soportar las demandas actuales de los enlaces del backbone correspondientes al core de las redes, siendo necesario para conseguir mayor capacidad explotar todas las frecuencias de la banda C, al punto de ocupar todos los canales ópticos con lo cual se tiende a saturar el espectro óptico, de acuerdo al estándar se puede ampliar el número de canales a 164 utilizando la banda L, sin embargo esto conllevaría a implementar un sistema de transmisión paralelo al ya implementado y doble uso de fibra óptica encareciendo la puesta en marcha del sistema de transmisión.

En Ecuador las principales empresas de telecomunicaciones actualmente se encuentran desplegando servicios y redes de última generación a la par con el

avance tecnológico, tal es el caso de las redes GPON (Gigabit-capable Passive Optical Network)/XGPON, red móvil 4G LTE (Long Term Evolution), e IP TV que generan altas cantidades de tráfico sobre la red MPLS (Multiprotocol Label Switching), por otro lado los clientes corporativos que contratan ancho de banda dedicados para el transporte de sus datos, esto ha conllevado a que los enlaces metropolitanos GE entre los switch de capa de acceso y de distribución se migren de forma paulatina a enlaces 10GE, lo antes mencionado conlleva a que los enlaces en los switches del core o enlaces de backbones cuenten con capacidades de decenas de Gbps para soportar el tráfico masivo y corporativo, con este comportamiento la red de transmisión DWDM implementada actualmente de 10Gbps y 40Gbps va a llegar al punto donde el número de longitudes de onda se agoten y no se pueda asegurar el transporte de todo el tráfico de manera confiable y con alto grado de disponibilidad.

Hay ofertas de fabricantes de dispositivos DWDM de diversas tecnologías para la implementación de sus redes, siendo necesario contar con un estudio técnico previo que determine los requerimientos de un sistema con canales de 400Gbps basado en la infraestructura de red existente, la distribución geográfica de las centrales, las crecientes demandas de tráfico y tendencias futuras que permitan obtener el mejor criterio técnico para elección de una empresa que despliegue esta nueva red.

Según la experiencia técnica del autor, que se desempeña en el campo de las redes de transporte óptico, se ha podido evidenciar en Ecuador y específicamente en Guayaquil un incremento del tráfico procedente de la red de acceso: XDSL (xDigital Subscriber Line), GPON, red móvil y clientes corporativos punto a punto, este hecho ha conllevado a la necesidad de incrementar la capacidad de ancho de banda disponible en el Core de la red, es decir la migración paulatina a enlaces de mayor capacidad de Ancho de banda SDH y ETH.

Definición del Problema: Necesidad de los proveedores de telecomunicaciones de contar con una red de transporte, con capacidad de ancho de banda suficiente para soportar las demandas de tráfico actuales y tendencias futuras.

1.4. Objeto de Estudio

Capacidad de redes de transmisión ópticas.

Se definen las variables de investigación:

VI: Tecnología DWDM de 400Gbps

VD: Capacidad de AB (Ancho de Banda) de una red metropolitana

1.5 Objetivos:

Los objetivos planteados son los siguientes:

1.5.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de transmisión DWDM con capacidad de longitudes de onda de 400G en el entorno metropolitano de la ciudad de Guayaquil

1.5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las redes DWDM con capacidad para el transporte de OCH's (Optical Channel) de 400Gbps.
- Determinar las configuraciones y arreglos de las tarjetas de línea multiplexoras, amplificadoras y compensadoras tanto en los nodos OADM (Optical Add-Drop Multiplexer), OLA y REG (Regenerator) para un sistema de 400Gbps.
- Simular y obtener los parámetros de atenuación y la relación señal ruido correspondiente a la distancia de los enlaces DWDM de 400Gbps de la topología de red propuesta.
- Determinar la distancia máxima que puede alcanzar un sistema DWDM de 400Gbps en dependencia de las pérdidas por inserción en los componentes activos y las atenuaciones de la red óptica pasiva.
- Realizar el análisis comparativo de las distintas ofertas comerciales de los proveedores de equipos considerando la convergencia con los sistemas DWDM actualmente implementados, la disposición para nuevas revisiones del estándar, la garantía y posicionamiento actual en el mercado.

1.6 Hipótesis

El diseño y simulación para el despliegue de una red de transporte DWDM con capacidad de lambdas de 400Gbps en un entorno metropolitano, permitirá conocer los requisitos técnicos necesarios de una red de alta capacidad que posibilite atender

los crecientes requerimientos de ancho de banda, asegurando la continua evolución de los proveedores de telecomunicaciones en la oferta de servicios de nueva generación, a la par con el avance tecnológico.

1.7 Metodología

Este proyecto de investigación es “Exploratorio” ya que se pretende explorar las tecnologías de las redes de transmisión ópticas, estándares DWDM empleados por las redes de transporte, estableciendo el estado del arte de las mismas. Es “Descriptivo”, ya que permite evaluar la tecnología DWDM de 400Gbps en un entorno metropolitano y adaptar el diseño propuesto a la topología de red seleccionada.

Además, este proyecto de investigación es “Analítico” con un enfoque “Cuantitativo” ya que se realizan los cálculos matemáticos en los enlaces ópticos y pérdidas de inserción en los componentes y tarjetas DWDM que permiten caracterizar un sistema de transporte óptico.

Finalmente, esta investigación es “Inductiva” ya que se parte de las observaciones de los fenómenos particulares presentados en las conexiones y arreglos lineales DWDM para posteriormente determinar la configuración completa de diseño en la topología de red planteada.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DE LAS REDES DE TRANSMISION OPTICA DWDM

En este capítulo se investigará todo el estado del arte referente a las redes DWDM, se hace un enfoque en el funcionamiento básico de un sistema WDM, el estándar definido por la ITU sobre esta tecnología de transporte, las consideraciones relevantes para el diseño de redes de transmisión ópticas utilizando esta tecnología.

2.1 Antecedentes de las comunicaciones ópticas

Se consideran los siguientes:

2.1.1 La fibra óptica

La fibra óptica transporta ondas de datos, por una fibra de vidrio o plástico se generan pulsos de luz que representan los datos a transmitir, los cuales son generados por una fuente de láser o LED (Light-Emitting Diode) (Chavarría & Ramírez, 2010).

Actualmente las fibras se emplean ampliamente en las redes de telecomunicaciones a nivel mundial, ya que posibilitan el envío de grandes cantidades de datos a una gran distancia, con velocidades superiores a las alcanzadas por los enlaces de radio o cables de cobre.

Un hilo de fibra óptica está conformado por tres elementos principales:

Núcleo óptico: el centro de vidrio por el cual se transmite la luz

Revestimiento: el material que rodea al núcleo para que la luz se refleje y sea transmitida internamente por el mismo

Cubierta: protege al núcleo del medio que rodea al cable de fibra óptica.

En la figura 2.1 se pueden observar los principales elementos.

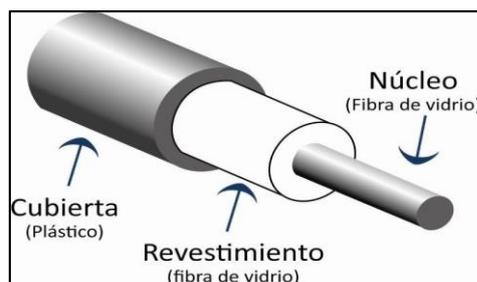


Figura 2. 1 Estructura de la Fibra óptica
Fuente: (Castro, 2014)

De acuerdo con el material por el que están constituidos los elementos, se tiene los siguientes tipos de fibra:

- Plástico: tanto el núcleo como el revestimiento son de plástico.
- PCS (Plastic Clad Silica): el núcleo está constituido de vidrio mientras la cubierta es de plástico.
- SCS (Silica Clad Silica): tanto el núcleo como la cubierta son constituidos de vidrio.

Para el envío de datos por una red de transporte por fibra óptica, se puede manifestar de forma general que por un cable viaja una señal luminosa, este modo de transporte no se basa en la transferencia de electrones a través de un material conductor, sino más bien los principios físicos que rigen este modo de transmisión, la reflexión y refracción de la luz.

La reflexión de un haz de luz ocurre cuando el mismo incide sobre una superficie de separación de dos medios, aquí se produce el cambio de dirección de la onda al pasar de un medio a otro, la misma que llega a tomar una dirección con un ángulo igual al de incidencia. Por ejemplo, si el haz luminoso incide en un ángulo de 90° sobre una superficie, este se reflejará en dirección contraria, esto sucede al ponerse frente a un espejo. Otro ejemplo sería el caso de un haz de luz que incide sobre un plano con 40° (ángulo incidente), se reflejará con un ángulo reflejado de 40° . En figura 2.2 se puede observar el efecto de la reflexión en una superficie.

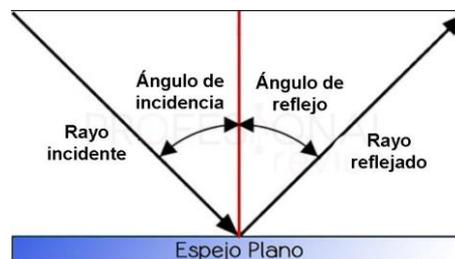


Figura 2.2 Principio de Reflexión
Fuente: (Castillo, 2019)

Refracción: este fenómeno físico ocurre por el cambio de dirección y velocidad que presenta una onda al pasar de un medio a otro. Por ejemplo, cuando la luz pasa del aire al agua, se observa la misma imagen, pero en un ángulo diferente, este efecto se visualiza en la figura 2.3.



Figura 2. 3 Reflexión de una onda
Fuente: (Zuñiga, 2015)

El parámetro relevante para el funcionamiento de las comunicaciones por fibra óptica es el índice de refracción, establece la velocidad con que la luz se propaga por un medio y la densidad de este. Considerando que a mayor índice de refracción (n), un medio es más denso y con menor velocidad de la luz, así mismo según el principio de reflexión interna total debe cumplirse que el núcleo tenga un índice n_1 mayor al del revestimiento n_2 , reflejando todas las señales que tienen un ángulo de incidencia mayor al crítico, es decir que los rayos de luz no pueden salir del núcleo y solo reflejarse.

Además, se debe considerar que la luz puede ingresar a la fibra cuando está en el cono de aceptación, que depende del material de fabricación de la fibra (Ortiz F. , 2006). En la figura 2.4 se presenta la propagación de los haces de luz considerando el cono de aceptación y los índices de refracción del núcleo y revestimiento indicados anteriormente.

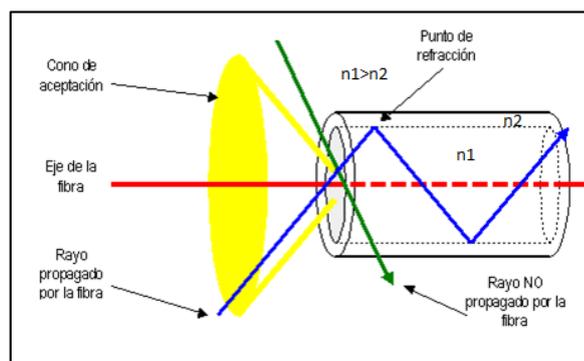


Figura 2. 4 Efecto de la reflexión interna total
Fuente: (Martínez P. , 2019)

La fibra óptica como medio de transmisión posee grandes ventajas para el transporte de datos en redes de nueva generación, entre las principales ventajas se tiene:

- Reduce atenuaciones de la señal óptica
- Gran capacidad de transporte dado a los pulsos cortos y bandas de frecuencias elevadas.
- El tiempo de vida útil de un enlace de fibra óptica es superior a los enlaces tradicionales.
- Debido a la gran capacidad de ancho de banda, la inversión económica para la implementación es justificada.
- La señal no se ve afectada por cambios climáticos como sucede con las señales inalámbricas.
- Es invulnerable a las interferencias electromagnéticas.
- Las señales ópticas son más difíciles de interferir, por ende, un sistema de transmisión de este tipo presenta mayor seguridad.
- Poseen aislamiento eléctrico y están libres de conexión a tierra.

2.1.2 Ventanas de operación de las comunicaciones ópticas

Son aquellas longitudes de onda (λ) en las cuales la atenuación de la fibra se considera total o parcialmente constante. La transmisión óptica emplea longitudes de onda que se encuentran en la parte del espectro cercano al infrarrojo y justo por arriba de la luz visible, se consideran distintas ventanas y su utilización depende de cómo obtener mejores prestaciones en el transporte utilizando una tecnología específica o del equipo activo en conjunto.

En la tabla 2.1 se describen las principales ventanas con su aplicación general en las telecomunicaciones.

Tabla 2.1 Ventanas de operación de la Fibra óptica

Ventana	Longitud de onda	Aplicación
Primera Ventana	850 nm	Led, cortas distancias y multimodo.
Segunda Ventana	1310 nm	Láser, distancias medias, multi/monomodo
Tercera Ventana	1550 nm	Láser, grandes distancias y monomodo.
Cuarta Ventana	1625 nm	Laser y monomodo.

Fuente: (Chavez, Duarte, Altamirano, & Uribe, 2015)

2.1.3 Tipos de Fibra óptica

Existen dos tipos de fibra óptica, según el número de modos que se propagan: monomodo y multimodo.

2.1.3.1 Fibra óptica monomodo

Las fibras monomodo son aquellas en las que únicamente fluye un haz luminoso, al reducir el diámetro del núcleo entre 8,3 y 10 μm , mientras el diámetro del revestimiento es 125 μm . En esta fibra la transmisión es paralela al eje del núcleo en la figura 2.5 se puede evidenciar lo indicado.



Figura 2. 5 Fibra monomodo
Fuente: (Ortiz, 2018)

Una desventaja de las fibras monomodo en relación al multimodo es que al ser el núcleo mucho más estrecho necesitan un alto grado de precisión en la manufactura, la conexión mecánica entre dos fibras debe ser mucho más precisa, encareciendo los conectores y el costo del cable en general.

Entre las principales fibras monomodo se destacan las siguientes: estándar, de dispersión desplazada, corte desplazado, de dispersión desplazada no nula y fibra insensible a las curvaturas.

Fibra monomodo estándar: Se la reconoce por sus siglas en inglés SSMF (Standar Single Mode Fiber), en este tipo de fibra la atenuación se encuentra en torno a los 0,2 dB/km y presenta generalmente una dispersión cromática de alrededor de 16 ps/km. nm en la tercera ventana óptica (1550 nm). La dispersión nula se sitúa en torno a la segunda ventana (1310 nm) donde su atenuación aumenta ligeramente.

Está normalizada en la recomendación ITU G.652 y existen millones de kilómetros de este tipo de fibra empleados en redes de transporte ópticos de todo el mundo, que se favorecen de sus bajas pérdidas a 1550 nm.

Este estándar contempla cuatro variantes (A, B, C, D), las dos primeras han sido diseñadas para tener una dispersión cromática cercana a cero en la longitud de onda de 1310 nm, mientras que las variantes G.652.C y G.652.D como característica principal reducen el pico de agua en la longitud de onda de los 1310 nm y 1550 nm lo que les permite el transporte de sistemas CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexed), en la tabla 2.2 se enumeran los principales parámetros de los estándares indicados.

Tabla 2. 2 Resumen de la recomendación ITU G.652.

Tipo/Característica	G.652.A	G.652.B	G.652.C	G.652.D
Diámetro del campo modal a 1.310 nm	(8,6 a 9,5) ± 0,6 μm			
Diámetro del revestimiento	125 ± 1 μm			
Error de concentricidad del núcleo	0,6 μm	0,6 μm	0,6 μm	0,6 μm
No circularidad del revestimiento	1%	1%.	1%.	1%.
Coefficiente de dispersión cromática entre 1300 y 1324 nm	0,092 ps/nm·Km	0,092 ps/nm·Km	0,092 ps/nm·Km	0,092 ps/nm·Km
Atenuación a 1310 nm	0,5 dB/km	0,4 dB/Km	0,4 dB/Km	0,4 dB/Km
Atenuación a 1550 nm	0,4 dB/km	0,35 dB/Km	0,3 dB/Km	0,3 dB/Km
Máximo valor de PMD de diseño del enlace (PMDQ)	0,50ps/√km, con:	0,20ps/√Km con:	0,50ps/√km, con:	0,20ps/√km, con: Q=0,01%

	Q=0,01% M=20 cables.	Q=0,01% M=20 cables	Q=0,01% M=20 cables	M=20 cables.
--	----------------------------	---------------------------	---------------------------	-----------------

Fuente: (UIT-T G.652, 2005), (Alfonso, 2013)

Fibra óptica de dispersión desplazada: Este tipo de fibra esta especificada en la recomendación ITU-T G.653.

Se la conoce por sus siglas: DSF (Dispersion Shifted Fiber), la misma se caracteriza por tener la dispersión cromática nula en la ventana de 1550 nm, esto se consigue mediante la modificación geométrica del perfil de índice de refracción. Las pérdidas son en promedio de 0,25 dB/km a 1550 nm, pero su principal desventaja y limitante proviene de los efectos no lineales, ya que su área efectiva es bastante más pequeña que en el caso de la fibra monomodo estándar.

Fibra monomodo con corte desplazado (cut-off shifted single mode optical fibre): Esta fibra está especificada en la recomendación ITU G.654, principalmente está diseñada para utilizarse en enlaces de largo alcance, posee dispersión cero alrededor de 1310 nm, con parámetros de pérdidas minimizados y corte desplazado a una longitud de onda alrededor de 1550 nm, es decir que este tipo de fibra monomodo esta optimizada para ser utilizada en las ventanas de 1530-1625 nm.

Fibra de dispersión desplazada no nula: Están normalizadas en la recomendación ITU G.655, este tipo de fibra surge para solventar los problemas de no linealidad de la fibra de dispersión desplazada, es decir se caracterizan por valores de dispersión cromática pequeños, pero no nulos (Cardenas, 2010).

Actualmente se comercializan dos tipos de fibras con valores de dispersión: positivos (NZDSF+) y negativos (NZDSF-), con el objetivo de poder utilizarse de manera simultánea en enlaces o sistemas que requieren de compensación de dispersión. Este estándar de fibras es principalmente empleado en redes DWDM, porque poseen valores pequeños de atenuación en la ventana de 1550 nm (alrededor de 0,22 dB/Km), por el pequeño coeficiente de dispersión cromática y también debido a que en la ventana de 1530 nm a 1560 nm los amplificadores empleados en DWDM trabajan mejor.

En la figura 2.6 se observa una representación del comportamiento de la dispersión cromática en relación con la longitud de onda, para la fibra G.655.

Fibra insensible a las curvaturas: Estas fibras están definidas en el estándar ITU-T G.657.

Las primeras variaciones A1 y A2 tienen parámetros de transmisión como las fibras monomodo G.652D, se emplean en la red de acceso y a su vez pueden trabajar en el rango de longitud de onda de 1260 nm a 1625 nm (Urrutia, 2011).

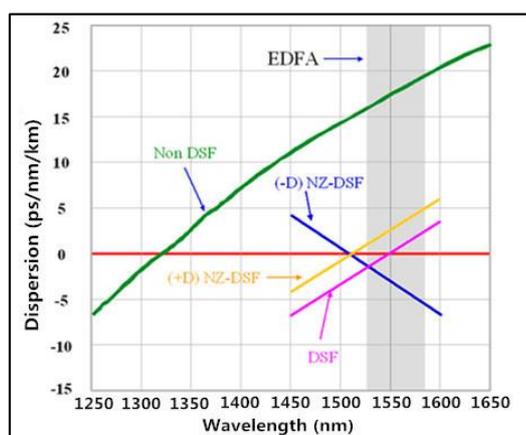


Figura 2. 6 Dispersión en la fibra ITU G.655
Fuente: (Twain, 2016)

En cambio, las fibras B2 y B3, únicamente se aplican en proyectos de poca longitud, como redes internas en inmuebles o patchcord que conectan tarjetas activas en arreglos ópticos de redes DWDM (Urrutia, 2011).

En la actualidad el estándar G.657 se utiliza ampliamente en aplicaciones FTTH (Fiber To The Home), en la tabla 2.3 se indican los rangos de curvatura y las aplicaciones más recomendadas.

Tabla 2. 3 Comparaciones de las características de curvatura de la fibra G.657

Norma ITU-T	Rango mínimo de curvatura	Aplicación
G.652D	30 mm	Todas las aplicaciones de planta externa
G.657A1	10 mm	Cables de planta externa de acceso
G.657A2/B2	7.5 mm	Para cordones en general, e instalaciones en ambientes internos
G.657B3	5 mm	Para aplicaciones en cables de acceso interno, que estarían sujetos a manipulación del usuario

Fuente: (Urrutia, 2011)

2.1.3.2 Fibra óptica multimodo

Es aquella en la que los rayos de luz pueden transmitirse por más de un modo o camino en forma simultánea. El efecto de que se propaguen por más de un modo

presume que no llegan todos al mismo tiempo al final de la fibra, por lo cual este tipo de fibra se emplea principalmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 1km, ya que este efecto se presenta como un grave problema en aplicaciones que requieren distancias mayores, en la actualidad se utilizan para la interconexión de equipos de planta interna, por ejemplo, servidores y equipos de conmutación en Centros de Datos.

Para que el haz de luz se propague en modo multimodo es obligatorio que el diámetro de la fibra óptica sea superior a la longitud de onda de este, por lo tanto el diámetro del núcleo suele estar comprendido entre los 50 μm y 62,5 μm y el revestimiento se encuentra en torno a los 125 μm .



Figura 2.7 Propagación en fibra Multimodo
Fuente: (Gormas, 2007)

Se tienen dos tipos de fibra óptica multimodo: de índice escalonado y gradual.

Fibra óptica multimodo de índice escalonado: Se caracteriza por estar fabricada por un material uniforme y tener un índice de refracción constante en el núcleo del mismo que es menor que el revestimiento.

Al reflejarse los rayos con distintos ángulos en las paredes del núcleo, los mismos toman distintos caminos llegando al receptor en distintos instantes de tiempo, lo cual la distancia de transmisión es corta y su ancho de banda se ve reducido.

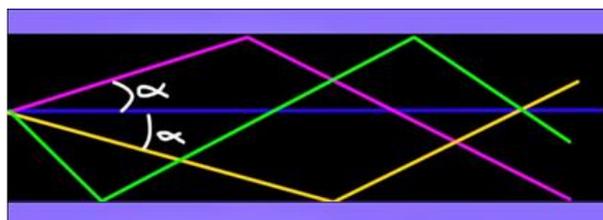


Figura 2.8 Fibra Multimodo de índice escalonado
Fuente (Lanchi, 2015)

Fibra óptica multimodo de índice gradual: Están normalizadas en la recomendación UIT-T G.651, esta fibra se caracteriza porque el índice de refracción va decreciendo de forma gradual, alcanzando el valor más pequeño en el revestimiento. Son de fabricación más compleja que las de índice escalonado, el

número de haces ópticos que se transmiten es menor que en las de índice escalonado, la distancia de propagación es mayor.

En la siguiente figura se muestra como se propagan los rayos de luz en una fibra óptica con índice gradual.

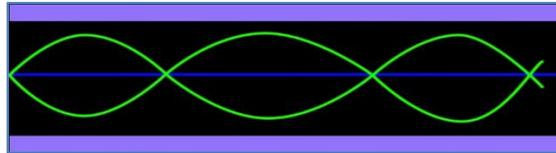


Figura 2. 9 Fibra Multimodo de índice gradual
Fuente (Lanchi, 2015)

2.1.4 Fenómenos que afectan a la Fibra óptica

Se consideran los siguientes:

2.1.4.1 Atenuación

Se define como la reducción de la potencia de la señal óptica, en la fibra este fenómeno es inversamente proporcional a la distancia, se expresa en dB/Km. Se pueden clasificar en:

Intrínsecas: Son provocadas por las impurezas presentes en el material de la fibra, por ejemplo, iones metálicos, es decir estas atenuaciones son propias del cable.

Extrínsecas: Son provocadas por mecanismos externos como conectores, empalmes por fusión mal ejecutados y también por curvaturas de la fibra fuera del rango permitido, dependiendo del estándar de esta.

Como se puede visualizar en la figura 2.10, la atenuación en la fibra varía en dependencia de la ventana óptica, presentándose la menor atenuación en la tercera ventana de operación.

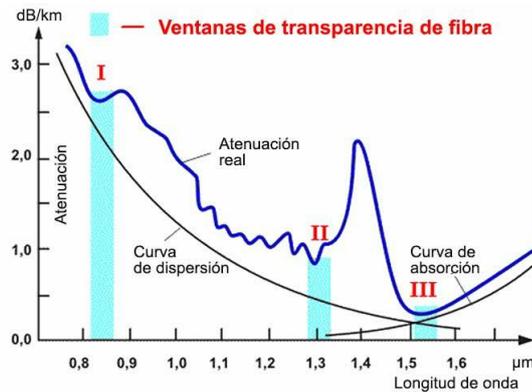


Figura 2. 10 Atenuación de la Fibra óptica
Fuente: (Toolboom, 2018)

2.1.4.2 Dispersión Modal

Esta dispersión se produce solamente en fibras multimodo, se debe a que los distintos haces de luz recorren distintas rutas y por ende existe una diferencia de los tiempos de propagación de estos. La dispersión modal limita la capacidad de ancho de banda, la distancia y por ende la eficiencia de la transmisión.

En la figura 2. 11 se observa los efectos que provoca la dispersión en la transmisión de datos, donde el intervalo de tiempo para el transporte de un pulso o bit se hace más largo, esto produce que bits consecutivos lleguen a solaparse. Entonces, si la dispersión modal sigue incrementándose, llegará el punto en que el sistema no podrá procesar los cambios de señal y por ende se tendrá interferencia entre símbolos.

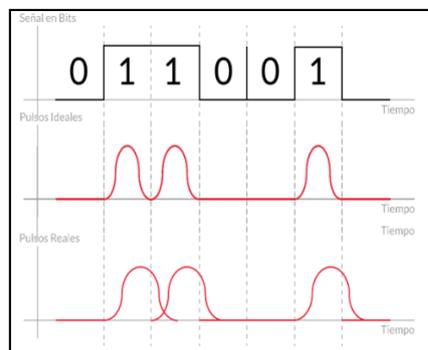


Figura 2. 11. Efecto de la dispersión modal
Fuente: (Martinez J. , 2018)

2.1.4.3 Dispersión por modo de polarización

Por sus siglas en inglés PMD (Polarization Mode Dispersion) se presenta cuando dos componentes ortogonales de polarización viajan a distinta velocidad de grupo, provocando una diferencia en su tiempo de llegada al receptor y por ende un ensanchamiento de los pulsos digitales. La diferencia indicada se conoce como

retardo diferencial de grupo (DGD, Differential Group Delay), parámetro que se emplea para determinar la PMD.

