



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA MIGRACIÓN DE LA TÉCNICA CWDM A
DWDM EN REDES ÓPTICAS.



AUTOR

Andrés Mauricio Argüello Asitimbay

AÑO

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA MIGRACIÓN DE LA TÉCNICA CWDM A
DWDM EN REDES ÓPTICAS.

“Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero en redes y
telecomunicaciones”

Profesor Guía

PhD. Orozco Garzón Nathaly Verónica

Autor

Andrés Mauricio Argüello Asitimbay

Año

2020

DECLARACIÓN PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido este trabajo, Análisis del impacto de la migración de la técnica CWDM a DWDM en redes ópticas, a través de reuniones periódicas con el estudiante Andrés Mauricio Argüello Asitimbay, en el semestre 202020, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".



Nathaly Verónica Orozco Garzón

Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Área de
Telecomunicaciones y Telemática

C.I. 1720938586

DECLARACIÓN PROFESOR CORRECTOR

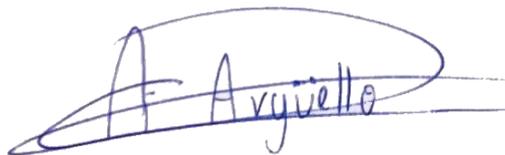
“Declaro haber revisado este trabajo, Análisis del impacto de la migración de la técnica CWDM a DWDM en redes ópticas, del estudiante Andrés Mauricio Argüello Asitimbay, en el semestre 2020-20, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los trabajos de titulación”.



MSc. Carlos Enrique Carrión Betancourt
Master en Ciencias en Telecomunicaciones y Telemática
CI: 1103738074

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”



Andrés Mauricio Argüello Asitimbay

C.I 1718321738

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis profesores, familia y amigos por guiarme y aconsejarme en toda mi vida estudiantil para poder ser una mejor persona.

DEDICATORIA

A mi madre Nancy Asitimbay por siempre creer en mi e incentivarme a ser mejor persona cada día, por su apoyo incondicional y por la estar siempre a mi lado brindándome su confianza y comprensión.

RESUMEN

DWDM como tecnología de transmisión óptica ha evolucionado después de que la tecnología SONET / SDH anterior haya alcanzado sus limitaciones en términos de componentes del ecosistema para lograr transmisiones de alta velocidad de datos a precios competitivos sobre las fibras. La unidad básica para la velocidad de transmisión de datos a través de dicho sistema era OC3 o STM-1, que consta de 155 Mbs. La velocidad más alta comúnmente implementada es el circuito OC-768 o STM-256, que opera a una velocidad de poco menos de 38.5 Gbit / s. La combinación de las primeras fuentes de láser y los circuitos electrónicos que transmiten en 1310 nm en fibras monomodo, con el método de obtener señales más altas por multiplexación por división de tiempo para formar el siguiente nivel de la jerarquía de SONET, ha alcanzado el agotamiento del ancho de banda de la fibra.

Las soluciones CWDM y DWDM están disponibles como sistemas activos o pasivos. En una solución pasiva y sin alimentación, el transceptor WDM reside directamente en el conmutador de datos. La salida del transceptor WDM se conecta a un multiplexor sin alimentación que combina y redistribuye, multiplexa y demultiplexa, las diversas señales. Como el transceptor WDM reside en el conmutador de datos, significa que toda la funcionalidad WDM está integrada en el conmutador de datos.

Las soluciones activas CWDM/DWDM son sistemas autónomos alimentados con CA o CC separados del interruptor. La tarea del sistema autónomo es tomar la señal de salida óptica de corto alcance de la fibra o el interruptor IP y convertirla en una señal WDM de largo alcance. Esta conversión OEO (óptica a eléctrica a óptica) es manejada por un transpondedor. La señal WDM convertida se transmite luego con la ayuda de transceptores y multiplexores. Debido a la separación de la solución de transporte WDM del conmutador real, los sistemas activos también tienden a ser más complejos que las soluciones pasivas e integradas.

ABSTRACT

DWDM as optical transmission technology has evolved after previous SONET / SDH technology has reached its limitations in terms of ecosystem components to achieve high-speed data transmission at competitive prices on fibers. The basic unit for the speed of data transmission through said system was OC3 or STM-1, which consists of 155 Mbs. The highest speed commonly implemented is the OC-768 or STM-256 circuit, which operates at a speed of just under 38.5 Gbit / s. The combination of the first laser sources and the electronic circuits that transmit at 1310 nm in single-mode fibers, with the method of obtaining higher signals by time division multiplexing to form the next level in the SONET hierarchy, has reached exhaustion of the fiber bandwidth.

CWDM and DWDM solutions are available as active or passive systems. In a passive, powerless solution, the WDM transceiver resides directly on the data switch. The WDM transceiver output connects to a non-powered multiplexer that combines and redistributes, multiplexes and demultiplexes the various signals. Since the WDM transceiver resides on the data switch, it means that all WDM functionality is built into the data switch.

