

**Diseño y simulación de un sistema DWDM coherente basado en una red de larga distancia
orientado en una topología de un operador real**

Miguel Angel Yate Rodriguez

Asesor

Ivan Camilo Nieto Sanchez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de ciencias, Basicas, Tecnologia e Ingenieria ECBTI

Ingenieria de telecomunicaciones

2023

Resumen

La necesidad de estar conectados hace que los operadores de telecomunicaciones enfrenten hoy en día la obligación de reinventarse. de acuerdo al informe anual de internet de Cisco, el crecimiento en el número de usuarios de internet es una tendencia global, Según el comunicado de prensa BOLETÍN TRIMESTRAL DE LAS TIC CIFRAS TERCER TRIMESTRE DE 2022, realizaron un análisis que evalúa la transformación digital en varios segmentos comerciales incluyendo los proveedores de servicios podemos evidenciar los porcentajes regionales.

Expandir su capacidad de transmisión y adicional aumentando la cobertura tendrá efectos significativos al tener una mejora en los servicios dados a sus usuarios y nuevos mercados a nivel nacional. Gracias a la evolución de las redes y los sistemas de transmisión que utilizan fibra óptica, podemos utilizar redes DWDM (Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa), que consisten en enviar múltiples flujos de información por un solo medio físico de esta forma aumentando la capacidad de ancho de banda y disminuyendo costos y gastos de operación.

El diseño de una red de transmisión va enlazado con requerimientos reales por parte del operador y conocimientos en cuanto a las soluciones DWDM. Es por esto que los análisis matemático realizados ayudan a obtener los presupuestos de potencia de los enlaces de la topología de red, los cuales pueden ser verificados en el adjunto Calculo OSNR (Relación de Señal Óptica al Ruido), datos relevantes como distancia, coeficiente de atenuación y atenuación nos darán un estimado de los parámetros de desempeño. En la simulación del enlace proyectado es posible evidenciar los parámetros en conjunto con las gráficas de esta forma podemos comparar los resultados finales del enlace. Los presupuestos de potencia tanto teórico y simulado concuerdan de esta forma el diseño topología y distribución de nodos intermedios OLA cumplen a cabalidad su función que es mantener la señal óptica en valores deseados. Por medio de la

etapa de amplificación es posible realizar los cálculos de señal a ruido que no solo cumplen con lo esperado para este diseño teniendo en cuenta la tasa 100G a ser utilizada. Se tiene una posibilidad de crecimiento sobre la red basado en el OSNR de cada uno de los tramos logrando un mayor aumento de tasa para posibles expansiones futuras.

Palabras Clave: DWDM, OSNR, diseño, red, Presupuesto de potencia.

Abstract

The need to be connected means that telecommunications operators today face the obligation to reinvent themselves. According to Cisco's annual internet report, the growth in the number of internet users is a global trend. According to the press release QUARTERLY ICT BULLETIN FIGURES THIRD QUARTER OF 2022, carried out an analysis that evaluates the digital transformation in several commercial segments including service providers we can show the regional percentages.

Expanding its transmission capacity and additionally increasing coverage will have significant effects by improving the services provided to its users and new markets nationwide. Thanks to the evolution of networks and transmission systems that use optical fiber, we can use DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) networks, which consist of sending multiple flows of information through a single medium in this physical way, increasing the bandwidth capacity and reducing operating costs and expenses.

The design of a transmission network is linked to real requirements on the part of the operator and knowledge of DWDM solutions. This is why the mathematical analyzes carried out help to obtain the power budgets of the links of the network topology, which can be verified in the attached OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) calculation, relevant data such as distance, noise coefficient attenuation and attenuation will give us an estimate of the performance parameters. In the simulation of the projected link it is possible to show the parameters together with the graphs in this way we can compare the final results of the link. The theoretical and simulated power budgets agree in this way, the topology design and distribution of intermediate OLA nodes fully fulfill their function, which is to maintain the optical signal at desired values. Through the amplification stage it is possible to carry out signal-to-noise calculations that not only comply with what is expected for this design considering the 100G rate to be used. There is

a possibility of growth on the network based on the OSNR of each of the sections, achieving a greater rate increase for possible future expansions.

Keywords: DWDM, OSNR, design, network, Power budget.

Tabla de Contenido

Introducción	12
Planteamiento del Problema	13
Justificación	15
Motivación	17
Objetivos	18
Estudio de Tecnología.....	19
DWDM (Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa).....	19
Transmisores	38
OADM (Optical Add Drop Multiplexer)	39
WSS (Wavelength Selective Switch).....	41
Optical Transport Networks (OTN)	43
Tasa de Errores y Corrección de Errores (BER pre FEC).....	46
Diseño Redes DWDM	48
Topología Red DWDM.....	49
Topología Punto a Punto	49
Topología en Anillo.....	51
Topología Redes Malladas	51
Presupuesto de Potencia	52
Relación de Señal Óptica al Ruido (OSNR)	54

Red WDM Coherentes	56
Diseño Red de Transmisión Escenario Real	56
Presupuesto de Potencia	60
Análisis Teórico y Simulado.....	64
Conclusiones	73
Referencias Bibliográficas	75

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Longitudes de Onda en Banda C DWDM</i>	30
Tabla 2	<i>Parámetros Componentes Ópticos. Tomado de [8]</i>	31
Tabla 3	<i>Parámetros de Fibra y Distancia.</i>	58
Tabla 4	<i>Valores de OSNR por Tasa y Modulación.</i>	60
Tabla 5	<i>Análisis Nodo A - Nodo O</i>	62
Tabla 6	<i>Resumen Análisis Técnico</i>	63
Tabla 7	<i>Valores Comparativos OSNR</i>	67
Tabla 8	<i>Valores Comparativos OSNR 2</i>	71

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Ventanas de Transmisión Fibra Óptica. Tomada de [2]</i>	19
Figura 2	<i>Esquema Funcional DWDM. Tomada de [3]</i>	20
Figura 3	<i>(a) Estructura. (b) Propagación en una Fibra Óptica. Tomado de [4]</i>	21
Figura 4	<i>Características Fibra Mono-modo. Tomado de [2]</i>	22
Figura 5	<i>Curva Total de Atenuación en Fibras Ópticas. Tomada de [3]</i>	24
Figura 6	<i>Efecto Dispersión en Pulso Transmitido Tomado de [2]</i>	25
Figura 7	<i>Sistema DWDM Compensado en Topología Punto a Punto</i>	26
Figura 8	<i>Modulación de Fase Propia (SPM) Tomado de [2]</i>	27
Figura 9	<i>Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) Tomada de [3].</i>	28
Figura 10	<i>Elementos Sistema WDM.</i>	29
Figura 11	<i>Multiplexor y Demultiplexor Sistema Unidireccional. Tomado de [3]</i>	34
Figura 12	<i>Multiplexor y Demultiplexor Sistema Bidireccional. Tomado de [3].</i>	35
Figura 13	<i>Esquema Amplificador de Fibra Dopado de Erbio (EDFA). Tomado de [9]</i>	36
Figura 14	<i>Configuración Amplificadora Raman. Tomado de [12]</i>	38
Figura 15	<i>Esquema Básico Optical Add Drop Multiplexer. Tomado de [3]</i>	39
Figura 16	<i>OADM Basado en Rejillas y Acopladores. Tomado de [10].</i>	40
Figura 17	<i>OADM Basado en Rejillas y Circuladores. Tomado de [10]</i>	41
Figura 18	<i>Diferencia Funcionalidad FOADM y ROADM.</i>	42
Figura 19	<i>Distribución de Longitudes de Onda en Sistema DWDM. Tomado de [10]</i>	43
Figura 20	<i>Diagrama de Flujo Señal OTN. Tomada de [16].</i>	44
Figura 21	<i>Capas Digitales y Ópticas OTN en Red WDM. Tomado de [10]</i>	46
Figura 22	<i>Utilización del Sistema de Corrección FEC y del Receptor Tasa de Errores en los Bits en la Salida. [17]</i>	47

Figura 23 <i>Perdidas por Tipo de Conector</i>	49
Figura 24 <i>Sistema Punto a Punto.</i>	50
Figura 25 <i>Sistema Punto a Punto con OLA Intermedio.</i>	50
Figura 26 <i>Sistema Topología en Anillo.</i>	51
Figura 27 <i>Topología Mallada</i>	52
Figura 28 <i>Modelo de Presupuesto de Potencia Enlace Mono Canal [10]</i>	53
Figura 29 <i>Modelo de Presupuesto de Potencia para un Enlace WDM. [10]</i>	54
Figura 30 <i>Diagrama OSNR Amplificador [17]</i>	55
Figura 31 <i>Tráfico de Datos Histórico</i>	57
Figura 32 <i>Diseño de Topología y Matriz de Tráfico DWDM Coherente.</i>	59
Figura 33 <i>Posibilidad de Crecimiento Basado en OSNR por Tramo.</i>	64
Figura 34 <i>Diagrama Simulación VPI</i>	65
Figura 35 <i>Grafica de Potencia Óptica.</i>	66
Figura 36 <i>Grafica de OSNR.</i>	67
Figura 37 <i>Hilo 1 Gestión DWDM Enlace Operativo</i>	69
Figura 38 <i>Hilo 2 Gestión DWDM Enlace Operativo</i>	70
Figura 39 <i>OSNR Enlace Operativo</i>	71

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Cálculo matemático de relación de señal óptica al ruido de cada uno de los enlaces que compone la red diseñada</i>	76
Apéndice B <i>Modelador de red- presupuesto de potencia óptico de acuerdo a la cantidad de elementos que compone la red diseñada</i>	77
Apéndice C <i>Propuesta comercial tentativa especificando cada uno de los elementos necesarios por nodo para cumplir con los valores de apéndice A y apéndice C</i>	78

Introducción

Actualmente se puede decir que nos encontramos en la era de la información, era en la cual la mayoría de las personas ven la necesidad de estar conectados y poder ser ubicados siempre, era en la cual se utilizan cada vez más aplicaciones en tiempo real y donde siempre estamos en búsqueda de mayor velocidad de navegación.

Los proveedores de servicios de internet (ISP) requiere expandir su capacidad y cobertura de transmisión con el fin de ofrecer mejores servicios a sus usuarios y cubrir nuevos mercados a nivel nacional. Por tal motivo, nace el requerimiento de diseñar un sistema DWDM coherente de larga distancia, que consiste en una ampliación de infraestructura óptica que permitirá aumentar sus capacidades de transmisión y cobertura del servicio para usuarios finales.

El diseño realizado nos mostrara los valores de performance obtenidos por medio de los análisis con respecto a los datos teóricos. Se utiliza un software especializado con el fin de comparar los datos teóricos y de esta forma asegurar los márgenes de operación y aun mas importante escalabilidad de la red futura.

Planteamiento del Problema

En los últimos años los usuarios que utilizan internet han aumentado considerablemente de acuerdo al comunicado de prensa BOLETÍN TRIMESTRAL DE LAS TIC CIFRAS TERCER TRIMESTRE DE 2022, día a día se implementan nuevos servicios para satisfacer las exigencias de los clientes finales de esta forma utilizando aún más internet. Los proveedores de servicios de internet (ISP) están en un punto donde deben afrontar la entrega de servicios a tasas mayores de usuarios que llevara un requerimiento de tráfico más alto que en un futuro podría saturar sus redes. Los datos más recientes de acuerdo a las cifras del tercer trimestre de 2022 presentadas por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (Mintic) muestran que el acceso fijo a internet alcanzo 8,52 millones, en el presente año 170 mil nuevos accesos y creciendo que los registrados en el mismo trimestre del año anterior que alcanzó una cifra de 8,35 millones. [1]

La velocidad de descarga es uno de factores claves del usuario final, de acuerdo con el ministerio de las TIC, para el tercer trimestre de 2022 la velocidad de descarga promedio nacional fue de 112,0 Mbps⁶ representando un aumento de más de 50 Mbps en el último año. A medida que se requiere una mayor capacidad de descarga, se presentan tecnologías que pueden suplir esta necesidad específica, la velocidad promedio de descarga fue de 170,2 Mbps en fibra óptica, 110,6 Mbps en cable, mientras las demás tecnologías tienen velocidades inferiores a 18,5 Mbps.[1]

Al analizar estos valores de acceso fijo a internet y velocidad de descarga se puede evidenciar que los requerimientos de tráfico en la red de datos serán mayores a medida que paso el tiempo, es por esto que actualmente los operadores de telecomunicaciones requieren expandir su capacidad y cobertura de transmisión con el fin de ofrecer mejores servicios a sus usuarios y

cubrir nuevos mercados a nivel nacional. Por tal motivo nace la necesidad de diseñar un proyecto de transmisión basada en un sistema real que consistirá en la ampliación de infraestructura óptica que permitirá aumentar las capacidades de transmisión, protección de sus enlaces y cobertura del servicio.

Justificación

El problema que se pretende abordar en este proyecto es un requerimiento real de expandir la capacidad y cobertura de transmisión de un ISP dadas las tendencias actuales de los servicios requeridos por los usuarios finales. Es de gran importancia las expansiones de las redes de transporte porque en los últimos años se ha tenido un aumento considerable en los nuevos accesos fijos a internet reportados por los proveedores de redes y servicios en Colombia. Este aumento de usuarios genera un impacto adicional en los requerimientos de velocidad de descarga, el promedio nacional del servicio de acceso fijo a Internet fue de 112,0 Mbps⁶ para el tercer trimestre de 2022, lo que representa un aumento de cerca de 50 Mbps en el último año. [1]

La dificultad se sitúa desde los tiempos en pandemia y las restricciones de movilidad impulsaron la modalidad de teletrabajo o home office, lo cual al día de hoy sigue en vigencia de una manera híbrida o totalmente trabajo remoto. Desde 2020 al tercer trimestre de 2022 de acuerdo a MINTIC se ha visto un aumento considerable en acceso fijos al aumentar la cantidad de usuarios que requieren conectividad a internet.

Los objetivos de la investigación son establecer el estado del arte para afianzar cada uno de los conceptos teóricos de las redes de transporte. Diseñar una red de transmisión de larga distancia coherente que cumpla con los valores promedio de operación y ser contrastada por medio de una simulación de un enlace con software especializado VPI. Las preguntas de investigación incluyen: ¿El diseño cumple con las necesidades del cliente en cuanto a posibilidad de ampliación de infraestructura óptica? ¿El análisis teórico y simulado del diseño tendrán similitud y cumplirán con los parámetros de funcionamiento de los enlaces?

Este proyecto surge en base a un requerimiento real que presenta un operador de telecomunicaciones, que presta servicios a nivel nacional y requiere aumentar su capacidad de transmisión para así satisfacer las necesidades de sus usuarios. Dado los análisis y aumento de

evolución de usuarios entre los periodos 2020 y 2022 para acceso a internet este diseño podrá evaluar el impacto de un sistema DWDM de larga distancia en una infraestructura de redes de telecomunicaciones basadas en multiplexación densa por división en longitudes de onda como plataforma de telecomunicaciones que ofrezca una mejor calidad en el transporte de información en el proveedor de servicios de internet (ISP). Por medio del diseño y documentación de las distintas fases será una alternativa de crecimiento para la empresa de comunicaciones.

En resumen, esta investigación es importante dado que es un diseño basado en un requerimiento real que aborda un problema relevante en cuanto acceso y ampliación óptica. Se espera que los resultados tanto teóricos y simulados tengan concordancia de esta forma ayudando como guía y estándar en diseños futuros de redes de transporte.