La variación de la velocidad de propagación de los haces de luz en distintos planos ortogonales es provocada por las características birrefringentes de la fibra óptica, es decir cada onda se propaga por el núcleo de la fibra con un índice de refracción distinto comportándose como dos señales independientes.

La PMD puede tener efectos negativos en la transmisión de datos en enlaces de fibra óptica a larga distancia y muy altas velocidades (>10G), es de carácter aleatorio, por lo tanto, es necesario un esquema de compensación de tipo dinámico. En la siguiente imagen se presenta en función del tiempo (**t**), el desfase en el tiempo ($\Delta\tau$) de dos señales ortogonales que han sufrido PMD.

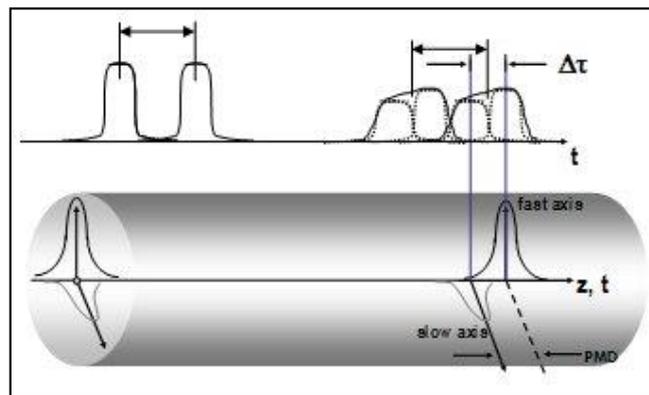


Figura 2. 12. Retardo entre la onda lenta y rápida para el caso de una fibra ideal y una fibra real
Fuente: (Lanchi, 2015).

El cálculo de la PMD se puede calcular siguiendo la siguiente ecuación (Sánchez, 2018):

$$\Delta PMD = PMDq * \sqrt{L}$$

Dónde:

ΔPMD : Dispersión por modo de polarización medida en pico-segundos (*ps*).

$PMDq$: Coeficiente de dispersión por modo de polarización, este valor viene especificado en la hoja técnica de la fibra óptica utilizada y se expresa en (*ps*/ \sqrt{km}).

L : Longitud de la fibra óptica, expresada en km.

En la tabla 2.4 se observan los coeficientes de dispersión recomendados por la ITU para algunos estándares de fibra óptica monomodo.

Tabla 2. 4 Coeficientes de PMD

Fibra óptica monomodo recomendación UIT-T	Coeficiente de dispersión por modo de polarización [ps/√km]
G.652.A y G.652.C	0,5
G.652.B y G.652.D	0,20
G.655.C, G.655.D y G.655.E	0,20

Fuente: (Sánchez, 2018).

2.1.4.4 Dispersión Cromática

Esta característica provoca un retardo variable dependiente de la frecuencia, introducida durante la propagación de la luz a través de la fibra óptica y causa una deformación no lineal a la salida del fotodetector.

Las redes de fibra óptica trabajan a grandes velocidades y se pueden alcanzar distancias superiores a los 80 km con el uso de amplificadores, sin embargo, la acumulación de dispersión cromática puede limitar el alcance de transmisión y capacidad de ancho de banda del enlace, debido al ensanchamiento de los pulsos ópticos que puede provocar interferencia entre símbolos y por ende la presencia de bits errados en la recepción.

2.1.4.5 Compensación de la Dispersión Cromática

Actualmente se utilizan dos alternativas para la corrección de la dispersión cromática, la primera es mediante el uso de tarjetas activas en la llegada de los equipos para la corrección de la dispersión y la otra alternativa es el uso de fibra óptica en la ventana de 1550 nm con coeficiente de dispersión negativo, las mismas son colocadas de forma estratégica en el enlace total.

Para la compensación con el uso de fibra con coeficiente negativo se debe considerar la siguiente condición:

$$D1 * L1 = -D2 * L2$$

En la ecuación se debe considerar que $D1$ es el coeficiente de dispersión del enlace con distancia $L1$ y $D2$ es el coeficiente de dispersión negativo expresado en ps/(nm*km) y $L2$ es la longitud de la fibra compensadora requerida.

Los equipos receptores activos en las redes de transmisión ópticas pueden soportar cierto valor de dispersión cromática acumulada, conocido como tolerancia de dispersión cromática (TD) y expresada en ps/nm, en la siguiente ecuación se puede

relacionar la longitud máxima de la fibra en función de la tolerancia y el coeficiente de dispersión de la fibra óptica.

$$L < \frac{TD}{DCq}$$

Donde L es la longitud máxima de la fibra en km y DCq es el coeficiente de dispersión cromática de la misma expresado en $ps/(nm*km)$.

2.2 Técnicas de Multiplexación en redes ópticas

La técnica de multiplexación consiste en transmitir varias señales sin que exista interferencia entre ellas por un mismo medio de transmisión, en este caso por una misma fibra óptica, con el objetivo de aumentar la cantidad de información que puede ser llevada a través de una red.

Se pueden multiplexar varias señales en tiempo, frecuencia y longitud de onda, en las comunicaciones ópticas se tiene las siguientes técnicas:

- OTDM (Optical Time Division Multiplexing)
- WDM

2.2.1 OTDM

En esta multiplexación cada una de las señales se transmite en una ranura de tiempo (time slots) sin que se sobrepongan entre sí.

En la actualidad esta técnica es usada por las redes de transporte SONET (Synchronous Optical Network) y SDH, aquí generalmente se asigna una ranura de tiempo para cada señal, si alguna de ellas no tiene nada que transmitir se envía la ranura vacía, una trama está constituida por un ciclo completo de ranuras de tiempo más los bits de sincronización, en la figura 2.13 se observa cómo se multiplexan distintas tramas incluidos los bits de sincronismo.

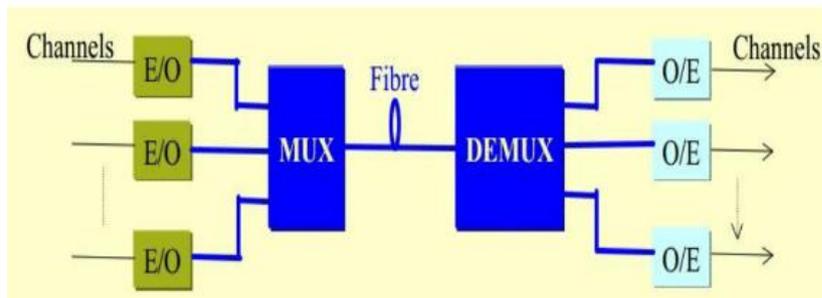


Figura 2. 13. Multiplexación OTDM
Fuente: (Hakani, 2013)

2.2.2 WDM

Esta técnica es considerada como una variante de la multiplexación por división de frecuencia, los multiplexores WDM se basan en combinar distintas señales ópticas en una longitud de onda diferente, para poder ser transportada por un solo hilo de fibra óptica, cada una de estas lambdas pueden ser recuperadas en el receptor por un demultiplexor óptico.

Esta técnica de multiplexación surgió como una evolución de OTDM, en cuanto a la capacidad de ancho de banda que se puede transmitir por la misma fibra óptica, la información correspondiente a cada canal óptico puede transmitirse en distintos formatos, además esta técnica permite que los sistemas de transmisión sean escalables, es decir que pueden añadirse o eliminarse lambdas de acuerdo con la demanda de transporte e incrementos de servicios en la red.

Los sistemas WDM fueron diseñados para trabajar en la ventana de 1310 nm y 1550 nm, en la figura 2.14 se aprecia un sistema general de esta tecnología.

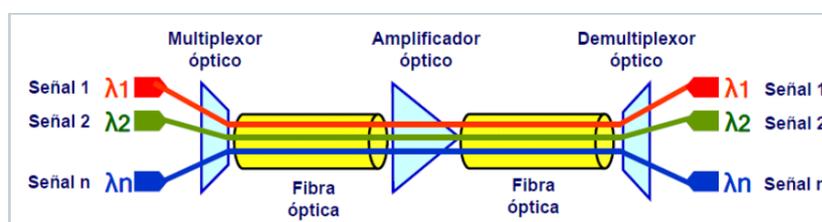


Figura 2. 14. Esquema de multiplexación WDM
Fuente: (Macias, 2016)

2.2.2.1 Elementos generales de un sistema WDM

A continuación, se realiza un acercamiento general de los principales componentes de un sistema WDM tradicional.

Componentes pasivos: son dispositivos que permiten ramificar o combinar señales ópticas, entre los principales se tiene:

- **Combinadores:** aquellos que integran en una misma fibra óptica señales procedentes de distintas fibras.
- **Divisores o splitters:** cumplen una función inversa de los combinadores, actualmente en el mercado se encuentran dispositivos con una o dos entradas y con salidas iguales a: 2, 4, 8, 16, 32 o 64, las pérdidas de inserción son aproximadamente iguales en cada una de las ramas, aunque permiten también tener salidas con distintas atenuaciones.
- **Circuladores:** estos dispositivos pasivos permiten transmitir una señal de un puerto a otro
- **Conectores o acopladores:** unen el extremo de un cable de fibra óptica para conseguir una conexión y desconexión de manera sencilla, su objetivo principal es acoplar mecánicamente los núcleos de las fibras para que los rayos de luz puedan transmitirse con pequeñas pérdidas de inserción.
- **Filtros:** permiten suprimir determinadas longitudes de onda transportadas en una fibra óptica, entre las aplicaciones más comunes son la eliminación del ruido, ecualización de los amplificadores, y selección de lambdas en los sistemas WDM.
- **Atenuadores:** permiten una reducción de la potencia de la señal óptica, son empleados básicamente en la recepción de los módulos ópticos para asegurarse que la señal se encuentre dentro del rango de trabajo especificado por el fabricante
- **Aisladores:** la función de estos elementos es permitir el paso de la luz en una sola dirección, generalmente empleados para que los haces de luz reflejados no se propaguen.
- **Multiplexores WDM:** permiten integrar en una sola fibra óptica distintas longitudes de onda provenientes de otras fibras.
- **Demultiplexores WDM:** separan una señal compuesta por un grupo de longitudes de onda en señales con longitudes de onda específicas para cada fibra óptica.

Convertidores de longitud de onda: en las redes WDM la conversión de longitud de onda es una de las etapas fundamentales en el sistema de transmisión, ya que permite adaptar la señal óptica procedente de distintos clientes en una longitud de onda específica, dentro de la ventana de operación de la red de transporte.

Estos convertidores permiten que la red se la pueda gestionar de forma más flexible y que sea fácil de configurar, por otra parte, se puede realizar el bloqueo de longitudes de onda en los nodos ópticos WDM y cambio de dirección de los mismos, lo cual permite que los recursos del sistema de transmisión se utilicen de forma más eficiente y considerando patrones de tráfico dinámicos.

La manera más común para realizar la conversión de longitud de onda es la fundamentada en un convertidor electro - óptico, donde la señal de luz se detecta para posteriormente realizarse la conversión a una señal eléctrica y con un láser o modulador externo se convierte nuevamente en óptica a una longitud de onda determinada.

Esta técnica de conversión es la indicada para velocidades de transmisión de 2,5 Gbit/s o menores, ya que a velocidades superiores el consumo de potencia y el costo aumentan considerablemente. Por ejemplo, para velocidades de 40 Gbps sólo es viable la conversión de longitud de onda a través de dispositivos totalmente ópticos.

En la figura 2.15 se observa los elementos de conversores electroópticos o completamente ópticos.

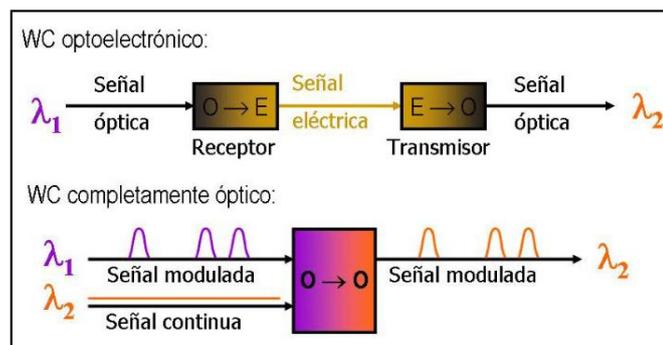


Figura 2. 15. Conversores de longitud de onda WDM
Fuente: (Gutierrez, 2005)

Transmisores WDM: En las comunicaciones ópticas se utilizan comúnmente dos fuentes de luz: LEDs y el diodo de inyección láser (ILD, Injection Laser Diode), sin embargo, en los sistemas WDM es necesario que las fuentes ópticas generen una señal estable en una longitud de onda estándar, evitando la dispersión, estas características la cumplen los ILD.

Los transmisores WDM consisten en arreglos de ILD, configurados cada uno en una longitud de onda específica, estos dispositivos corresponden a fuentes de luz coherente de emisión estimulada con espejos semi-reflejantes formando una

cavidad resonante, la cual sirve para realizar la retroalimentación óptica, así como el elemento de selectividad.

Entre los ILD más utilizados se tiene los siguientes:

- **VCSEL (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser):** está diseñado para la emisión de señales con longitudes de onda correspondientes a la primera ventana óptica (850 nm) y es empleado principalmente en fibra multimodo.
- **DFB (Distributed Feedback Laser):** se trata de una fuente de luz donde la región activa del elemento está arreglada periódicamente como una rejilla de difracción, esta última suministra retroalimentación que es empleada para hacer que ciertos modos en el resonador oscilen más que otros.
- **DBR (Distributed Bragg Reflector):** en este dispositivo el resonador del láser se realiza con al menos un reflector de Bragg distribuido fuera de la región activa, por ejemplo, amplificadores de fibra y aplicaciones de precisión que requieren alta estabilidad, fiabilidad y potencia.
- **FP (Fabry Perot):** este láser es considerado como un diodo LED con dos espejos finales, estos se requieren para tener las condiciones apropiadas para que se produzca la acción láser, estos dispositivos son generalmente empleados para trabajar con fibras monomodo.

Receptores WDM: están constituidos por detectores ópticos, los cuales son responsables de convertir los rayos de luz en señal eléctrica digital, para que posteriormente sean procesados por los equipos de la red de datos correspondiente. Los fotodetectores más empleados en comunicaciones ópticas son los fotodiodos, la detección puede ser directa (no coherente) o coherente.

El funcionamiento del fotodiodo se basa en una unión semiconductor P-N, con polarización inversa que, al incidir fotones en una establecida frecuencia sobre la región de transición con energía mayor a la banda prohibida, se incita el paso de electrones de la banda de valencia a la de conducción, generándose un par electrón hueco en la zona de transición. La figura 2.16 muestra la estructura y regiones de un fotodiodo.

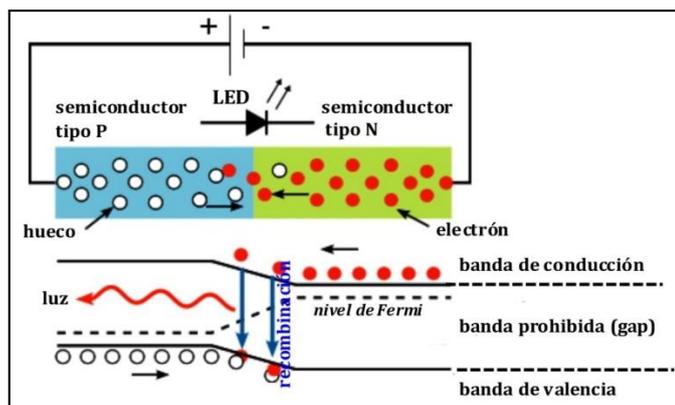


Figura 2. 16. Estructura de un fotodetector.
Fuente: (Lanchi, 2015)

Los enlaces WDM de baja capacidad y sistemas ópticos tradicionales emplean la detección lineal, aquí generalmente los datos a transmitirse se modulan por una portadora óptica, esto consiste en tener en el transmisor un láser de onda continua a través de un modulador de intensidad, mientras que la recepción se realiza mediante un fotodetector que realiza la conversión óptico – eléctrica de la señal, seguido de un preamplificador y filtro pasa bajos, estos sistemas se los conoce como IMDD (Intensity Modulation and Direct Detection).

Los sistemas de comunicación coherentes surgieron para alcanzar mayores velocidades de transmisión en los canales ópticos, esto significa velocidades superiores a 40 Gbps, en los sistemas coherentes se tiene en el transmisor adicional al laser, moduladores de amplitud, fase y frecuencia, debido a las mejores prestaciones en la actualidad se utilizan las modulaciones: QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) y DQPSK (Diferential Quadrature Phase Shift Keying) con las cuales se puede tener canales ópticos de 100 Gbps y en el receptor la detección coherente consiste en aplicar a la señal óptica de llegada una onda generada por un oscilador local para recuperar la información transmitida.

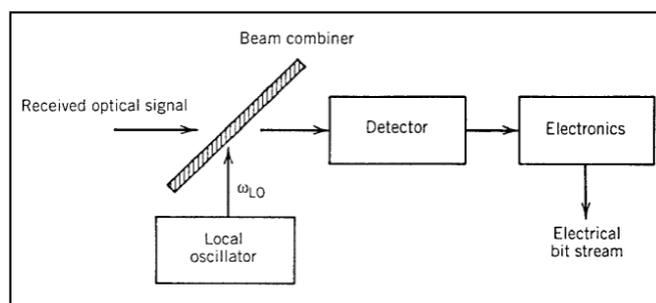


Figura 2. 17 Esquema de un receptor coherente

Fuente: (Rodríguez & Cid, 2012)

La ventaja que tiene la detección coherente frente a la lineal, aparte de permitir el transporte de mayores velocidades, son la mejora de la relación señal ruido y sobre todo mejoran la tolerancia a la dispersión cromática y por modo de polarización.

Amplificadores ópticos: es un dispositivo que amplía la señal de entrada con un mayor nivel de potencia en la salida, esto en el dominio óptico sin necesidad de convertirla al dominio eléctrico.

Los amplificadores ópticos se asimilan al principio físico de un láser pero sin retroalimentación, necesitan de una señal de bombeo que introduce una energía en la región activa del amplificador, la cual es atraída por los electrones que aumentan sus niveles de energía causando la inversión de polarización.

Al ser los electrones alcanzados por los fotones de la señal óptica de entrada, bajan a unos niveles energéticos más bajos dando lugar a un nuevo fotón, este procedimiento se conoce como emisión estimulada y de esta manera se realiza la amplificación de la señal.

En la figura 2.18 se muestra el funcionamiento básico de un amplificador:

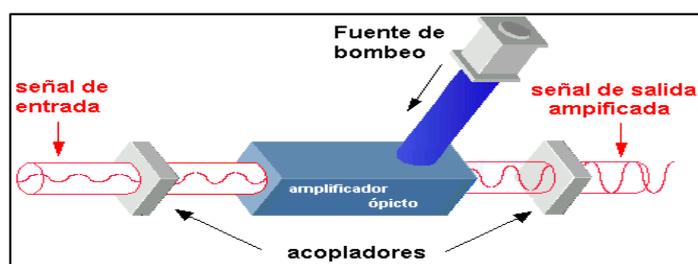


Figura 2. 18 Funcionamiento básico de un amplificador óptico
Fuente: (Lanchi, 2015)

Los amplificadores ópticos son de gran utilidad en las comunicaciones ópticas, tanto en sistemas lineales como coherentes, existen dos tipos de amplificadores actualmente empleados: EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) y RAMAN.

EDFA: actualmente es el más empleado en las redes de transporte ópticos debido a que trabajan en las ventanas de 1550 nm a 1625 nm, compensa la atenuación acumulada de la fibra óptica permitiendo que los sistemas de transmisión alcancen distancias superiores a 80 km, estos amplificadores presentan una ganancia no uniforme en el espectro óptico lo cual conlleva a una distorsión de la señal y disminuye la relación señal ruido, limitando el ancho de banda del sistema, para

corregir estas no uniformidades se utilizan filtros ópticos, en la actualidad utilizan una combinación de dos frecuencias de bombeo a 980 nm y 1480 nm, con esto se puede conseguir amplificadores optimizados capaces de alcanzar ganancias de 25 dB promedio, con la menor cantidad de ruido, en la figura 2.19 se observa el funcionamiento de este tipo de amplificadores.

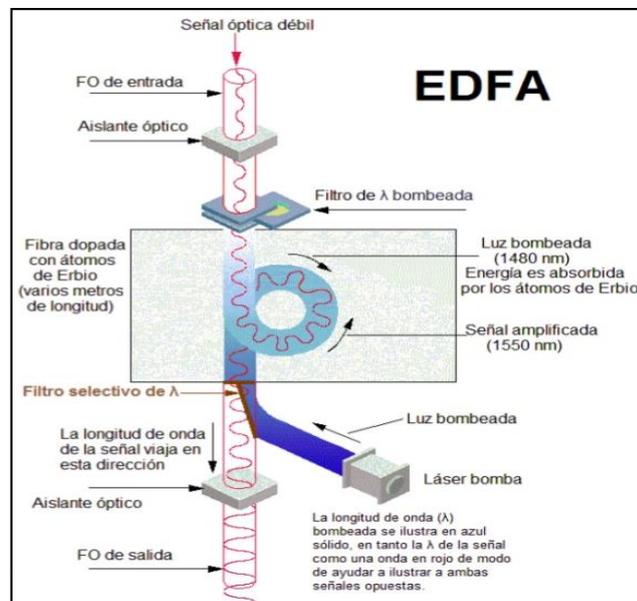


Figura 2. 19 Funcionamiento de un amplificador EDFA
Fuente: (Mendioroz, 2014)

RAMAN: estos amplificadores basan su trabajo en el efecto Raman, SRS (Stimulated Raman Scattering), que se basa en ingresar dos señales ópticas de distinta longitud de onda en la fibra óptica, es decir la potencia de la señal de bombeo que tiene una longitud de onda más baja se transfiere a la longitud de onda de la información (señal de más alta longitud de onda), efectuándose la amplificación de esta última señal.

Una de las limitantes de estos amplificadores es que requieren una señal de bombeo de alta potencia, desde 700 mW hasta un valor cercano a un Watt. Por otro lado, una de las principales ventajas es que amplifica un margen de longitudes de onda que no es cubierto por los amplificadores EDFA, por esta última razón en los sistemas de transmisión ópticos de nueva generación, con el objetivo de conseguir una ganancia prácticamente plana, se emplean los dos tipos de amplificadores en combinación. En la figura 2.20 se muestra la curva de ganancia obtenida en el sistema óptico al utilizar los amplificadores EDFA y RAMAN de forma combinada.

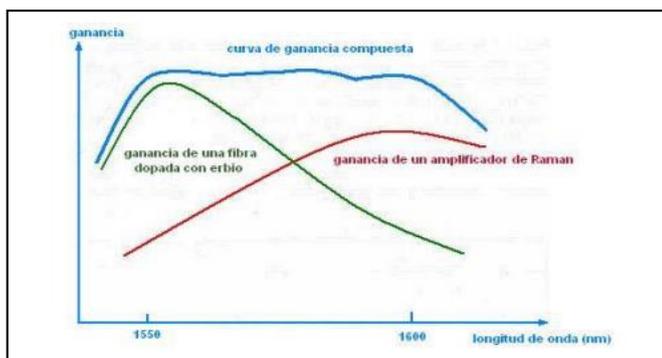


Figura 2. 20 Ganancia individual y combinada de los amplificadores EDFA y RAMAN
Fuente: (Ventura, 2016)

2.2.2.2 Categorías WDM

La multiplexación por división de longitud de onda es la tecnología de transporte que aprovecha las características que posee la fibra como medio de transmisión, para el envío de información a grandes velocidades y distancias, generalmente en WDM se tienen dos tipos de sistemas dependiendo la separación entre canales y características técnicas de cada uno: CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) y DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

La tecnología CWDM permite el transporte de 8 a 16 canales ópticos ocupando el espectro óptico de las ventanas comprendidas entre 1270 nm a 1610 nm, con una separación entre canal de 2500 GHz o 20 nm, en la figura 2.21 se observa el espectro óptico especificado para CWDM en la recomendación ITU-T G.694.2.

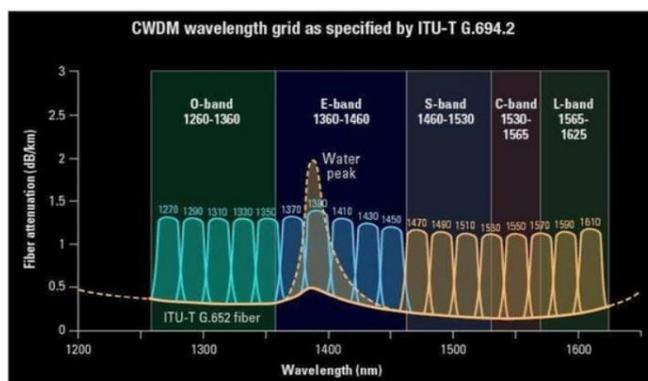


Figura 2. 21 Espectro especificado para CWDM
Fuente: (Gonzales, Gutierrez, & Rodrigo, 2018)

La tecnología CWDM es generalmente usada en las redes de acceso y metropolitanas pequeñas, donde los requerimientos de ancho de banda son moderados y las distancias inferiores a 80 km, ya que esta tecnología no permite el uso de amplificadores y en la práctica se emplean los 8 últimos canales del espectro (1470 nm a 1610 nm), considerando que la atenuación de la fibra es menor en esta región óptica, por su contraparte DWDM si permite alcanzar distancias superiores

a 80 km mediante el uso de amplificadores y la capacidad total del enlace puede alcanzar el orden de los Tbps permitiendo el transporte de hasta 160 canales ópticos con canalizaciones inclusive de 12,5 GHz (Salvador, 2019). En la tabla 2.5 se puede observar una comparación general de las distintas aplicaciones entre CWDM y DWDM.

Tabla 2. 5 Comparaciones entre CWDM y DWDM

Aplicación/parámetro	CWDM	DWDM	DWDM
	acceso/MAN	MAN/WAN	largo alcance
Canales por fibra	16	32-80	80-160
Espectro utilizado	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Espaciado entre canales	20 nm (2500 GHz)	0,8 nm (100 GHz)	0,4 nm (50 GHz)
Capacidad por canal	2,5 Gbit/s	10-40 Gbit/s	10-40 Gbit/s
Capacidad de la fibra	20-40 Gbit/s	100-1000 Gbit/s	>1 Tbit/s
Tipo de láser	uncooled DFB (láser de realimentación distribuida)	cooled DFB	cooled DFB
Distancia	hasta 80 km	cientos de km	miles de km
Coste	bajo	medio	Alto
Amplificación óptica	ninguna	EDFA	EDFA, Raman

Fuente: (Casillas, 2017)

2.3 Redes de transporte ópticas DWDM

Son la evolución de las redes WDM con el objetivo de conseguir mayores anchos de banda, explotando las ventajas que presenta la fibra óptica para el transporte de datos. A continuación, se explicarán los elementos, componentes, tipos de nodos, protecciones y tecnologías que garantizan la operación de una red de Transporte óptico DWDM.