Active CWDM / DWDM solutions are autonomous AC or DC powered systems separate from the switch. The task of the autonomous system is to take the fiber's short-range optical output signal or IP switch and convert it to a long-range WDM signal. This OEO (optical to electrical to optical) conversion is handled by a transponder. The converted WDM signal is then transmitted with the help of transceivers and multiplexers. Due to the separation of the WDM transport solution from the actual switch, active systems also tend to be more complex than passive and integrated solutions.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1.	Antecedentes	7
1.2.	Alcance.....	11
1.3.	Justificación	11
1.4.	Objetivos	12
1.4.1.	Objetivo General.....	12
1.4.2.	Objetivo específico	12
2.	CAPÍTULO I: CONCEPTOS BÁSICOS.....	12
2.1	La Fibra Óptica	12
2.1.1	Composición de la Fibra Óptica.....	14
2.1.2	Ventajas de la Fibra Óptica	15
2.1.3	Desventajas de la Fibra Óptica.....	16
2.1.4	Transmisores	16
2.1.5	Receptores	19
2.1.6	Bandas de frecuencia	21
2.2	Tecnologías de multiplexación.....	22
2.2.1	Tecnología de multiplexación por división por tiempo (TDM)	23
2.2.2	Multiplexación por división de longitud de onda (WDM)	24
2.2.3	Terminal Multiplexor Óptico (OTM).....	25
2.2.4	Multiplexación por división de longitud de onda (CWDM).....	25
2.2.5	Multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM) ..	26

3.	CAPÍTULO II: TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN	
	CWDM Y DWDM	28
3.1	CWDM (<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>)	28
3.1.1	Evolución de CWDM	29
3.1.1	Características CWDM	30
3.1.2	Estructura en CWDM	31
3.1.3	Canales CWDM	34
3.2	Tecnología DWDM (<i>Dense Wavelength División Multiplexing</i>)	35
3.2.1	Evolución DWDM	36
3.2.2	Características del DWDM	37
3.2.3	Arquitectura DWDM	38
4.	CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE MULTIPLEXACIÓN	
	DWDM	42
4.1.	Análisis de Componentes DWDM.....	42
4.1.1.	Conexión óptica cruzada (OXC) en DWDM.....	42
4.1.2.	Convertidores de longitud de onda DWDM	43
4.1.3.	Multiplexor	43
4.1.4.	Multiplexor de inserción / extracción óptica (OADM)	44
4.1.5.	Amplificador óptico de línea (OLA)	44
4.2.	Análisis de simulación de DWDM.	45
4.2.1.	Transmisor DWDM	45
4.2.2.	Propiedades del transmisor DWDM.....	46
4.2.3.	Amplificador óptico	47

4.2.4.	Medio de transmisión.....	47
4.2.5.	Demultiplexor DWDM	49
4.2.6.	Receptor DWDM.....	49
4.2.7.	Simulación Completa red óptica DWDM.....	50
4.3.	Análisis de cálculos de simulación DWDM.	51
4.3.1.	Cálculo de la dispersión.....	51
4.3.2.	Cálculo del presupuesto de potencia para el cable de fibra óptica	51
4.3.3.	Cálculo de la pérdida permisible máxima en la fibra.....	53
5.	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA	
	MIGRACIÓN DE LA TÉCNICA CWDM A DWDM ...	56
5.1	Migración de Arquitecturas CWDM a DWDM	56
5.1.1	Migración de CWDM a DWDM en topología punto a punto.....	58
5.1.2	Migración de CWDM a DWDM en topologías anillos y estrella. ...	59
5.2	Análisis de conexiones posibles en la migración de CWDM a DWDM.	60
5.3	Migración de las tasas binarias de CWDM a DWDM. ...	62
5.4	Migración de Módulo óptico de CWDM a DWDM.	63
5.5	Amplificación de señal de CWDM a DWDM	64
5.6	Migración de interfaces ópticas de CWDM a DWDM....	65
5.7	Análisis de la migración de interfaces de CWDM a DWDM.....	66
5.8	Migración de láser de CWDM A DWDM	67
5.9	Diferencias de equipos CWDM Y DWDM	67
5.10	Comparación económica entre CWDM y DWDM	69

5.10.1	Comparación de hardware CWDM y DWDM.....	71
5.10.2	Estudio Económico de tecnologías CWDM y DWDM	72
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
6.1.	Conclusiones	75
6.2.	Recomendaciones	77
	REFERENCIAS.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Fibra óptica	13
<i>Figura 2</i> TX y RX.....	13
<i>Figura 3</i> Componentes de la Fibra Óptica.....	14
Figura 4 Tipos de espectro mediante reflexión.....	17
Figura 5 Diodos emisores de luz LED	18
Figura 6 Modos de cavidad láser	18
Figura 7 Láser monomodo y multimodo	19
Figura 8 Fotodetectores	20
Figura 9 Modelos de un receptor óptico típico de detección directa.....	20
Figura 10 Modelo de un receptor óptico de detección directa típico que utiliza un preamplificador óptico	21
Figura 11 Regiones de las Longitudes de onda	21
Figura 12 Multiplexación	22
Figura 13 Coexistencia de múltiples canales WDM en la misma fibra óptica...	24
Figura 14 CDWM.....	28
Figura 15 Varios interfaces utilizados para CWDM.	31
Figura 16 <i>Mux / Demux</i>	32
Figura 17 Soltar y pasar	33
Figura 18 Soltar e Insertar módulo	34
Figura 19 Rejilla de longitudes de onda en CWDM.....	34
Figura 20 Plan de Frecuencias UIT-T G.692.....	35
Figura 21 Evolución de DWDM	36
Figura 22 Transmisiones en DWDM	37
Figura 23 Topología punto-a-punto	39
Figura 24 Topología anillo	40
Figura 25 Topología de malla.....	41
Figura 26 Elemento de red OTM.....	43
Figura 27 Diagrama funcional de OADM.....	44
Figura 28 Transmisor DWDM.....	46
Figura 29 Propiedades del Transmisor DWDM	46
Figura 30 Conexiones entre el transmisor y multiplexor.....	47