Motivación

Este diseño podrá favorecer al ISP que desea conocer de forma clara y sencilla, no solo el funcionamiento de este tipo de tecnología si no también los beneficios, ventajas y desventajas que ofrece la implementación de DWDM en la red. El aporte del diseño fundamentado en trabajos prácticos basado en un sistema real servirá de guía y estándar en los diseños de redes de transporte para que se continúen realizando este tipo de investigaciones, también favorecerá a quienes quieran realizar estudios sobre las ventajas tecnológicas y empresariales que desempeña DWDM.

Así mismo, como ámbito social se espera que con el diseño de esta plataforma de transporte, el ISP tenga una mayor capacidad a larga distancia, de esta forma beneficiando a los usuarios finales que se reflejara en la capacidad de usuarios conectados y velocidades de descargar. Como ámbito personal y laboral mediante la tecnología que será utilizada podre afianzar cada uno de los conocimientos obtenidos durante mi periodo académico, adicional el diseño y simulación que se plantean será de gran importancia cuando se realice la ejecución del proyecto.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar una red de transmisión de larga distancia basado en tecnología DWDM, mediante un análisis teórico de los principales factores de desempeño de la red, encontrando las similitudes con los resultados del software especializado de simulación VPI.

Objetivos Específicos

Establecer el estado del arte de las diferentes arquitecturas de redes transmisión por fibra óptica que afianzaran los conceptos teóricos de las redes de transporte DWDM.

Diseñar una red de transmisión de larga distancia para un operador de telecomunicaciones basado en un requerimiento real que cumpla los valores promedio de operación.

Realizar la simulación de la solución propuesta por medio del software Virtual Photonics (VPI), donde se evidenciarán los parámetros de funcionamiento de los enlaces.

Estudio de Tecnología

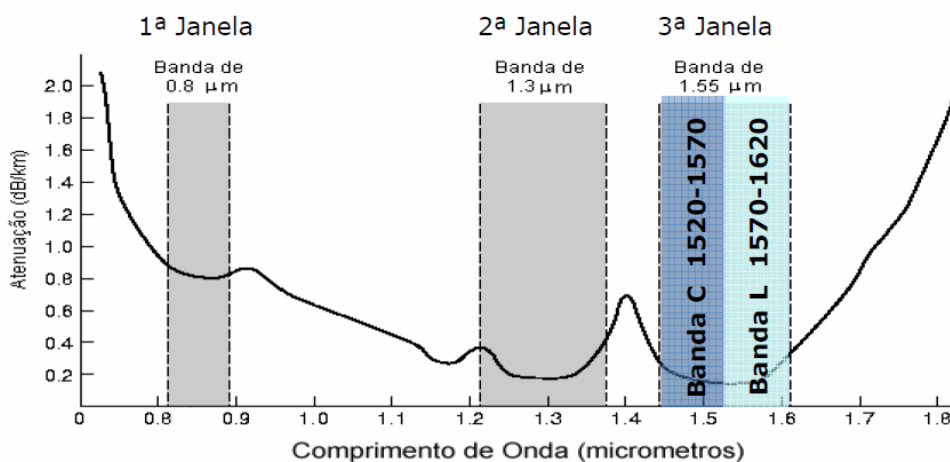
Los operadores se encuentran en la búsqueda de tecnologías escalables en ancho de banda en el cual puedan aumentar la capacidad de su red usando la cantidad mínima de recursos físicos. En este capítulo se presenta la tecnología DWDM y sus principales características, como medio de transmisión, ventanas de operación, componentes principales y tipos de elementos de red.

DWDM (Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa)

Es una técnica que permite enviar múltiples flujos de información por un medio físico (fibra) compartido, de esta forma se aumenta la capacidad de carga del medio realizando una asignación de frecuencias de luz (Longitud de onda). La banda C es la utilizada para esta tecnología que trabaja en longitud de onda de 1520 – 1570 ver Figura 1.

Figura 1

Ventanas de Transmisión Fibra Óptica. Tomada de [2]

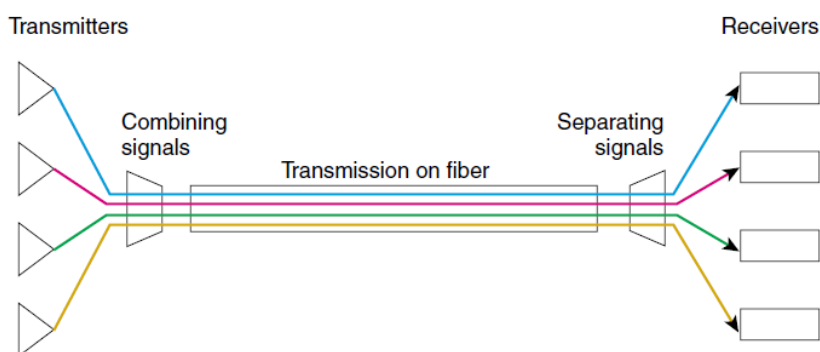


Nota. Adaptado de *LPE20 - Introdução à Teoria de DWDM* (p. 7), por Padtec, 2020

En la figura 2 Podemos pensar que en WDM cada canal es un color diferente, de esta forma la frecuencia de luz que son combinadas y a la vez transmitidas por el mismo medio físico de manera simultánea, pero usando frecuencias o longitudes de onda diferentes. Este método se conoce como multiplexación por división de longitud de onda (WDM) [3]

Figura 2

Esquema Funcional DWDM. Tomada de [3]



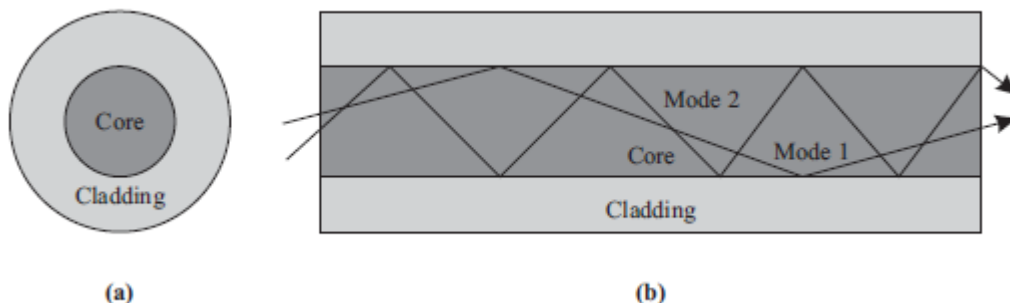
Nota. Adaptado de Introduction to DWDM technology (p. 28), por Cisco Systems Inc, 2000, cisco (https://www.cisco.com/c/dam/global/de_at/assets/docs/dwdm.pdf).

Medio de Transmisión

La fibra óptica es una estructura cilíndrica delgada en vidrio que está compuesta de dos partes (Figura 3): el núcleo (Core) que es el material interno y un material de revestimiento exterior (Cladina). El núcleo y revestimiento están diseñados para mantener señales de luz guiadas por medio de la fibra, esto nos permite que la luz sea transmitida a distancias relativamente largas antes de que la señal comience un proceso de degradación en calidad. [4]

Figura 3

(a) Estructura. (b) Propagación en una Fibra Óptica. Tomado de [4]



Nota. Adaptado de WDM Network Elements, in Optical Networks, A Practical Perspective. (p. 32), por Ramaswami, R., Sivarajan, K., Sasaki, G., 2002, Morgan Kaufmann.

La propagación de la fibra se puede comprender con el modelo de óptica geométrica, ilustrado en Figura 3. Un rayo de luz choca contra el revestimiento de un lado a otro en el núcleo, siendo esta reflejada por la estructura. En este modelo la señal cuenta con múltiples rayos de luz en el cual cada uno toma eventualmente un camino diferente por medio de la fibra óptica. Cada señal cuenta con un modo de propagación diferente, dado que viaja a una velocidad diferente comparándolo con el otro modo. [4]

Las fibras multi-modo trabajan en la banda $850nm$ su núcleo es más ancho 50 o 62,5 micras permitiendo la propagación del haz de luz por la fibra, lo cual la señal de información puede tomar distintos caminos causando que los pulsos viajen con tiempos diferentes como se representa en Figura 3.

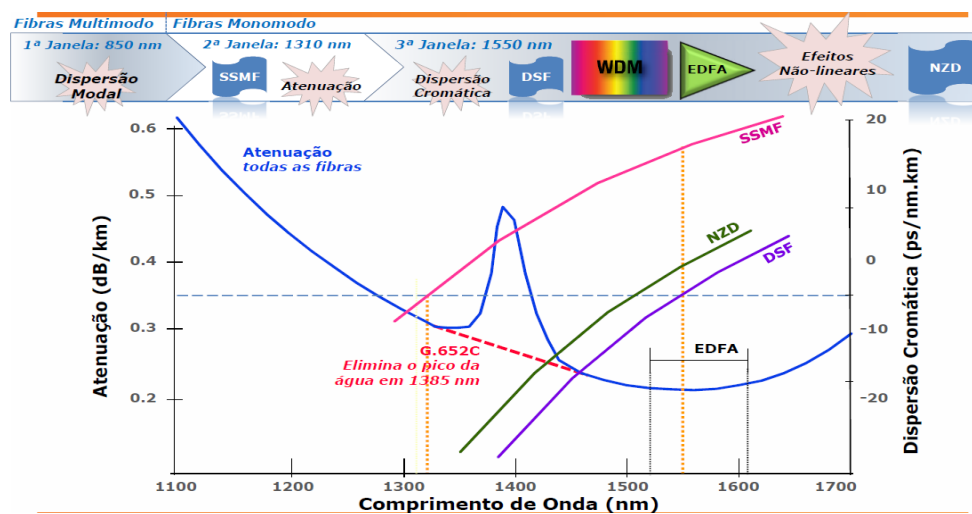
Las fibras mono-modo permite propagar solo un modo de luz a la vez. Opera en las bandas $1310nm$ y $1550nm$ su núcleo es más estrecho $8-10 \mu m$ (micrómetros) por lo cual elimina cualquier distorsión mejorando de forma significativa una atenuación de la señal y logrando

velocidades de transmisión altas.

La fibra G.652 fue la pionera en ser usada en sistemas de comunicación de larga distancia, la cual presenta una atenuación máxima de 0.25 dB/Km en la banda 1550nm (este valor dado por el estándar ITU-T G.652) [5]. La dispersión a 1550nm es aproximadamente de 17ps/nm/km, al realizar un aumento de tasa de transmisión a 10Gb/s en este tipo de fibra la dispersión cromática presento limitaciones dado que los receptores comerciales no soportan dispersión mayor a 1600 ps/nm por lo que en enlaces superiores a 94km debían ser regenerados. Como posibles alternativas podrían usar compensadores de dispersión cromática módulos pasivos que proporcionan perdidas de inserción, o buscar fibras nuevas con una dispersión más baja en la banda 1550nm, de esta forma se desarrolló la fibra G.653.

Figura 4

Características Fibra Mono-modo. Tomado de [2]



Nota. Adaptado de LPE20 - Introdução à Teoria de DWDM (p. 6), por Padtec, 2020

La fibra G.653 conocida como DSF (Dispersión Shift Fiber), presenta una dispersión cromática cercana a cero en la banda 1550nm. (Ver figura 4). Esta fibra óptica de dispersión desplazada dio solución a la limitación presentada por dispersión cromática en sistemas de 10Gb/s, pero dado la demanda de crecimiento en las tasas de transporte, se adopta tecnología WDM para usar múltiples señales en diferente longitud de onda por un único medio físico. [6]

Al utilizar este tipo de fibra y tecnología WDM, se encontró un efecto no lineal llamado mezcla de cuatro ondas (FWM, Four Wave Mixing) se da bajo un efecto que se llama casamiento de fase, que implica que la señal este en un punto de cero dispersión. FWM es más notorio en fibras G.653 en banda de 1550nm. Dado este efecto se desarrolla la fibra G.655.

La fibra G.655 conocida NZDSF (Non Zero Dispersion Shift Fiber). Esta cuenta con una dispersión diferente a cero en la banda 1550nm, de esta forma minimizando el efecto no lineal FWM que se presenta en la fibra G.653 y a la vez en comparación a la fibra G.652 una dispersión cromática más baja. [7]

Dada la evolución en pasar una capacidad con tasa de bit de 10Gb/s a 40/100Gb/s la fibra presenta G.655 presenta una mayor afectación por efectos no lineales como son SPM (Self phase modulation) y XPM (Cross phase modulation). Teniendo en cuenta los efectos lineales presentados en tasas mayores la fibra óptica estándar G.652 es el medio físico de transmisión para garantizar un sistema DWDM con tasas mayores o iguales a 10Gb/s.

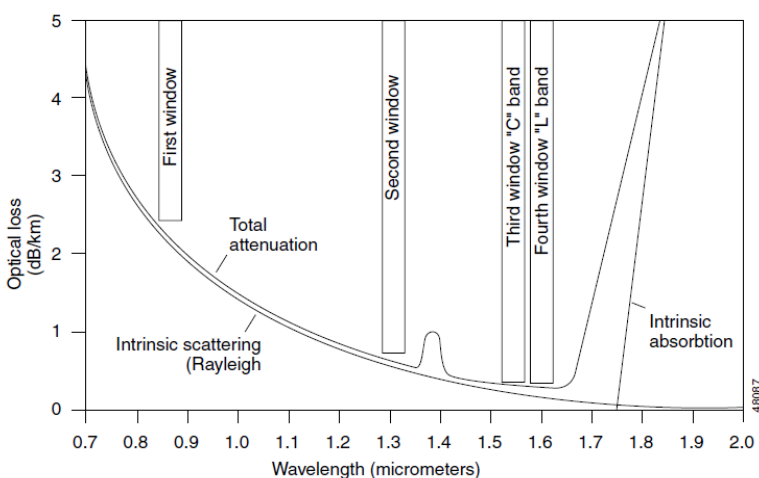
Atenuación

Es uno de los principales aspectos a tener en cuenta en cualquier medio de transmisión es la atenuación, puede ser causada por factores extrínsecos que se relacionan con el proceso de fabricación de la fibra, al ambiente y la flexión física de esta. También se tienen factores

intrínsecos como son la dispersión y la absorción que afectan las longitudes de onda por debajo de 800nm. [3]. La figura 5 muestra una curva de la atenuación total en función de la longitud de onda (μm) y las pérdidas ópticas en decibelios por kilómetro (dB/km). En la Figura 1 se muestra las ventanas de operación donde la tercera y cuarta corresponde a las bandas de operación C y L.

Figura 5

Curva Total de Atenuación en Fibras Ópticas. Tomada de [3]



Nota. Adaptado de Introduction to DWDM technology (p. 34), por Cisco Systems Inc, 2000, cisco (https://www.cisco.com/c/dam/global/de_at/assets/docs/dwdm.pdf).

La pérdida incurrida al propagarse por una fibra se puede modelar fácilmente de la siguiente manera: La potencia de salida (P_{out}) al final de una fibra de longitud L que está relacionada con la potencia de entrada (P_{in}).

$$P_{out} = P_{in}e^{-\alpha L}$$

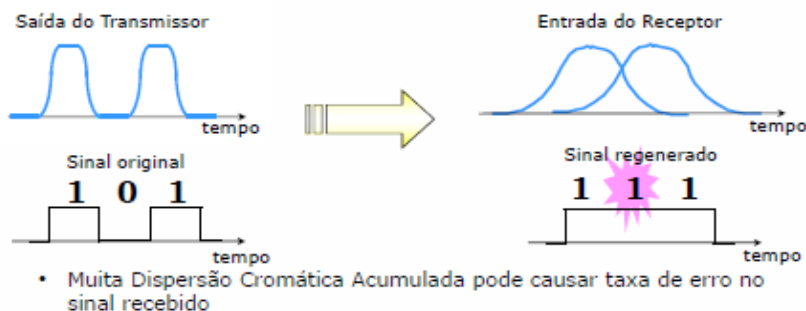
Dispersión Cromática

La dispersión cromática provoca en un sistema WDM de forma negativa una alteración sobre la señal que se transmite produciendo variación en la velocidad de propagación de la señal, esto puede generar errores por problemas de retardo, deformación de la señal y amplificación temporal de los pulsos ópticos esto generando interferencia entre sí.