2.3.1 Orígenes y evolución de la tecnología DWDM

La primera aplicación óptica en el desarrollo tecnológico fue en 1790, cuando se inventó el telégrafo óptico por el inventor francés Claude Chappe, este sistema consistía en una serie de faros instalados en dos torres en los que un usuario transmitía mensajes desde una torre a otra. El siguiente intento fue en 1880, cuando Alexander Graham Bell, licenció un teléfono óptico, al cual le dio la denominación de "Photophone". Estos experimentos tuvieron como limitante que la luz solar o blanca, está compuesta por todas las longitudes de onda, otra limitante era la utilización del aire como medio de transmisión, por lo antes indicado estos experimentos no dieron resultados positivos en las comunicaciones. No fue hasta las décadas sesenta y setenta del siglo veinte cuando se descubrió el láser y la fibra dando comienzo a las comunicaciones ópticas (Buevas, Téllez, & Mateus, 2010).

La técnica DWDM procede de WDM, cuyo primer sistema consiste en mezclar dos señales portadoras, hizo su aparición en 1985. A los inicios de los años 90 apareció una segunda generación WDM, llamada de banda estrecha, en los cuáles se utilizaron dos canales de ocho disponibles, los mismos fueron separados en un intervalo de 400 GHz en la ventana 1550 nm. (Buelvas, Téllez, & Mateus, 2010).

A mediados de la década de los 90, los sistemas DWDM empezaron a surgir con 16 a 40 canales y una separación de 100 GHz a 200 GHz. A finales de los años 90 las redes DWDM se habían implementado para el transporte de 64 a 160 canales ópticos por cada enlace, con una separación de 50 GHz hasta 25 GHz (Benavidez, 2015).

En la figura 2.22 se presenta un resumen de la evolución de las redes DWDM.

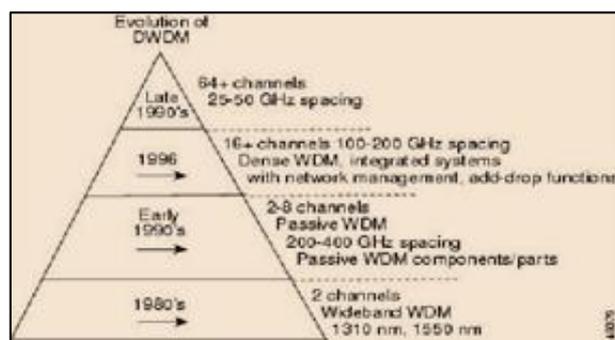


Figura 2. 22 Evolución de las redes DWDM
Fuente: (Benavidez, 2015)

2.3.2 Modelo general de un sistema DWDM

En un sistema DWDM señales diferentes con una longitud de onda específica se multiplexan en una fibra para ser transmitidas, los elementos principales que lo conforman son:

- OTU (Optical Transponder Unit), transforma la lambda no estándar a una estandarizada por ITU-T, mediante transformación óptica-eléctrica-óptica, el fotodiodo PIN o APD (Avalanche Photodiode) pasa la señal luminosa admitida a eléctrica y se modula para alcanzar la lambda esperada.
- OM/OD (Optical Multiplexer/Optical Demultiplexer), multiplexor con múltiples entradas y una salida, cada entrada elige una lambda específica para insertarla en una onda compuesta y el demultiplexor separa las lambdas de dicha onda.

- OA (Optical Amplifier), amplifica la señal luminosa, tiene elevada ganancia y soporta el ruido, se emplean dos clases: erbium-doped fiber amplifier (EDFA) y fiber Raman amplifier (FRA).
- OSC (Optical Supervisory Channel), supervisa la técnica DWDM, ITU-T pide alinear el canal a 1510 nm y 2Mbps, funciona si los OA fallan y su sensibilidad es hasta -48dBm.

En la figura 2.23 se pueden apreciar los elementos principales para un sistema en una configuración fija, es decir que los canales ópticos son configurados en una dirección determinada (Fixed DWDM).

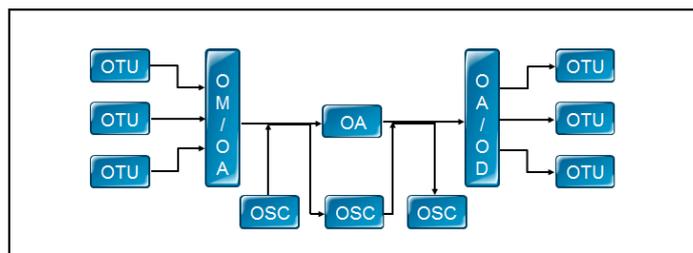


Figura 2. 23 Estructura general DWDM para N longitudes de onda
Fuente: (Cortes, 2015)

Al igual que en las redes SDH, que maneja una cros-conectora eléctrica que permite la reconfiguración de los contenedores a nivel de VC2, VC3, o VC4 entre distintas direcciones en un equipo de red dentro de la topología implementada, en las redes DWDM de nueva generación los canales ópticos pueden ser habilitados a través de una cros-conectora óptica que permite que un canal sea reconfigurado de forma dinámica entre distintas direcciones de un nodo DWDM.

La **OXC** (Optical Cross Connect) es el elemento principal en los nodos ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) de los cuales se hablará más adelante y permiten reconfigurar de manera fácil por el operador de red el recorrido o ruta de un canal óptico desde un sistema de gestión remoto.

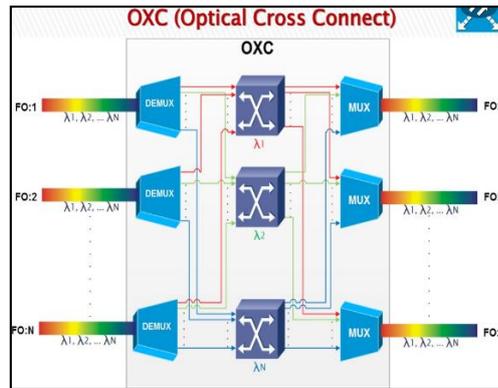


Figura 2. 24 Cros conectora Óptica DWDM
Fuente: (Mendioroz, 2014)

2.3.3 Modelo de transmisión de un sistema DWDM

En los sistemas DWDM están definidas dos formas de transmisión: bidireccional con una fibra y unidireccional a una fibra. En el sistema unidireccional todos los canales ópticos viajan en una misma dirección en la fibra, se necesitan de dos de estas para la transmisión en ambos sentidos, es el modo más empleado alrededor del mundo. En los bidireccionales una única fibra transmite las señales ópticas en ambas direcciones con longitudes de onda distintas para cada sentido, este modo suele ser más utilizado en los sistemas CWDM.

En la figura 2.25 se indican las direcciones de las señales ópticas en los dos modos de transmisión, si bien es cierto que la bidireccional permite una reducción del costo de implementación al emplear una sola fibra, se produce una limitante del ancho de banda. Los dos modos antes descritos se pueden implementar tanto en sistemas DWDM abiertos, donde no se tiene requerimientos de la señal del cliente dentro de las ventanas ópticas de DWDM o sistemas integrados donde la señal óptica del cliente está dentro del estándar DWDM y no es necesario el uso de OTU.

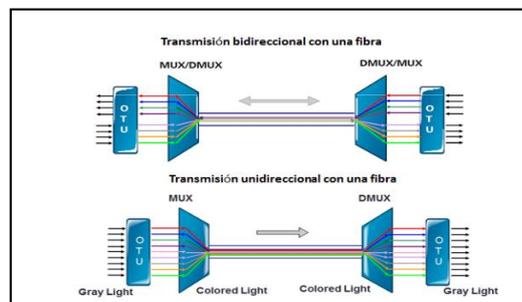


Figura 2. 25. Modos de transmisión DWDM
Fuente: (Huawei Technologies Co.,Ltd, 2015)

2.3.4 Ventanas de operación y número de canales

La ITU-T divide la banda de fibra mayor a 1260nm como banda O, E, S, C, L, U, los rangos específicos de longitudes de onda se indican en la tabla 2.6, para los

sistemas DWDM se eligen las bandas C y L por ser aquellas donde la fibra óptica tiene menor atenuación.

Tabla 2. 6. Ventanas ópticas según la ITU-T

band	state	range (nm)	bandwidth (nm)
O	original	1260~1360	100
E	extend	1360~1460	100
S	short wavelength	1460~1525	65
C	conventional wavelength	1525~1565	40
L	long wavelength	1565~1625	60
U	ultra long wavelength	1625~1675	50

Fuente: (Huawei Technologies Co.,Ltd, 2015).

Usando las bandas C y L se pueden transmitir 160 longitudes de onda, pero se necesitarían dos arreglos de sistemas ópticos (mux/demux/amplifier), esto aumentaría considerablemente los costos de implementar un sistema DWDM y no sería competitivo para las empresas proveedoras de equipos, quienes consideran que una banda más grande como la L no es la dirección de la evolución actual, es más importante aumentar la velocidad de la única longitud de onda (10G/40G/100G/400G/1T), en la tabla 2. 7 se indica la distribución de frecuencias para la banda C (Huawei Technologies Co.,Ltd, 2015).

Tabla 2. 7. Distribución de frecuencias para la banda C: 40/80 canales.

No.	center frequency (THz)	center frequency (nm)	No.	center frequency (THz)	center frequency (nm)	No.	center frequency (THz)	center frequency (nm)	No.	center frequency (THz)	center wave (nm)
1	192.1	1560.61	21	193.1	1552.53	41	194.1	1544.53	61	195.1	1536.61
2	192.15	1560.2	22	193.15	1552.13	42	194.15	1544.13	62	195.15	1536.22
3	192.2	1559.79	23	193.2	1551.72	43	194.2	1543.73	63	195.2	1535.82
4	192.25	1559.39	24	193.25	1551.32	44	194.25	1543.34	64	195.25	1535.43
5	192.3	1558.99	25	193.3	1550.92	45	194.3	1542.94	65	195.3	1535.04
6	192.35	1558.59	26	193.35	1550.52	46	194.35	1542.54	66	195.35	1534.65
7	192.4	1558.18	27	193.4	1550.12	47	194.4	1542.15	67	195.4	1534.25
8	192.45	1557.77	28	193.45	1549.72	48	194.45	1541.75	68	195.45	1533.86
9	192.5	1557.37	29	193.5	1549.32	49	194.5	1541.35	69	195.5	1533.47
10	192.55	1556.96	30	193.55	1548.92	50	194.55	1540.96	70	195.55	1533.08
11	192.6	1556.56	31	193.6	1548.52	51	194.6	1540.56	71	195.6	1532.68
12	192.65	1556.15	32	193.65	1548.12	52	194.65	1540.16	72	195.65	1532.29
13	192.7	1555.75	33	193.7	1547.72	53	194.7	1539.77	73	195.7	1531.9
14	192.75	1555.35	34	193.75	1547.32	54	194.75	1539.37	74	195.75	1531.51
15	192.8	1554.94	35	193.8	1546.92	55	194.8	1538.98	75	195.8	1531.12
16	192.85	1554.54	36	193.85	1546.52	56	194.85	1538.58	76	195.85	1530.73
17	192.9	1554.14	37	193.9	1546.12	57	194.9	1538.19	77	195.9	1530.34
18	192.95	1553.73	38	193.95	1545.72	58	194.95	1537.79	78	195.95	1529.95
19	193.0	1553.33	39	194.0	1545.32	59	195.0	1537.4	79	196.0	1529.56
20	193.05	1552.93	40	194.05	1544.93	60	195.05	1537.01	80	196.05	1529.17

Fuente: (Huawei Technologies Co.,Ltd, 2015)

En los sistemas DWDM el espaciamiento de canal puede ser de 200, 100, 50, 25 y 12,5 GHz, en la práctica se utiliza el de 50GHz para sistemas de 80 longitudes de onda. Se debe considerar que cuanto menor sea el espaciamiento entre canal, mayor

será la diafonía y dependiendo de los equipos a medida que el espaciamiento disminuye, también se ve limitada la máxima velocidad de datos por longitudes de onda que se deseen transmitir.

2.3.5 Fenómenos de las redes DWDM

En los proyectos de redes DWDM se consideran los fenómenos del cable y las mediciones en las ondas luminosas al fluir en la red, a continuación, se indican los principales fenómenos que se deben considerar en el diseño de las redes DWDM.

2.3.5.1 Atenuación

Es la disminución de la potencia de la señal óptica, es inversamente proporcional a la longitud de onda, en la fibra óptica se expresa en dB/Km y puede ser causada por pérdidas intrínsecas (propias de por la fabricación de la fibra) y extrínsecas (conectores, empalmes y curvatura de instalación). Para las redes DWDM se recomienda el uso de la fibra G.652 y G.655, adicional a la pérdida total del enlace de fibra óptica que comunica dos equipos DWDM ubicados en distintas centrales, se debe considerar las pérdidas de inserción que incluyen los elementos de un modelo general de esta tecnología.

2.3.5.2 Dispersión

Fenómeno de deformación de la onda luminosa al fluir por el cable, por los componentes frecuenciales de la onda que van a diferentes velocidades y llegan al receptor en tiempos desiguales, produciendo una disminución del ancho de banda y al agrandarse los pulsos restringen la tasa de transmisión, hay dos clases de dispersión: cromática y por polarización, la fibra G.652 la presenta de unos 20ps/nm.km y la G.655 5ps/nm.km.

2.3.5.3 Relación señal-ruido

Es la relación de la potencia de la onda a la del ruido, influye en la calidad de la transmisión, a mayor relación se tiene un mayor alcance de transmisión y evita la presencia de errores en los canales ópticos.

2.3.5.4 Tasa de bits errados (BER)

La BER (Bit Error Rate), se define como la tasa de bits errados en un total de los transmitidos, para las redes DWDM la ITU-T recomienda un valor de 10^{-12} , sin

embargo, los fabricantes recomiendan un valor de 10^{-15} , un bit errado en 10^{15} bits enviados.

2.3.6 Tipos de nodos en redes DWDM

En redes DWDM, los nodos se pueden implementar como OTM (Optical Terminal Multiplexer), REG, OLA, OADM y ROADM. Las empresas de telecomunicaciones emplean nodos para obtener diferentes topologías, estrella, malla, punto a punto, anillo o combinaciones de ellas.

2.3.6.1 OTM

Permite adicionar y aumentar lambdas en una trayectoria, la figura 2.26 muestra un arreglo para transmitir 40 longitudes de onda, con M40/D40 las ondas se multiplexan y demultiplexan, OBU y OAU operan como preamplificadores y booster, la SC1 crea la onda de supervisión y la señal compuesta por distintas longitudes de onda se mezclan en la FIU (Fiber Interface Unit) para ser enviadas por el cable a la siguiente estación. También nótese que la señal recibida también pasa por una tarjeta DCM (Dispersion Compensation Modules) que realiza la compensación de la dispersión cromática.

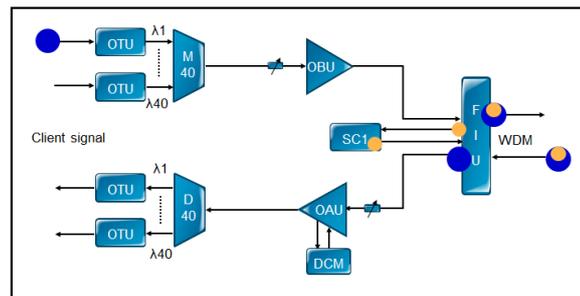


Figura 2. 26 Esquema de un nodo OTM
Fuente: (Cortes, 2015)

2.3.6.2 OLA

En las redes troncales los enlaces superan los 100Km, por lo tanto, es necesaria la utilización de amplificadores de línea para que la señal llegue dentro del rango nominal de potencia en el receptor, en la figura 2.27 se observan los componentes principales de un OLA, aquí se debe considerar la extracción de la señal de monitoreo antes de pasar la señal compuesta por los amplificadores ópticos y una

vez ya amplificada y compensada la dispersión, será nuevamente multiplexada por la FIU.

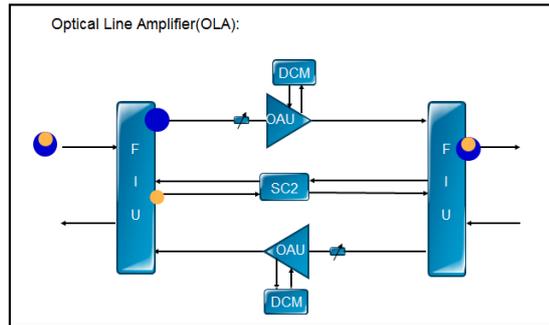


Figura 2. 27 Esquema de un nodo OLA
Fuente: (Cortes, 2015).

2.3.6.3 REG

Cuando las distancias son superiores a 200km la relación señal ruido es muy pequeña, la dispersión tiene gran efecto en el sistema y no es suficiente únicamente realizar la amplificación del canal, ya que existe la presencia de errores en los canales ópticos o en el peor de los casos pérdida de trama, en estas situaciones es necesario el uso de regeneradores, este proceso lo realizan las OTU mediante la conversión O/E/O. En la figura 2.28 se muestra el esquema de un regenerador.

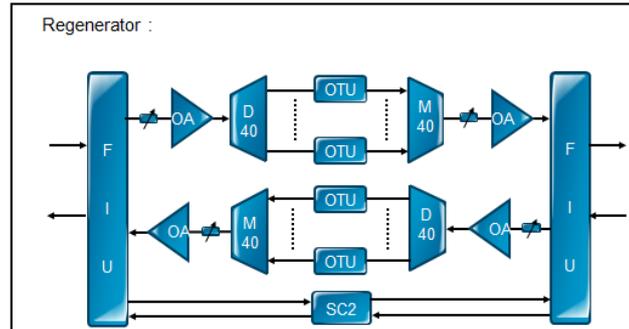


Figura 2. 28. Esquema de un nodo Regenerador
Fuente: (Huawei Technologies Co.,Ltd, 2015)

2.3.6.4 OADM

En una central donde es necesario, a más de recibir o enviar servicios con destino local, hacer pass through a la siguiente central, en los sistemas DWDM se tiene dos modelos de OADM: fijo y reconfigurable. En la figura 2.29 se tiene el esquema de un FOADM (Fixed Optical Add/Drop Multiplexer), donde el sistema está diseñado para un número de longitudes de onda limitado en direcciones predeterminadas, para las lambdas que hacen passthrough se debe realizar un cableado dedicado para cada una.

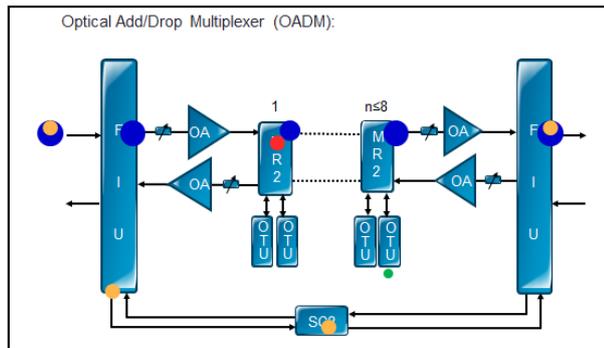


Figura 2. 29. Esquema de un OADM fijo
Fuente: (Huawei Technologies Co.,Ltd, 2015)

2.3.6.5 ROADM

Esta configuración se presenta como la evolución de las redes DWDM tradicionales, posee tarjetas multiplexoras/demultiplexoras que permiten converger hasta nueve direcciones, en estos sistemas se puede realizar de forma flexible la reconfiguración de una lambda por la dirección deseada.

En la figura 2.30 se tiene un sistema presentado por Huawei donde están habilitadas dos direcciones para 40 longitudes de onda por cada una, así se puede conseguir más trayectorias mediante la interconexión entre las WSM9 y RDU9 e instalando otra FIU, dos amplificadores y mux/demux, permiten agregar fácilmente una nueva dirección, por ejemplo. Otro aspecto importante es que en la misma arquitectura se puede conseguir sistemas de 80 lambdas mediante la instalación de M40 y D40 adicionales, cada uno de estos manejará las longitudes de onda pares o impares y una tarjeta sumadora permitiría obtener la combinación total de las mismas.

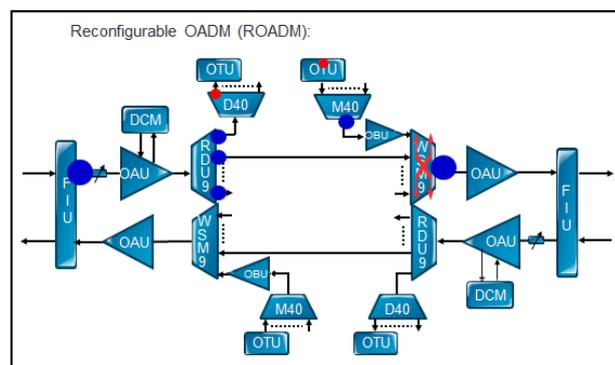


Figura 2. 30 Configuración de un nodo ROADM
Fuente: (Cortes, 2015).

2.3.7 Topologías en sistemas DWDM

La topología física en una red DWDM es la manera como los distintos tipos de nodos (OTM, OLA, ROADM y REG), están interconectados entre ellos dentro del área geográfica que cubre el sistema de transmisión. Las redes DWDM en la

actualidad están desplegadas en topologías: punto a punto, anillo y malla, en un sistema completo de transporte de un proveedor de telecomunicaciones se puede tener una combinación de estas topologías.

Además, es necesario tener presente que la disposición de las topologías físicas dentro de la red limita las protecciones y respaldos que se pueden habilitar lógicamente, ya sea un canal óptico o a los servicios, lo cual conlleva a la disponibilidad de servicio frente a los eventos fortuitos en la red de fibra óptica y fallas de hardware en los componentes activos de la red.

2.3.7.1 Topología punto a punto

Se obtiene esta topología cuando dos nodos DWDM están conectados directamente, pueden ser dos OADM o enlaces de larga distancia que superan los 80Km a 100Km, se puede tener un nodo intermedio OLA, que permite amplificar la señal para cubrir largas distancias.

En esta topología no se puede configurar protección, por ende, la disponibilidad de los servicios es afectada cuando ocurre un evento en el enlace de fibra lineal.

En la figura 2.31 se observa una conexión punto a punto, donde se tiene implementado el protocolo APS (Automatic Protection Switching), en que se tiene una protección 1+1 a nivel de tarjeta de línea, mediante dos enlaces paralelos que recorren la misma ruta, esta es la redundancia más común que se configura en los sistemas de transporte ópticos con topología punto a punto.

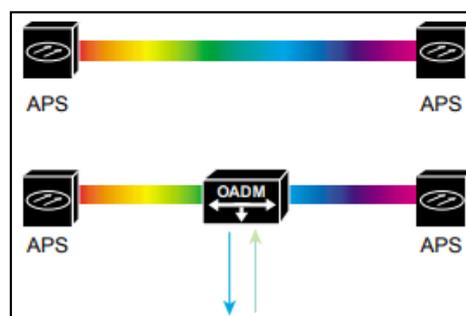


Figura 2. 31 Topología Punto a Punto
Fuente: (Hérendez, 2019)

2.3.7.2 Topología anillo

En esta topología el tráfico entre dos nodos puede tener dos rutas distintas para transportarse, lo cual aumenta la disponibilidad de tráfico frente a la topología punto a punto, es implementada generalmente en redes metropolitanas y por sus distancias pequeñas no necesitan OLAs, para mejorar la redundancia de la red se suelen

también implementar anillos dobles, donde el segundo interconecta los mismos nodos del primero, en la figura 2.32 se observa un caso de la disposición de nodos OADM en topología anillo.

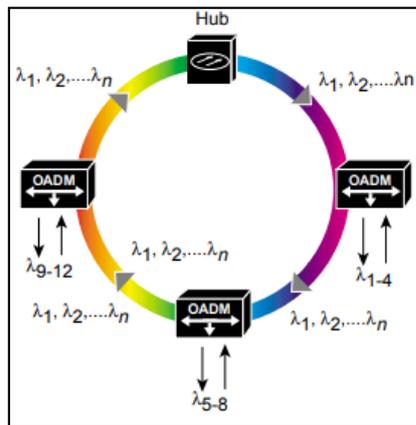


Figura 2. 32 Topología Anillo
Fuente: (Hérmendez, 2019)

2.3.7.3 Topología en Malla

En la figura 2.33 se observa un caso de aplicación de una red DWDM en un entorno metropolitano y las combinaciones de las topologías detalladas anteriormente.

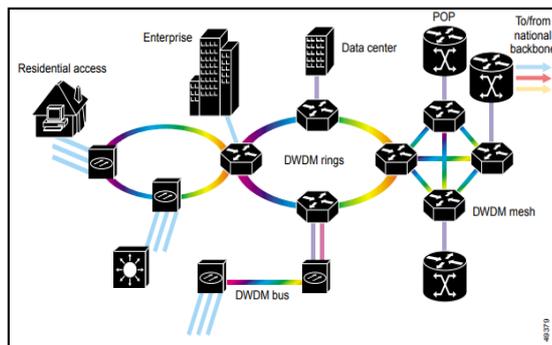


Figura 2. 33 Topologías DWDM en un entorno metropolitano
Fuente (Cisco, 2000)

2.3.8 Modelos de Protecciones

La protección en DWDM incrementa la disponibilidad del servicio ante sucesos imprevistos en el cable, hardware o software de los dispositivos, ahora se refieren las defensas más aplicadas por las empresas.

2.3.8.1 Protección SNC/N

Semejante a SDH la tarjeta cross conectora, responde la onda del usuario por dos trayectorias de manera sincrónica, la de operación y defensa, se denomina transmisión concurrente y recepción selectiva, se configura en ODUK (0, 1, 2, 3, 4, 5).

Esta protección se caracteriza por tener de manera fija una ruta de trabajo y una de protección, en caso de una falla en la primera, el tráfico se desvía automáticamente a la ruta de protección en un tiempo menor a 50 ms, de tal forma que el usuario final no detecta una afectación del servicio de voz o datos. Además, en esta protección una falla en las dos rutas preconfiguradas provocará una eminente afectación de los servicios transportados por el canal de datos asignado al cliente.

2.3.8.2 Protección ASON

Automatic Switch Optical Network (ASON), protección para DWDM de próxima generación, brinda elevada disponibilidad a través del descubrimiento automático de topología y recursos, administración de servicios punto a punto y suministro por múltiples SLA (Service Level Agreement).