Figura 31 Medio de transmisión	47
Figura 32 Medio de transmisión fibra multimodo.....	48
Figura 33 Amplificador óptico en el receptor	48
Figura 34 Demultiplexor	49
Figura 35 Receptor DWDM	49
Figura 36 Diagrama de red DWDM	50
Figura 37 Señales generadas	54
<i>Figura 38 Diagrama de Ojo Canal 1 y Figura 39 Diagrama de Ojo Canal 3.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 40 Diagrama de Ojo Canal 8 y Figura 41 Diagrama de Ojo Canal 10..</i>	<i>55</i>
Figura 42 Multiplexor CWDM.	57
Figura 43 Migración a DWDM en una arquitectura CWDM ya establecida	57
Figura 44 Migración topología punto a punto	58
<i>Figura 45 Anillos DWDM/CWDM combinados</i>	<i>59</i>
<i>Figura 46 Anillos DWDM estrella CWDM</i>	<i>60</i>
Figura 47 Arquitectura y esquema funcional de OAM en CWDM.....	60
Figura 48 Arquitectura y esquema funcional de OAM en DWDM.....	61
Figura 49 Esquemas de regeneración	61
Figura 50 Arquitectura OAM con matriz de conexión cruzada	62
Figura 51 Mapeo de canales DWDM dentro del espectro de longitud de onda CWDM.....	63
<i>Figura 52 Capacidades de expansión a través del espectro DWDM</i>	<i>64</i>
Figura 53 Topología aplicada a la transmisión unidireccional de 16 señales eléctricas distintas	65
<i>Figura 54 Migración de interfaces ópticas.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 55 Comparativo CWDM y DWDM</i>	<i>68</i>
<i>Figura 56 Comparativo precios CWDM y DWDM.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 57 Comparativo arquitecturas CWDM y DWDM</i>	<i>72</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La fibra óptica es un hilo de vidrio muy puro, en su fabricación se rodea de aún más vidrio y en algunos casos de plástico para enviar pulsos de luz que representan diferentes tipos de datos. Las partes de la fibra óptica se construyen con un índice de refracción diferente haciendo que la luz se refleje siempre hacia el interior y lograr que el haz se confine. La fibra óptica llegó a solucionar varios problemas en telecomunicaciones ya que existió gran demanda por parte de usuarios en busca de mejor calidad en sus conexiones, es por esto por lo que con la implementación de la fibra óptica se permitió un aumento muy grande de la velocidad del tráfico en el internet lo que permitió a las empresas de telecomunicaciones a mejorar sus servicios.

La llegada de la fibra óptica logró que una señal se pueda transportar con gran capacidad de información a través de las ondas de luz que llegan a altas frecuencias, por lo que se logró mejorar las transmisiones y hacer las redes más seguras. Se pueden mencionar más beneficios de la fibra óptica como: la gran capacidad de transmisión, reducida atenuación, inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, bajo coste y son de pequeño diámetro. (Zapardiel, 2014)

El inicio de la fibra óptica comienza cuando el físico John Tyndall en el siglo XIX, descubrió de forma práctica como al ver que la luz viajaba en el agua por su reflejo. Una década más tarde en el año 1952, el físico Narinder Singh se ayudó del estudio de Tyndall para el invento de las primeras fibras ópticas. Con la llegada del láser y los cables que transmitían en vidrio se llegó a la conclusión que para una buena comunicación se debía tener un producto limpio totalmente sin impurezas lo que llevó al estudio y avance de la fibra óptica. Después en los años 60 es cuando se empieza a notar los beneficios que tiene la fibra óptica. Adicional la invención del láser de esta década fue la que realizó la investigación de los cables transmisores de vidrio.

Posteriormente en 1966, el estudio de Kao y Hockman, demostró la revolución de las comunicaciones, el estudio menciona la atenuación observada en materiales de vidrio, lo cual, no era ocasionado por impurezas, eran ocasionadas por errores al momento de su construcción, gracias a esto se pone en marcha sustituir la electricidad y los conductores mecánicos por la luz y el vidrio, en cuanto a líneas telefónicas. En 1970 una empresa llamada Corning Glass fue capaz de desarrollar fibras con atenuación menor a 2 dB/km y gracias a este estudio, los físicos comenzaron a investigar sobre la atenuación.

Para ese entonces se realizaron varios experimentos para analizar cómo disminuye la atenuación, y esto fue lo que hizo que la fibra óptica fuera mejorando, con el paso de cada experimento. Para el año de 1980, Payne y Desurvire científicos que inventaron un amplificador óptico ayudó que sean más eficientes las comunicaciones interurbanas, desde este momento, se comienza a desarrollar y construir nuevas infraestructuras de telecomunicaciones que fueron conectando poco a poco a países como Estados Unidos. (Xperts Factory, 2018)

La velocidad de la fibra óptica ha ido avanzando con el tiempo, mediante diferentes técnicas como la técnica de multiplexación. En las redes de distribución óptica se determina que la máxima velocidad de bajada es de 2,488 Gbs/s y la máxima velocidad de subida es de 1,244 Gb/s. (Edison Quisancela, 2016)

La multiplexación es la combinación de varios canales que se transportaran en una sola fibra óptica. La multiplexación es un proceso importante en la técnica de transmisión de datos, ya que, a través de esta operación, es posible utilizar de manera óptima los canales de comunicación, generando transmisión de información en términos de Gbps en una sola línea de transmisión (Ortiz, Adriana Et al., S.f).