En figura 6 se refleja la salida de transmisión del pulso enviado y el efecto producido de la dispersión cromática al pulso que viaja por medio físico (Fibra óptica), en la entrada del receptor tenemos interferencia entre dos pulsos ópticos.

Figura 6

Efecto Dispersión en Pulso Transmitido Tomado de [2]



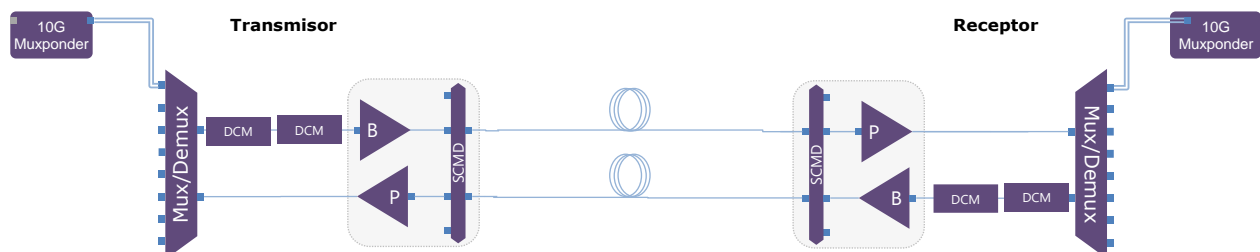
Nota. Adaptado de LPE20 - Introdução à Teoria de DWDM (p. 45), por Padtec, 2020

Se tienen alternativas para contrarrestar este efecto producido en la fibra óptica en una red compensada que use transmisores a 10Gb/s, el receptor usado es un foto detector el cual soporta 1600ps/nm de dispersión cromática, En lo descrito en Medios de transmisión se menciona que para una fibra G. 652 con dispersión 17ps/nm/km a 94km es lo máximo que soportaría este foto receptor sin compensación. Un sistema compensado punto a punto se

muestra en Figura 7.

Figura 7

Sistema DWDM Compensado en Topología Punto a Punto



Nota. La figura representa un sistema punto a punto con capa óptica multiplexada, amplificada y compensada por DCM.

Efectos no Lineales

Los efectos no lineales se dan de acuerdo a la intensidad de señal y tipo de fibra que se utiliza, Se debe evitar la alta potencia porque es más susceptible a los efectos no lineales como la modulación de fase inducida que depende de la intensidad de la señal, los efectos más destacados son:

Modulación de fase propia (SPM)

Modulación de fase cruzada (XPM)

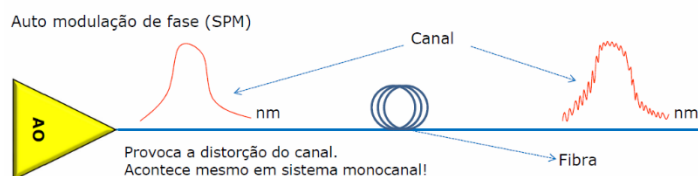
Mezcla de cuatro ondas (FWM)

Self-Phase Modulation (SPM) Cross-Phase Modulation (XPM): Estos efectos suceden cuando hay cambio en las potencias ópticas de la señal donde se tiene una variación en la fase de la señal. El ruido inducido en un canal dependerá de la variación del índice de refracción con la intensidad en el otro canal este efecto se llama modulación de fase cruzada (XPM). SPM puede

ser de gran consideración en sistemas diseñados a 10Gbps y la potencia de canal no debe exceder el orden de los milivatios (mW), mientras que CPM no presenta problemas para los sistemas WDM excepto que las distancias entre canales sean estrechas. [4].

Figura 8

Modulación de Fase Propia (SPM) Tomado de [2]



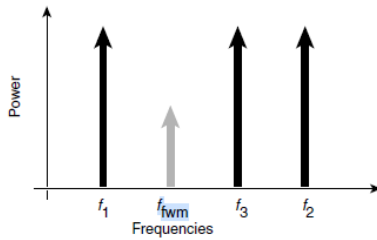
Nota. Adaptado de LPE20 - Introdução à Teoria de DWDM (p. 59), por Padtec, 2020

Four Wave Mixing (FWM): Este efecto se presenta cuando se desea transmitir dos o más longitudes de onda a la vez. El efecto de mezcla de cuatro ondas es independiente de la tasa de bits, pero depende críticamente del espacio entre canales y la dispersión cromática de la fibra. [4]

Las interacciones entre diferentes canales DWDM crean bandas laterales que pueden causar interferencias entre canales. En figura 9 se representa en 3 longitudes de onda interactuando por el medio físico donde viajan y de esta forma producir una cuarta onda agregando degradación de la señal a ruido.

Figura 9

Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) Tomada de [3].



Nota. Adaptado de Introduction to DWDM technology (p. 36), por Cisco Systems Inc, 2000, cisco (https://www.cisco.com/c/dam/global/de_at/assets/docs/dwdm.pdf).

Componentes

En un sistema DWDM se pueden encontrar elementos de red como:

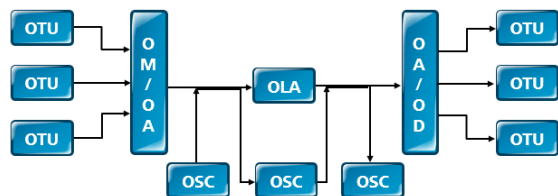
Unidad de transporte óptica (OTU)

Multiplexores ópticos (OM)

Demultiplexores ópticos (OD)

Amplificadores ópticos de línea (OLA)

Canales de supervisión óptico (OSC)

Figura 10*Elementos Sistema WDM.*

Nota. La figura representa la estructura general de un sistema DWDM con multiplexación de longitud de onda.

Alguna de las funciones principales de un sistema DWDM son:

Agrupar múltiples señales en un mismo par de hilos (OM)

Tabla 1*Longitudes de Onda en Banda C DWDM*

Canal	Frecuencia (GHz)	Longitud de Onda (nm)	Canal	Frecuencia (GHz)	Longitud de Onda (nm)
C21	192.100	1560.61	41	194.100	1544.53
C22	192.200	1559.79	42	194.200	1543.73
C23	192.300	1558.98	43	194.300	1542.94
C24	192.400	1558.17	44	194.400	1542.14
C25	192.500	1557.36	45	194.500	1541.35
C26	192.600	1556.65	46	194.600	1540.56
C27	192.700	1555.75	47	194.700	1539.77
C28	192.800	1554.94	48	194.800	1538.98
C29	192.900	1554.13	49	194.900	1538.19
C30	193.000	1553.33	50	195.000	1537.40
C31	193.100	1552.52	51	195.100	1536.61
C32	193.200	1551.72	52	195.200	1535.82
C33	193.300	1550.92	53	195.300	1535.04
C34	193.400	1550.12	54	195.400	1534.25
C35	193.500	1549.32	55	195.500	1533.47
C36	193.600	1548.51	56	195.600	1532.68
C37	193.700	1547.72	57	195.700	1531.90
C38	193.800	1546.92	58	195.800	1531.12
C39	193.900	1546.12	59	195.900	1530.33
C40	194.000	1545.32	60	196.000	1529.55

Nota. Algunas de las ventajas más considerables para redes DWDM es la capacidad de transmitir múltiples señales simultáneas por medio de una única fibra óptica. La transmisión de la señal puede abarcar mayores distancias con diferentes longitudes de onda, evitando degradación sobre la señal óptica.

Agregar y desagregar tráfico (OTU).

Sistema de amplificación para cubrir distancias mayores.

Los elementos principales en un sistema DWDM cuenta con una serie de características y parámetros. En la Tabla 2 se describe cada uno de los componentes principales para el diseño de las redes de transporte. Estos valores son tomados de un proveedor latinoamericano.

Tabla 2*Parámetros Componentes Ópticos. Tomado de [8]*

Componente	Característica	Parámetro	Valor típico
Multiplexor	8 canales	Pérdida de Inserción	4 dB
Multiplexor	20 canales	Pérdida de Inserción	5,5 dB
Multiplexor	40 canales	Pérdida de Inserción	7 dB
Multiplexor	80 canales	Pérdida de Inserción	7 dB
Transmisor	10Gb/s OOK	Pout	0dBm
Transmisor	10Gb/s OOK	Sensibilidad	-18dBm
Transmisor	10Gb/s OOK	Tolerancia Dispersión Cromática	1600 ps/nm
Transmisor	10Gb/s OOK	Tolerancia OSNR	14dB
Transmisor	100Gb/s DP-QPSK	Pout	0dBm
Transmisor	100Gb/s DP-QPSK	Sensibilidad	-18dBm
Transmisor	100Gb/s DP-QPSK	Tolerancia DC	40 ns/nm
Transmisor	100Gb/s DP-QPSK	Tolerancia OSNR	12.5dB
Amplificador	EDFA	Pot. Salida por canal 10Gb/s	5dBm
Amplificador	EDFA	Pot. Salida por canal 100Gb/s	2dBm
Amplificador	EDFA	NF	5-6dB
Amplificador	EDFA	Pot. Salida Total	18-24dBm

Amplificador	EDFA	Sensibilidad	-25dBm
Amplificador	Raman	Ganancia Raman 28dBm	7dB
Amplificador	Raman	Ganancia Raman 30dBm	12dB
DCFM	84 ps/nm	Pérdida de Inserción	1,5dB
DCFM	167 ps/nm	Pérdida de Inserción	2dB
DCFM	335 ps/nm	Pérdida de Inserción	2,5dB
DCFM	669 ps/nm	Pérdida de Inserción	3,5dB
DCFM	1339 ps/nm	Pérdida de Inserción	6,5dB
OADM	2 canales	Pérdida de Inserción Add/Drop	3dB
OADM	2 canales	Pérdida de Inserción Express	2,5dB
OADM	4 canales	Pérdida de Inserción Add/Drop	4dB
OADM	4 canales	Pérdida de Inserción Express	2,5dB
OADM	8 canales	Pérdida de Inserción Add/Drop	5dBm
OADM	8 canales	Pérdida de Inserción Express	2,5dB
WSS	9 grados B&S	Pérdida de Inserción In – Inter	10dB
WSS	9 grados B&S	Pérdida de Inserción Inter – Out	10dB
WSS	9 grados B&S	Pérdida de Inserción In – Drop	7dB
WSS	9 grados B&S	Pérdida de Inserción ADD – Out	8dB

Nota. La tabla representa cada uno de los componentes de una red DWDM en valores típicos podemos encontrar valores más importantes al realizar un presupuesto de potencia.

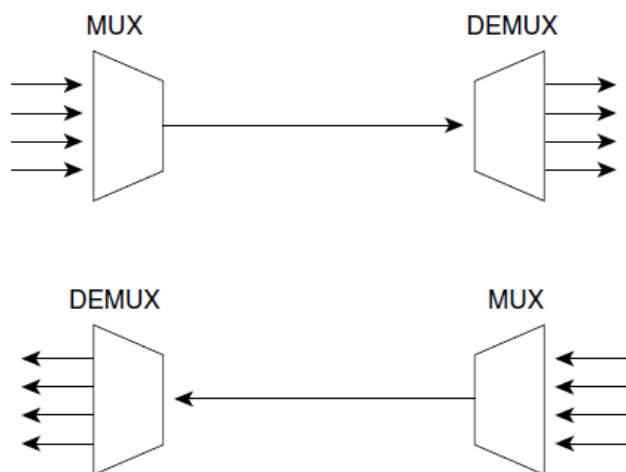
Multiplexores y Demultiplexores

Debido a que los sistemas DWDM envían señales de varias fuentes a través de una sola fibra, deben incluir algunos medios para combinar las señales entrantes. Esto se hace con un multiplexor, que toma longitudes de onda ópticas de múltiples fibras y las converge en un solo haz. En el extremo receptor, el sistema debe ser capaz de separar los componentes de la luz para que puedan ser detectados discretamente. Los demultiplexores realizan esta función separando el haz recibido en sus componentes de longitud de onda y acoplándolos a fibras individuales. La demultiplexación debe realizarse antes de que se detecte la luz, porque los foto detectores son dispositivos inherentemente de banda ancha que no pueden detectar selectivamente una sola longitud de onda. [3]

En un sistema unidireccional (ver Figura 11) se tiene un multiplexor en el extremo de transmisión y en el lado remoto un demultiplexor receptor. Se requerirían dos sistemas en cada extremo para la comunicación bidireccional igualmente dos hilos de fibra separados.

Figura 11

Multiplexor y Demultiplexor Sistema Unidireccional. Tomado de [3].

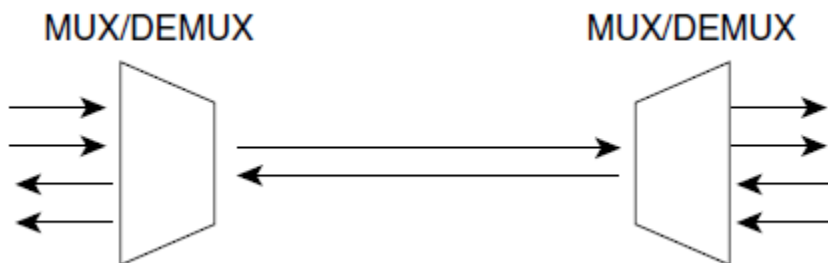


Nota. Adaptado de Introduction to DWDM technology (p. 41), por Cisco Systems Inc, 2000, cisco (https://www.cisco.com/c/dam/global/de_at/assets/docs/dwdm.pdf).

En un sistema bidireccional (ver Figura 12), hay un multiplexor/demultiplexor en cada extremo el cual en un único equipo se tiene integrado tanto el proceso de transmisión y receptor la comunicación se realiza a través de un único par de fibras.

Figura 12

Multiplexor y Demultiplexor Sistema Bidireccional. Tomado de [3].



Nota. Adaptado de Introduction to DWDM technology (p. 41), por Cisco Systems Inc, 2000, cisco (https://www.cisco.com/c/dam/global/de_at/assets/docs/dwdm.pdf).

Amplificadores Ópticos

En las redes de comunicaciones ópticas se tiene elementos que generaran altas perdidas de inserción como compensadores, acopladores (los multiplexores, las pérdidas de inserción van a varias de acuerdo a la cantidad de canales del sistema como sistema de 8 canales (perdidas 4dB) y sistema de 80 canales (Perdidas hasta 7dB), adicionalmente los amplificadores nos ayudaran a contrarrestar las limitaciones de los transmisores y receptores con respecto a la potencia de transmisión y recepción soportada, es por esto que el uso de los amplificadores ópticos son de suma importancia para que las redes sean de alta capacidad y largo alcance.