En DWDM tradicionales se tienen dos áreas: de servicio según las funciones de enviar ondas luminosas, disponer cros conexiones y gestión con tareas de orientación de los elementos de red, administración de errores, ordenaciones por software de gestión y administración de seguridad, en ASON surge el plano de revisión para el control de conexiones, supervisión y restablecimiento de enlaces caídos de forma automática por intercambio de señalización entre nodos.

Las protecciones ASON en el área de revisión usa esencialmente tres protocolos: OSPF-TE (Open Shortest Path First - Traffic engineering) consigue y anuncia la topología para determinación de la vía de servicio en el dominio ASON, RSVP-TE (Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering) instaura y conserva la trayectoria de servicio y LMP (Link Management Protocol) que efectúa el encuentro de recursos y la función de gestión, genera y mantiene los canales de revisión entre nodos adyacentes.

Redes con ASON pueden implementarse desde una distribución práctica concentrada, una describe si el programa está en un servidor y remite los comandos remotamente a cada dispositivo en la red, el distribuido es si el programa está en cada dispositivo de la red, este último es más utilizado por las empresas de telecomunicaciones.

ASON suministra productos de diferente calidad para clientes disímiles, el SLA se puede catalogar según el proyecto de defensa, los niveles de prestación empleados son: diamante, oro, plata y cobre.

Además, es importante considerar que, para la implementación de distintos SLA, es indispensable la topología física disponible en la red, así para obtener la mayor ventaja que presenta la protección Diamante (SLA Diamond) se requiere de una topología en malla.

En la tabla 2.8 se presenta un resumen de los atributos y características técnicas que presentan los distintos SLA de la protección ASON implementados en redes DWDM de próxima generación.

Tabla 2. 8 SLAs manejados por ASON

	Diamond	Gold	Silver	Copper
Service Level	★★★★★	★★★★★	★★★	★★
Protection & Restoration	Protection & Restoration	Protection & Restoration	Restoration	No protection No restoration
Protection Scheme	SNCP	ODUK SPRing	Rerouting	—
Index	Protection time <50ms	Protection time < 50ms Restoration time < 2s	Restoration time<2s	—
Bandwidth Utilization	Low	Medium	High	Very High
Cost	Very High	High	Medium	Low
Service Application	Bank/negotiable securities/Leased line	PSTN/GSM	IP data service/Internet	Temporary service

Fuente: (Huawei Technologies Co.,Ltd, 2015)

2.3.8.3 Protección Client 1+1

Requiere establecer la prestación del usuario en dos recorridos paralelos, de trabajo y defensa, cada uno con un hardware dedicado y una tarjeta óptica como conmutador, en caso de ausencia de señal, errores o diferencia de energía de 5dB de la onda de una de las tarjetas de prestación, se establece la conmutación de la defensa.

Esta defensa es muy costosa de realizar, por el número de tarjetas DWDM necesarias para operar una prestación específica.

La ruta de trabajo y la de protección pueden estar configuradas a su vez con protección SNC/N o ASON, por ejemplo en la práctica se podría configurar en una red metropolitana en malla, un servicio GE para un cliente que necesita una disponibilidad de servicio bien alta (> 99,90%), en donde aparte de la protección Client 1+1 se le podría asignar a cada ODU0 que corresponde al camino de trabajo y backup un SLA Silver, con esto el cliente siempre tendría disponible una ruta

principal y de respaldo, de esta forma se disminuye al mínimo la probabilidad de afectación de tráfico transportado de este cliente específico.

2.3.8.4 Protección intra board 1+1

Esta protección es una variación de la protección Client 1+1, se configura generalmente en los canales ópticos con el fin de optimizar los recursos referentes al número de tarjetas transpondedores necesarias para levantar un servicio con al menos una ruta de trabajo y protección fijas, es decir que una misma frecuencia óptica se puede configurar por dos direcciones, donde el camino uno será el de trabajo y el dos el de protección.

Para lograr esta protección se necesita un conmutador óptico de dos entradas y una salida en modo de transmisión unidireccional a una fibra, este replicará la señal proveniente del transpondedor en dos salidas, que a su vez irán conectadas a los multiplexores y demultiplexores correspondientes a cada dirección DWDM.

Al momento de implementar esta protección es necesario que el balance de potencia sea aproximadamente el mismo en cada dirección, debido a que la conmutación se produce por diferencia en la potencia de la señal de llegada en 5 dB o por la presencia de errores en una de las direcciones.

2.3.9 OTN

Esta tecnología permite el envío de distintas señales procedentes de los clientes a través de canales ópticos transportados por las redes DWDM, permite integrar el transporte de señales provenientes de clientes MPLS, IP, Servidores, redes SDH, SONET, IP-RAN, a distintas velocidades de línea óptica utilizando WDM para redes de corta y larga distancia, es decir: MAN (Metropolitan Area Network) o WAN (Wide Area Network). Entre las principales características que aportan las OTN se tiene las siguientes:

- Una mejora en la gestión de averías en redes multi operador por las conexiones tándem.
- Realizan un mapeo asincrónico de las señales de bajo a alto nivel.
- Realizan corrección de errores FEC (Forward Error Correction).
- Gran capacidad de transporte de paquetes en redes de transporte ópticas MAN y WAN.

- Las señales procedentes de los clientes finales son digitalmente empaquetadas.
- Señales ópticas de mantenimiento adicional a las señales de información o datos.
- Sistema de operación y mantenimiento óptimo.
- Restauración de los servicios basado en políticas.
- Permiten un despliegue rápido de los servicios.
- Posibilitan el transporte de múltiples clientes compartiendo el mismo canal óptico.
- Posibilitan el despliegue de arquitecturas en malla con un networking óptico virtualizado.
- Posibilitan el transporte de canales de comunicación genéricos por la red DWDM.

En la figura 2.34 se puede observar distintas señales de clientes que se transportan por las redes OTN, esto constituye una aplicación práctica de como actualmente se desempeñan las redes de transporte ópticas DWDM de nueva generación. La ITU-T define básicamente los siguientes estándares para la arquitectura, jerarquías, interfaces y gestión de redes OTN:

- Recomendación ITU-T G.709/Y.1331: Interfaces para la red de transporte óptica
- Recomendación ITU-T G.872: Arquitectura de las redes de transporte óptica
- Recomendación ITU-T G.798: Características de la Jerarquía de las redes de transporte óptico.
- Recomendación ITU-T G.959.1: Interfaces de la capa física en las redes de Transporte óptico.

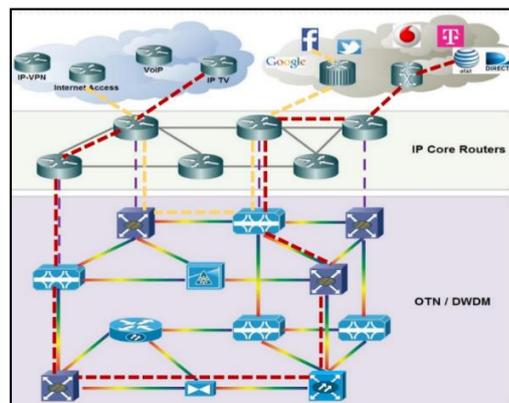


Figura 2. 34 Transporte de servicios sobre OTN
Fuente: (Mendioroz, 2014)

2.3.9.1 Arquitectura OTN

OTN está constituida por varios componentes que forman la jerarquía de la tara de comunicación entre dos nodos DWDM, siendo la estructura transportada a través de la fibra óptica el OTM constituido por una sección digital y una analógica (capa óptica). Permite el envío multiservicio de paquetes por flujo de información y encargo del canal óptico determinado a una lambda u OCH, por la adicción de una cabecera (OH) a la onda del usuario, la cual puede ser: GbE, SONET, SDH, FC o cualquier otro protocolo, se obtiene la capa OPU (Optical channel Payload Unit), cuando los servicios de los clientes son asignados de manera transparente, como 1 GbE, 10 GbE, ESCON o FC, el servicio pasa por un asignador de trama genérica (GFC, Generic Flow Control).

El siguiente nivel en la estructura es la unidad de datos de canal óptico: ODUk (Optical channel Data Unit), donde $k= 1/2/2e/3/3e/4/5$, esta unidad está conformada por OPU más una cabecera, como BIP8, GCC1, TCM, etc., el siguiente nivel es la unidad de transporte óptico: OTUk (Optical channel Transport Unit), compuesto por ODUk más la tara de sección (BIP 8) y es compatible con los bytes del canal de comunicaciones general (GCC General Communication Channel) para la funciones de operación y mantenimiento entre nodos de la red.

GCC entre otras funciones se encarga de la detección de fallas, bytes de señalización para el control de las protecciones de la red, las funciones del plano de control utilizado por ASON, monitoreo de desempeño e informes de nivel de servicio.

La capa OTU más una cabecera (OH) corresponde a la información que será encapsulada en una determinada longitud de onda o OCH, que se propaga a lo largo del enlace de fibra óptica, hasta este nivel corresponde la estructura o sección digital de OTN.

En la figura 2.35 se indica los componentes de la arquitectura OTN transportado entre dos nodos ópticos DWDM.

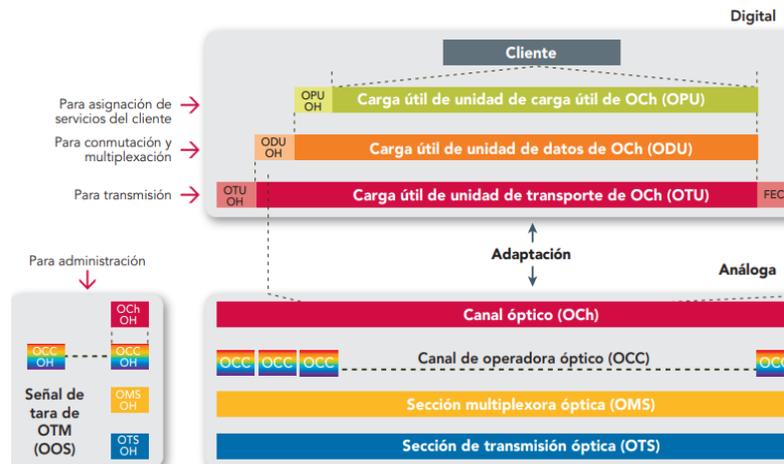


Figura 2. 35 Módulo de transporte óptico
Fuente: (Littlewood, Masoud, & Follis, 2015)

En la recomendación G.872 de la ITU – T, una red de transporte óptico se compone en capas de red independientes, en la que cada una cumple una función específica dentro de la capa óptica: OTS (Optical Transport Section), OMS (Optical Multiplex Section) y OCH, en la figura 2.36 se observan las secciones dentro de un enlace DWDM.

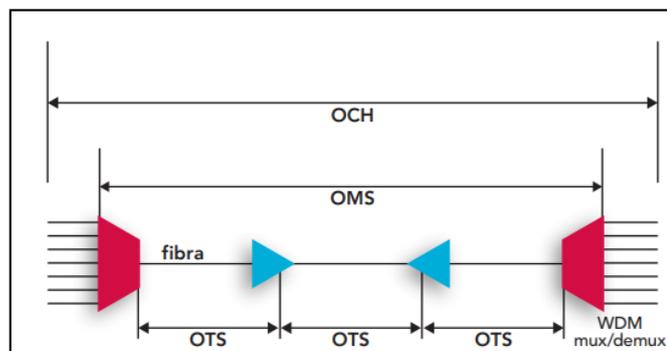


Figura 2. 36 Estructura de línea de OTN
Fuente: (Littlewood, Masoud, & Follis, 2015).

OTS: Se define como la conexión entre dos elementos que cumplen cualquier función óptica, se precisan parámetros como: OSNR (Optical Signal to Noise Ratio), frecuencia, niveles de potencia, en una sección de transporte de orden n soporta un solo ejemplar de una sección de multiplexación de igual orden.

OMS: Corresponde a la conexión entre dos multiplexores y se encarga del transporte de los canales ópticos entre dos nodos OADM, es decir para la interconexión de redes por una señal óptica compuesta por varias longitudes de onda.

OCH: Es la interconexión de redes ópticas extremo a extremo entre dos transpondedores ópticos de nodos OADM. Según la recomendación ITU-T G.709

una lambda se descompone en dos niveles de red OPU y ODU, y la capa de transporte independiente: OTU, cada capa en la gestión de red es visualizada de manera independiente para la administración y operación de esta. De acuerdo con la recomendación ITU-T G.872, se definen las siguientes funcionalidades para las distintas capas:

- El OCH o OCHr dota de la interconexión de red entre dos puntos de regeneración 3R (Retiming, Reamplification & Reshaping).
- La OTUk, suministra la supervisión y a su vez acondiciona la señal para su transmisión entre dos puntos de la OTN.

La ODUk proporciona supervisión de la conexión extremo a extremo y de la conexión en cascada, además posibilita la adaptación de la señal de información de los distintos tipos de clientes mediante la unidad de carga útil (OPUk)

2.3.9.2 Jerarquía de Multiplicación de OTN

Denominada contenedor digital, por su capacidad para trasladar una prestación en los contenedores digitales ópticos, como SDH posee rangos digitales con diferentes cabidas de flujo, la más pequeña es VC12 a VC4 la capacidad más alta de encapsulación; la más chica en OTN es un ODU0 (1,25Gbps), siguen ODU1 (2,5 Gbps), ODU2 (10Gbps), ODU3 (40Gbps), ODU4 (100Gbps), ODU5 (400Gbps) en el futuro los vendedores de dispositivos intentan realizar canales de 1Tbps que correspondería a un ODU6.

En DWDM según el tipo de prestación a trasladar usa un contenedor específico, un OCH de 10 Gbps puede ser comercializado como un ODU2 para transportar una prestación de 10 GbE, se puede fraccionar en cuatro ODU1 y se podría traer 4 clientes SDH STM-16 o a su vez cada ODU1 en dos ODU0 si se tuviera un cliente que desea transportar un servicio GE, en resumen se tiene que un ODU2 puede ser dividido en 4 ODU1 u 8 ODU0 o una combinación entre ODU1 y ODU0, en la figura 2.37 se observa una multiplexación hasta un ODU4, finalmente un ODU5 tendría 4 ODU4.

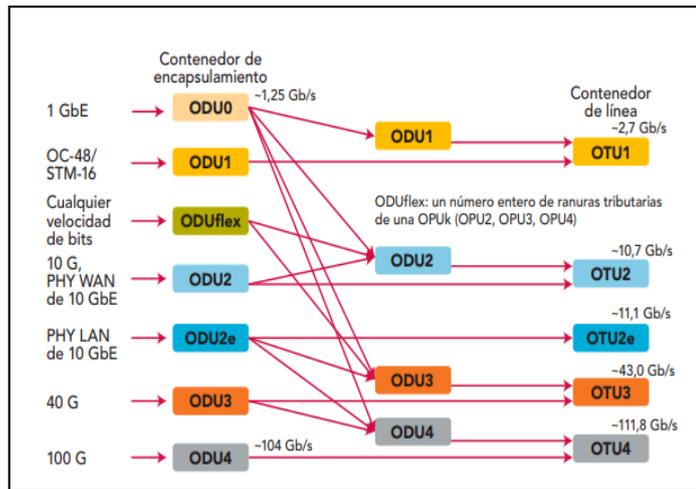


Figura 2. 37 Jerarquía de Multiplexación de OTN
Fuente: (Littlewood, Masoud, & Follis, 2015)

2.3.9.3 Encabezado y estructura de la Trama

En la recomendación ITU-T G.709 se define la estructura de la trama OTN, con un tamaño de 4 bytes por 4.080 bytes que resulta en un valor de 16.320 bytes sin importar el orden del OTUk, la trama en cada nivel jerárquico crece de tamaño, los encabezados o taras incluidos en los niveles OPU, ODU u OTU cumplen funciones de operación y mantenimiento, entre otras funciones específicas que aseguran el transporte efectivo de las tramas y servicios por la red de fibra óptica.

En la figura 2.38 se puede ver la representación de una trama OTUk, que luego se inserta en el OCH, el cual corresponde a una longitud de onda específica transportada por la red DWDM.

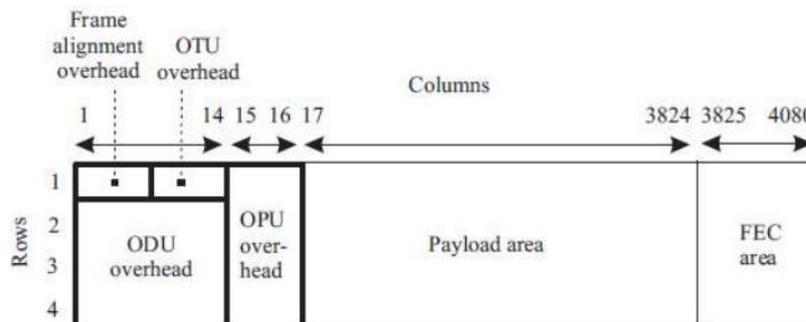


Figura 2. 38. Estructura de la trama OTN
Fuente: (Sequeria, 2017)

Una de las características esenciales de OTN es el soporte de FEC como parte de la trama OTU, este protocolo de corrección de errores está especificado en la recomendación ITU-T G.975. Este encabezado se adiciona en la última sección de la trama previa a la codificación para ser transmitida por la red óptica.

Este protocolo de corrección de errores es indispensable para solventar de manera eficiente una cantidad muy alta de errores en la transmisión causados por interferencias u otros eventos presentes en las transmisiones de alta capacidad.

El estándar FEC emplea un método de codificación Reed-Solomon RS (255/239), en que se requieren 239 bytes para procesar una comprobación de paridad de 16 bytes, otra de sus ventajas principales es que permite conseguir mayores distancias entre regeneradores, con lo cual reducen los gastos operativos y de implementación en las redes de transporte de nueva generación DWDM.

2.3.10 Modulación multinivel

La mayor tecnología DWDM con canales de 10 Gbps desarrollada en la actualidad es OOK (On-Off Keying), ya hay avances en proyectos de modulación óptica multinivel, aumenta la probabilidad de error, es imprescindible el empleo de las técnicas FEC. En la figura 2.39 se observa las modulaciones empleadas en los transpondedores de 10 Gbps y 40 Gbps.

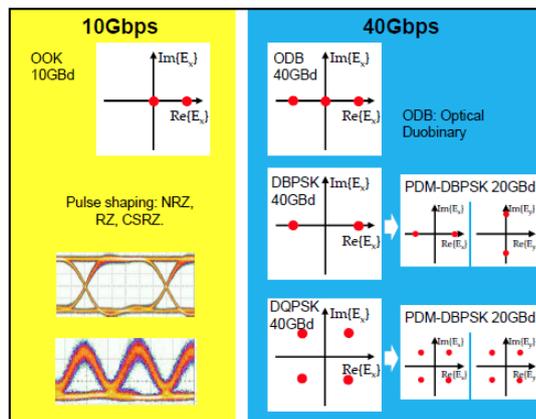


Figura 2. 39 Esquemas de modulación óptica para sistemas de 10G y 40G
 Fuente: (Apablaza, 2015).

Durante más de una década las redes DWDM de 10G han sido el estándar para el transporte de datos de alta velocidad, debido a la constante demanda este ha evolucionado a nuevas velocidades de 100G, 200G, 400G e inclusive 600G por algunos proveedores.

Los sistemas de 400G son posibles gracias a los transmisores multinivel y multifase y receptores coherentes, también se emplea el espaciado FlexGrid, que permite que cada longitud de onda ocupe un grupo escalable de segmentos del espectro de 12,5 GHz; con esto a una señal de 400G que requiere un espaciado de 75 GHz se le

pueden asignar 6 segmentos de 12,5 GHz. Así mismo a las señales de 10G pueden asignarse solo 25GHz y a las de 100G un espacio de 50GHz.

En cuanto a las modulaciones, los sistemas DWDM de 400G emplean 16QAM y 32QAM, en la figura 2.40 se puede apreciar los esquemas de modulación en dependencia de la capacidad del canal óptico.

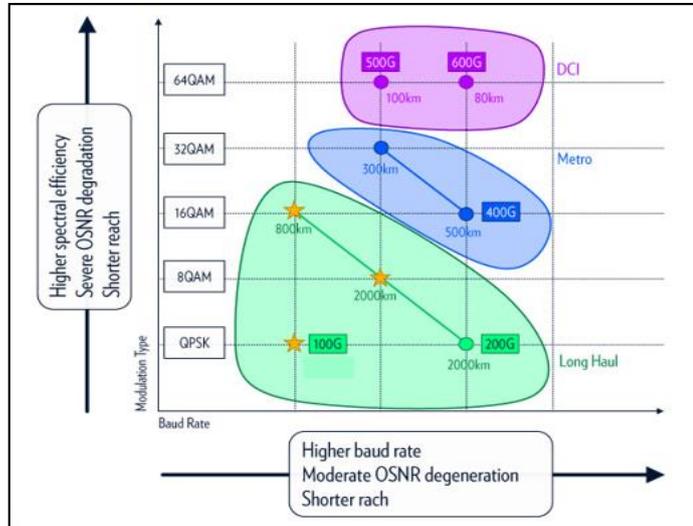


Figura 2. 40 Modulaciones utilizadas en sistemas coherentes DWDM
Fuente: (Solera, 2018)

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE LA PROPUESTA

En el presente capítulo se desarrolla la propuesta del presente proyecto de investigación, aquí se define la topología de red planteada para este estudio, la ubicación y arreglos de las tarjetas de cada nodo ROADM considerado, los servicios a ser transportados por la red DWDM a diseñar y simular mediante un software los parámetros técnicos de un enlace.

Cabe indicar que el alcance de este proyecto de investigación es determinar los requisitos técnicos necesarios de la planta interna en un sistema DWDM, con capacidades para el transporte de longitudes de onda de 400Gbs, mas no identificar los requerimientos de diseño de la planta externa.

3.1 Definir la ubicación de los nodos y la topología de Red a implementar

Para el escenario de estudio de este trabajo de investigación se ha seleccionado la ciudad de Guayaquil, considerada como la ciudad con mayor población y crecimiento industrial y tecnológico del país y de acuerdo a la experiencia laboral del investigador representa la mayor demanda de tráfico a nivel nacional.

El diseño de esta red de nueva generación con capacidades de longitudes de onda de 400 Gbps permitirá en el entorno metropolitano planteado, satisfacer las demandas continuas de ancho de banda requeridas por los nuevos servicios, una red con esta capacidad también posibilita alquilar enlaces dedicados a portadores internacionales que brindan acceso a empresas que necesitan conexiones dedicadas al exterior.

Permitirá a los abonados disfrutar de aplicaciones innovadoras del Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things), automatización de los procesos en las industrias, continuar con el despliegue de las redes de acceso ópticas de nueva generación como X-GPON e implementación de redes móviles 5G. De acuerdo a las pruebas preliminares realizadas por los principales operadores del país, Conecel S.A. y la Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT EP), se verificó que la nueva red móvil puede alcanzar velocidades de subida de hasta 1 Gbps y descarga de 5 Gbps con retardos iguales o menores a 1 milisegundo, por lo tanto para que esta red de acceso pueda desplegarse correctamente es indispensable fortalecer el core de la red de transporte con mayor ancho de banda y disponibilidad de servicios.

Para analizar y determinar los requisitos técnicos considerados en una red DWDM de 400Gbps se define una topología distribuida en los nodos en zonas de mayor concentración de tráfico, los que se indican a continuación:

Nodo 1: Zona Norte de Pascuales

Nodo 2: Zona del Centro

Nodo 3: Zona de Bellavista

Nodo 4: Zona de Mapasingue

Nodo 5: Zona Sur - Guasmo

En la figura 3.1 se observa la interconexión de los nodos y la topología planteada para este proyecto:

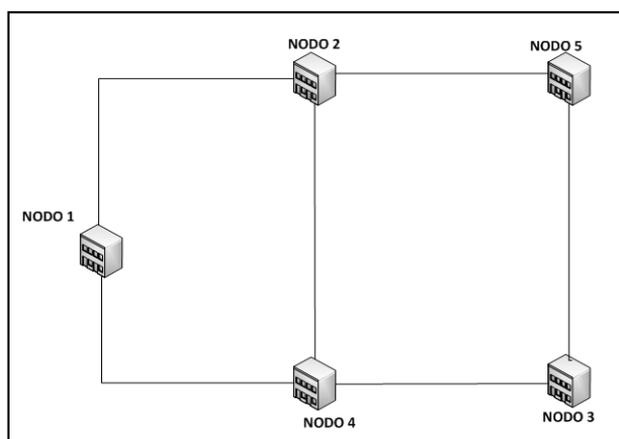


Figura 3.1 Topología a implementa

Fuente: autor

3.2 Tipos de fibra a utilizar y cálculos de las atenuaciones de los enlaces ópticos

Para los enlaces de fibra óptica de redes DWDM metropolitanas pueden emplearse fibras monomodo del estándar G.655 o G.652d, sin embargo, por las características de atenuación y dispersión cromática que presentan en la ventana de 1550nm, se recomienda el estándar G.655.

De acuerdo con la recomendación de la ITU, el estándar G.655C puede tener una atenuación máxima de 0,35 dB/Km (anexo 1), en el mercado se encuentran fibras donde los fabricantes como OPTRAL indican que poseen atenuaciones de 0,25 dB/Km, sin embargo, para efectos de cálculo se considera el coeficiente de atenuación recomendado por ITU.

Para el cálculo de la atenuación del enlace de fibra también es necesario conocer que las bobinas de fibra óptica vienen en vanos de 4 Km, y en condiciones normales la fusión es 0,1 dB.

De acuerdo con la topología de la figura 3.1 se considera para este estudio, seis enlaces de fibra óptica, se considera la distancia aproximada de cada enlace y en base a la misma calcular la atenuación de cada uno, cuyo valor será el resultado de multiplicar la distancia total por el coeficiente de atenuación más el número de empalmes correspondientes al total de bobinas para alcanzar la distancia deseada.

Tabla 3. 9 Atenuación de los enlaces de fibra óptica

ENLACES	DISTANCIA (Km)	ATENUACIÓN DE EMPALMES (N)	ATENUACIÓN TOTAL(At)
E1: Conexión entre N1 y N2	18,1	0,5 dB	6,8 dB
E2: Conexión entre N1 y N4	9,8	0,3 dB	3,73 dB
E3: Conexión entre N2 y N4	15,4	0,4 dB	5,8 dB
E4: Conexión entre N2 y N5	7,8	0,2 dB	2,9 dB
E5: Conexión entre N3 y N5	23	0,6 dB	8,7 dB
E6: Conexión entre N3 y N4	9,6	0,3 dB	3,7 dB

Fuente: autor

3.3 Tipos de servicios a ser transportados

Las redes de transmisión deben ser escalables y poder transportar diversidad de servicios de acuerdo con las necesidades de los proveedores de telecomunicaciones. La tendencia es el transporte de tráfico totalmente IP sobre interfaces Ethernet, sin embargo, en la actualidad aún se mantienen equipos que manejan tráfico TDM (Time Division Multiplexing), las redes ópticas de transporte deben ser capaces de transmitir los tipos de servicios actuales y nuevas tendencias a la par con el avance tecnológico.