Existen algunos tipos de Multiplexación existentes en redes ópticas como:

TDM (Multiplexación por división de tiempo): Explora cíclicamente los datos de entrada de los diferentes usuarios, transmitiendo los tramos a través de una única línea de comunicación de alta velocidad. Realiza la asignación de cada estación un turno de transmisión rotativo durante un período de tiempo. (De la O, 2016)

WDM (Multiplexación por división de longitud de onda): Está diseñado por utilizar la capacidad de alta tasa de los datos de la fibra. Para esto se requiere adoptar varias pulsaciones de luz dentro de una sola luz por medio de la multiplexación. También hace combinación y división de haces de luz mediante un prisma (Cerón, 2018)

CWDM (Multiplexación por división aproximada de longitud de onda): Es la combinación de una longitud de onda en una fibra usando colimadores de fibra con espiral y filtros de longitud de onda que están alineados y montados en un tubo de vidrio y típicamente empaquetados en un tubo de acero inoxidable para mayor protección. También se utiliza para separar más de una señal utilizando el mismo dispositivo y transmitiendo la señal en la dirección opuesta. Estos sistemas tienen limitaciones en sus capacidades respecto al ancho de banda y velocidades, lo cual es por la separación entre portadoras o longitudes de onda que abarcan todo el espectro permitido que tienen hasta 18 canales de transmisión con lo que logra velocidades de 2.5 hasta 10 Gbps. (Clearfield, 2017)

DWDM (Multiplexación por división en longitudes de ondas densas): Pueden ser utilizadas para separar más de una señal utilizando el mismo dispositivo y transmitiendo la señal en la dirección opuesta. Tienen un espaciado y banda de paso de canal de trabajo que le permite agregar múltiples longitudes de onda a una fibra mientras se mantiene dentro de las longitudes de onda operativas. Tiene alcances de multiplexación muy altos ya que estos sistemas cuentan con distancias de separación de hasta 20nm entre canales, con lo cual logra que tenga hasta 160 canales de comunicación ópticas de amplificación, con ello logra a lograr velocidades desde 10 Gbps en adelante. (Clearfield, 2017)

DWDM permite optimizar los sistemas comunicación de telecomunicaciones. Se analizará DWDM al tener buena respuesta en cantidades grandes de ancho de banda para los servicios utilizados hoy en día, ya que es posible llegar a 100 Gb/s de velocidad de transmisión con ayuda de la multiplexación, además al ser una gran innovación en las redes ópticas con muchas ventajas como amplificar longitudes de onda sin convertirlas en señales eléctricas, lo que cumple el protocolo de transferencia de bits independientes al transportar señales en diferentes velocidades. (Khatri, 2015)

La técnica CWDM fue una gran innovación para la transmisión de varios tipos de datos, pero la necesidad por encontrar formas más rápidas y eficaces para una calidad de servicio en las redes actualmente se desarrolló la tecnología DWDM la cual aumenta y aprovecha el ancho de banda al combinar diferentes tipos de señales y longitudes de onda para transmitir por una sola fibra óptica. CWDM y DWDM son similares en algunas características y en este proyecto se analizará cada uno de los parámetros necesarios para lograr su migración y saber sus diferencias como son temas de costos, capacidades y características necesarios para la correcta migración y funcionamiento óptimo.

La migración de multiplexores de diferentes capacidades es un tema complejo en el cual se debe analizar factores para su correcto cambio en la infraestructura que ya cuenta con tecnología CWDM que tiene las ventajas que combinan los costos accesibles y gran capacidad de transmisión, pero al tener una amplia distancia de canales, se limitó a no poder exceder de los 18 canales. Con este problema llegó la solución y el interés de migrar a la tecnología DWDM en la cual puede llegar a tener 160 canales trabajando simultáneamente, con ello llega a alcanzar velocidades exuberantes de hasta más de 20 Gbps, pero su migración en costos llega a ser muy alta por los cambios de un sistema prácticamente nuevo al tener que cambiar a conectividad, fibra óptica y parámetros compatibles con los canales del multiplexor DWDM.

1.2. Alcance

Definir los conceptos y características de las comunicaciones ópticas actuales al analizar el desempeño de señales con las técnicas DWDM y CWDM al medir sus capacidades de detección, longitudes de ondas, alcances y velocidades de transmisión de datos.

Analizar el impacto de la migración de la tecnología DWDM a CWDM y determinar los parámetros importantes en la migración y analizar sus ventajas y desventajas. Se describirá las tecnologías que son utilizadas actualmente por la tecnología DWDM.

1.3. Justificación

La migración de CWDM a DWDM se genera por diferentes razones, así como: disminución de costos, amplificadores con altas ganancias, foto detectores, componentes ópticos y también para poder definir inconvenientes que pueden ocurrir como tolerancias, compatibilidad con tipos de fibra óptica. Con ello lograr determinar las ventajas y desventajas de una migración de estas tecnologías en diferentes tipos de escenarios. Existen esquemas para la migración de CWDM a DWDM, dado que cuando la capacidad de los sistemas CWDM se deba extender, es importante saber que en los puertos CWDM se pueden conectar componentes DWDM.