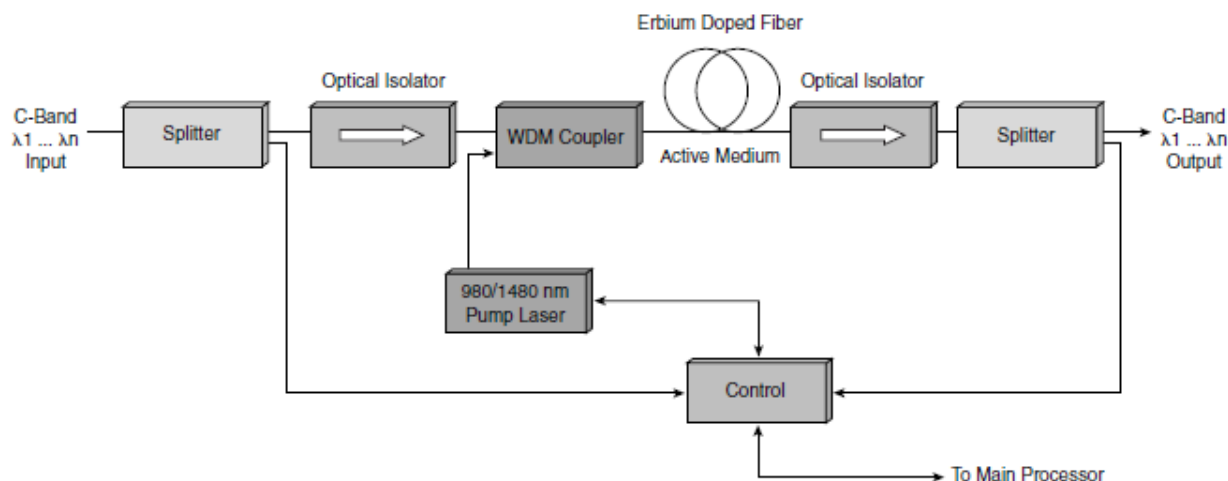
Dado que la fibra óptica tiene ventanas de baja atenuación en longitudes cercanas a 1310nm y 1550nm, las recomendaciones ITU-T G.555, G.653 y G.652 definen las bandas de operación de las fibras ópticas, siendo la banca C 1530nm – 1565nm (ver Figura 1) la más adecuada para transmisión de larga distancia.

Amplificadores EDFA

Su principio de funcionamiento se basa en bombear un segmento de fibra dopada con erbio a través de un láser de alta potencia. En presencia de esta bomba, los iones de erbio se excitan a un nivel de energía más alto, pero inestable, y luego regresan al nivel inicial. Este proceso de decaimiento libera energía en forma de fotones con una longitud de onda alrededor de 1550nm al entrar en fase con las señales ópticas recibidas, favoreciendo su amplificación. [9]

Figura 13

Esquema Amplificador de Fibra Dopado de Erblio (EDFA). Tomado de [9].



Nota. Adaptado de Optical network design and implementation (p. 123), por Cisco Systems Inc., 2004, Cisco Press.

Los parámetros clave de rendimiento de los amplificadores ópticos son la ganancia, la uniformidad de la ganancia, el nivel de ruido y la salida. Los EDFA normalmente son capaces de obtener ganancias de 30 dB o más y una potencia de salida de +17 dB o más. Sin embargo, los parámetros objetivos al seleccionar un EDFA son bajo ruido y ganancia plana. La ganancia debe ser plana porque todas las señales deben ser amplificadas uniformemente. Mientras que la ganancia de señal proporcionada con la tecnología EDFA depende inherentemente de la longitud

de onda, se puede corregir con filtros de aplanamiento de ganancia. El bajo nivel de ruido es un requisito porque el ruido, junto con la señal, se amplifica. Como este efecto es acumulativo, y no puede filtrarse, la relación señal/ruido es un factor limitante en última instancia del número de amplificadores que pueden concatenarse y, por tanto, la longitud de un único enlace de fibra. [3]

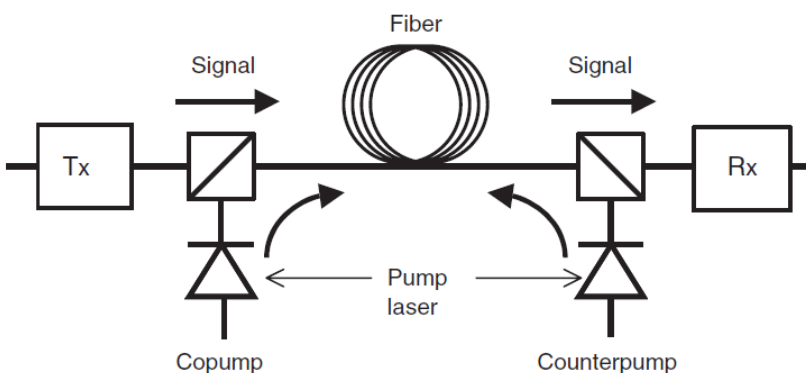
Amplificador Híbrido

Los amplificadores RAMAN, a diferencia de los tradicionales amplificadores EDFA, hacen uso de los efectos no lineales para obtener el efecto de amplificación. La ganancia Raman proviene de la transferencia de potencia desde una señal de mayor frecuencia hacia una señal de menor frecuencia dada por la energía de un fonón óptico. [10]

El efecto Raman es un efecto bidireccional, por lo tanto, es posible utilizarlo en el mismo sentido de transmisión de la señal (amplificador en transmisión) o en el sentido contrario (amplificador en recepción), sin embargo, como la potencia de la señal se limita en transmisión para evitar efectos no lineales y la potencia decrece a medida que se propaga por la fibra óptica, este efecto es normalmente usado en recepción. La Figura 14 muestra la configuración del amplificador Raman para transmisión y recepción [12]

Figura 14

Configuración Amplificadora Raman. Tomado de [12]



Nota. Adaptado de Raman Amplification in Fiber Optical Communication System. (p. 7), por Headley, C., Agrawal, G., 2005, Elsevier Academic Press.

Transmisores

Los transmisores ópticos son los elementos encargados de adaptar la señal de entrada para ser transmitida por un sistema WDM. Son los encargados de modular la señal de entrada en una longitud de onda adecuada para luego ser conectada al multiplexor óptico, siguiendo la recomendación ITU-T G.694.1 [15]. Los transmisores están compuestos por fuentes de luz y moduladores.

Se utilizan múltiples transmisores ópticos como fuentes de luz en un sistema DWDM. Los bits de datos eléctricos recibidos (0 o 1) activarán la modulación de del flujo de luz. Los laser crean pulso de luz. Cada pulso de luz tiene una longitud de onda diferente y exacta (λ) la cual se expresa en nanómetros (nm).

Para entender el funcionamiento de un láser, este puede ser considerado como un amplificador dentro de una cavidad resonante. Si el amplificador, o medio de ganancia es

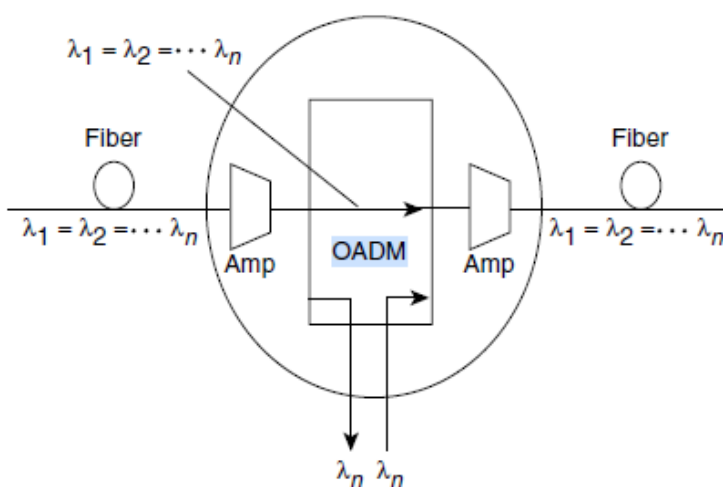
ubicado entre dos placas reflectivas paralelas, en el momento en que la señal impacte la placa exterior, parte de la señal será transmitida mientras que la otra parte será reflejada hacia el dispositivo, donde se producirá una interferencia constructiva para las longitudes de onda resonantes dentro de la cavidad, lo que se conoce como modos longitudinales. [10]

OADM (Optical Add Drop Multiplexer)

Entre los puntos de multiplexación y demultiplexación en un sistema DWDM, como se muestra en la Figura, hay una zona en la que existen múltiples longitudes de onda. A menudo es deseable poder eliminar o insertar una o más longitudes de onda en algún punto a lo largo de este tramo. Un multiplexor óptico add/drop (OADM) realiza esta función. En lugar de combinar o separar todas las longitudes de onda, el OADM puede eliminar algunas y transmitir otras. Los OADM son una pieza clave para avanzar hacia el objetivo de las redes totalmente ópticas. [3]

Figura 15

Esquema Básico Optical Add Drop Multiplexer. Tomado de [3]

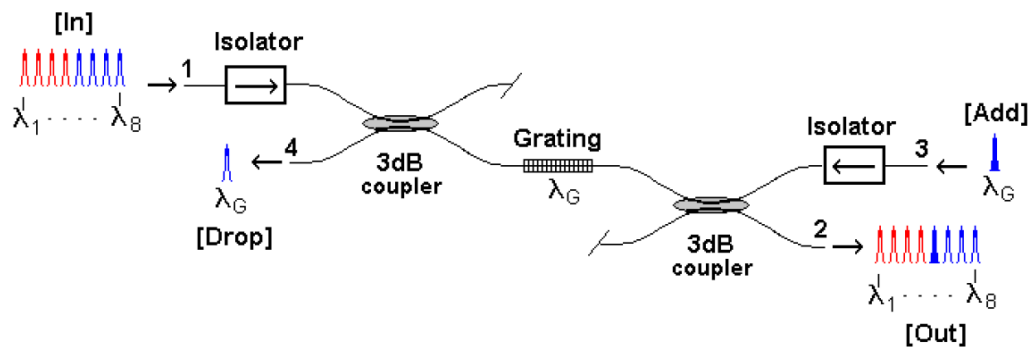


Nota. Adaptado de Introduction to DWDM technology (p. 44), por Cisco Systems Inc, 2000, cisco (https://www.cisco.com/c/dam/global/de_at/assets/docs/dwdm.pdf).

El elemento básico usado en la construcción del OADM es la rejilla de Bragg, la cual realiza la función de filtro pasa banda, reflejando ciertas longitudes de onda y permitiendo el paso de las restantes de acuerdo a sus parámetros físicos. Para completar las funcionalidades de agregar o desagregar tráfico, se agregan acopladores o circuladores de acuerdo a como se muestra en la Figura 16 y 17 [10].

Figura 16

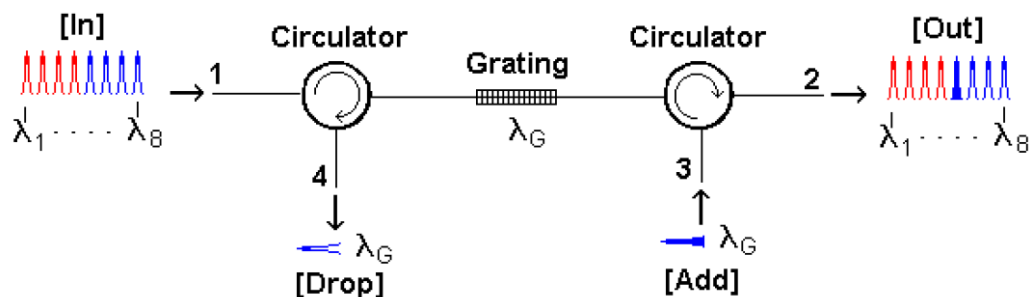
OADM Basado en Rejillas y Acopladores. Tomado de [10].



Nota. Adaptado de Modelo Para Establecer La Migración De Red De Transporte Óptico Para Soportar Futuros Servicios Basados En La Nube Y Requerimientos De Redes Móviles De Quinta Generación. (p. 51), por Yepes, H., 2019

Figura 17

OADM Basado en Rejillas y Circuladores. Tomado de [10].



Nota. Adaptado de Modelo Para Establecer La Migración De Red De Transporte Óptico Para Soportar Futuros Servicios Basados En La Nube Y Requerimientos De Redes Móviles De Quinta Generación. (p. 51), por Yepes, H., 2019

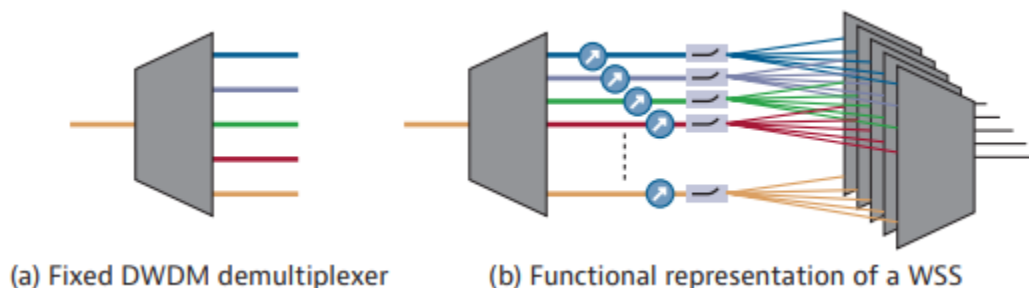
WSS (Wavelength Selective Switch)

Los WSS permiten seleccionar cualquier longitud de onda de cualquier origen y direccionarlo hacia un puerto de destino haciendo una configuración de manera lógica.

La diferencia clave entre un demultiplexor fijo y un WSS se ilustra en la Figura 18. Para un demultiplexor, hay es una relación clara y fija entre el puerto de salida y la longitud de onda; a cada longitud de onda se le asigna una salida específica fibra (o puerto). A diferencia de un WSS, cualquier longitud de onda, grupo o banda de longitudes de onda puede dirigirse a cualquier fibra de salida. Estos patrones de salida pueden cambiarse o reasignarse a diferentes fibras de salida a través de un circuito eléctrico. Esta capacidad dinámica también se ha ampliado en la mayoría de los casos para incluir una función de atenuación. mientras que un demultiplexor generalmente se construye a partir de unos pocos elementos ópticos fijos. [14] En las referencias [14] y [15] se puede encontrar más información sobre el funcionamiento del dispositivo.

Figura 18

Diferencia Funcionalidad FOADM y ROADM.



Nota. Adaptado de ROADM and Wavelength Selective Switches (p. 2), por Viavi Solutions, 2019, Viavi (<https://www.viavisolutions.com/en-us/literature/roadm-and-wavelength-selective-switches-application-notes-en.pdf>)

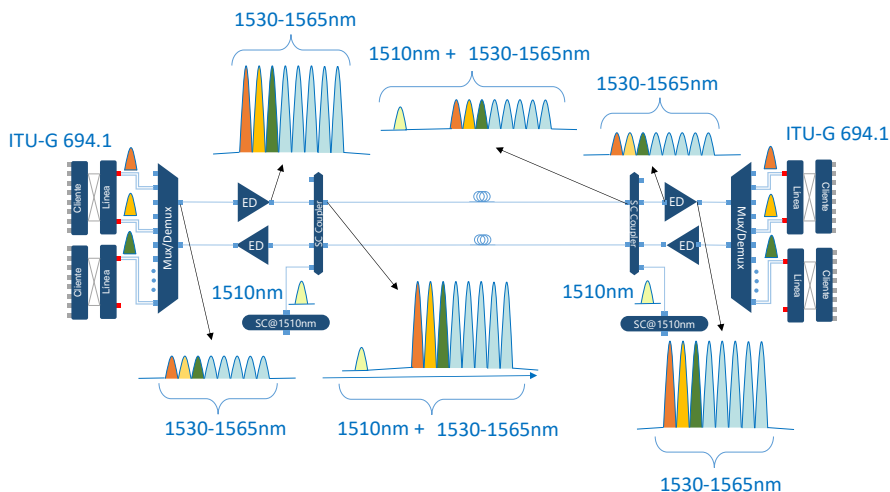
Arquitectura de Red DWDM

La tecnología DWDM se compone de transmisores sintonizables siguiendo la recomendación ITU-T G.694.1, elementos que permitan agregar múltiples señales en un mismo hilo de fibra como es el caso de multiplexores ópticos u OADMs, amplificadores EDFA para compensar las pérdidas de inserción del elemento de agregación de tráfico y para permitir la transmisión de la señal a mayor distancia. Adicional a estos elementos, es necesario transportar una señal de supervisión que permita el monitoreo y gestión de los elementos ópticos que componen el sistema en caso de una falla de alguno de sus componentes, por lo tanto, después de los amplificadores ópticos es agregado un acoplador que une la señal proveniente del amplificador (Banda C) con una señal que normalmente se encuentra en una longitud de onda de 1510nm. [10]

La Figura 19 muestra la arquitectura de red especificando bandas de operación, de supervisión y funcionalidad de cada elemento del sistema.