En cuanto al tráfico Ethernet los principales proveedores de equipos de conmutación de capa 3 del modelo OSI, han realizado pruebas con interfaces Ethernet de 100 GE y 200 GE.

De acuerdo con lo antes indicado, las tarjetas de servicio de los equipos instalados en la capa óptica de un nodo ROADM deben ser capaces de encapsular los servicios indicados en la siguiente tabla.

Tabla 3. 10 Servicios a ser configurados por la red DWDM

Tecnología	Tipo de servicio
SDH	STM-1, STM-4, STM-16, STM-64
Fiber Channel	FC800, FC1200, FC100
ETH	GE, 10GE LAN, 10GE WAN, 100 GE, 200GE

Fuente: autor

3.4 Número de longitudes de onda a ser transmitidas por cada dirección DWDM

En sistemas DWDM modernos se ha definido la grilla flexible, esto significa que una determinada longitud de onda ocupa un grupo escalable del espectro óptico en espacios de 12,5 GHz, así una señal de 400 GHz requiere 6 segmentos de 12,5 GHz y una lambda pequeña de 10G necesitaría solo dos segmentos de 12,5 GHz; las soluciones respecto al arreglo de MUX/DEMUX ha evolucionado para permitir la coexistencia de canales con distintas velocidades de transmisión.

Bajo la consideración antes indicada, el número de canales en un enlace óptico estará determinado por la capacidad de ancho de banda de las longitudes de onda configuradas, considerando espacios de 75 GHz los fabricantes han presentado soluciones de 48 y hasta 96 lambdas con espaciados de 50 GHz empleando la banda C extendida.

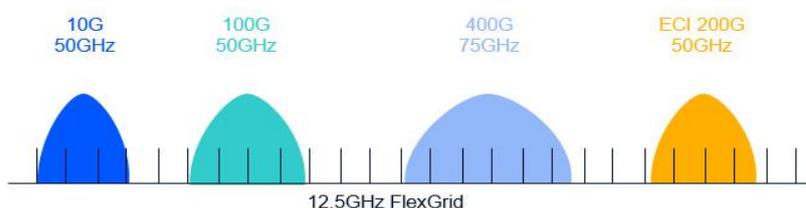


Figura 3. 2 Esquema Flex-grid

Fuente: (Solera, 2018)

3.5 Elementos y dimensionamiento de tarjetas de la capa: óptica – eléctrica de un Nodo ROADM

En redes DWDM se puede configurar determinadas longitudes de onda con ancho de banda fijo para una dirección específica, este arreglo se conoce como **colorless**. Las redes de transporte por división de longitud de onda han evolucionado, para permitir el envío de una longitud de onda procedente de un nodo específico a cualquier dirección del nodo ROADM, este arreglo óptico se conoce como

directionless, además los últimos avances permiten el uso del canal óptico ajustable, el mismo que de acuerdo con la recomendación de la ITU-T se espera que sea escalable a 1T, esta configuración se la conoce como **Gridless**.

Por lo tanto, el arreglo de las tarjetas de la capa óptica permitirá el envío a cualquier dirección, manejando un balance de potencia adecuado en dependencia a las pérdidas de los enlaces y de inserción de las tarjetas.

El equipo que maneje la capa eléctrica y las funciones OTN, debe contener los transpondedores con capacidades OTU-N reconfigurables, tarjetas de protección, servicio, cros conexión eléctrica, comunicación o controladora, unidades de ventilación y demás tarjetas con interfaces de alimentación eléctrica DC.

En la figura 3.3 se observa un diagrama de bloques donde se diferencia el esquema de conmutación multidireccional (N direcciones) de la capa óptica que interconecta a la eléctrica mediante patchcord de fibra óptica.

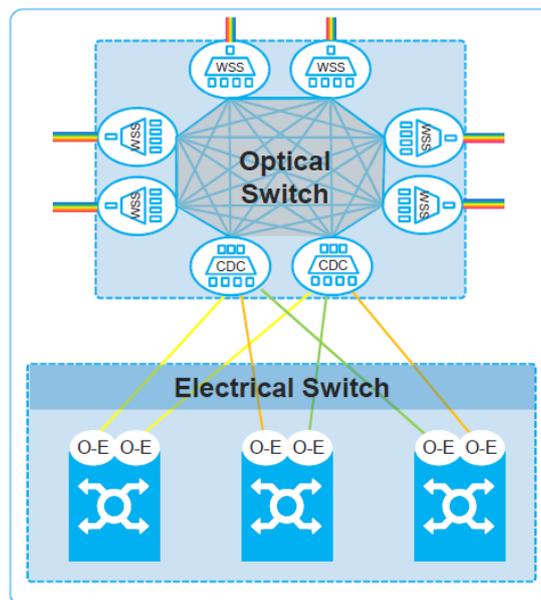


Figura 3.3 Diagrama de bloques la interconexión de los equipos de la capa óptica y eléctrica
Fuente: (Solera, 2018).

En la topología seleccionada para el presente proyecto se tienen nodos ROADM con dos y tres direcciones, en las figuras 3.4 y 3.5 se presenta los diagramas con las principales tarjetas de los equipos de la capa óptica.

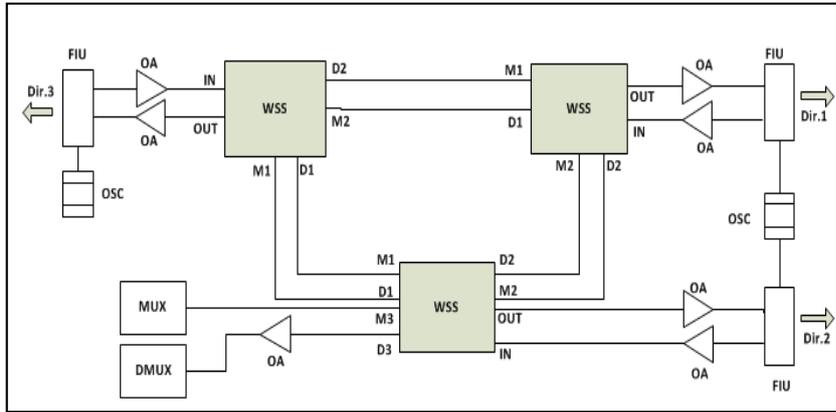


Figura 3. 4 Diagrama de un sistema ROADM con tres direcciones
Fuente: autor

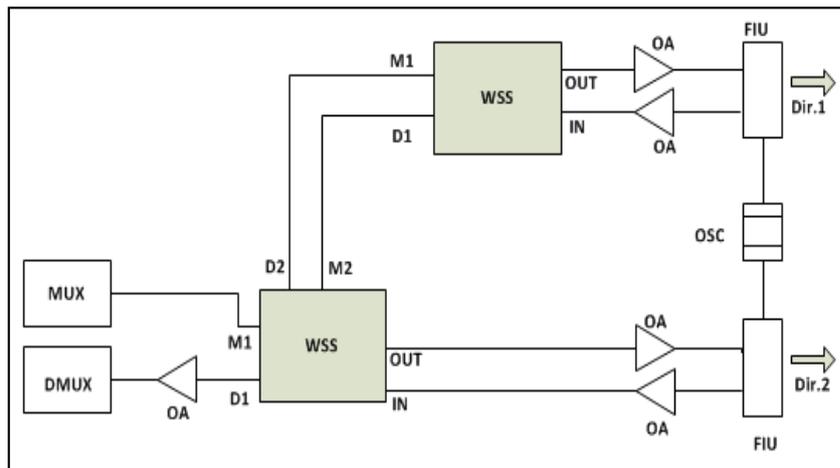


Figura 3. 5 Diagrama de un sistema ROADM con dos direcciones
Fuente: autor

3.6 Selección de elementos pasivos y conexiones de fibras

En la figura 3.6 se puede ver la distribución de los principales elementos en un nodo ROADM, para llevar un esquema de implementación que facilite la revisión de fallos en los distintos elementos se han distribuido los equipos de la capa óptica en un bastidor cerrado y en otro el de la eléctrica y los ODF (Optical Distribution Frame) en un bastidor abierto.

Las tarjetas de los equipos ópticos, amplificadores, mux/demux, tarjeta de arreglos de multiplexación y multiplexación (WSS, Wavelength Selective Switch), tarjetas de línea FIU y del canal de supervisión óptico, se interconectan entre sí mediante patchcord de fibra G.657 A2 dentro del mismo bastidor, se maneja esta consideración para evitar la atenuación al pasar por acopladores ópticos.

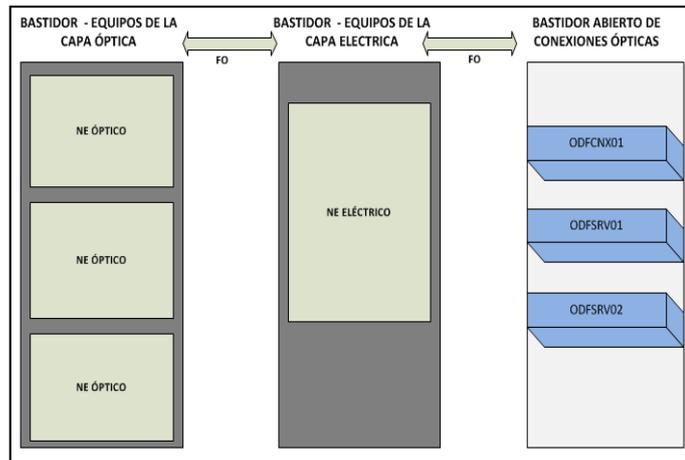


Figura 3. 6 Esquema de conexión de los equipos DWDM y los elementos pasivos
Fuente: Autor.

La conexión entre las tarjetas transpondedoras instaladas en el equipo eléctrico y las multiplexoras y demultiplexoras de la capa óptica también tendrán una conexión directa con patchcord G.657 A2 simplex con conectores LC-LC, también se recomienda esta conexión para evitar la atenuación causada por los acoples de fibra óptica.

Dentro de la capa óptica, también se puede instalar tarjetas que funcionan como conmutadores ópticos para determinado tipo de protección, con ausencia o diferencia de señal de 5 dB entre dos puertos, estas protecciones se pueden manejar para los canales ópticos o para los servicios que maneja el cliente, para interconectar los puertos antes indicados se utiliza el ODF de conexión ODFCNX01, que permitirá llevar un orden de conexión y facilitar la revisión en caso de problemas de atenuación revisados desde gestión.

Para la conexión de las tarjetas de servicio instaladas en el equipo eléctrico, es decir los puertos de esta últimas, deberán ir conectadas a los equipos de los clientes: ETH, SDH, servidores de almacenamiento u otros equipos de red que van a transportarse por la red DWDM a través de los ODF de servicio, ODFSRV01 y ODFSRV02, cada uno de estos tiene acoples dúplex LC-LC, es decir por una cara ingresan los patchcord de las tarjetas de servicio y por el otro lado ingresan los patchcord de los clientes de la red DWDM.

Las conexiones entre los distintos bastidores mediante los patchcord de fibra G.657 A2 se instalarán por fiber runners, y los sobrantes deben organizarse en el bastidor abierto, la correcta instalación del cableado interno facilitará su revisión y un crecimiento ordenado en las conexiones de los nodos ROADM.

3.7 Tipos de protecciones y configuraciones

Las protecciones por configurarse en la red DWDM propuesta en este proyecto, se realizan en el plano tradicional y ASON y deben ser capaces de aumentar la disponibilidad del servicio frente a eventos fortuitos en la red y también cuando se tiene falla de hardware en las tarjetas transpondedoras, de servicio u otras que forman parte del sistema DWDM en una dirección determinada.

En la tabla 3.3 se aprecia un resumen de las protecciones que se van a configurar.

Tabla 3. 11 Tipos de protecciones de la Red

Nivel de protección	Tipos de Protecciones
Nivel de Tarjeta	Intra board 1+1 OLP Client 1+1 Board 1+1
Nivel de red	ODU-k SNC/N ASON: Silver, Diamond, Gold, Copper (óptico y eléctrico).

Fuente: Autor

3.8 Dimensionamiento de NE-ID e IP

En este proyecto se tienen 5 nodos, en cada nodo ROADM se tiene los equipos de la capa eléctrica y óptica, para que cada uno sea administrable de manera local y mediante el servidor de gestión remota, es necesario que maneje un identificador en la red, que permitirá distinguir al elemento de red como único dentro de la topología, además la IP asignada permitirá el ingreso local a cada equipo mediante el software de gestión local.

Cada elemento de red manejará una NE-ID específica, sin embargo, solos equipos principales de las capas óptica y eléctrica manejarán una conexión TCP/IP, es decir tendrán configurada una IP local. También es importante definir dos gateways dentro de la red, estos últimos equipos tendrán conexión directa con el servidor de gestión mediante conexión TCP/IP, la necesidad de contar con estos es que en caso de que falle el principal, los equipos puedan conmutar al de backup y así asegurar que no se pierda gestión de ningún elemento de red.

En la siguiente tabla se observa el direccionamiento IP e identificaciones de NE-ID de cada equipo, los que trabajarán como gateways serán los ADM ubicados en el nodo 1 y 5.

Tabla 3. 12 Direccionamiento NE ID e IP

NODOS	ID	IP	Tipo de elemento
Nodo 1	20-101	172.20.1.4/24	Gateway
	20-104	172.20.1.5/24	Gateway
Nodo 2	20-105	172.20.1.8/24	No Gateway
	20-108	172.20.1.9/24	No Gateway
Nodo 3	20-109	172.20.1.14/24	No Gateway
	20-113	172.20.1.15/24	No Gateway
Nodo 4	20-114	172.20.1.19/24	No Gateway
	20-118	172.20.1.20/24	No Gateway
Nodo 5	20-119	172.20.1.24/24	Gateway
	20-123	172.20.1.25/24	Gateway

Fuente: Autor

3.9 Balance de potencias ópticas

Es el cálculo de todas las pérdidas y ganancias de todo el enlace, desde el transmisor de la unidad transpondedor óptica del nodo origen hasta el receptor de la OTU del destino.

Para el cálculo se consideran todas las pérdidas de los conectores, patchcord de fibra, empalmes y enlace de fibra óptica, además las de inserción de las tarjetas de los equipos ópticos, multiplexores, demultiplexores, WSS, entre otras, también es necesario considerar la ganancia de los amplificadores utilizados.

Para establecer el total de pérdidas es necesario tomar en consideración la conexión indicada en la figura 3. 6, donde se debe tener presente la pérdida de los acoples en los ODF y los patchcord de fibra óptica que interconectan la tarjeta de interfaz FIU y el enlace de fibra óptica.

Por lo tanto la atenuación total del enlace entre tarjetas FIU, denominada A_{te} (dB), sería igual a la atenuación de la fibra (A_t) considerada en la tabla 3. 1, mas la de dos acoples (A) y la pérdida de los patchcord (P) de fibra que interconectan la tarjeta FIU al ODF de la fibra óptica de línea que va a la calle, con esto resulta la siguiente ecuación:

$$A_{te}(dB) = A_t(dB) + A*0,25(dB) + P*0,3(dB)$$

De acuerdo a la topología planteada, la distancia mayor es la considerada entre los Nodos 3 y 5, calculado la atenuación total se tiene:

$$Ate(dB) = 8,7 \text{ dB} + 2*0,25(dB) + 2*0,3(dB)$$

$$Ate(dB) = 9,8 \text{ dB}$$

Para proceder con el calculo de presupuesto total de potencia, es necesario conocer la pérdida de inserción en las tarjetas ópticas, la ganancia de los amplificadores, los valores de potencia de transmisión y sensibilidad de recepción en los amplificadores y unidades transpondedoras ópticas, para esto se toma como referencia los valores indicados en la tabla 3. 5, el valor de ganancia maxima del amplificador es 36 dB, sin embargo, en la práctica por experiencia del investigador se configuran ganancias de 29 dB.

Tabla 3. 13 Características comunes de los equipos ópticos

Parámetro	Valor
Rango de potencia de transmisión del transponder (P_{TX})	-5 a - 0dBm
Sensibilidad del receptor (PS)	- 16 dBm
Potencia de sobrecarga del receptor (P_{OVL})	0 dBm
Pérdida del multiplexor (P_{MUX})	-8 dB
Pérdida del interleaver (P_{ITL})	-3 dB
Pérdida del WSS (P_{WSS})	-8 dB
Pérdida de la tarjeta de interfaz de fibra FIU (P_{FIU})	-1 dB
Amplificador booster TN130AU103	
Ganancia nominal del amplificador booster EDFA (G_{OA})	36 dB
Rango de potencia de entrada del amplificador booster EDFA	-32 a -16 dBm
Potencia de salida máxima del amplificador booster EDFA ($P_{OUT MAX OA}$)	20 dBm
Figura de ruido del amplificador booster EDFA (NF)	5,5 dB

Fuente: (Sánchez, 2018)

Una vez considerados todos los parámetros de potencia y pérdidas en cada elemento, es posible realizar el cálculo en cada uno de los escenarios planteados en dependencia del diagrama óptico diseñado.

Escenario 1:

Se considera la conexión directa de los multiplexores y demultiplexores a la tarjeta WSS, que conecta a los amplificadores que direccionan el enlace DWDM a las salidas de la fibra óptica.

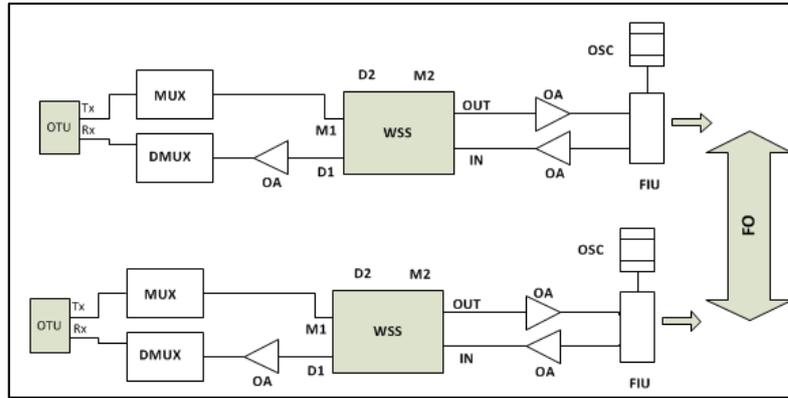


Figura 3. 7 Diagrama de conexión de escenario 1 de un sistema ROADM
Fuente: autor

Lado de transmisión:

Para el cálculo se considera las potencias de transmisión mínima de la OTU ($P_{tx_{OTU}}$) de -5 dBm y de entrada de -32 dBm y que la atenuación es de $0,3$ dB en cada patchcord de G.657 B2 que interconecta las distintas tarjetas, el número de conectores se representa con P .

Primero se calcula la potencia de ingreso al amplificador ($P_{i_{OA}}$) con la siguiente ecuación:

$$P_{i_{OA}} = P_{tx_{OTU}} - At_{MUX} - At_{WSS} - 0,3 * P$$

$$P_{i_{OA}} = -5 \text{ dBm} - 8 \text{ dB} - 8 \text{ dB} - 0,3 * 3(\text{dB})$$

$$P_{i_{OA}} = -21.9 \text{ dBm}$$

El valor calculado se encuentra dentro del rango de operación de -32 dBm a -16 dBm, sin embargo, en la práctica los valores de transmisión del OTU es de 0 dBm, considerando el último valor de potencia, la de ingreso al amplificador es de $-16,9$ dBm y también se encuentra dentro del rango del amplificador de sensibilidad.

Tomando como referencia la ganancia del amplificador (G) de 29 dB, se calcula la potencia de salida del amplificador ($P_{out_{OA}}$).

$$P_{out_{OA}} = P_{i_{OA}} + G$$

$$P_{out_{OA}} = -21.9 \text{ dBm} + 29 \text{ dB}$$

$$P_{out_{OA}} = 7.1 \text{ dBm}$$

Para calcular la potencia de salida de la tarjeta FIU del lado de transmisión, se considera la atenuación de inserción y la pérdida del patchcord con lo cual se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_{out_{FIU}} = P_{out_{OA}} - A_{t_{FIU}} - 0,3 \text{ dB}$$

$$P_{out_{FIU}} = 7.1 \text{ dBm} - 1 \text{ dB} - 0,3 \text{ dB}$$

$$P_{out_{FIU}} = 5.8 \text{ dBm}$$

Lado de recepción:

Para el cálculo de la potencia de recepción de la OTU se considera los valores de pérdidas de inserción consideradas anteriormente en el lado de transmisión y la atenuación total entre FIU de origen y destino que es 9.8 dB

$$P_{i_{FIU}} = P_{out_{FIU}} - A_{te}$$

$$P_{i_{FIU}} = 5.8 \text{ dBm} - 9,8 \text{ dB}$$

$$P_{i_{FIU}} = -4 \text{ dBm}$$

Para el cálculo de la potencia de ingreso al amplificador uno, se utiliza la de llegada al amplificador y se resta las pérdidas en la tarjeta FIU y el patchcord, con lo cual se tiene:

$$P_{i_{OA}} = P_{i_{FIUOTU}} - A_{t_{FIU}} - 0,3 \text{ dB}$$

$$P_{i_{OA}} = -4 \text{ dBm} - 1 \text{ dB} - 0,3 \text{ dB}$$

$$P_{i_{OA}} = -5.3 \text{ dBm}$$

La potencia de entrada máxima al amplificador es superior al rango de entrada máxima permitida (-16 dBm), es necesario utilizar un atenuador variable que viene instalado en los amplificadores ópticos, el cual se lo puede configurar desde gestión en un valor de 0 a 23 dB, si se lo hace en 20 dB la entrada del amplificador será de -25.5 dBm y por ende su potencia de salida sería:

$$P_{out_{OA1}} = P_{i_{OA}} + G$$

$$P_{out_{OA1}} = -25.5 \text{ dBm} + 29 \text{ dB}$$

$$P_{out_{OA1}} = 3.5 \text{ dBm}$$

La potencia de ingreso al amplificador dos sería:

$$P_{i_{OA2}} = P_{out_{OA1}} - A_{WSS} - 0.3 * 2(\text{dB})$$

$$P_{i_{OA2}} = 3.5 \text{ dBm} - 8 \text{ dB} - 0.6 \text{ dB}$$

$$P_{i_{OA2}} = -5.1 \text{ dBm}$$

Este valor de potencia también se encuentra fuera del rango normal de operación de recepción del amplificador, se asigna a la entrada una atenuación de 20 dB, se obtiene una potencia de ingreso de -25.5 dBm.

A continuación, se calcula la potencia de salida del amplificador dos, obteniendo lo siguiente:

$$P_{out_{OA2}} = P_{i_{OA2}} + G$$

$$P_{out_{OA2}} = -25.1 \text{ dBm} + 29 \text{ dB}$$

$$P_{out_{OA2}} = 3.9 \text{ dBm}$$

Con el valor de potencia de salida del amplificador se procede a calcular la potencia de ingreso en el receptor de la OTU.

$$Prx_{OTU} = P_{out_{OA2}} - A_{DMUX} - 0.3 \text{ dB}$$

$$Prx_{OTU} = 3.9 \text{ dBm} - 8 \text{ dB} - 0.3 \text{ dB}$$

$$P_{out_{OA1}} = -4.4 \text{ dBm}$$

El valor de -4.4 dBm se encuentra dentro del rango de sensibilidad que es -16 dBm, sin embargo, en los cálculos ópticos es necesario dejar un valor de 3 dB de tolerancia frente a posibles atenuaciones fortuitas en los enlaces de fibra óptica, con lo cual el valor recomendado de recepción sería -13 dBm, que para este escenario se encuentra dentro del valor adecuado.

Escenario 2:

En el escenario 2, se considera la conexión directa de los multiplexores y demultiplexores a la tarjeta WSS que conecta a los amplificadores que direccionan el enlace DWDM a las salidas de la fibra óptica y en el nodo destino se considera el arreglo de dos tarjetas WSS, como se indica en la figura 3.8.

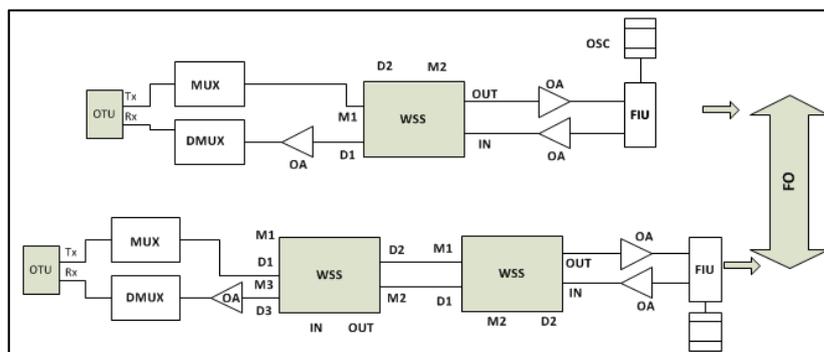


Figura 3. 8 Diagrama de conexión del escenario 2 de un sistema ROADM
Fuente: autor

Lado de transmisión:

Para el lado de la transmisión se tiene el mismo caso del escenario 1, por ende, para calcular la potencia de salida de la tarjeta FIU se considera la atenuación de inserción y la pérdida del patchcord con lo cual se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_{out_{FIU}} = P_{out_{OA}} - At_{FIU} - 0,3 \text{ dB}$$

$$P_{out_{FIU}} = 7.1 \text{ dBm} - 1 \text{ dB} - 0,3 \text{ dB}$$

$$P_{out_{FIU}} = 5.8 \text{ dBm}$$

Lado de recepción:

Para el cálculo de la potencia de recepción de la OTU se considera las pérdidas de inserción consideradas anteriormente en el lado de transmisión y la atenuación total desde FIU de origen al de destino que es 9.8 dB

$$P_{i_{FIU}} = P_{out_{FIU}} - Ate$$

$$P_{i_{FIU}} = 5.8 \text{ dBm} - 9,8 \text{ dB}$$

$$P_{i_{FIU}} = -4 \text{ dBm}$$

Para calcular la potencia de ingreso al amplificador uno se utiliza la de llegada al amplificador y se resta las pérdidas en la tarjeta FIU y el patchcord, con lo cual se tiene:

$$P_{i_{OA}} = P_{i_{FIUOTU}} - At_{FIU} - 0,3 \text{ dB}$$

$$P_{i_{OA}} = -4 \text{ dBm} - 1 \text{ dB} - 0,3 \text{ dB}$$

$$P_{i_{OA}} = -5.3 \text{ dBm}$$

La potencia de entrada máxima al amplificador es superior al rango de entrada máxima permitida (-16 dBm), como en el escenario 1, se configura el atenuador variable en 20 dB obteniendo en la entrada del amplificador el valor de -25.5 dBm y por ende la potencia de salida del amplificador quedaría:

$$P_{out_{OA1}} = P_{i_{OA}} + G$$

$$P_{out_{OA1}} = -25.5 \text{ dBm} + 29 \text{ dB}$$

$$P_{out_{OA1}} = 3.5 \text{ dBm}$$

La potencia de ingreso al amplificador dos sería:

$$P_{i_{OA2}} = P_{out_{OA1}} - A_{WSS1} - A_{WSS1} - 0.3 * 2(dB)$$

$$P_{i_{OA2}} = 3.5 \text{ dBm} - 8 \text{ dB} - 8 \text{ dB} - 0.6 \text{ dB}$$

$$P_{i_{OA2}} = -13.1 \text{ dBm}$$

Este valor de potencia también se encuentra fuera del rango normal de operación de la recepción del amplificador, por lo cual se asigna a la entrada una atenuación de 15 dB, consiguiendo una potencia de ingreso de -28.1 dBm.