El análisis de la multiplexación DWDM es importante en las comunicaciones ópticas ya que existe cada vez más exigencia de velocidad y capacidad de transmisión al utilizar más longitudes de onda en cada fibra, por lo que el estudio de dicha técnica nos ayuda que su utilidad sea óptima para cumplir las necesidades de redes de última generación.

En la actualidad el uso de la técnica DWDM ayuda a los propietarios a mejorar sus infraestructuras para dotarlas de más capacidades como lo son servicios de tráfico de datos, voz y multimedia de alta calidad. Por lo que el siguiente proyecto ayudará a tener una idea clara del estudio del arte y de las

técnicas de multiplexación DWDM y como estas contribuyen con el desarrollo de la tecnología (Kartalopoulos, 2016)

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Analizar el impacto de la migración de la técnica CWDM a DWDM en redes ópticas.

1.4.2. Objetivo específico

- Definir conceptos básicos de fibra óptica y técnicas de multiplexación para comprender de mejor manera el desarrollo del presente proyecto.
- Analizar las técnicas de multiplexación CWDM y DWDM, junto con sus evoluciones y características.
- Enlistar nuevas innovaciones de la tecnología DWDM.
- Analizar el impacto de la migración de la técnica CWDM a DWDM en todas las instancias de una red óptica.

2. CAPÍTULO I: CONCEPTOS BÁSICOS

2.1 La Fibra Óptica

La fibra óptica es un conductor cilíndrico que este hecho a base de materiales de vidrio y que tiene capacidades grandes de velocidad de transmisión más altas que cualquier otro medio de transmisión. (Daya, y otros, 2015).

Se basa en el centro del vidrio transparente rodeado de varias capas de material protector, de esta manera las señales eléctricas no se transmiten, sino únicamente las luces dentro de la fibra óptica que representaran tipos de datos como se observa en la Figura 1. La fibra óptica es un filamento de vidrio (hecho de cristal natural) o de plástico (cristal artificial) con un espesor de 10 a 300

micras. Transmiten mensajes en forma de rayos de luz que efectivamente los atraviesan de un extremo al otro, donde el filamento pasa sin interrupción (Raj & Singh, 2015). La fibra óptica se puede utilizar como un cable de cobre normal, tanto en pequeños entornos independientes (como sistemas de procesamiento de datos), también como en grandes redes geográficas (como largas líneas urbanas soportadas por compañías telefónicas). Además, el cable puede transmitir simultáneamente varias señales con diferentes tipos de frecuencias, lo cual se denomina multiplexación.

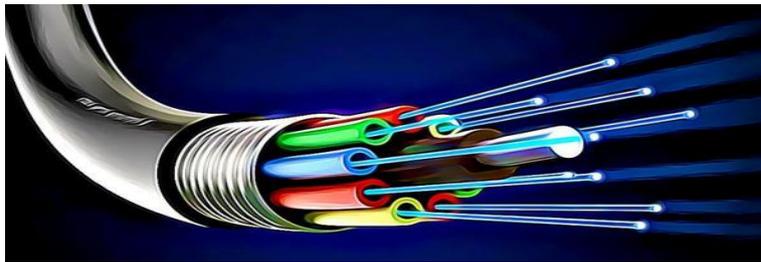


Figura 1 Fibra óptica

Fuente: (De la O, 2016)

La transmisión de fibra óptica avanzó experimentalmente en la década de 1990, pero la tecnología comenzó a desarrollarse rápidamente en la segunda mitad de la década en 1920 con la invención del alcance de fibra óptica, que encontró aplicación en medicina e industrias, por ejemplo, en el uso de cirugía laparoscópica (Nielsen, 2015).

El diseño de una fibra óptica básica es mediante un multiplexor transmisor que enviara señales a través de un empalme que dependiendo de la distancia necesitara de un repetidor de señal que pasara por otro empalme hacia su destino en el multiplexor del receptor como se puede apreciar en la Figura 2.

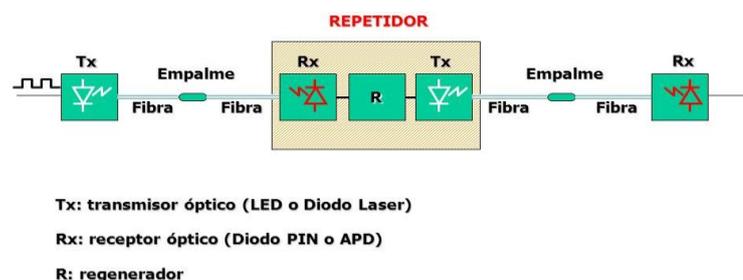


Figura 2 TX y RX

Fuente: (Newman, 2015)

2.1.1 Composición de la Fibra Óptica

Para que una señal o información pueda transmitirse a través de la fibra óptica necesitara de materias esenciales para su comunicación los cuales son: Un núcleo de fibra y el recubrimiento que estará hecho con materiales de vidrio y el revestimiento hecho de plástico que cubrirá las dos primeras capas antes mencionadas como se muestra en la figura 3.