Figura 19

Distribución de Longitudes de Onda en Sistema DWDM. Tomado de [10]



Nota. Adaptado de Modelo Para Establecer La Migración De Red De Transporte Óptico Para Soportar Futuros Servicios Basados En La Nube Y Requerimientos De Redes Móviles De Quinta Generación. (p. 55), por Yepes, H., 2019

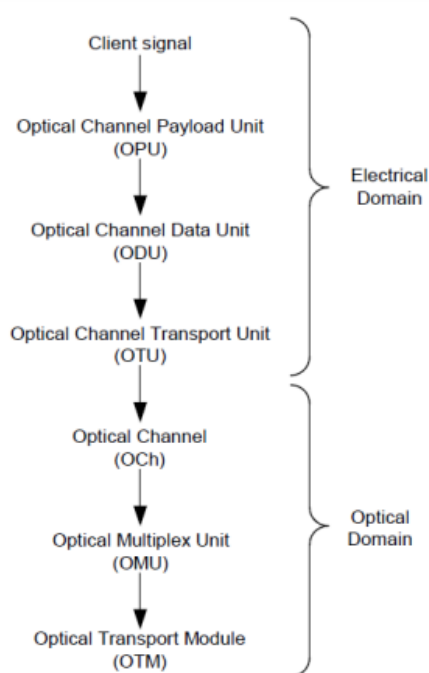
Optical Transport Networks (OTN)

(Optical Transport Network) están definidas por la ITU-T como un conjunto de elementos ópticos de red conectados por enlaces de fibra óptica que son capaces de proveer funcionalidad de transporte, multiplexación, enrutamiento, gestión y supervisión de los canales ópticos en los que viajan las señales de información. OTN maneja diversos protocolos que permiten la gestión de los equipos, monitorear el rendimiento de la red, manejo del jitter, así como también están definidas la arquitectura de trama y las características físicas de la red.

Una de las aplicaciones más importantes de OTN es la implementación de sistemas DWDM basados en OTN, es decir, los elementos de red son los utilizados para redes DWDM, pero el transporte de la información se hace a través de protocolos de OTN.

Figura 20

Diagrama de Flujo Señal OTN. Tomada de [16].



Nota. Adaptado de A Tutorial on ITU-T G.709 Optical Transport Networks (OTN) (p. 15) por Gorshe, S, 2009, PMC-Sierra

La señal cliente (Ethernet, SDH, SONET, etc.) es insertada en una trama payload, allí se le adicionan unas cabeceras y todo este conjunto conforma la unidad óptica de payload (OPU). A esta unidad OPU, se le agregan cabeceras de operación, administración y mantenimiento (OAM) y de esta manera se obtiene la unidad de datos óptica (ODU). A esta unidad se le agregan entonces cabeceras de transporte, como, por ejemplo, de alineación de tramas y de corrección de

errores (FEC), obteniendo entonces la unidad de transporte óptico (OTU), que es el último paso antes de la transmisión óptica de la señal. [16]

En el dominio eléctrico, las capas de red del protocolo OTN se describen de la siguiente forma:

OPU: encargado de encapsular y justificar la tasa de la señal cliente hacia la tasa del contenedor OPU.

ODU: Agrega encabezados para operación y mantenimiento de la señal del cliente en sus extremos de interconexión, incluyendo encabezados para conexiones tándem, transmisión de señales de control de los protocolos cliente y conteo de errores del lado cliente.

OTU: Agrega encabezado adicional para operación y mantenimiento de la señal cliente tanto en sus puntos terminales como en los puntos de regeneración. Adiciona un encabezado para corrección de errores (FEC).

En el dominio óptico, las capas de red del protocolo OTN se describen de la siguiente forma:

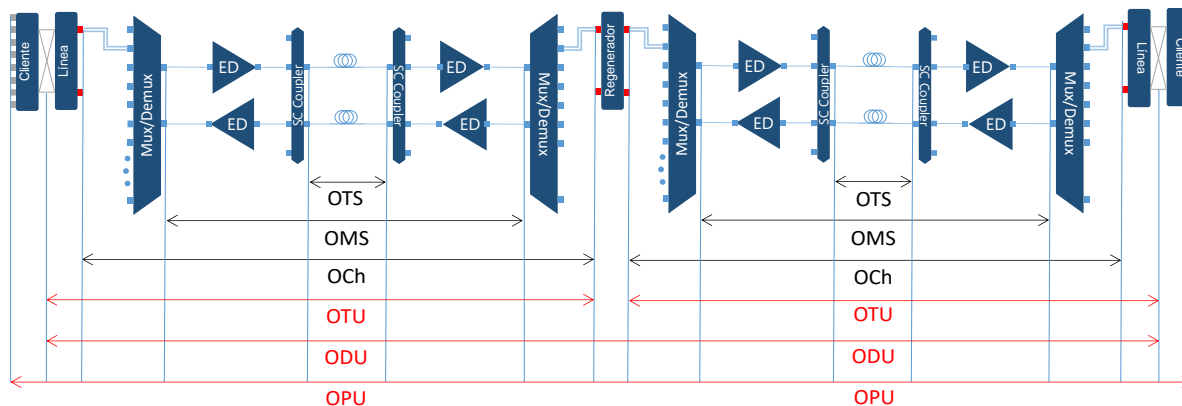
OCh: Es la primera capa óptica del protocolo OTN, toma la información de la capa digital OTU y la modula en una longitud de onda de acuerdo a la recomendación ITU-T G.694.1.

OMS: El OMS se compone de múltiples OCh, representa la interconexión entre los Multiplexores y Demultiplexores de un enlace óptico

OTS: Representa la conexión entre cualquier de los elementos de la red OTN, en un caso práctico, entre los amplificadores.

Figura 21

Capas Digitales y Ópticas OTN en Red WDM. Tomado de [10]



Nota. Adaptado de Modelo Para Establecer La Migración De Red De Transporte Óptico Para Soportar Futuros Servicios Basados En La Nube Y Requerimientos De Redes Móviles De Quinta Generación. (p. 58), por Yepes, H., 2019

Tasa de Errores y Corrección de Errores (BER pre FEC)

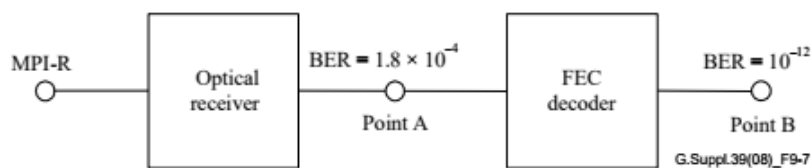
La tasa de errores binarios (BER) es el indicador final para medir la calidad de la transmisión. Debido al impacto de factores tales como el ruido, los efectos no lineales y la dispersión (PMD/CD), las formas de onda de las señales ópticas acopladas a las fibras se distorsionan cuando las señales ópticas llegan al final de los enlaces de fibra. Por lo tanto, los errores de bits están presentes cuando el receptor convierte las señales ópticas en señales eléctricas.

Si se utiliza esta metodología, los valores de sensibilidad de recepción y penalidad de trayecto óptico medidos en la salida del receptor (punto A) con una tasa BER de $10E-5$ a $10E-6$ será normalmente estimaciones prudentes de los valores de sensibilidad de reflector y penalidad

del trayecto para un valor BER de $10E-12$ después del decodificador FEC (punto B). Ver figura (22). [17]

Figura 22

Utilización del Sistema de Corrección FEC y del Receptor Tasa de Errores en los Bits en la Salida. [17]



Nota. Adaptado de Optical system design and engineering considerations (p. 66) por recommendation ITU-T G-series Sup.39, 2016, ITU-T

Diseño Redes DWDM

El diseño de redes de transporte óptico tiene como finalidad asegurar las capacidades finales y con esto cumplir ciertos parámetros de ingeniería como potencia de recepción, OSNR, FEC, presupuesto de potencia, etc.... Así como ser capaces de suplir la demanda actual y futura de tráfico y servicios que el cliente necesita. Por lo cual se debe pensar en una estructura escalable, con posibilidad de ampliarse reduciendo costos operativos.

Algunos de los datos primordiales para el diseño de una red WDM deben constituir las características de la fibra óptica ya instalada.

Tipo de fibra óptica instalada. SMF (G.652), NZD (G.655), DSF (G.653).

Topologías, distancias, atenuación

Matriz de tráfico




Caracterización de fibra óptica

Atenuación óptica [dB/Km]: Atenuación óptica del medio físico que hay entre los elementos de red o nodos. Dependiendo de la fibra esta tendrán características diferentes que contarán con variaciones en los valores.

Perdidas por empalme [dB]: Pérdidas producidas por empalmes en escenarios de reparación o ODF por donde pasara la señal. En el mercado se tiene una gran variedad de conectores el más utilizado en DWDM es APC dado que la pérdida por acople de este conector es aproximadamente 0.2dB.

Figura 23

Perdidas por Tipo de Conector

Forma De acople del Conector	Tipo Conector	Luz Reflejada Hacia la Fuente	Perdida Acople
	Conector PC	0.01%	0.5dB
	Conector UPC	0.001%	0.3dB
	Conector APC	0.0001%	0.2dB (0.1dB para LX5/E2000)

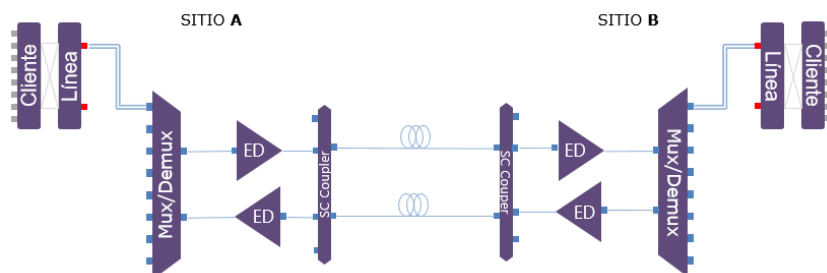
Nota. Las pérdidas se generan por la forma en que la luz es reflejada hacia la fuente y el espacio (GAP) que queda entre los conectores dentro de un acople mecánico.

Topología Red DWDM

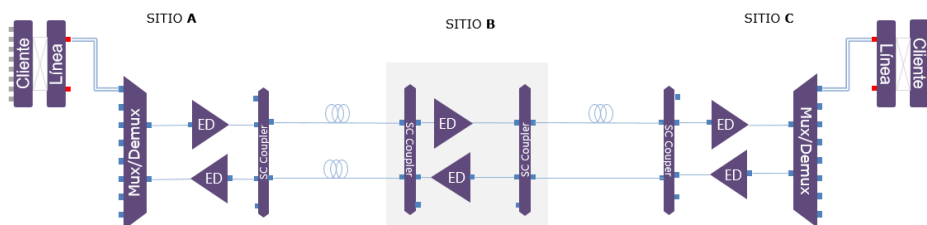
Una vez se tengan los datos anteriormente mencionados, se estudiará la topología que se ajuste a la necesidad del cliente y donde se necesite extraer e insertar el tráfico. Se puede contar con una serie de topologías como:

Topología Punto a Punto

Este tipo de topología no existe una protección de camino a menos que se redunde por medio de claves ópticas. Tanto en el nodo inicial como remoto se agrega y desagrega todo el tráfico. Puede ser necesario la instalación de amplificadores ópticos intermedios ver Figura 25 (Optical Line Amplifier OLA) dependiendo de la distancia entre los nodos.

Figura 24*Sistema Punto a Punto.*

Nota. La figura representa la estructura general de un sistema DWDM punto a punto con amplificación EDFA.

Figura 25*Sistema Punto a Punto con OLA Intermedio.*

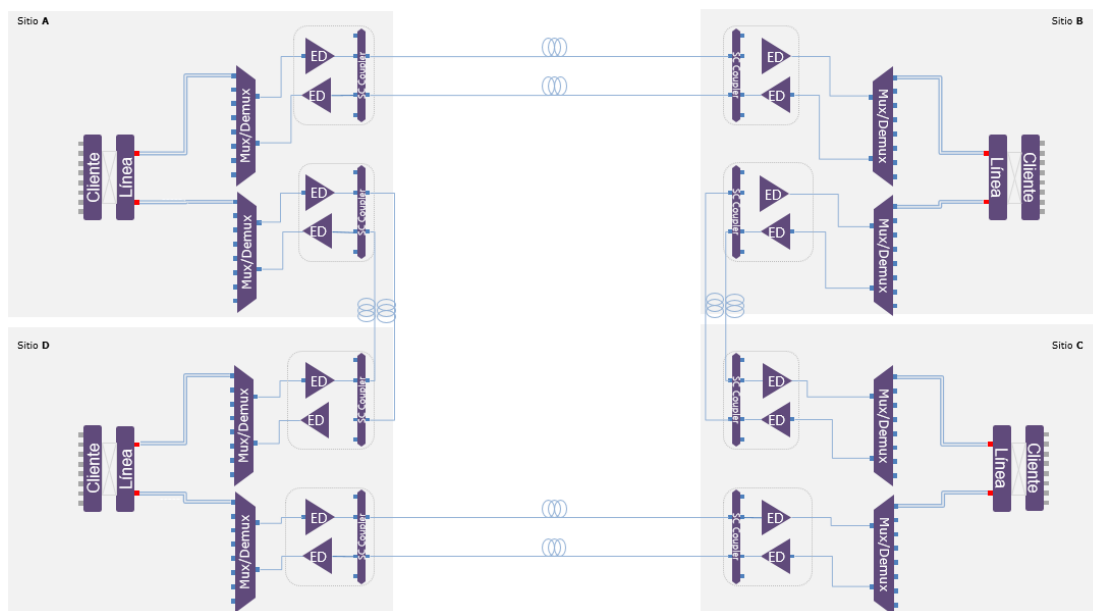
Nota. La figura representa la estructura general de un sistema DWDM punto a punto con nodo amplificador (OLA) intermedio por distancia entre los nodos cabecera.

Topología en Anillo

Es una topología en la cual cada nodo se conecta a otros dos nodos de esta manera formando una ruta continua, puede protegerse la señal óptica por varios caminos. Esta estructura es común en entornos metropolitanos donde la distancia sea reducida y no requiera de nodos amplificadores ópticos.

Figura 26

Sistema Topología en Anillo.



Nota. La figura representa la estructura general de un sistema DWDM anillado conectados entre sí por medio de fibra externa.