A continuación, se calcula la potencia de salida del amplificador dos, obteniendo lo siguiente:

$$P_{out_{OA2}} = P_{i_{OA2}} + G$$

$$P_{out_{OA2}} = -28.1 \text{ dBm} + 29 \text{ dB}$$

$$P_{out_{OA2}} = 0.9 \text{ dBm}$$

Finalmente, con el valor de potencia de salida del amplificador se procede a calcular la potencia de ingreso en el receptor de la OTU.

$$P_{rx_{OTU}} = P_{out_{OA2}} - A_{DMUX} - 0.3 * 2 \text{ dB}$$

$$P_{rx_{OTU}} = 0.9 \text{ dBm} - 8 \text{ dB} - 0.6 \text{ dB}$$

$$P_{out_{OA1}} = -7.7 \text{ dBm}$$

El valor de -7.7 dBm se encuentra dentro del rango de sensibilidad del valor recomendado de recepción (0 dBm a -13 dBm).

Escenario 3:

En el siguiente escenario se ve que la señal procedente de las tarjetas OTU para ser enviada por la dirección correspondiente pasa por un arreglo de dos tarjetas WSS.

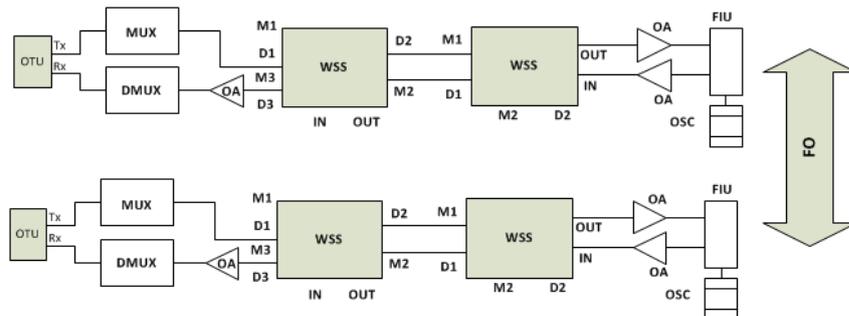


Figura 3. 9 Diagrama de conexión del escenario 3 de un sistema ROADM

Fuente: autor

Lado de transmisión:

Se considera las mismas características y parámetros técnicos de los escenarios anteriores. Primero se calcula la potencia de ingreso al amplificador (Pi_{OA}) con la siguiente ecuación:

$$Pi_{OA} = Ptx_{OTU} - At_{MUX} - At_{WSS1} - At_{WSS2} - 0,3 * P$$

$$Pi_{OA} = -5 \text{ dBm} - 8 \text{ dB} - 8 \text{ dB} - 8 \text{ dB} - 0,3 * 3(\text{dB})$$

$$Pi_{OA} = -29.9 \text{ dBm}$$

El valor calculado se encuentra dentro del rango de operación de -32 dBm a -16 dBm, sin embargo, como ya se indicó, en la práctica los valores de transmisión del OTU es de 0 dBm, si se considera el último valor de potencia de transmisión, la de ingreso al amplificador es de -24,9 dBm la cual también se encuentra dentro del rango del amplificador de sensibilidad.

Tomando como referencia la ganancia del amplificador (G) que es de 29 dB, se calcula la potencia de salida del amplificador ($Pout_{OA}$).

$$Pout_{OA} = Pi_{OA} + G$$

$$Pout_{OA} = -24.9 \text{ dBm} + 29 \text{ dB}$$

$$Pout_{OA} = 4.1 \text{ dBm}$$

Para calcular la potencia de salida de la tarjeta FIU del lado de transmisión se considera la atenuación de inserción y la pérdida del patchcord con lo cual se obtiene la siguiente ecuación:

$$Pout_{FIU} = Pout_{OA} - At_{FIU} - 0,3 \text{ dB}$$

$$Pout_{FIU} = 4.1 \text{ dBm} - 1 \text{ dB} - 0,3 \text{ dB}$$

$$Pout_{FIU} = 2.8 \text{ dBm}$$

En el cálculo de la potencia de recepción de la OTU se considera las pérdidas de inserción consideradas anteriormente en el lado de transmisión y la atenuación total desde FIU de origen al de destino que es 9.8 dB

$$Pi_{FIU} = Pout_{FIU} - Ate$$

$$Pi_{FIU} = 2.8 \text{ dBm} - 9,8 \text{ dB}$$

$$P_{i_{FIU}} = -7 \text{ dBm}$$

Para el cálculo de la potencia de ingreso al amplificador uno se utiliza la potencia de llegada al amplificador y se resta la pérdida en la tarjeta FIU y del patchcord con lo cual se tiene:

$$P_{i_{OA}} = P_{i_{FIU}} - A_{t_{FIU}} - 0,3 \text{ dB}$$

$$P_{i_{OA}} = -7 \text{ dBm} - 1 \text{ dB} - 0,3 \text{ dB}$$

$$P_{i_{OA}} = -8.3 \text{ dBm}$$

La potencia de entrada al amplificador es superior al rango de entrada máxima permitida (-16 dBm), para este caso se configura en 17 dB y se obtendría en el ingreso del amplificador -25.3 dBm y por ende la potencia de salida quedaría:

$$P_{out_{OA1}} = P_{i_{OA}} + G$$

$$P_{out_{OA1}} = -25.3 \text{ dBm} + 29 \text{ dB}$$

$$P_{out_{OA1}} = 3.7 \text{ dBm}$$

La potencia de ingreso al amplificador dos sería:

$$P_{i_{OA2}} = P_{out_{OA1}} - A_{WSS1} - A_{WSS2} - 0.3 * 3(\text{dB})$$

$$P_{i_{OA2}} = 3.7 \text{ dBm} - 8 \text{ dB} - 8 \text{ dB} - 0.9 \text{ dB}$$

$$P_{i_{OA2}} = -13.2 \text{ dBm}$$

Este valor de potencia también se encuentra fuera del rango normal de operación de la recepción del amplificador (-16 a -32 dBm), por lo cual se asigna al ingreso una atenuación de 15 dB, consiguiendo una potencia de entrada de -28.2 dBm.

A continuación, se calcula la potencia de salida del amplificador dos, obteniendo lo siguiente:

$$P_{out_{OA2}} = P_{i_{OA2}} + G$$

$$P_{out_{OA2}} = -28.2 \text{ dBm} + 29 \text{ dB}$$

$$P_{out_{OA2}} = 0.8 \text{ dBm}$$

Finalmente, con el valor de potencia de salida del amplificador se procede a calcular la potencia de ingreso en el receptor de la OTU.

$$Prx_{OTU} = Pout_{OA2} - A_{DMUX} - 0.3 * 2 \text{ dB}$$

$$Prx_{OTU} = 0.8 \text{ dBm} - 8 \text{ dB} - 0.6 \text{ dB}$$

$$Pout_{OA1} = -7.8 \text{ dBm}$$

El valor de -7.8 dBm se encuentra dentro del rango de sensibilidad del valor recomendado de recepción (0 dBm a -13 dBm).

3.10 Simulación de los parámetros ópticos en Optisystem en dependencia del arreglo óptico.

Para la simulación, se considera el tercer escenario de estudio, porque presenta la mayor cantidad de tarjetas WSS que insertan más atenuación y ruido al sistema.

Primero se define el transmisor de la tarjeta OTU de origen, que debe tener modulación DP-16QAM y el nivel de potencia de emisión debe ser de -5 dBm a 5 dBm, para este caso se utiliza el siguiente elemento transmisor del Optisystem 17.

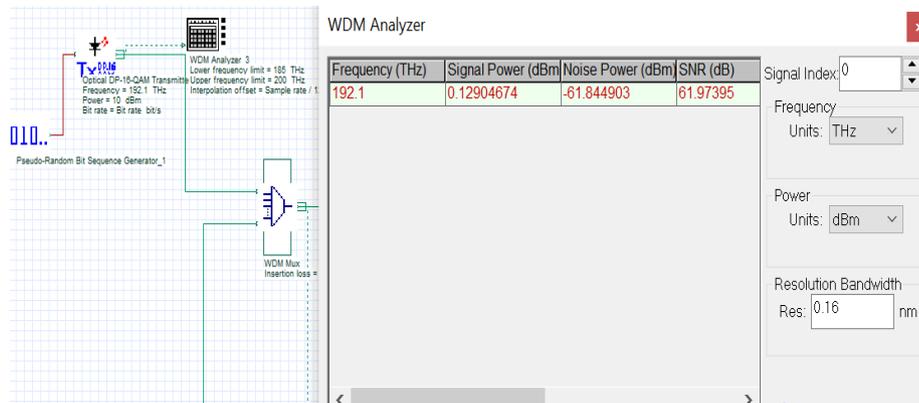


Figura 3. 10 OTU origen definido en Optisystem.
Fuente: autor

Se puede observar en la figura 3.10 que la potencia seteada en el transmisor es de 10 dBm, sin embargo, se debe considerar que para obtener un modulador 16QAM es necesario un arreglo de componentes, donde se debe configurar una fuente laser, de tal forma que esta potencia visualizada es la del láser, según el siguiente diagrama, es decir con una potencia de 10 dBm en el láser, la potencia de salida del transmisor coherente será aproximadamente igual a 0 dBm.

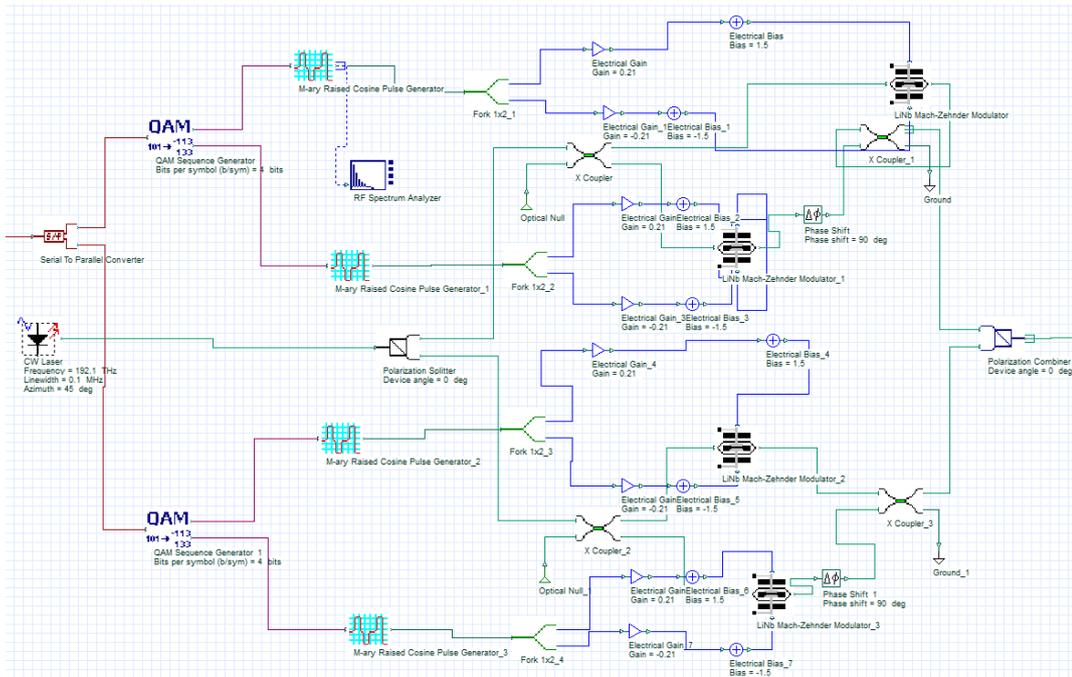


Figura 3. 11 Esquema del transmisor 16 QAM.

Fuente: autor

Una vez definido el transmisor, es necesario precisar el esquema general de simulación, considerando los valores que se necesitan configurar de pérdidas y ganancias a los amplificadores, con lo cual se obtiene el siguiente diagrama:

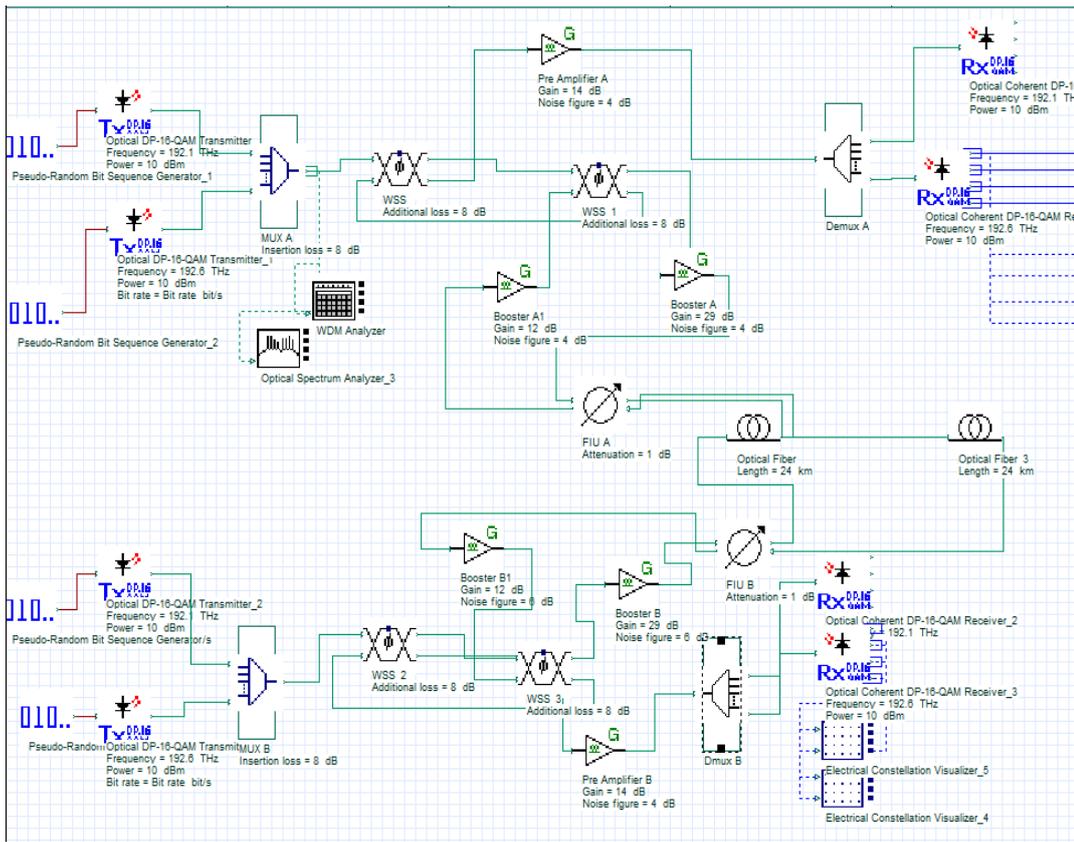


Figura 3. 12 Esquema de modulación definido en Optisystem.

Fuente: autor

Una vez detectada la señal en cada receptor coherente (DP-16 QAM), es necesario realizar el procesamiento y conversión de datos a una salida digital de bits, lo cual se puede obtener mediante el siguiente diagrama:

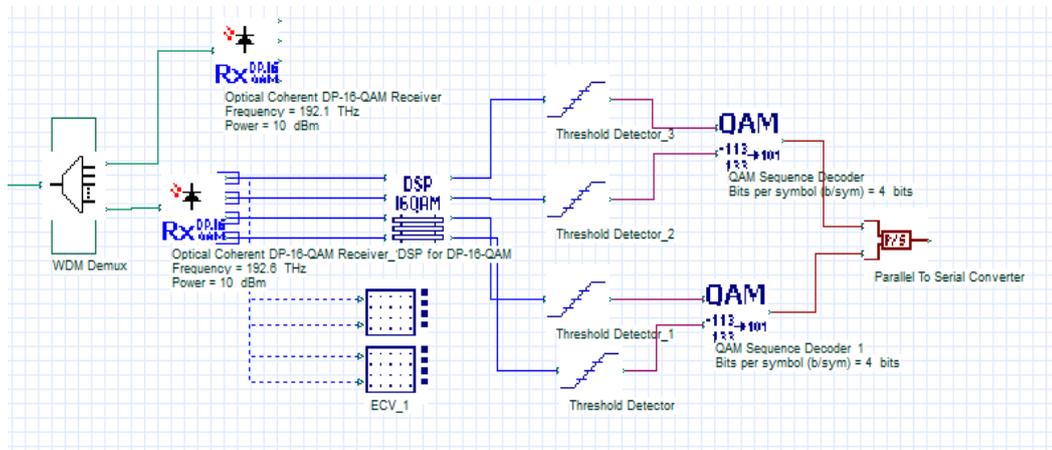


Figura 3. 13 Tratamiento de la señal en el receptor Coherente.
Fuente: autor

Mediante la simulación de los diagramas de red antes indicados, es posible obtener la relación señal ruido y los valores de potencia y pérdidas insertadas por los distintos componentes y elementos que intervienen en el diseño del sistema DWDM propuesto en este proyecto de investigación.

3.11 Selección de los proveedores de equipos de los proveedores DWDM

Los equipos seleccionados deben cumplir con los requerimientos de diseño del presente proyecto, los cuales se indican a continuación.

- Manejo de FlexGrid, para permitir la coexistencia con lambdas menores a 400 Gbps.
- Tarjetas transpondedoras que manejen modulación coherente.
- Disponibilidad de distintas protecciones de red indicadas en la tabla 3. 3
- Tarjetas de servicio con funcionalidad OTN, para encapsular los distintos tipos de servicio indicados en la tabla 3. 2
- Tarjetas WSS con funcionalidad de manejar hasta 8 direcciones ópticas.
- Amplificadores EDFA con ganancias, rango de sensibilidad indicado en la sección anterior y atenuadora ópticos variables.

- Tarjetas multiplexoras y demultiplexoras con capacidad de manejar 48 lambdas o más.
- Sistema de gestión para la fácil operación, mantenimiento y detección de fallos en la red.
- Manejo de tarjetas analizadoras de espectro para la visualización de las potencias individuales de los canales ópticos al pasar por un amplificador u otra tarjeta óptica.
- Manejo de distintas lambdas con espaciamentos distintos en dependencia de la capacidad del canal óptico.
- Crecimiento a mayor velocidad del canal de luz, manteniendo la capa óptica.
- Analizadores de espectro y OSNR de cada lambda individual al pasar por un amplificador específico.

HUAWEI:

El fabricante Huawei presenta soluciones con equipos que permiten manejar las capas óptica y eléctrica DWDM por separado, de acuerdo con los estándares, de OTN permiten el mapeo de distintos servicios y protecciones de red. Este proveedor presenta la plataforma Optix OSN 9800, las cuales se presentan como plataformas OTN inteligentes y de alta capacidad, según las especificaciones técnicas de la tabla 3.6, puede configurarse diversidad de servicios con lambdas de 100G, 200G y 400G, las mismas que se pueden ampliar a 1T.

Tabla 3. 14 Especificaciones de Plataforma OSN 9800

Parámetros	OSN 9800 UPS	OSN 9800 M12	OSN 9800 M24	OSN 9800 U32 Enhance d
Dimensiones (altura x ancho x profundidad, en mm)	397 x 442 x 291	347.2 x 442 x 295	442 x 295 x 747.2	1900 x 498 x 295
Ranuras de servicio	16	13	24	32
Tipo de cros conexión	N/A	N/A	ODUk/PKT/ VC	ODUk/PK T/VC
Capacidad de cros conexión	N/A	N/A	Modo 1:1: 4.8T/2.4T/1.9 2T	32T/6.4T/2 .56T

			Modo 1:3:10T/2T/1. 6T	
Espaciamiento entre canales	Red fija de 100 GHz para 40 u 48 longitudes de onda			
	Red fija de 50 GHz para 80 u 96 longitudes de onda			
	Red flexible de 37.5 GHz a 400 GHz			
Velocidad por canal (máximo)	100G/200G/400G	100G/200G	100G/200G/400G/600G	
Servicios	SDH/SONET, Ethernet, SAN, OTN, vídeo			
Protecciones de servicios	ODUk SNC/N, ASON, OLP, Client 1+1			
Protecciones de controladora y crosconectora	1+1	1+1	1+1	1+1
Rango de longitudes de onda	DWDM: 1529.16 nm a 1560.61 nm (banda C, ITU-T G.694.1)			
Fuente de alimentación	-48 V CC/-60 V CC			

Fuente: (Huawei Technologies Co., Ltd, 2020)

En la figura 3.14, se observa los principales equipos de la serie Optix 9800, el 9800 UPS maneja la capa óptica DWDM, mientras los equipos Optix OSN9800 U/16/32, M12/M24, se encargan del procesamiento de los servicios en la capa eléctrica DWDM.

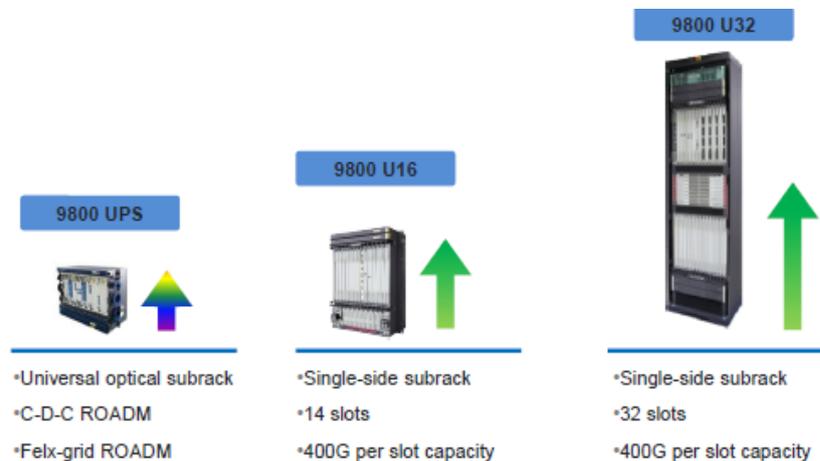


Figura 3. 14 Equipos de la plataforma Optix 9800

Fuente: (Huawei Technologies Co., Ltd, 2020)

NOKIA:

Este proveedor ofrece una cartera de conmutadores de servicio fotónico (PSS, Photonic Service Switching), para diversos escenarios de despliegue de redes ópticas, que van desde la conexión de centros de datos hasta redes multiservicio de corta y larga distancia.

En la figura 3.15 se aprecian los principales equipos presentados por Nokia, para el despliegue de las redes DWDM.

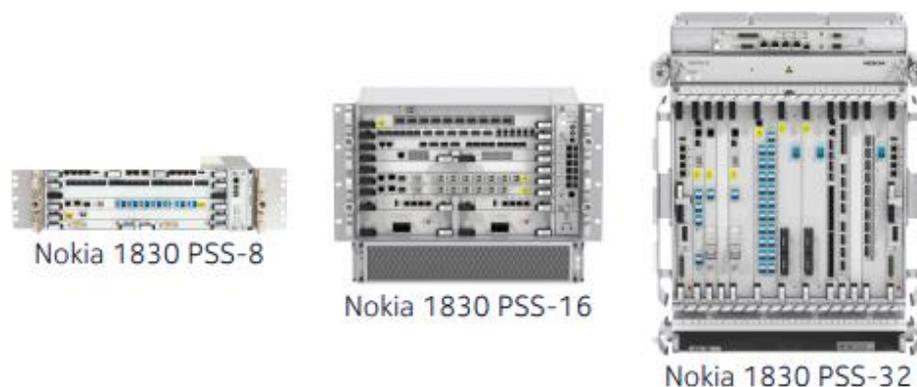


Figura 3. 15 Equipos de la plataforma 1830 PSS
Fuente: (Nokia, 2020)

Las características técnicas de estos equipos se presentan en la tabla 3.6 a continuación:

Tabla 3. 7 especificaciones de los equipos 1830 PSS

Parámetros	1830 PSS-8	1830 PSS-16	1830 PSS-32
Dimensiones (altura x ancho x profundidad)	133 mm (5.2 in)/ 438.9 mm (17.2 in)/ 325 mm (12.7 in)	DC version: 354.8 mm (13.9 in)/ 440 mm (17.3 in)/ 325 mm (12.7 in) AC version: 399.25 mm (15.64 in)/ 440 mm (17.3 in)/ 325 mm (12.7 in)	622 mm (24.5 in)/ 483 mm(19 in)/ 325 mm (12.7 in)
Ranuras de servicio	8	16	32
Tipo de conexión cruzada	Distributed fabric	Distributed fabric	Card based
Capacidad de conexión cruzada	1.6Tb/s	3.2 Tb/s	6.4 Tb/s
Espaciamiento entre canales	Flex Grid		
Velocidad por canal (máximo)	100G a 600G		
protecciones de servicios	OLP, 1+1 OCH, SNC/N		
protecciones de controladora y crosconectora	1+1	1+1	1+1
Servicios	Ethernet, SAN, OTN, vídeo, IEEE 1588V2		
Rango de longitudes de onda	DWDM: (banda C, ITU-T G.694.1)		
Fuente de alimentación	DC version: 48V DC, 110/220V AC with external converter AC version: 48V DC, 110/220V AC		

Fuente: (Nokia, 2020)

CAPÍTULO 4: ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describen los resultados del diseño planteado para finalmente plantear las conclusiones y recomendaciones a las que se llega a partir del presente trabajo de investigación.