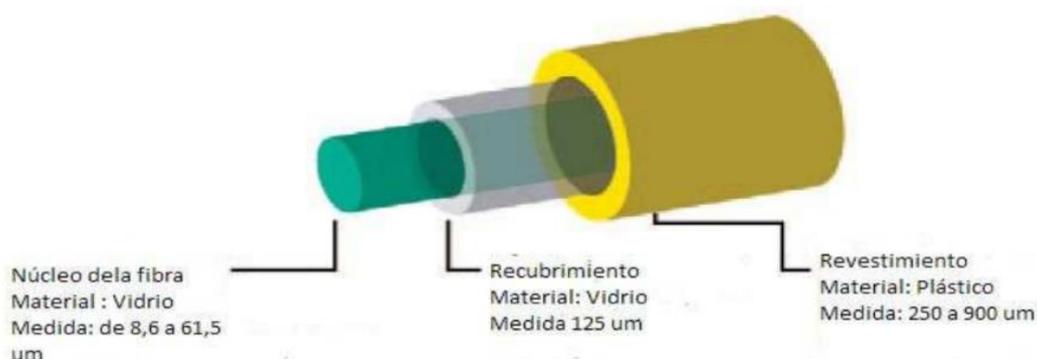


Figura 3 Componentes de la Fibra Óptica

Fuente: (Wolff, 2016)

El núcleo es un medio físico que transmite señales de datos ópticos desde una fuente de luz a un dispositivo receptor. Es una fibra continua única de vidrio de cuarzo ultra puro o dióxido de silicio de diámetro muy pequeño, de 10 a 300 micras (10-6 m). Cuanto mayor sea el diámetro del núcleo, más luz puede transportar el cable, asimismo, los cables de fibra óptica se clasifican según su diámetro, los tres tamaños más comunes están disponibles: 50 μm , 62,5 μm y 100 μm (Clearfield, 2017).

El núcleo de la fibra actúa como una capa reflectante y garantiza que las ondas de luz que intentan salir del núcleo se reflejen y retengan en el núcleo. La cubierta protectora agrega varias capas de plástico para absorber cualquier impacto y proporcionar protección adicional contra la flexión excesiva del cable, es decir, para mantener la resistencia de la fibra (Raj & Singh, 2015).

Este recubrimiento también se mide en micras (m) y su diámetro puede variar de 250 a 900 m. Una serie de fibras de refuerzo envolventes está diseñada para proteger el núcleo contra posibles compresiones o tensiones excesivas al tender el cable (Tihomirovs & Grabis, 2016).

2.1.2 Ventajas de la Fibra Óptica

Existen diversas ventajas en la utilización de fibra óptica, las cuales se detallan a continuación:

Aislamiento eléctrico: Al usar fibra óptica, se eliminan los problemas causados por la inducción y las diferencias potenciales.

Al contrario de otros medios de transmisión la fibra óptica no se ve alterada por el ruido, con lo que pueden ser instalados cerca de cables de electricidad sin ocasionar ningún daño o interferencia en el mismo (Richards, 2015).

Baja tasa de error: Esto es posible por su diseño, el cual se acopla adecuadamente para distribuir los niveles de señal correctos al extremo receptor de la línea sin tener pérdidas en las transmisiones (Richards, 2015).

Mayor capacidad de transmisión: Una de las mayores innovaciones en las tecnologías de transmisión de redes es el cableado de la fibra óptica ya que gracias a su gran capacidad de transmisión puede conectar largas distancias y viajar a grandes velocidades entre continentes a través de conexiones en ambientes submarinos.

Diámetro: La fibra óptica es el medio de transmisión más pequeño y delgado, esto es debido a que muchas señales pueden multiplexarse o ser transportadas en una misma fibra (Farcic, 2016).

Escalabilidad: La fibra óptica puede ampliarse de forma exponencial mediante empalmes y repetidores en las conexiones que pueden agrandar la infraestructura con varias tecnologías y protocolos de comunicación.

2.1.3 Desventajas de la Fibra Óptica

Las desventajas de la fibra óptica son:

Uso limitado: el cable de fibra óptica solo se puede usar en tierra o en conexiones subterráneas bajo el mar, pero no se puede utilizar en comunicaciones móviles (Newman, 2015).

Baja energía: las fuentes de luz están limitadas por la baja potencia. Aunque existen transmisores potentes que mejoran el suministro de energía, esto generará costos adicionales.

Fragilidad: la fibra óptica es bastante frágil y más vulnerable al daño que los cables de cobre, es mejor no torcer o doblar los cables de fibra óptica (Richards, 2015).

2.1.4 Transmisores

Espectros de emisión

Cuando una luz se enfrenta directamente con un objeto transparente nos mostrara un espectro según su distancia y temperatura, para entender espectros y su comportamiento es importante saber los tipos de banda C y L los cuales se utilizan generalmente con tecnologías WDM al trabajar en longitudes de 1530 a 1610 nm. El espectro puede cambiar dependiendo del material o químico en el que se refleja, al reflejar un material de cuerpo negro tendremos como resultado un espectro continuo, cuando un gas caliente se refleja por un prisma tendremos un espectro de emisión y cuando un gas frío pasa por un objeto como un prisma se tendrá como resultado un espectro de absorción como se muestra en la Figura 4. (Sánchez, 2019)

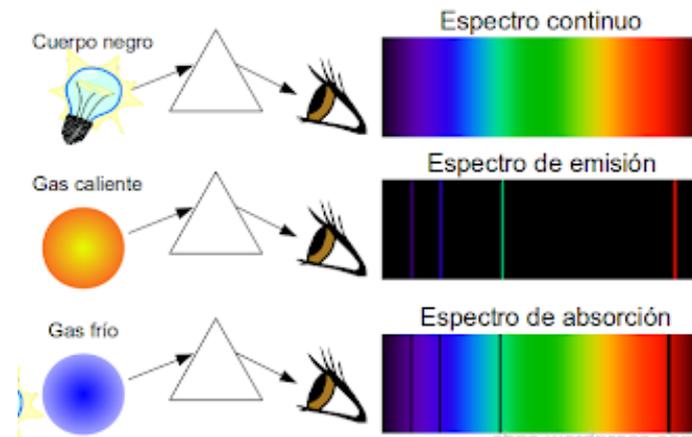


Figura 4 Tipos de espectro mediante reflexión.