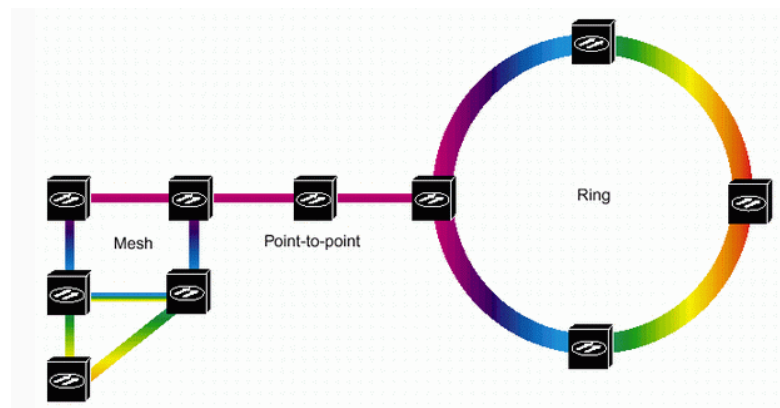
Topología Redes Malladas

Es una de las topologías más completas pudiendo conectar los nodos entre sí. Ofrece redundancia. En este tipo de topologías se suele encontrar nodos ROAMD (Reconfigurable Optical Add Dropp Multiplexer) permitiendo enrutar las diferentes lambdas según las

necesidades. En este tipo de topología hay que mencionar el uso de mecanismos de planificación y restauración de lambdas utilizando WSS (Wavelength Selective Switch) que se mencionó en el apartado WSS (Wavelength Selective Switch).

Figura 27

Topología Mallada



Nota. Adaptado de Introduction to DWDM technology (p. 58), por Cisco Systems Inc, 2000, cisco (https://www.cisco.com/c/dam/global/de_at/assets/docs/dwdm.pdf).

Presupuesto de Potencia

El presupuesto de potencia óptico es usado para analizar y calcular la distancia máxima de fibra óptica que podemos tener entre dos elementos activos, como transponders o amplificadores. El cálculo del presupuesto de potencia en un sistema mono canal debemos conocer la potencia de transmisión del elemento activo, pérdidas de inserción de los elementos en la ruta y la potencia mínima de recepción del elemento activo que recibirá dicha potencia. Se debe considerar un margen de seguridad con el fin de que, en caso de una posible degradación por atenuación, evento de fibra óptica o componente óptico el sistema siga operativo. La figura 28 muestra el modelo de presupuesto de potencia de un enlace mono canal.

P_{Tx} = Potencia de Transmision

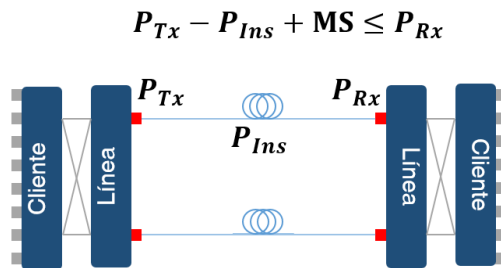
P_{Ins} = Perdidas por insercion

MS = Margen de seguridad

P_{Rx} = Potencia de recepcion

Figura 28

Modelo de Presupuesto de Potencia Enlace Mono Canal [10]

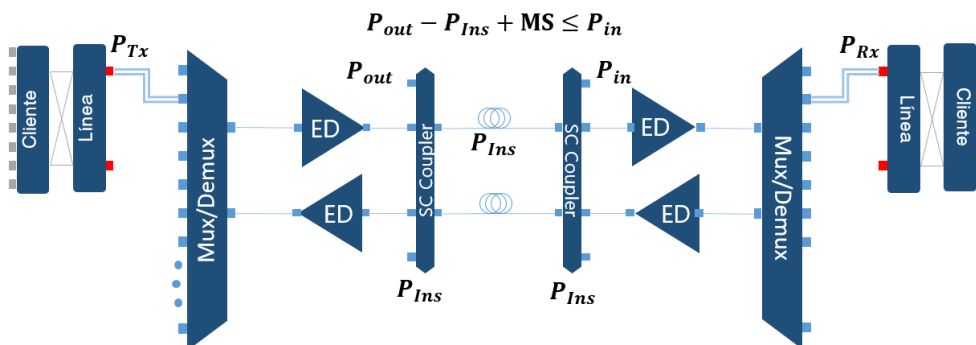


Nota. Adaptado de Modelo Para Establecer La Migración De Red De Transporte Óptico Para Soportar Futuros Servicios Basados En La Nube Y Requerimientos De Redes Móviles De Quinta Generación. (p. 62), por Yepes, H., 2019

El análisis de presupuesto de potencia en sistemas DWDM es un poco más complejo, ya que los amplificadores ópticos del sistema deben estar diseñados para soportar el crecimiento futuro sin entrar en región de saturación. El modelo de presupuesto de potencia para sistemas DWDM con amplificadores ópticos se presenta en la Figura 29.

Figura 29

Modelo de Presupuesto de Potencia para un Enlace WDM. [10]



Nota. Adaptado de Modelo Para Establecer La Migración De Red De Transporte Óptico Para Soportar Futuros Servicios Basados En La Nube Y Requerimientos De Redes Móviles De Quinta Generación. (p. 62), por Yepes, H., 2019

Relación de Señal Óptica al Ruido (OSNR)

En un sistema de comunicación óptico, la relación señal a ruido óptico (OSNR) es la medida del nivel de potencia óptica (dB) de una señal transmitida, por el nivel de potencia del ruido existente en el sistema (dB). La relación señal a ruido es una medida de cómo una buena señal óptica sobresale a cualquier luz que penetre por accidente en el sistema. La señal debe ser considerablemente más potente que el ruido subyacente. La señal reduce su potencia con la distancia en una fibra óptica y debe ser necesariamente elevada en forma periódica, por medio de amplificadores ópticos. No obstante, la ganancia óptica asociada a esos amplificadores debe balancearse contra el ruido adicional que cada amplificador introduce. Los amplificadores ópticos amplían la señal, pero también el ruido indeseado. Mientras menor sea el nivel de la señal y mayor el nivel de ruido, menor será el OSNR. [17]

Para cada amplificador se calcula el OSNR de la siguiente manera:

$$OSNR_{dB} = P_{in} - NF + 58$$

P_{in} : Potencia de entrada al amplificador [dBm]

NF : Figura de ruido del amplificador [dB]

58: Resultado del calculo h, V y Δf

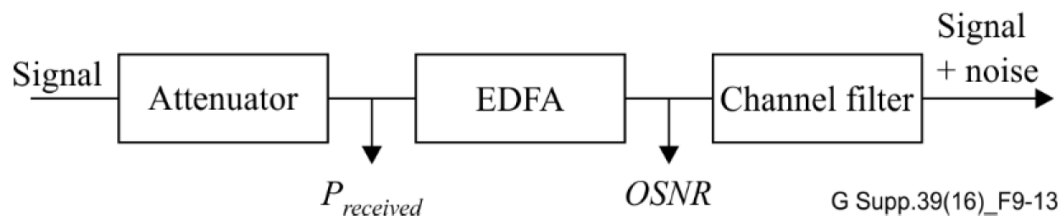
h =Constante de plank [$mJ * S$] = $6.62606957 \times 10^{-37}$

V = frecuencia central [Hz] = 193,1THz

Δf =Ancho de banda de medición= 12,5Ghz

Figura 30

Diagrama OSNR Amplificador [17]



Nota. Adaptado de Optical system design and engineering considerations (p. 71) por recommendation ITU-T G-series Sup.39, 2016, ITU-T

Para calcular el OSNR acumulado en un trayecto de una lambda en caso de tener amplificadores en cascada, se utiliza la siguiente formula:

$$OSNR_{acum\ dB} = 10 \text{ Log}_{10} \frac{1}{\frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \frac{1}{OSNR_3} + \frac{1}{OSNR_N}}$$

Red WDM Coherentes

los efectos lineales como dispersión cromática y PMD se compensaron usando técnicas de procesamiento digital de señales, evitando el uso de compensadores de dispersión que aumentaban la latencia y las pérdidas de inserción sobre la capa óptica, este tipo de sistemas se conoce como sistema coherente.[10]

DWDM Coherente permite que las redes de baja capacidad que en un principio operaban a 10G por canal y a través de Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa ahora tengan un alcance de 100G por canal DWDM o más, de esta forma permitiendo un avance significativo de tasas de 10G/40G a 100G con el fin de obtener un mayor ancho de banda

Un factor importante en el diseño de redes coherentes, es que la potencia de salida por canal es menor para transmitir un canal a 100Gb/s que para un canal a 10Gb/s, ya que los efectos no lineales como SPM, XPM y FWM son más notorios para canales con mayor tasa de bit, por lo tanto, se debe disparar el canal con menor potencia para evitar la aparición de efectos no lineales que degraden el desempeño del sistema.[10]

Diseño Red de Transmisión Escenario Real

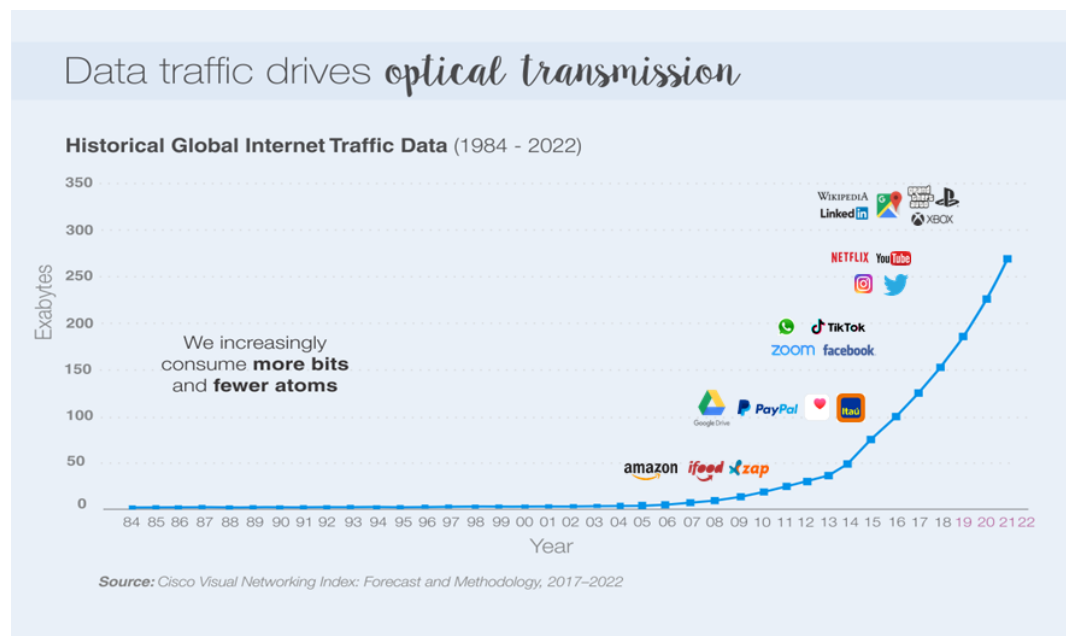
Con los conocimientos teóricos vistos en anteriores capítulos, el objetivo del este capítulo es diseñar y simular una red basada en un requerimiento real. dado que DWDM es una capa de transporte la capacidad total será de acuerdo a la tasa requerida por el cliente, la desagregación a nivel usuarios es netamente bajo la demanda requerida por cada localidad y su cantidad de usuarios. Un claro ejemplo es la implementación de una lambda 100G en desagregación 10 puertos de 10G para clientes dedicados que tienen un alto flujo de consumo de banda ancha, como se representa en el BOLETÍN TRIMESTRAL DE LAS TIC CIFRAS TERCER TRIMESTRE DE 2022 de acuerdo a Ministerio de Tecnologías de la Información y las

Comunicaciones, Bogotá es una de las ciudades con más accesos fijos a internet por cada 100 habitantes liderando los indicadores frente a los 32 departamentos de Colombia. al tener mayor acceso fijo a internet la velocidad de descarga promedio residencial tiende a aumentar alcanzando para tercer trimestre de 2022 123.3Mbps con un aumento de 40Mbps en el último año. dado que se habla de ISP (proveedor de servicios de internet) y teniendo en cuenta los valores indicados del boletín trimestral uno de los proveedores con mayor número de accesos fijos a internet fue Comcel con 3,14 millones.

El tráfico de datos histórico a nivel global viene en aumento teniendo en cuenta el gran número de aplicaciones que requieren un consumo de ancho de banda como Streaming que son contenidos en vivo o grabados que se pueden disfrutar por medio de internet y en tiempo real.

Figura 31

Tráfico de Datos Histórico



Nota. Adaptado de Tendencias Tecnológicas para Redes de Transmisión Óptica de Alta Capacidad (p. 4) por Hernan Yepes.

El escenario presentado y que demanda el cliente para iniciar con el diseño consta con la conexión entre los siguientes nodos y distancias. Los nodos a interconectar se presentan en la tabla 3 la red debe tener una capacidad máxima de 40 canales ópticos y viabilizado en señales ópticas de 100Gbps.

Tabla 3

Parámetros de Fibra y Distancia.

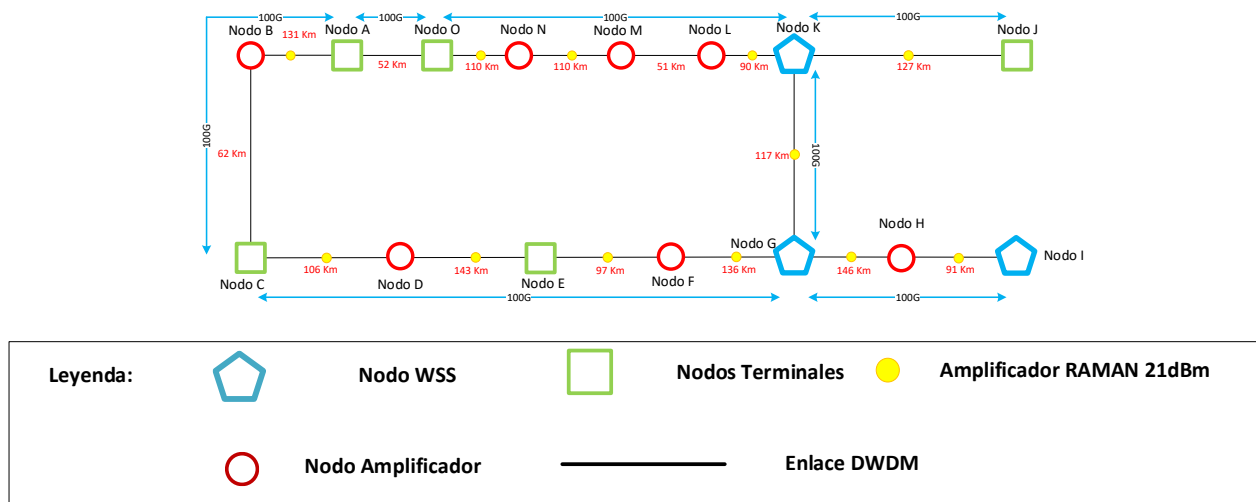
Nodo Origen	Nodo Destino	Tipo de fibra	Distancia KM
Nodo A	Nodo C	G652	193
Nodo A	Nodo O	G652	52
Nodo C	Nodo G	G652	482
Nodo G	Nodo I	G652	237
Nodo G	Nodo K	G652	117
Nodo K	Nodo J	G652	127
Nodo O	Nodo K	G652	361

Nota. Los valores de distancia por enlace son descritos en la tabla teniendo en cuenta el recorrido total del enlace, tipo de fibra y sus características.

Dadas las distancias indicadas entre nodos se propone implementar un nodo OLA con doble amplificador cada 80Km mínimo y máximo 120Km entre los nodos de desagregación, esto con el fin de mantener los valores de performance como OSNR, FEC en rangos operativos y adicional que la potencia recomendada de entrada en amplificadora cumpla con los valores de sensibilidad.