4.1 Arreglo de tarjetas y arquitectura planteada.

En la figura 4.1 se observa el esquema y arquitectura de red resultante para la topología considerada en el presente proyecto, de acuerdo a los cálculos realizados para cada escenario, se pudo comprobar que es factible la implementación, ya que cumple con los requisitos ópticos de las tarjetas activas y el arreglo de las mismas asegura que las atenuaciones insertadas en el sistema sean compensadas correctamente y por ende los niveles de potencia en los amplificadores y en las tarjetas transpondedoras se encuentre dentro del rango normal.

En el caso de los amplificadores, es necesario tener presente la potencia máxima de salida, esto es relevante para evitar que el amplificador entre en saturación, la potencia máxima de salida (P_{max}) es el resultado del sumatorio de todas las potencias individuales de los canales ópticos y deben cumplir con la siguiente consideración:

$$P_{max} = P_{in} + 10 * \text{Log}(N)$$

La consideración anterior especifica que la potencia máxima de salida está en función de la potencia individual (P_{in}) y el número total de longitudes de onda (N) que pasan por el sistema diseñado.

Si se considera que el sistema de transmisión está diseñado para el envío de 48 canales ópticos y de acuerdo con las especificaciones técnicas, la máxima potencia de salida del amplificador es de 20 dBm, se concluye que la de cada canal individual es de 3 dBm y por ende con una ganancia de 29 dB, la máxima potencia de entrada debe ser de -26 dBm y la mínima de -32 dBm. Para asegurar los parámetros ópticos especificados, es necesario que cada amplificador posea un VOA (Variable Optical Attenuators), el cual puede ser configurado desde el centro de gestión.

Todos los amplificadores seleccionados en este proyecto tienen un puerto de monitoreo que debe ir conectado a una tarjeta analizadora de espectro, en la cual se puede ver la potencia de cada canal individual y la relación señal ruido del mismo.

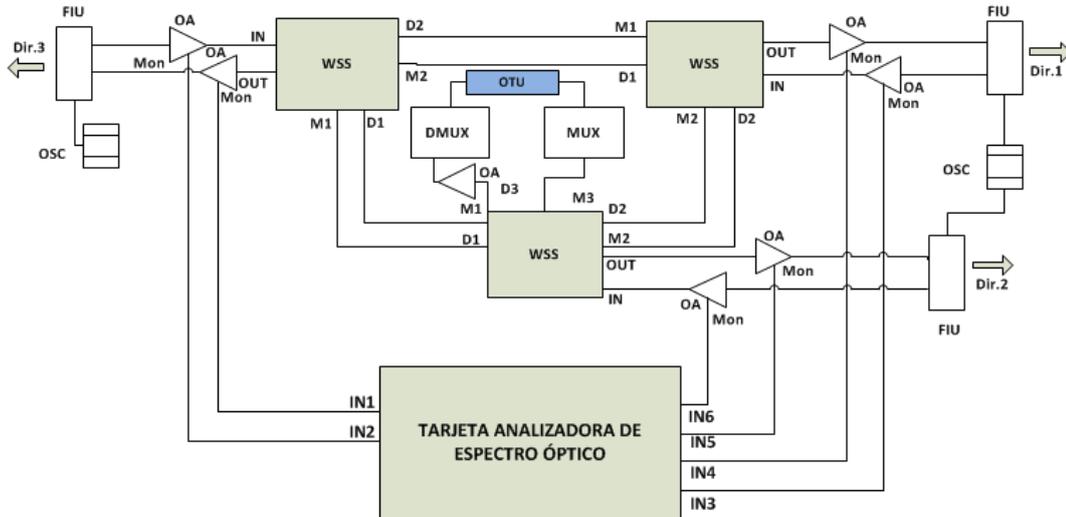


Figura 4. 1 Esquema de conexión completa de un nodo ROADM
Fuente: autor

4.2 Máxima distancia alcanzada por el sistema propuesto

De acuerdo a los cálculos realizados en el capítulo anterior, se pudo verificar que en el escenario 3, que corresponde a la mayor cantidad de tarjetas WSS conectadas en cascada, se tiene la menor potencia de entrada al amplificador del transmisor (-29.9 dBm), para determinar la máxima distancia aproximada de un enlace de fibra óptica entre dos centrales ROADM se considera los valores de sensibilidad de los amplificadores y las pérdidas de las FIU para calcular la pérdida del enlace y despejar la longitud de fibra óptica.

Con las consideraciones antes indicadas se obtiene el diagrama óptico, mostrado en la figura 4.2.

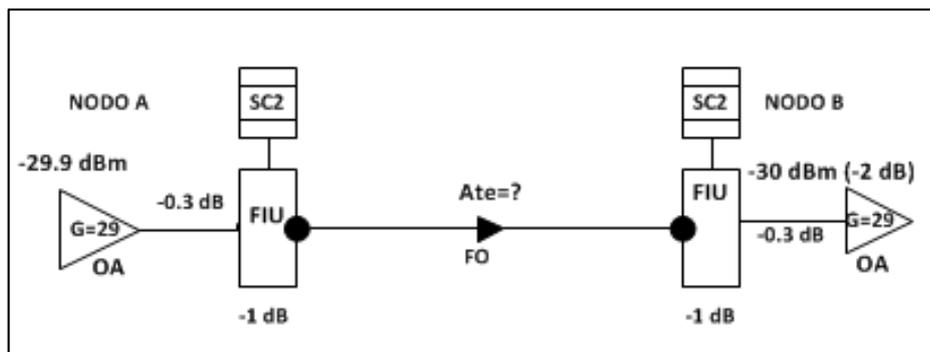


Figura 4. 2 Diagrama de conexión para el cálculo de la máxima distancia
Fuente: autor

La potencia de salida en la FIU de la figura anterior, es -2.2 dBm ($P_{out_{FIUA}}$) y considerando la siguiente ecuación se despeja la atenuación del enlace, además es necesario tener presente que la sensibilidad del amplificador es -32 dBm, sin embargo se deja un margen de 2dB por seguridad ante posibles pérdidas por acoples y empalmes, con lo cual el valor de potencia de sensibilidad será -30 dBm y por ende la potencia de entrada en la FIU B ($P_{i_{FIUB}}$) será -28.7 dBm.

$$P_{i_{FIUB}} = P_{out_{FIUA}} - Ate$$

$$Ate = P_{out_{FIUA}} - P_{i_{FIUB}}$$

$$Ate = 26.5 \text{ dB}$$

Para calcular la distancia total de la fibra se aproxima la atenuación total del enlace y a este valor se disminuye 2dB considerando las pérdidas de patchcords en el nodo A y B, esta consideración es válida tomando en cuenta que en el esquema de la figura 4.2 se dejó 4dB de guarda que compensarían las pérdidas de los empalmes de cada bobina de FO de 4Km.

Finalmente, se define las distancias máximas en dependencia del coeficiente de la fibra óptica, como resultado se comprueba mediante los cálculos matemáticos que se cumple la recomendación de la ITU-T, que indica que los enlaces DWDM pueden alcanzar distancias de alrededor de 80 a 100Km sin necesidad de amplificadores OLA.

Tabla 4. 15 Distancia máxima que pueden alcanzar los enlaces DWDM

Ítem	Coficiente (dB/Km)	Distancia (km)
1	0,35	70
2	0,25	98
3	0,3	81.7

Fuente: Autor

4.3 Resultados de las simulaciones

Se analizan los resultados obtenidos con el diseño planteado, considerando las pérdidas de inserción de cada componente, cabe indicar que en el análisis matemático se consideró una sola longitud de onda, sin embargo, para esta simulación se revisa el comportamiento con dos longitudes de onda, por ende, el valor total a la salida de los amplificadores será igual a la potencia individual más 3 dB.

Las longitudes de onda seleccionadas corresponden a la banda C, se trabajó con 192.1 THz y 192.6 THz.

Para la simulación se obtiene las señales a la salida del multiplexor, como se puede ver en la figura 4.3, se aplicó un filtro óptico para eliminar el ruido generado por el transmisor, pasando la relación señal ruido de 61dB a 91dB.

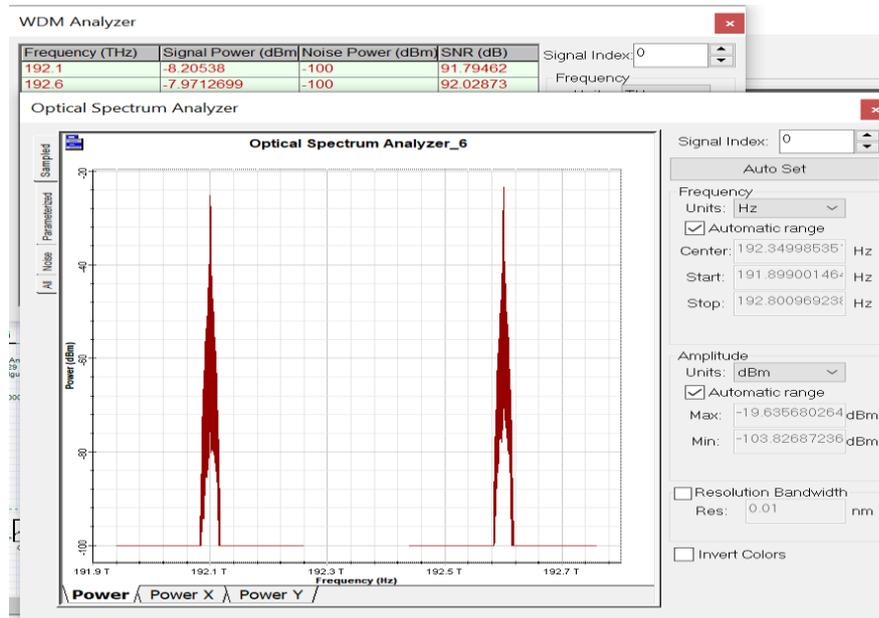


Figura 4. 3 Señales a la salida del demultiplexor del nodo origen.
Fuente: autor

También debe considerarse que en el simulador no es posible asignar una atenuación a los patchcord locales y las pérdidas por fusión de cada bobina de 4 Km, por ende, se asigna a cada tarjeta WSS y MUX/DMUX una pérdida de 8,3 dB y a las FIU una de 2dB, para tener el escenario más real posible y determinar un comportamiento semejante a un escenario real de un sistema DWDM.

Además, debe configurarse los VOA en los amplificadores, por ende, en esta simulación se realiza una reducción en la ganancia. Con todas las consideraciones indicadas se obtienen los siguientes resultados:

En las figuras 4.4 y 4.6 se observa la señal a la entrada y salida del primer amplificador del nodo A (**Booster A**), es decir la señal resultante al pasar por el multiplexor y las dos tarjetas WSS.

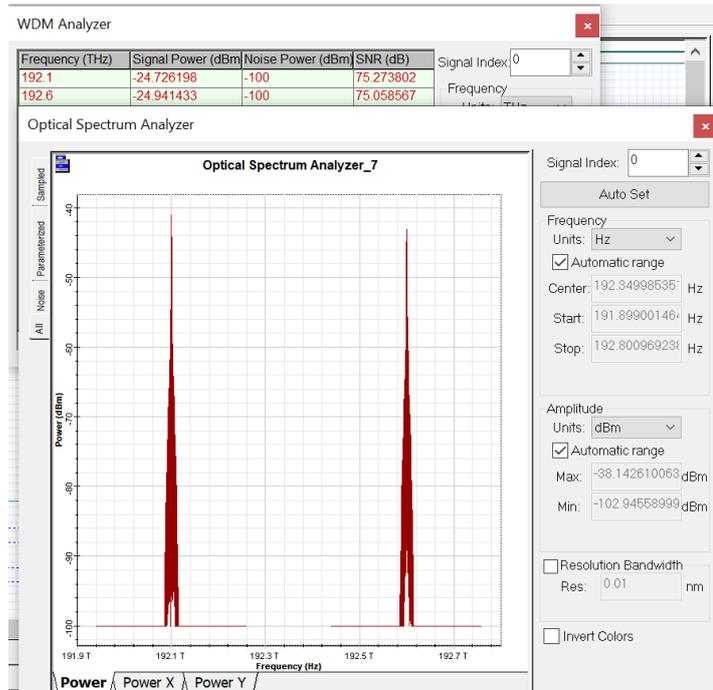


Figura 4. 4 Señal de ingreso al amplificador (Booster A).
Fuente: autor

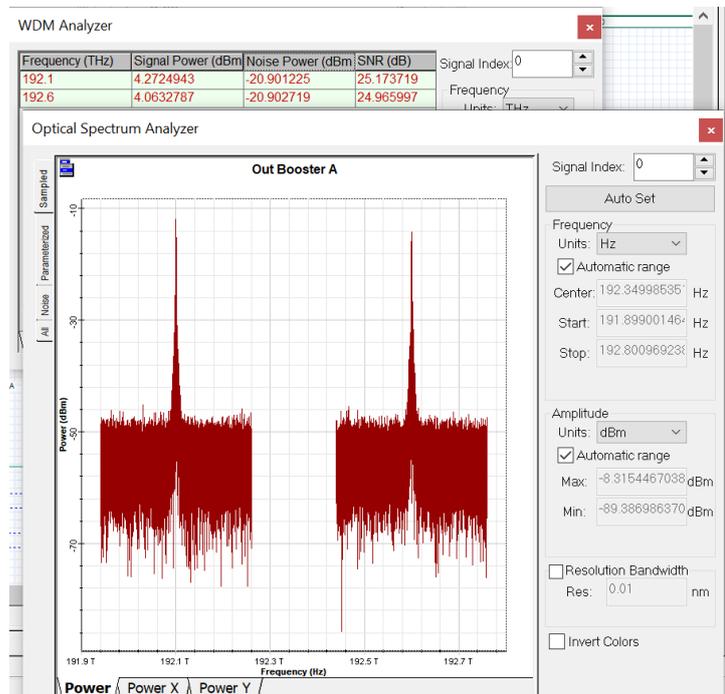


Figura 4. 5 Señal de salida del amplificador (Booster A).
Fuente: autor

A continuación, se revisan las potencias de entrada y salida en el amplificador de llegada del Nodo B, es decir la señal óptica que ingresa al amplificador (**Booster B1**) al pasar por las tarjetas FIU y las pérdidas de fibra óptica, considerando un coeficiente de atenuación de 0,35 dB/Km.

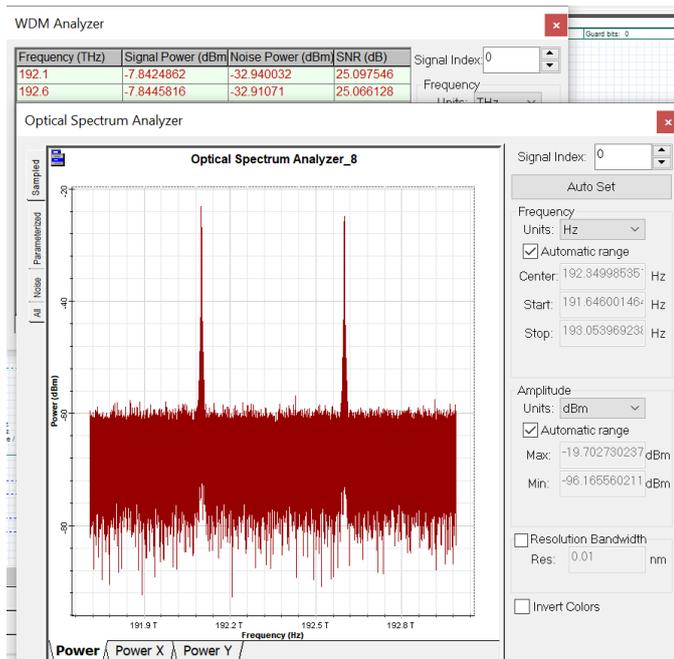


Figura 4. 6 Señal de ingreso del amplificador (Booster B1).
Fuente: autor

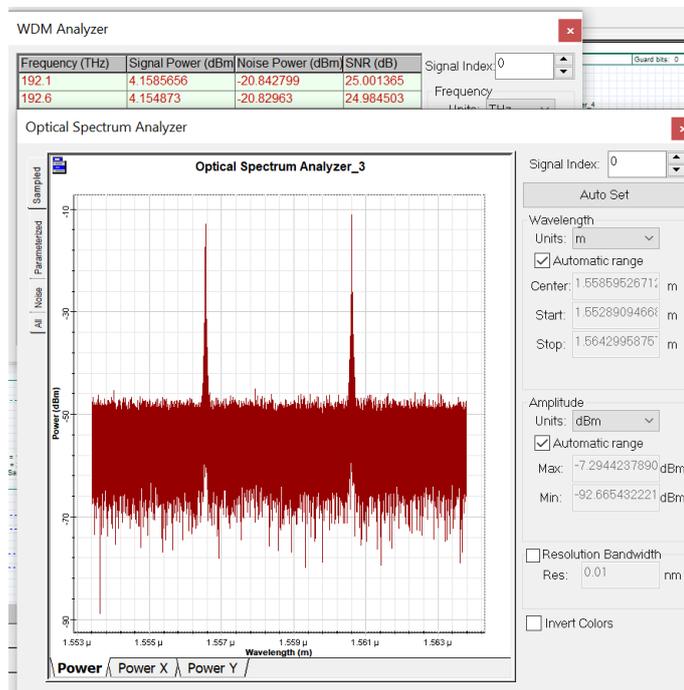


Figura 4. 7 Señal de salida del amplificador (Booster B1).
Fuente: autor

Posteriormente se revisa las señales ópticas en el amplificador de llegada antes del Dmux (**pre amplifier B**), el cual permite compensar las pérdidas locales en el receptor antes del ingreso al demultiplexor, para así asegurar que los valores de potencia de recepción se encuentren dentro del rango normal.

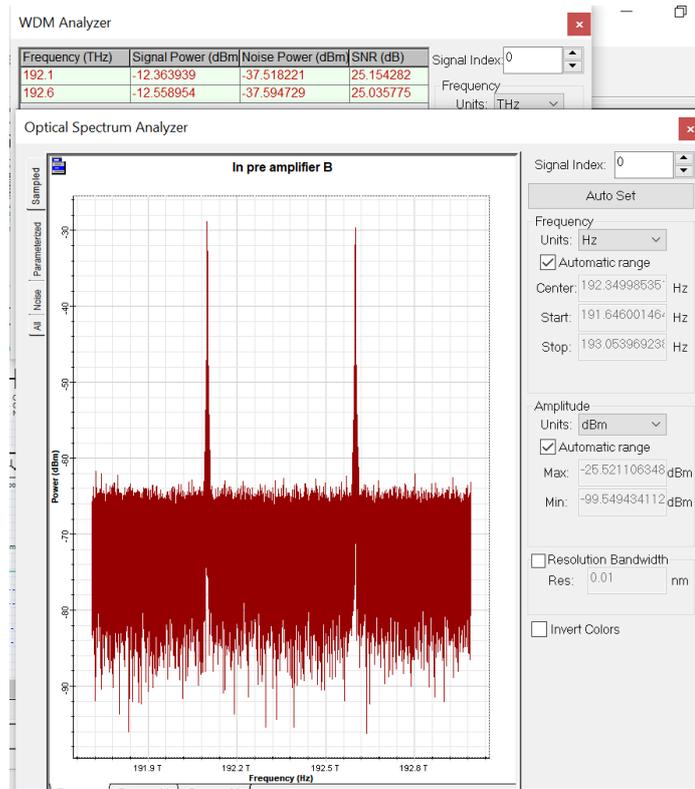


Figura 4. 8 Señal de ingreso del amplificador (pre amplifier B).
Fuente: autor

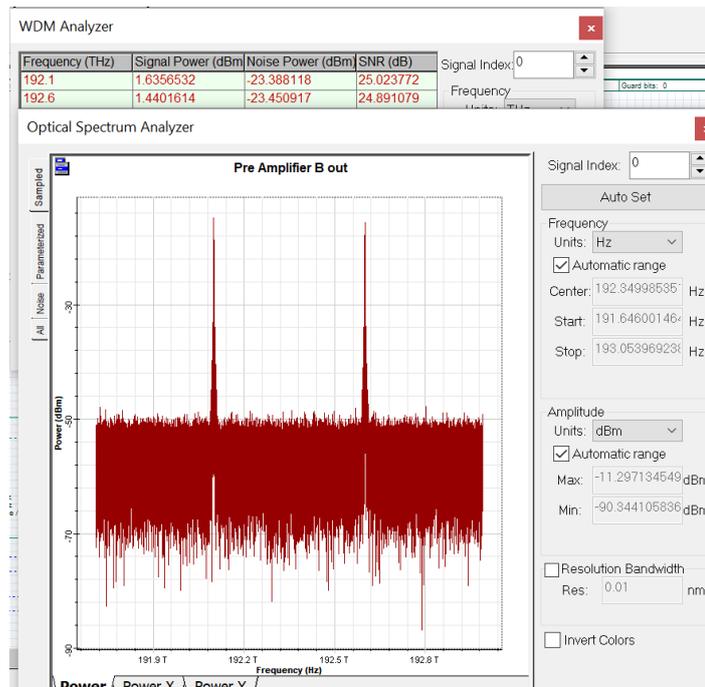


Figura 4. 9 Señal de salida del amplificador (pre amplifier B).
Fuente: autor

Finalmente, se tiene la señal de ingreso al transpondedor después de pasar por el demultiplexor ideal, el valor de potencia es de -6.8 dBm lo cual se encuentra dentro del rango normal de recepción.

Si se analiza la relación señal ruido, es baja, es decir el ruido insertado en el sistema es alto, sin embargo, el mismo se encuentra por arriba del valor mínimo permitido en los sistemas DWDM (mayor a 19 dB).

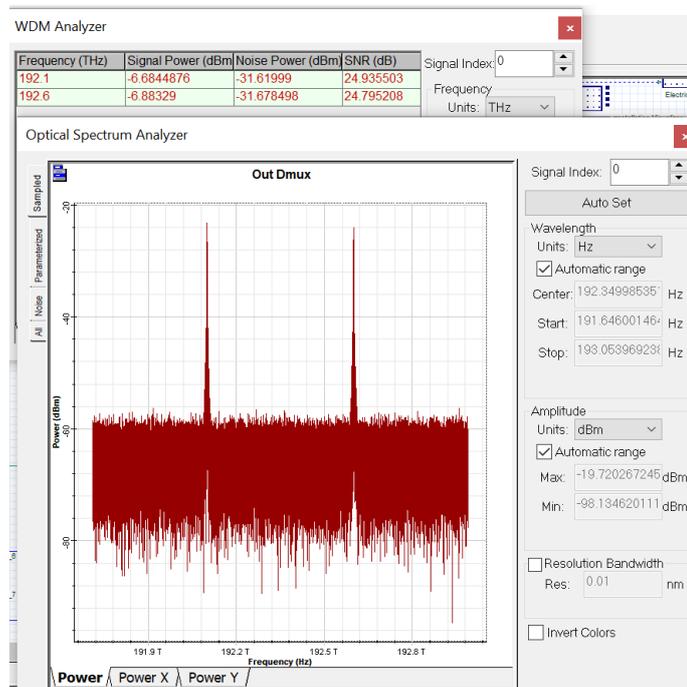


Figura 4. 10 Señal de llegada al transpondedor de nodo destino.

Fuente: autor

La relación señal ruido del receptor es de 24,9 dB, si para este valor se grafica la constelación en el plano eléctrico se observa como la presencia del ruido distorsiona la señal de llegada, lo antes indicado se puede apreciar en la figura 4.11.

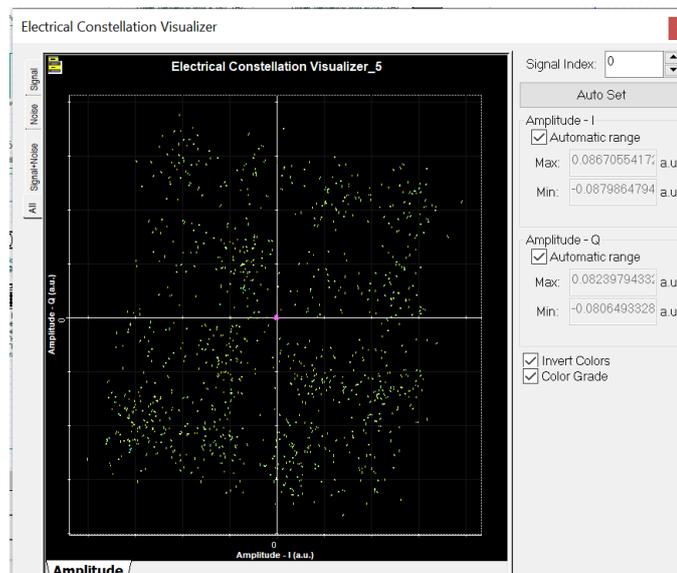


Figura 4. 11 Constelación de la señal óptica en la llegada del receptor.

Fuente: autor

Si el valor de señal-ruido verificado por los analizadores de espectro es superior a 19 dB, el transpondedor es capaz de recuperar la señal mediante la aplicación de filtros en el dominio óptico, para este proyecto se aplica un filtro Gaussiano de segundo orden, el cual está disponible en las librerías del Optisystem 17.

En la figura 4.12 se observa la longitud de onda de 192.1 THz, una vez aplicado el filtro Gaussiano, se verifica que la relación señal ruido mejora sustancialmente, sin afectar la potencia de la portadora.

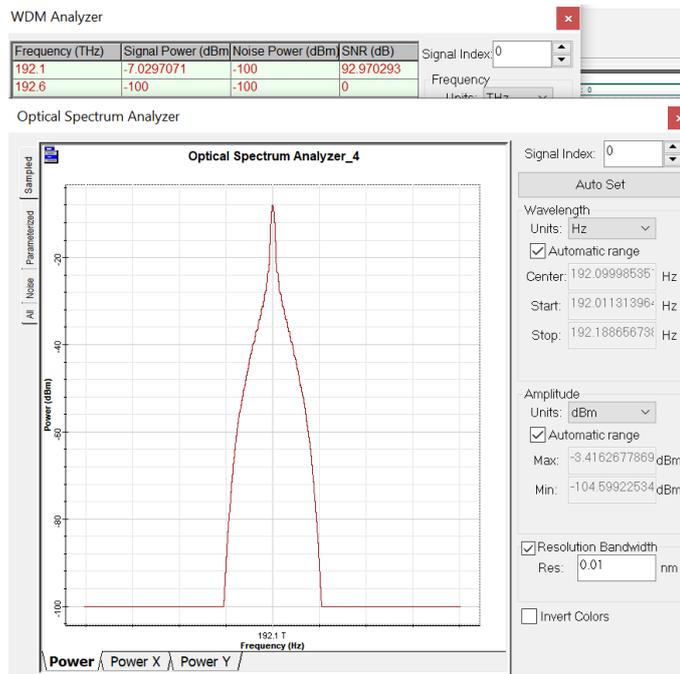


Figura 4. 12 Señal resultante con filtro Gaussiano.