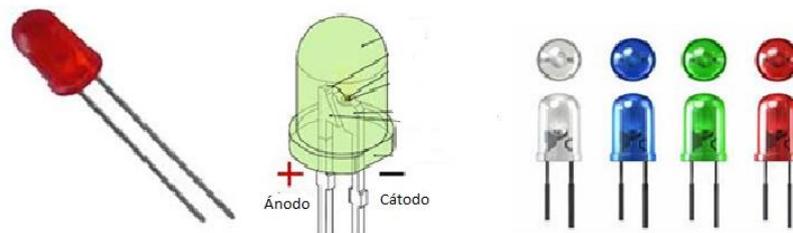
Fuente: (Sánchez, 2019)

Emisores de luz tipo (LED)

Los emisores de luz tipo LED son uno de los dispositivos fotónicos más simples y tiene importantes aplicaciones tanto para la visualización como para la generación de señales ópticas en las comunicaciones. En comparación con un diodo láser (LD), su fabricación es mucho más simple porque no requiere un resonador óptico especial, aunque los inconvenientes son una señal óptica débil, un espectro muy amplio, una luz inconsistente y una respuesta bastante lenta (Carneiro & Schmelmer, 2016).

La simplicidad del LED lo hace muy atractivo como componente para aplicaciones de visualización y comunicación. El LED puede gestionar hasta 1 GHz de frecuencia de modulación, el ancho espectral de la señal óptica corresponde a un rango de longitud de onda de 200 a 300 λ en temperatura ambiente (Kartalopoulos, 2016).

Veamos ejemplos reales de diodos led:



Veamos el símbolo de diodo led:



Figura 5 Diodos emisores de luz LED

Fuente: (Kartalopoulos, 2016)

Modos en la cavidad láser

La reproducción en un resonador óptico posee modos transversales de orden inferior en la cavidad transversal como son: campos asociados, modelos de intensidad en modos, frentes de onda, reflexión por cavidad óptica. Cada una de estas cavidades funcionan con los espejos dieléctricos reflejando la fuente de la luz laser para la transmisión como se lo puede ver los tipos de cavidades según la posición de los espejos tal se muestra en la Figura 6 (Kratzke, (2015)).

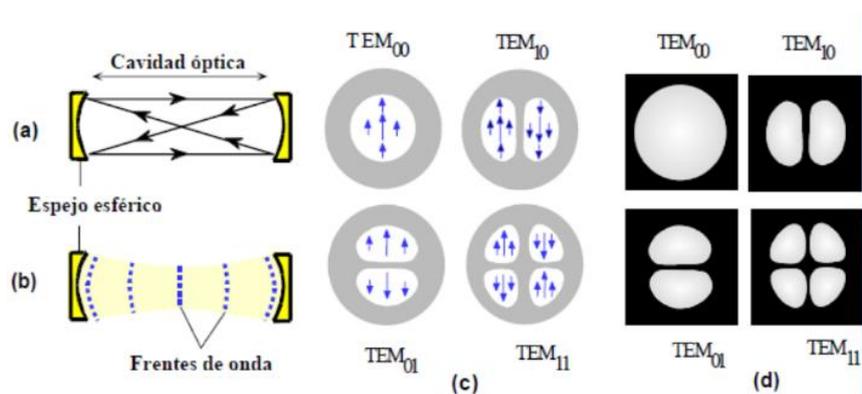


Figura 6 Modos de cavidad láser

Fuente: (Kratzke, (2015))

Oscilador láser

Un láser es un dispositivo que utiliza el efecto de la mecánica cuántica, radiación inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente tanto en el espacio como en el tiempo. La coherencia espacial corresponde a la capacidad del haz de permanecer pequeño cuando se transmite en el vacío a largas distancias y la coherencia temporal se asocia con la capacidad de concentrar la radiación en un rango espectral muy estrecho.

En otras palabras, es un dispositivo que emite luz (radiación electromagnética) a través de un proceso llamado radiación estimulada. El láser de luz es generalmente coherente, lo que significa que la luz se emite en una divergencia de haz estrecho y se hunde o puede convertirse utilizando componentes ópticos como lentes, en fibra óptica se lo divide por multimodo envió de diferentes modos de luz y monomodo que es envió de un único modo de envió de luz como se muestra en la Figura 7 (Khatri, 2015).