Figura 32

Diseño de Topología y Matriz de Tráfico DWDM Coherente.



Nota. La figura representa la topología diseñada describiendo cada uno de los nodos de acuerdo a su configuración.

Como se mencionó anteriormente ya que las distancias no permiten la unión sin amplificación, se realiza una adecuación de nodos intermedios Olas para amplificar la señal óptica, con los datos obtenidos se procede a realizar los cálculos correspondientes en la hoja de cálculo con el fin verificar los valores de operación del sistema de la figura 32. En Tabla 4 se representan uno de los valores de mayor importancia en redes coherentes (Ver Red WDM Coherentes) por lo cual al momento de realizar el cálculo de presupuesto de potencia se buscará el mejor escenario para cumplir con el valor de OSNR esperado de acuerdo a la tasa y tipo de modulación a usar.

En el **Apéndice C** se especifica la cantidad de elementos por nodo y precios unitarios aproximados de cada uno de los elementos dado que la mayoría de vendor mantienen esta información privada.

Tabla 4

Valores de OSNR por Tasa y Modulación.

Tasa	Formato de Modulación [dB]	Tasa de Símbolo [Gbaud]	Grid Mínimo [GHz]	OSNR [dB]
100G	QPSK	31,4	37,5	12
100G	D-QPSK	30,2	37,5	12,5
200G	8 QAM	42	50	19
200G	16 QAM	31,5	37,5	21,1

Nota. A medida que la tasa de bit es superior y su formato de modulación varía el requerimiento de señal a ruido será superior de esta forma podemos analizar que a mayor modulación menor alcance del canal.

Presupuesto de Potencia

Una vez agregados los datos como distancias entre nodos, coeficiente de atenuación (0,25*Km) (Ver medio de transmisión fibra G652), margen de seguridad (3dB) se compone de acuerdo a estructura técnica con el cliente teniendo en cuenta que los valores de coeficiente de atenuación son conservadores y dependerá del estado de la fibra externa, potencia de transmisión (2 dBm) (ver efectos no lineales donde se especifica por qué se debe transmitir con baja potencia) y perdidas podemos obtener los valores de la red.

El análisis técnico se basa en calcular la relación señal a ruido óptica de cada uno de los enlaces de interés. En la tabla 5 se muestra los resultados teóricos para el enlace Nodo A – Nodo O, el cual fue seleccionado debido a un sistema punto a punto, la distancia total del enlace y uno de los nodos principales del cliente donde se presente un crecimiento a nivel de tráfico futuro. En el **apéndice A** y **apéndice B** se encontrará cada uno de los cálculos teóricos por enlace.

Los valores representados en Tabla 5 son discriminados con las siguientes formulas

Atenuación fibra externa = *Distancia del enlace* [Km] * Cof. atenuacion [dB]

$$52 * 0.25 \frac{dB}{Km} = 13dB$$

Perdida en ODF [dB] y Perdida en SCM [dB]: en cada nodo se contempla conexiones en ODF y SCM por lo cual el valor correspondiente a 1dB por tipo de elemento debe ser calculado de la siguiente forma *Perdida de insercion * cantidad de elementos*

$$0.5dB * 2 = 1dB$$

Potencia de Transmisión Booster [2 dBm]: La baja potencia de transmisión se debe contemplar para evitar efectos no lineales, los cuales nos pueden afectar el rendimiento del canal. (ver efectos no lineales)

Margen de seguridad [3dB]: normalmente se considera un margen de seguridad con el fin de que el sistema siga operativo en caso de degradación de algún componente óptico o atenuación por envejecimiento o eventos de fibra óptica. Este margen debe ser contemplado en conjunto con el cliente ya que tiene el conocimiento del estado de la fibra externa.

$$P_{tx} - (P_{ins} + MS) = P_{Rx}$$

$$2_{dBm} - (13_{dB} + 2_{dB} + 3_{dB}) = -16_{dBm}$$

Tabla 5*Análisis Nodo A - Nodo O*

Nodo A - Nodo O	Nodo A
	Nodo O
Distancia de enlace [km]	52
Potencia de Recepción Bostear [dBm]	-14
Potencia de Transmisión Booster[dBm]	2
Perdida en SCM [dB]	1,00
Perdida en ODF [dB]	1,00
Atenuación fibra externa [dB]	13
Margen de operación mínima [dB]	3,00
Potencia de Recepción [dBm]	-16
OSNR después de Línea/Pré [dB]	35,9

Nota. La tabla representa los valores considerados en el presupuesto óptico del enlace analizado con el simulador VPI.

El análisis del OSNR se basa en una serie de fórmulas por etapa de amplificación y acumulado final de OSNR. Ver Relación de Señal Óptica al Ruido (OSNR)

$$OSNR_{dB} = P_{in} - NF + 58$$

$$Nodo A = -14 - 4 + 58 = 40db$$

$$\text{Nodo O} = -16 - 4 + 58 = 38\text{db}$$

$$\text{OSNR}_{\text{acum dB}} = 10 \text{Log}_{10} \frac{1}{\frac{1}{\text{OSNR}_1} + \frac{1}{\text{OSNR}_2} + \frac{1}{\text{OSNR}_3} + \frac{1}{\text{OSNR}_N}}$$

$$\text{OSNR}_{\text{acum dB}} = 10 \text{Log}_{10} \frac{1}{\frac{1}{40} + \frac{1}{38}} = 35,9\text{dB}$$

En la Tabla 6 se presenta el resumen del análisis técnico realizado.

Tabla 6

Resumen Análisis Técnico

Tramo	OSNR Acumulado [dB]	Distancia total [Km]	Nodos intermedios
Nodo A – Nodo C	23,8	193	1
Nodo A – Nodo O	35,9	52	0
Nodo O – Nodo K	25,5	361	3
Nodo G – Nodo I	20,3	237	1
Nodo G – Nodo K	27,5	117	0
Nodo K – Nodo J	25,1	127	0
Nodo C – Nodo G	18,5	482	3

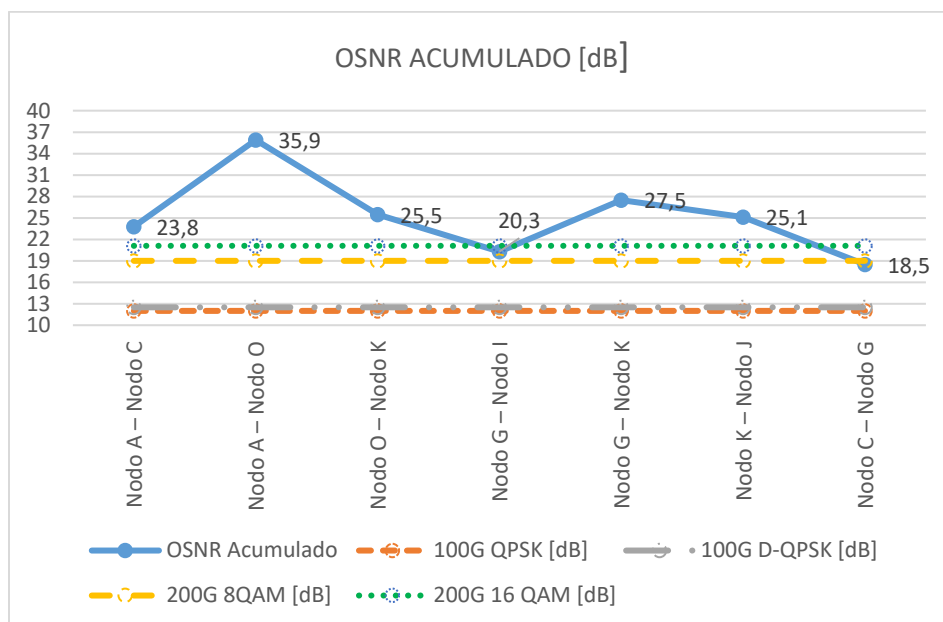
Nota. El análisis técnico de OSNR nos muestra que de acuerdo a la distancia y cantidad de nodos implicados intermedios podemos llegar a tener valores de OSNR con mayor rendimiento.

La información es comparada con los requerimientos de relación señal a ruido resumidos en la Tabla 4 con el fin de determinar si es posible implementar canales con las tasas requeridas

por el cliente. Se realiza un análisis con posibilidad de crecimiento basado en el OSNR por tramo en Figura 33.

Figura 33

Posibilidad de Crecimiento Basado en OSNR por Tramo.



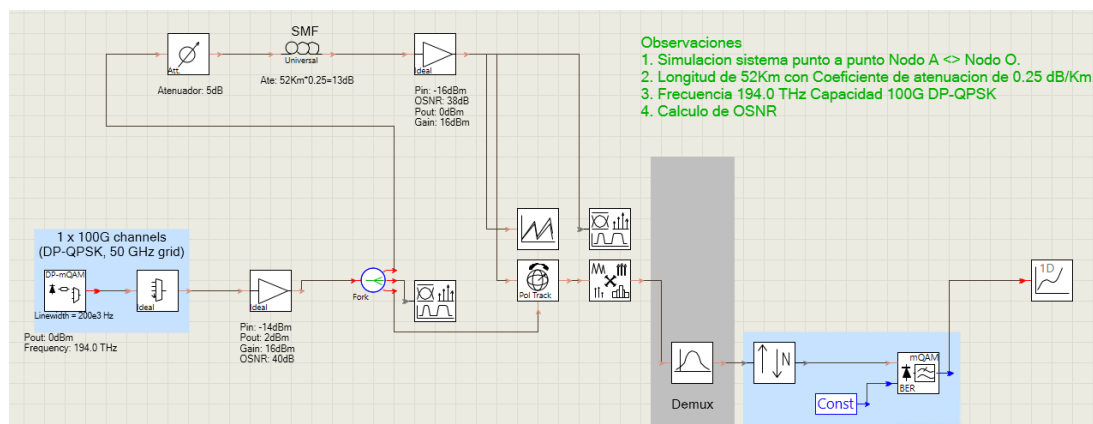
Nota. La figura representa la escalabilidad futura de acuerdo a un análisis de OSNR de cada tramo de la red donde se contemplan nodos terminales. El OSNR acumulado (línea azul) nos da a entender que es posible implementar canales de tasa de bit superior a 100G.

Análisis Teórico y Simulado

Durante la simulación con software especializado VPI se estableció una configuración punto a punto Nodo A <> Nodo O con una distancia de 52Km. Ver Figura 34

Figura 34

Diagrama Simulación VPI



Nota. La figura representa el diagrama y sus conexiones entre cada uno de los componentes (Ver Pag. 22) de la capa óptica. Como observaciones se tiene cada uno de los valores esperados de acuerdo al presupuesto de potencia óptica.

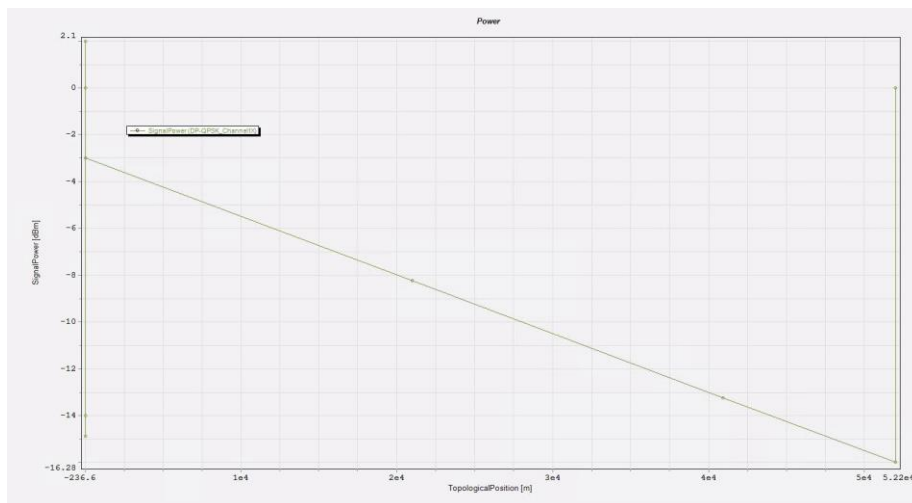
De acuerdo a Tabla 5 donde se especifican cada uno de los valores teóricos calculados y utilizados para obtener los valores de OSNR acumulado son utilizados en la simulación y detallados en cada uno de los elementos que compone la capa óptica, el atenuador de 5dB anexado antes del medio físico o fibra óptica simula cada una de las pérdidas y margen de operación anexa en los valores teóricos.

En la Gráfica de potencia es posible ver cada uno los valores representados desde el Transponder con una potencia de Tx de 0dBm, luego de esto llegando una potencia de Rx de -14dBm al amplificador en transmisión, aumentando considerablemente a 2dBm en potencia de Tx desde el amplificador vamos a tener que luego del paso por atenuador y medio físico tenemos una potencia de recepción en preamplificador de -16dBm.

Este análisis de la simulación concuerda con los valores teóricos anexados en la Tabla 5 y en el **apéndice A**. Donde por medio de formular podemos llegar a los valores presentados en la Figura 35.

Figura 35

Grafica de Potencia Óptica.

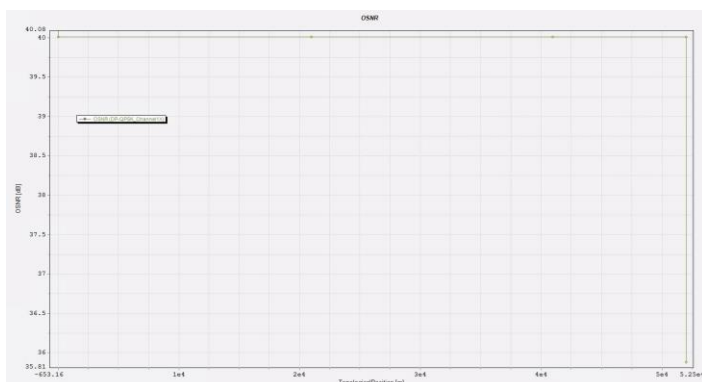


Nota. La figura representa el comportamiento de la potencia óptica desde la salida de Transmisión del transponder con valor 0dBm hasta su llegada al preamplificador con -16dBm luego de pasar por la capa óptica y fibra externa.

La grafica de OSNR concuerda con los valores teóricos obtenidos desde la etapa de amplificación del nodo A el valor de señal a ruido es de 40dB haciendo paso por el medio físico hasta el Preamplificador del nodo O se puede obtener el OSNR acumulado el cual tiene un valor de 35.9dB.

Figura 36

Grafica de OSNR.



Nota. La figura representa el comportamiento de señal a ruido (OSNR) desde su primera etapa de amplificación 40dB a media que pasa por el medio físico fibra externa este valor tiende a bajar su desempeño teniendo un acumulado de 35.9dB.

Con los valores tanto teóricos como simulados es posible verificar en la Tabla 5 que cada uno de los cálculos teóricos y simulación nos permite establecer las similitudes que existen entre las dos formas de realizado el análisis de señal a ruido del sistema punto a punto entre los Nodo A <> Nodo O.

Tabla 7

Valores Comparativos OSNR

$OSNR_{dB}$	Teórico	Simulado
Nodo A	40	40
Acumulado	35,9	35,9

Nota. El análisis teórico realizado por medio del cálculo matemático coincide con la simulación en Virtual Photonics (VPI) de esta forma podemos concluir que los niveles de OSNR cumplirán con el performance necesario para este canal.