Fuente: autor

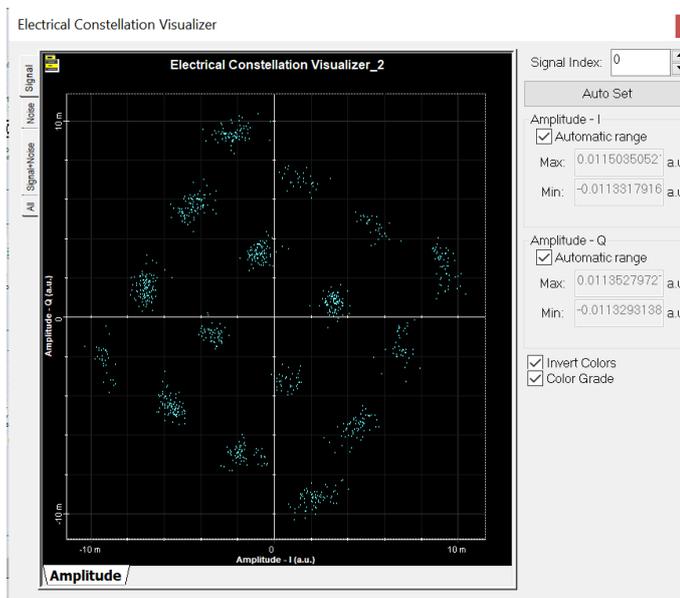


Figura 4. 13 Constelación de señal filtrada.

Fuente: autor

Ahora se revisará el resultado de tener una longitud de fibra de 80Km, para esto es necesario que el amplificador de llegada en el nodo B: **BoosterB1**, tenga la máxima ganancia (29 dB), con esta consideración se observa en la figura 4.14 que el valor de recepción es de -9.83 dBm y que se encuentra con un valor de señal ruido de 20.1 dB, estos valores se encuentran dentro del rango aceptable que asegura la correcta operación del sistema DWDM, para obtener estos resultados también es necesario configurar el coeficiente de la fibra en 0,35 dB/Km, tomando en cuenta que es un valor recomendado para los cálculos matemáticos.

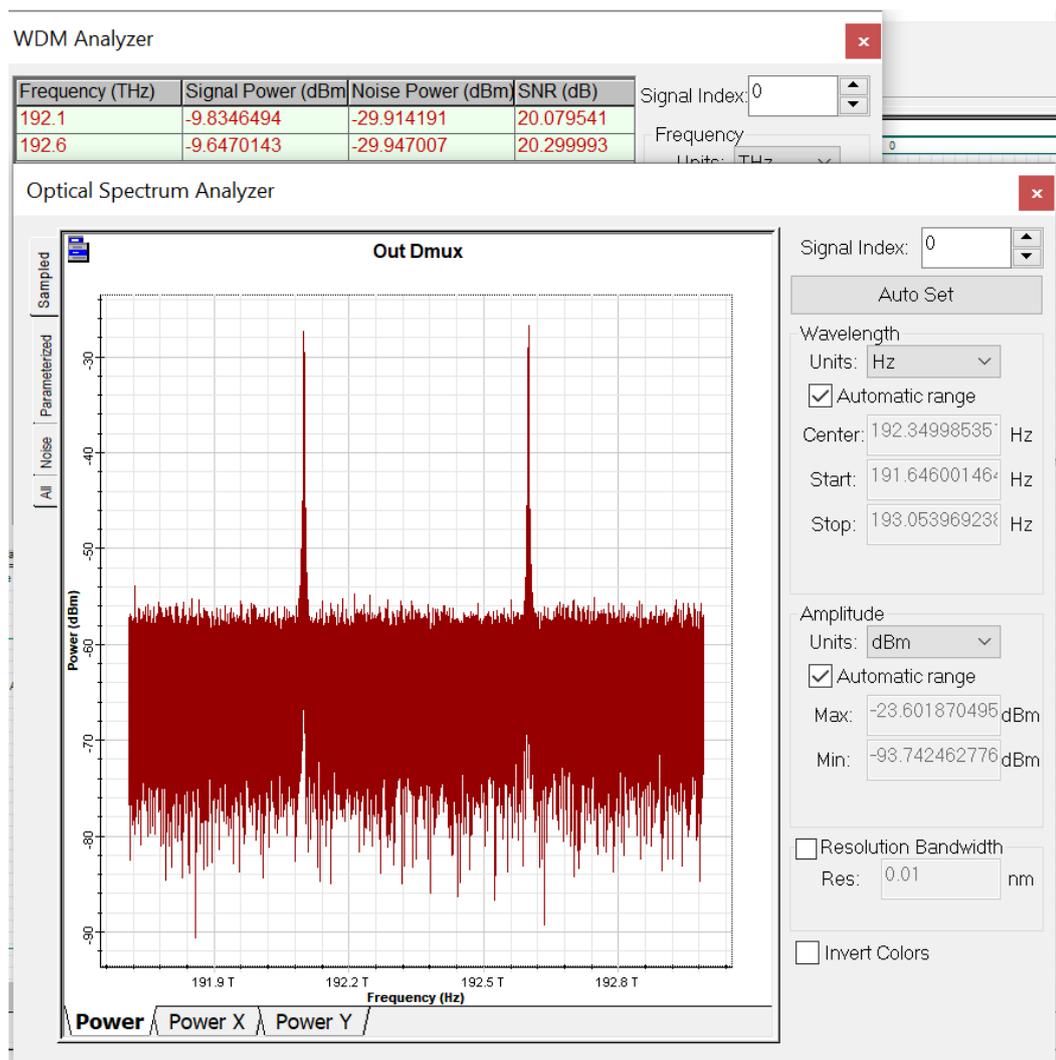


Figura 4. 14 Señal de llegada al transpondedor de nodo destino con distancia de 80 km.
Fuente: autor

Los resultados de las simulaciones indican que los arreglos de las tarjetas pasivas y activas permiten obtener valores de potencia dentro de los rangos de sensibilidad

normales, cumpliendo con los parámetros indicados en las especificaciones técnicas de un sistema DWDM de 400G.

4.4 Equipamiento a utilizar

De acuerdo con la investigación realizada, se seleccionaron los proveedores de equipos según los requerimientos técnicos de diseño del presente proyecto, la solución que más se adapta a estos es la del fabricante Huawei y además presenta las siguientes ventajas que permiten el crecimiento de la red manteniendo la capa óptica inicial:

- Mejor eficiencia espectral, que de acuerdo con el fabricante aseguran un crecimiento a lambdas de 1 Tbps.
- Permite una red full mesh, con N direcciones de salida, donde una lambda de cualquier dirección puede conmutar a otra dirección.
- Presenta una integración de varias tarjetas (FIU, OSC, WSS, OA) en una sola tarjeta óptica de línea, lo cual reduce la ocupación de slots y el costo de equipamiento.
- Al tener un backplane óptico se reduce las conexiones de fibra y las probabilidades de error en el mismo producto de la manipulación.
- Virtualización de los servidores de gestión para la operación, mantenimiento y aprovisionamiento remoto de nuevos servicios.
- Se pueden hacer pruebas en tiempo real y detección rápida de fallas mediante un OTDR virtual implementado en una tarjeta óptica.
- Presentan un analizador de espectro, que permite desde gestión monitorear los valores de potencia individual y OSNR.
- La plataforma está pensada para permitir un crecimiento gradual de 100/200G/400G mediante OTU con modulaciones reprogramables.

En la tabla 4.2 se indica el dimensionamiento de los equipos en cada nodo, se selecciona por el número de slot para la capa eléctrica el OSN 9800 U32 y para la capa óptica el OSN 9800 UPS.

Tabla 4. 16 Tarjetas y equipos de la capa óptica de la topología diseñada

Nodo/ Equipo	OSN 9800 U32	OSN 9800 UPS	Mux/Dmux	Tarjeta de línea (WSS+OA+O SC+FIU)	OA (pre amplificador)	Tarjeta Analizadora de Espectro
Nodo 1	1	2	1/1	2	1	1
Nodo 2	1	3	1/1	3	1	2
Nodo 3	1	2	1/1	2	1	1
Nodo 4	1	3	1/1	3	1	2
Nodo 5	1	2	1/1	2	1	1

Fuente: Autor

Si bien en la tabla anterior se presenta el dimensionamiento inicial de la capa óptica y se especifica que por cada nodo se tiene un equipo eléctrico 9800 U32, el sistema está diseñado para seguir creciendo en direcciones y equipamiento en concordancia a los requerimientos de los proveedores y las demandas de tráfico en la red.

Es importante recalcar que cada equipo óptico cuenta con una tarjeta controladora en configuración 1+1 y los equipos eléctricos con una tarjeta cross conectora y de control también en configuración 1+1, adicional a las tarjetas de línea, transpondedores y tarjetas de servicio para el manejo de distintos servicios.

Además, cada equipo debe tener habilitada la licencia ASON para la configuración de protecciones en distintos SLA.

Conclusiones

- Las redes DWDM han evolucionado para permitir el transporte de canales ópticos de gran capacidad de ancho de banda, mediante la utilización de técnicas de modulación coherente, y sistemas de multiplexación con grillas flexibles que permiten optimizar el espectro óptico y sobre todo posibilitan la escalabilidad de canales ópticos con distintas velocidades.
- El arreglo de tarjetas multiplexoras, demultiplexoras, amplificadoras y tarjetas de línea seleccionados en el diseño propuesto permiten obtener un sistema DWDM con 5 nodos ROADM, que acuerdo a las distancias de los enlaces no hay necesidad de considerar un nodo OLA, la ubicación de cada pre amplificador y amplificador booster está seleccionado de manera estratégica para permitir la funcionalidad de potencia óptima del sistema y posibilitar el envío de 48 canales ópticos a cualquier dirección con velocidades interoperables de 100G/200G/400G y en un futuro realizar un upgrade a 1T.
- En la simulación realizada Optisystem se puede comprobar que el sistema propuesto opera dentro de los rangos ópticos normales de las tarjetas finales y al paso de cada amplificador, el sistema compensa todas las pérdidas de inserción locales de cada nodo y además las presentadas por el medio de transmisión, con un valor de señal ruido de 24,9 dB para 23 Km y 20 dB para 80 km, estos valores garantizan que la señal puede ser recuperada y por ende determinan la ausencia de errores en la red.
- Mediante los cálculos matemáticos y en dependencia de los parámetros ópticos de los amplificadores Booster en la salida y entrada de un nodo ROADM y coeficientes de atenuación de la fibra óptica, se puede concluir que con el sistema propuesto con amplificadores EDFA puede alcanzar alrededor de 80 a 90 km de distancia entre dos nodos ROADM, por ende el diseño propuesto es factible de implementar en el escenario de red considerado, dado que todos los enlaces se encuentran con distancias menores a este valor máximo permitido.
- La oferta comercial del fabricante seleccionado a más de cumplir con los requerimientos técnicos detallados en el presente proyecto y tener un posicionamiento actual en distintos países, presenta una solución escalable, donde sin variar el equipamiento de la capa eléctrica se pueden implementar nuevos canales de 1T de acuerdo a las nuevas revisiones del estándar DWDM.

- De acuerdo con las conclusiones de los objetivos específicos, se presenta el diseño de un sistema de transmisión DWDM con capacidad de longitudes de onda de 400G en el entorno Metropolitano de la ciudad de Guayaquil, que cumple las especificaciones técnicas para este tipo de redes.

Recomendaciones

- Para el diseño de las redes DWDM de nueva generación se recomienda a más de utilizar grilla flexible, el uso del dimensionamiento de WSS para permitir configuraciones contentionless, con crecimiento dinámico a futuro.
- Para aumentar el número de longitudes de onda se recomienda utilizar una tarjeta combinadora de señales que se conoce como ITL, donde de acuerdo a las recomendaciones del fabricante se puede crecer hasta a 96 longitudes de onda, en el balance de potencia ópticos es necesario conocer la nueva pérdida de inserción de esta tarjeta, la cual regularmente suele ser de 3 dB.
- Se recomienda para el manejo de distancias superiores a 80Km el empleo de amplificadores RAMAN, los cuales presentan mayores ganancias y rango de sensibilidad, sin embargo, también es necesario tener presente el ruido insertado al aumentar la distancia, por lo cual se sugiere emplear arreglos de amplificadores EDFA y RAMAN en cascada.
- Para la selección del fabricante de equipos a más de tener en cuenta los beneficios técnicos de las soluciones propuestas, es necesario considerar el soporte técnico y los costos de implementación, en dependencia de estos últimos tomar una decisión de la nueva inversión tecnológica de una empresa.
- Es recomendable asegurar que todos los canales ópticos al pasar por un amplificador tengan un valor inferior a la máxima potencia de salida individual y que los valores de los distintos canales sean aproximadamente iguales, con este trabajo por parte de los técnicos e ingenieros de operación y mantenimiento se puede asegurar que un amplificador no se sature cuando trabaje con la capacidad superior al 70% de canales ópticos.

GLOSARIO

ADM: Add/Drop Multiplexer

ASON: Automatic switch optical network

DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing

FC: Fibre Channel

FEC: Forward Error Correction

G.709: la recomendación del ITU-T para interfaces de la OTN

GE: Gigabit Ethernet

10GbE = 10 Gigabit Ethernet

100GbE = 100 Gigabits Ethernet

Gbps: Gigabits por segundo

GCC: General Communication Channel

IP: Internet Protocol

ITU: International Telecommunication Union

MAN: Metropolitan Area Network

MPLS: Multiprotocol Label Switching

OCh: optical channel

OSC: Optical Supervisory Channel

ODU: Optical Data Unit

OMS: optical multiplex section

OPU: optical channel payload unit

OTN: Optical Transport Network

OTS: Optical Transport Section

OTU: Optical Transponder. Unit

SONET: Synchronous Optical Network

ROADM: Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer

OLA: Optical Line Amplifier

REG: Regenerator

OTM: Optical Terminal Multiplexer

OADM: Optical Add/Drop Multiplexer

FOADM: Fixed Optical Add/Drop Multiplexer

SAN: **Storage Area Network**

SDH: Synchronous Optical Network

SLA: service level agreement

SONET: Synchronous Optical Network

WAN: Wide Area Network

OA: Optical Amplifier

EDFA: Erbium doped fiber amplifier

VOA: Variable Optical Attenuators

PMD 16QAM: Polarization Mode Dispersion 16-Cuadrature Amplitude Modulation

PCS: Plastic Clad Silica

SCS: Silica Clad Silica

SMF: Standar Single Mode Fiber

DSF: Dispersion Shifted Fiber

NZ DSF: non-zero dispersion-shifted fiber

DGD: differencial group delay

OTDM: Optical Time Division Multiplexing

LED: light-emitting diode

ILD: injection laser diode

VCSEL: Vertical Cabity Surface-Emiting Laser

DFB: Distribute Feedback Laser

DBR: Distributed Bragg Reflector

OXC: Optical Cross Connect

WSS: wavelength selective switch

OSPF-TE: Open Shortest Path First - Traffic engineering

RSVP-TE: Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering

LMP: Link Management Protocol

3R: retiming, reamplification & reshaping

OSNR: Optical Signal to Noise Ratio

BIBLIOGRAFIA

- Apablaza, F. (2012). *Redes de Telecomunicaciones*. Obtenido de Slideshare: <https://es.slideshare.net/fapablaza/redes-de-telecomunicaciones-cap-43>
- Apablaza, F. (2015). *NG WDM*. Obtenido de Textos Científicos: <https://www.textoscientificos.com/redes/ng-wdm>
- Benavidez, A. (2015). *Diseño de una red con fibra óptica utilizando utilizando tecnologia DWDM desde da Ciudad de Cotacachi al Sector de Apuela*. Obtenido de Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte: <http://repositorio.utn.edu.ec/>
- Buelvas, D. (2009). *Redes Ópticas DWDM: Diseño e Implementación*. Bogotá: Universidad San Francisco Jose de Caldas.
- Buelvas, D., Téllez, I., & Mateus, E. (2010). *Redes Ópticas DWDM: Diseño e Implementación*. Obtenido de GALE ACADEMIC ONEFILE: <https://go.gale.com/ps/anonymous?id=GALE%7CA357592726&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=19099746&p=AONE&sw=w>
- Casillas, S. (2017). *Planificación y diseño de redes ópticas WDM*. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid: E.T.S.I. y Sistemas de Telecomunicación (UPM).
- Castillo, J. (2019). *Fibra óptica: qué es, para qué se usa y cómo funciona*. Obtenido de Profesional Review: <https://www.profesionalreview.com/2019/02/15/fibra-optica-que-es/>
- Castro, S. (2014). *Fibra óptica y las voces de la región*. Obtenido de El Vigia: <https://www.elvigia.net/c-t/2014/5/17/fibra-ptica-vores-regin-158481.html>
- Ccitel. (2018). *Ccitel*. Obtenido de <https://ictdevices.com/Transport-Network/Huawei-OptiX-OSN-9800-U32-Series-Products-Price-and-Specs.html>
- Chavez, M., Duarte, K., Altamirano, J., & Uribe, C. (2015). *Ventanas de transmisión de fibras ópticas*. Obtenido de Academia: https://www.academia.edu/19526062/Ventanas_transmision

- Cisco. (2000). *Introduction to DWDM Technology*. California: Cisco Systems.
- CISCO Technologies. (2017). *El trafico IP Global*. Obtenido de <http://globalnewsroom.cisco.com/es/es/release/El-tr%C3%A1fico-IP-global-se-multiplicar%C3%A1-por-tres-en-los-pr%C3%B3ximos-cinco-a%C3%B1os-superando-los-2523350>
- Cortes, M. (2015). *Principios DWDM*. Obtenido de <http://principiosdelwdm.blogspot.com/>
- Gonzales, E., Gutierrez, A., & Rodrigo, T. (2018). *Multiplexación en fibra óptica*. Obtenido de SlidePlayer: <https://slideplayer.es/slide/12432524/>
- Gormas, I. (2007). *Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios: instalaciones electrotécnicas* (2da ed.). Madrid: Paraninfo.
- Gutierrez, R. (2005). *Hacia un sistema de telecomunicaciones completamente óptico*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/figure/Convertidores-de-longitud-de-onda-WC-optoelectronico-arriba-y-completamente-optico_fig5_279752566
- Hakani, R. (2013). *Optical Time Division Multiplexing (OTDM)*. Ahmadabad. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/271767077_Optical_Time_Division_Multiplexing_OTDM
- Hérmendez, Y. (2019). *Diseño de una Red Metropolitana para servicios Avanzados s-Health en Smart Cities*. Universidad Abierta de Cataluña., Cataluña: UOC Universitat Oberta de Catalunya.
- Huawei Technologies Co., Ltd. (2020). *Plataforma OTN Optix 9800*. Obtenido de <https://e.huawei.com/es/products/enterprise-transmission-access/transmission/wdm/osn-9800>
- Huawei Technologies Co.,Ltd. (2015). *Optix OSN3800-6800-8800(OTN) NG DWDM*. Shenzhen, China.
- Lanchi, L. (2015). *Diseño de la red de acceso de la Universidad Nacional de Loja, basada en la tecnología GPON (Gigabit Passive Optical Network)*. Universidad Nacional de Loja. Loja: Universidad Nacional de Loja.

- Littlewood, P., Masoud, F., & Follis, E. (2015). *Redes de Transporte óptico*. Hanover: Ciena.
- Macias, M. (2016). *Administración de Redes*. Obtenido de Tecnología de telecomunicaciones PDH, SDH y DWDM: <https://docplayer.es/4142974-Tecnologia-de-telecomunicaciones-pdh-sdh-y-dwdm.html>
- Maharrey, B., Lim, A., & Gao, C. (2012). *Interconexión entre redes IP y redes inalámbricas de sensores*. Obtenido de <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2012/567687>
- Martinez, J. (2018). *La dispersión modal*. Obtenido de Prored: <https://www.prored.es/la-dispersion-modal/>
- Martinez, P. (2019). *Fibra óptica*. Obtenido de Física y Química Online: <http://fisicayquimicaonline.blogspot.com/2019/11/fibra-optica.html>
- Mendioroz, F. (2014). *Sistemas de Conmutación*. Obtenido de SlideShare: <https://es.slideshare.net/fernandomendioroz/introduccion-a-wdm-y-otn>
- NEMESIS. (2006). *Tutorial de Comunicaciones Ópticas*. Obtenido de http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1_5_1.htm
- Nemesis Telecommunications. (2006). *Tutorial de Comunicaciones Ópticas*. Obtenido de http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1_5_1.htm
- Nokia. (2020). *Interruptor de servicio fotónico 1830*. Obtenido de <https://www.nokia.com/networks/products/1830-photonic-service-switch/#highlights>
- Ortiz, J. (2018). *Tipos de fibra óptica Capítulo I Monomodo*. Obtenido de Solution FTTX: <https://www.solutionsfttx.com/single-post/2018/02/20/Tipos-de-fibra-optica-Capitulo-I-Monomodo>
- Pérez, I. (2015). *Dispositivos y medios de transmisión*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Ramos, B. (2005). *Diseño de un enlace WDM sobre la red troncal de fibra óptica Quito- Guayaquil de ANDINATEL S.A.* Quito: Escuela Superior Politécnica del Ejército.

- Rodríguez, C., & Cid, F. (2012). *Sistemas Ópticos Coherentes*. Obtenido de Departamento de Electrónica de Universidad Técnica Federico Santa María: http://www2.elo.utfsm.cl/~elo357/Presentaciones_2009/Sistemas_Opticos_Coherentes_2011.pdf
- Salvador, J. (2019). *Fibra óptica – CWDM y DWDM*. Obtenido de Davantel: <https://blog.davantel.com/fibra-optica-cw-dm-dwdm>
- Sánchez, A. (2018). *Migración de la Red de Anillos Metropolitanos de Quito de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones con Tecnología DWDM*. Obtenido de BIBDIGITAL. Repositorio Digital Institucional de la Escuela Politécnica Nacional: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19496>
- Sequeria, P. (2017). *Estudio de la interoperabilidad de distintos equipos DWDM*. Obtenido de Instituto Tecnológico de Buenos Aires: <https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/613/Trabajo%20Especializaci%C3%B3n%20PS%20vbeta%20Corregido.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Solera, C. (2018). *ECI Telecom explica las Redes DWDM de próxima generación*. Obtenido de America Digital: <https://congreso.america-digital.com/eci-telecom-redes-dwdm-proxima-generacion/>
- The Fiber Optical Association. (2014). *Guide to Fiber Optical and Premises Cabling*. Obtenido de <http://www.thefoa.org/ESP/Sistemas.htm>
- Toolboom. (2018). *Mediciones en la fibra óptica, grabación y análisis de reflectogramas*. Obtenido de <https://toolboom.com/es/articles-and-video/fiber-optic-measurements-otdr-trace-recording-and-analysis/>
- Twain, E. (2016). *Single-mode Fiber Standard and Selection*. Obtenido de Fiber Optical Solution: <http://opticalfibersa.over-blog.com/2016/06/single-mode-fiber-standard-and-selection.html>
- UIT-T G.652. (2005). *Características de las fibras y cables ópticos monomodo*. Obtenido de Serie G: Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales. Características de los medios de transmisión – Cables de fibra óptica : https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.652-200506-S!!PDF-S&type=items.

Urrutia, P. (2011). *¿Cuáles la mejor fibra para su Red Óptica de Acceso?* Obtenido de Revista Electro Industria: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1683&ni=cual-es-la-mejor-fibra-para-su-red-optica-de-acceso>

Ventura, D. (2016). *Estudio experimental de un conversor en longitud de onda usando láseres de fibra óptica.* Obtenido de <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/22169>

Zuñiga, M. (2015). *Reflexion y Refraccion Optica.* Obtenido de <https://prezi.com/utvvjmcwgf5k/reflexion-y-refraccion-optica/>



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Luis Eduardo Lanchi Rueda**, con C.C: # 1104921844 autor/a del trabajo de titulación: **Diseño de una red de transporte DWDM con longitudes de onda de 400Gbps para la ciudad de Guayaquil**, previo a la obtención del título de **Magíster en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 21 de septiembre, de 2020

f. _____

Nombre: **Luis Eduardo Lanchi Rueda**

C.C: 1104921844



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

<i>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</i>		
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN		
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Diseño de una red de transporte DWDM con longitudes de onda de 400Gbps para la ciudad de Guayaquil	
AUTOR(ES)	Lanchi Rueda Luis Eduardo	
REVISOR(ES)/TUTOR	MSc. Córdova Rivadeneira Luis; MSc. Quezada Calle Edgar/ MSc. Romero Paz Manuel	
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	
FACULTAD:	Sistema de Posgrado	
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones	
TITULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones	
FECHA DE PUBLICACIÓN:	Guayaquil, a los 21 días del mes septiembre del 2020	No. DE PÁGINAS: 114
ÁREAS TEMÁTICAS:	Redes de transmisión ópticas, Multiplexación por división de longitud de onda, Topologías en redes DWDM, estándares y arquitectura OTN.	
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	DWDM, ROADM, OTN, OCH, ASON, 400G,PDM 16QAM, GRIDLESS	
RESUMEN/ABSTRACT: Se estudian las redes de transmisión ópticas basadas en la multiplicación por división de longitud de onda densa (DWDM), con capacidades de ancho de banda para el soporte de nuevas demandas de transporte como consecuencia diversificación de servicios, aplicaciones a los pueden acceder los usuarios y de la evolución de las redes de acceso de nueva generación, tales como X-GPON y servicio móvil avanzado de quinta generación (5G). Este proyecto de investigación es exploratorio ya que se investigan las tecnologías y estándares DWDM, para obtener el estado del arte de las redes de nueva generación con capacidades de longitudes de onda de 400 Gbps y que posibiliten la convergencia de distintos servicios de telecomunicaciones mediante el estándar OTN; también es pre-experimental considerando que se utiliza un simulador para validar los parámetros ópticos que indican		

que el diseño planteado y la arquitectura de red propuesta se puede implementar. El resultado y aportación es el dimensionamiento de las tarjetas activas de la capa de red óptica/eléctrica y los componentes pasivos necesarios para el transporte de una red DWDM con capacidades de transporte de 400 Gbps, una vez obtenido el dimensionamiento de todos los elementos de red, se realiza el balance de potencias óptico mediante la simulación del comportamiento de los parámetros ópticos en el programa Optisystem. Y finalmente se selecciona el equipamiento de un proveedor de redes de nueva generación que cumpla con los requisitos propuestos en el presente proyecto.

ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO AUTOR/ES:	Teléfono: +593-96049973	E-mail: eduardolanchy@gmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Romero Paz Manuel de Jesús	
	Teléfono: +593-994606932	
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		