Se realiza una verificación con un sistema de gestión DWDM enlace con 51Km de distancia y coeficiente de atenuación de 0,37dB/Km de acuerdo a los cálculos realizados por medio de etapa de amplificación de los nodos. Se debe tener en cuenta que la atenuación del enlace, los canales adyacentes que están en la red al no salir con los mismos valores de Tx influirá en los valores de performance (OSNR) del canal.

$$OUT\ Line - In\ Line = Ate.\ Tramo\ Hilo\ 1$$

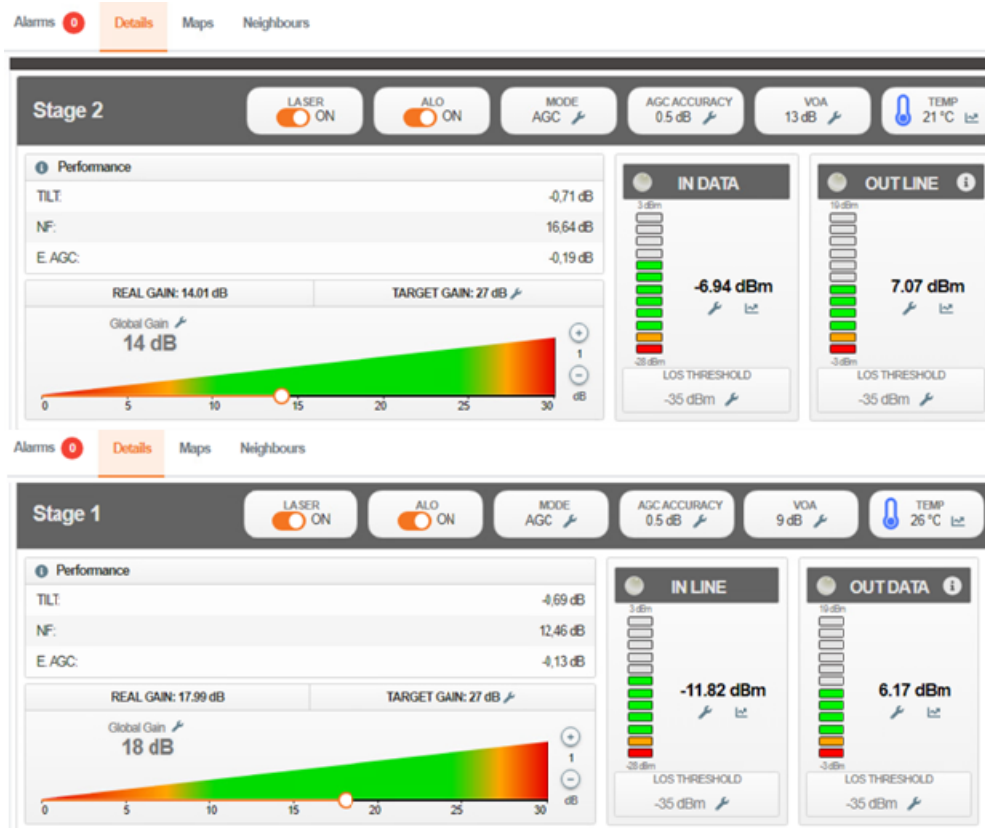
$$7,07dBm - (-11,82dBm) = 18,89dB$$

$$Coef = \frac{Ate.\ Tramo}{Dist.}$$

$$\frac{18,89dB}{51Km} = 0,37dB$$

Figura 37

Hilo 1 Gestión DWDM Enlace Operativo



Nota. La figura representa la etapa de amplificación hilo 1 de un enlace operativo donde es posible evidenciar los valores de Tx y Rx del enlace por este hilo.

$$OUT\ Line - In\ Line = Ate.Tramo\ Hilo\ 2$$

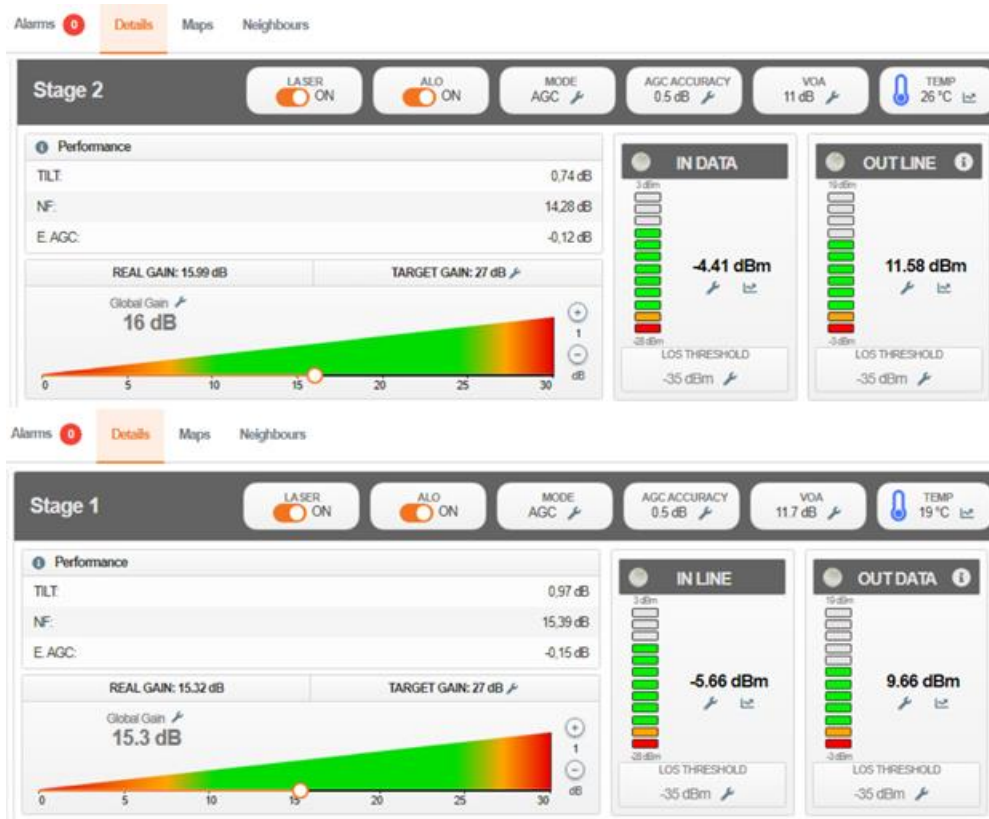
$$11,58dBm - (-5,66dBm) = 17,24dB$$

$$Coef = \frac{Ate.Tramo}{Dist.}$$

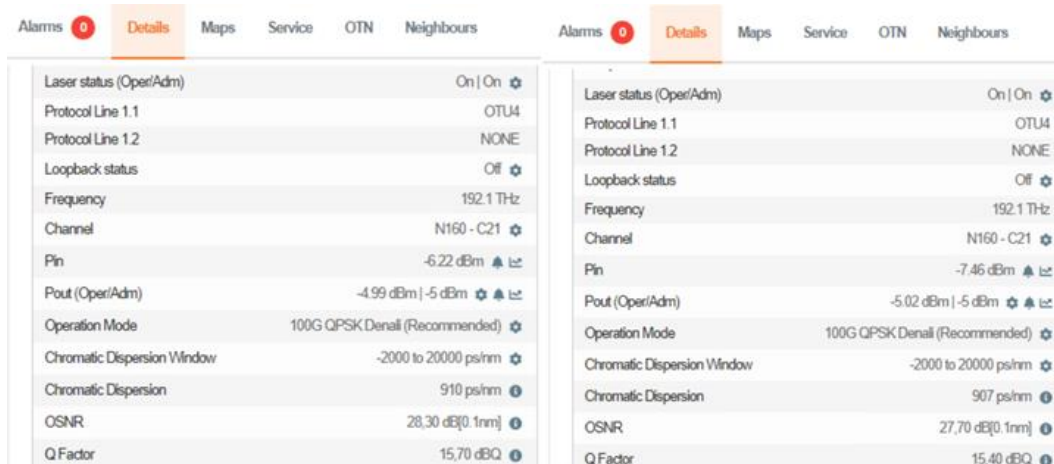
$$\frac{17,24dB}{51Km} = 0,33dB$$

Figura 38

Hilo 2 Gestión DWDM Enlace Operativo



Nota. La figura representa la etapa de amplificación hilo 2 de un enlace operativo donde es posible evidenciar los valores de Tx y Rx del enlace por este hilo.

Figura 39*OSNR Enlace Operativo*

Nota. La figura representa los valores de OSNR del punto a punto teniendo como valor más bajo 27,7dB el cual es afectado por el coeficiente de atenuación de la fibra externa. Es importante considerar que estos valores son apropiados para la operatividad del tipo de modulación utilizada 100G QPSK OSNR mínimo 12dB.

Tabla 8*Valores Comparativos OSNR 2*

$OSNR_{dB}$	Teórico	Simulado	Gestión
Nodo A	40	40	40
Acumulado	35,9	35,9	27,7

Nota. La tabla representa los valores obtenidos durante el análisis teórico, simulación y comparativo con sistema de gestión DWDM.

La diferencia en el coeficiente de atenuación representada de acuerdo a los cálculos realizados por medio de la etapa de amplificación de cada hilo sacrifica de manera importante los valores de OSNR dado que para fibras G.652 el coeficiente estipulado es 0.25dB/Km en este caso llegando a tener variación hasta 0,37dB/Km por el Hilo 1. La calibración de los canales es un punto determinante en cuanto a los valores de performance al igual que la cantidad de canales que pasan por el sistema actual siendo este 5 la cantidad actual. La potencia de salida de estos canales será determinante para la operatividad del sistema y futuras expansiones sobre la red dando posibilidad a un crecimiento.

Conclusiones

Las arquitecturas de transmisión pueden ser enfocadas atender a un segmento o cliente en particular para permitir la conexión y transmisión de datos a través de la red. Teniendo en cuenta los posibles clientes es importante mencionar que algunas empresas robustas con infraestructura de fibra óptica como *Carrier* que operan redes de gran cobertura y a su vez los *ISP* proveedores de servicios de internet organizaciones las cuales brindan diversos servicios donde los usuarios pueden acceder y utilizar internet cuentan en su infraestructura escenarios con tecnología DWDM para aumentar la tasa y cobertura a su cliente final.

La Fibra G.652 es la mejor opción para medios de transmisión dado sus valores de atenuación bajo en banda C, la dispersión cromática es mayor, pero al tener redes coherentes no se tiene problema alguno ya que los transponders coherentes realizan un ajuste de este efecto. Los parámetros y características de una red es parte fundamental para el diseño, puesta en marcha y escalabilidad de una red de transmisión, cada uno de estos aspectos nos permitirá mantener los valores de performance como OSNR, FEC en rangos operativos y adicional que las potencias recomendadas en cada escenario sean las recomendadas para la operatividad del sistema.

En el mercado se encuentran diferentes herramientas que pueden ser utilizadas para simular sistemas de transmisión, en este caso particular con Virtual Photonics (VPI), debido a que permite la verificación de los cálculos teóricos realizados y la relación entre sí de manera precisa. Es importante mencionar que estas herramientas son de gran utilidad para evidenciar los parámetros de funcionamiento de diferentes redes, teniendo en cuenta cada uno de los factores requeridos durante el diseño de red y cada una de las observaciones teóricas, es importante resaltar que son un apoyo puesto que, sin los cálculos, presupuestos de potencia y demás información del prediseño, no es posible simular la red.

Los cálculos matemáticos realizados y de acuerdo a cada uno de los valores obtenidos como coeficiente de atenuación y distancia de la fibra podemos generar un presupuesto de potencia óptico, el cual pueda mantener la potencia recomendada de entrada en amplificadora y esta cumpla con los valores de sensibilidad de esta forma asegurando valores indispensables para redes coherentes como OSNR. Se puede concluir que con la capa optica propuesta y tipos de amplificadores utilizados el sistema cumple las especificaciones necesarias para el tipo de Tasa a utilizar mantenido la siguiente premisa implementar un nodo OLA con doble amplificador cada 80Km mínimo y máximo 120Km entre los nodos de desagregación.

La simulación realizada en Virtual Photonics (VPI) logra comprobar el funcionamiento del enlace simulado teniendo en cuenta la sensibilidad de cada una de los elementos de la capa optica implicados, logrando verificar valores de señal a ruido de 35,9dB acumulado para un enlace de 52Km utilizando amplificador EDFA. Es importante recalcar los Anexos 1 y 2 que explicaran de una manera mas simple cada uno de los valores de OSNR y presupuesto de potencia óptico de la red.

Referencias Bibliográficas

- Cisco Systems Inc, (2000). *Introduction to DWDM technology*.
https://www.cisco.com/c/dam/global/de_at/assets/docs/dwdm.pdf
- Cisco Systems Inc, (2004). *Optical network design and implementation*. Cisco Press
- Gorshe, S., (2009). *A Tutorial on ITU-T G.709 Optical Transport Networks (OTN)*. PMC-Sierra
- Headley, C., Agrawal, G. (2005) *Raman Amplification in Fiber Optical Communication System*.
 Elsevier Academic Press
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, (2022). *BOLETÍN TRIMESTRAL DE LAS TIC CIFRAS TERCER TRIMESTRE DE 2022*.
<https://colombiatic.mintic.gov.co/679/w3-article-274258.html>
- Mohammed, N., (2004). *Raman Amplifiers for Telecommunications 2, Sub-Systems and Systems*.
 Springer
- Padtec, (2020). *LPE20 - Introdução à Teoria de DWDM*. Campinas.
- Padtec, (2023). *Plataforma LightPad i6400G 200-Channel DWDM Multiservice System, Versão TM.LP64.2023.02.POR.V1*.
- Pulikkaseril, C., Stewart, L., Roelens, M., Baxter, G., Poole, S., Frisken, S., (2017) *Spectral modeling of channel band shapes in wavelength selective switches*.
<https://opg.optica.org/abstractview.cfm?id=212815>
https://opg.optica.org/directpdfaccess/2fb77474-05b8-496c-b409fdb7ca23f6a9_212815/oe-19-9-8458.pdf?da=1&id=212815&seq=0&mobile=no
- Ramaswami, R., Sivarajan, K., Sasaki, G. (2002). *WDM Network Elements, in Optical Networks, A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann

Recommendation ITU-T G.652, (2016). *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.*

Recommendation ITU-T G.653, (2010). *Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable.*

Recommendation ITU-T G.655, (2009). *Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.*

Recommendation ITU-T G.694.1, (2020). *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.*

Recommendation ITU-T G-series Sup.39, (2016). *Optical system design and engineering considerations*

Viavi Solutions, (2019). *ROADM and Wavelength Selective Switches.*

<https://www.viavisolutions.com/en-us/literature/roadm-and-wavelength-selective-switches-application-notes-en.pdf>

Yepes, H. (2019). *Modelo Para Establecer La Migración De Red De Transporte Óptico Para Soportar Futuros Servicios Basados En La Nube Y Modelo Para Establecer La Migración De Red De Transporte Óptico Para Soportar Futuros Servicios.*

https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/14262/1/YepesHernan_2019_ModeloEstablecerMigracion.pdf

Apéndices

Apéndice A

Cálculo Matemático de Relación de Señal Óptica al Ruido de Cada uno de los Enlaces que Componen la Red Diseñada.



Cálculo matemático
de relación de señal óptica

Apéndice B

*Modelador de red Presupuesto de Potencia Óptico de Acuerdo a la Cantidad de Elementos que
Compone la Red Diseñada.*



Modelador de red-
presupuesto de poder

Apéndices C

Propuesta Comercial Tentativa Especificando cada uno de los Elementos Necesarios por Nodo para Cumplir con los Valores de Apéndice A y Apéndice C.



Propuesta comercial
tentativa especificand