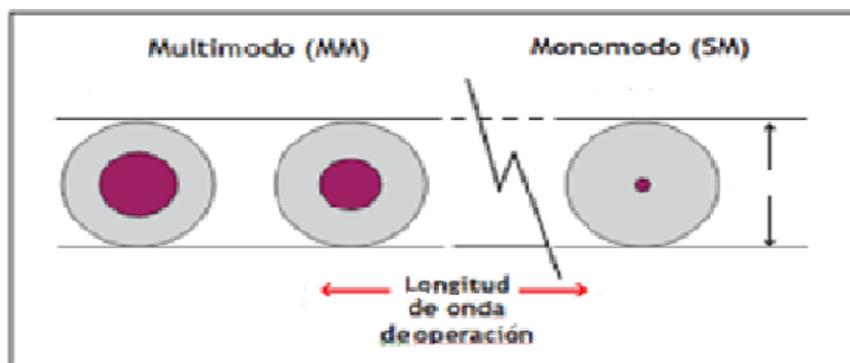


Figura 7 Láser monomodo y multimodo

Fuente: (Khatri, 2015)

2.1.5 Receptores

El propósito del receptor óptico es recibir los datos del transmisor a través de un diodo laser que envía la información en un canal óptico por la fibra la cual llegara a un receptor que cuenta con un fotodetector que transforma la información en electrones para después ser amplificada para llegar a los respectivos receptores como se muestra en la Figura 8 (Khatri, 2015).

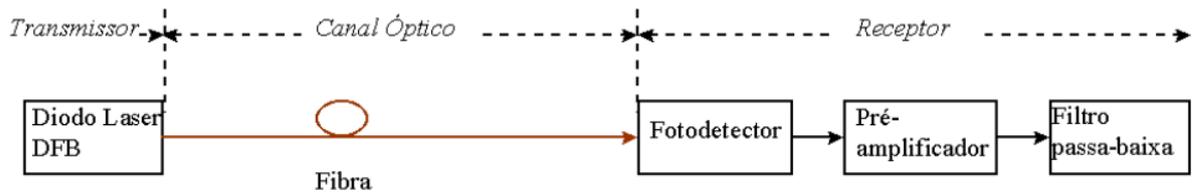


Figura 8 Fotodetectores

Fuente: (Richards, 2015)

Existen tipos de receptores ópticos los cuales implementan diferentes componentes para su funcionamiento los cuales son:

Receptor óptico de envío y detección de información directa

Para el envío de información y detección directa al receptor es necesaria un transmisor con un tipo de laser DFB(distributed feedback laser) el cual enviara los pulsos de luz por un canal óptico, el cual enviara información a un amplificador de señal en el receptor directo a un fotodetector, después la información llega finalmente a un filtro pasa baja que se encargara de pasar las frecuencia bajas para llegar al usuario final como muestra la Figura 9. (Richards, 2015).

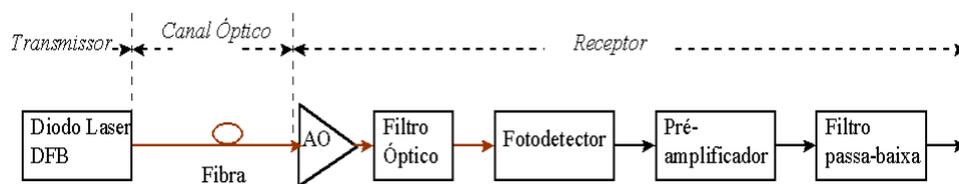


Figura 9 Modelos de un receptor óptico típico de detección directa

Fuente: (Richards, 2015)

Para la detección directa se puede añadir o reemplazar componentes en el receptor, en este caso se reemplazará un amplificador óptico por un acoplador que permite un empalme para tener mayor alcance y oscilación en el envío de información en la fibra como se muestra en la Figura 10.

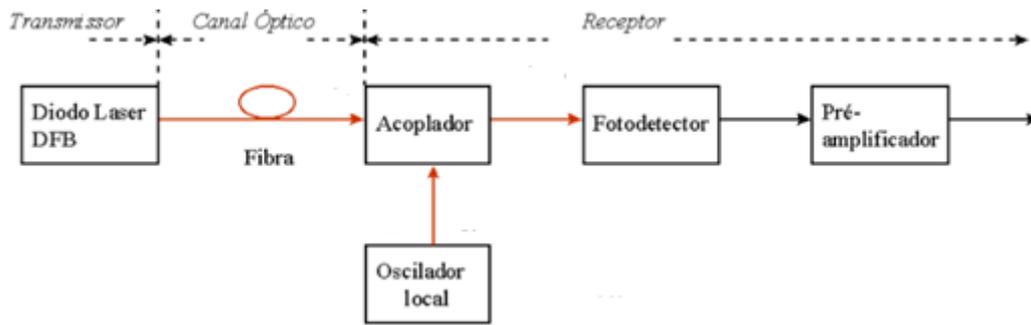


Figura 10 Modelo de un receptor óptico de detección directa típico que utiliza un preamplificador óptico

Fuente: (Wolff, 2016)

2.1.6 Bandas de frecuencia

El desarrollo de fibras ópticas implica el uso de ciertas áreas en donde existe menos atenuación en el espectro. Los primeros sistemas fueron diseñados para operar a alrededor de 850 nm, la primera ventana de fibra óptica. La segunda ventana (banda S), a 1330 nm, rápidamente se volvió más utilizada para baja atenuación, luego la tercera ventana (banda C) a 1550 nm, pero con incluso menos atenuación. Hoy se está desarrollando áreas de espectro de tipo o banda L de alrededor de alcance de hasta 1630 nm (Farcic, 2016). La siguiente figura 11 se detallan las regiones de las longitudes de onda.

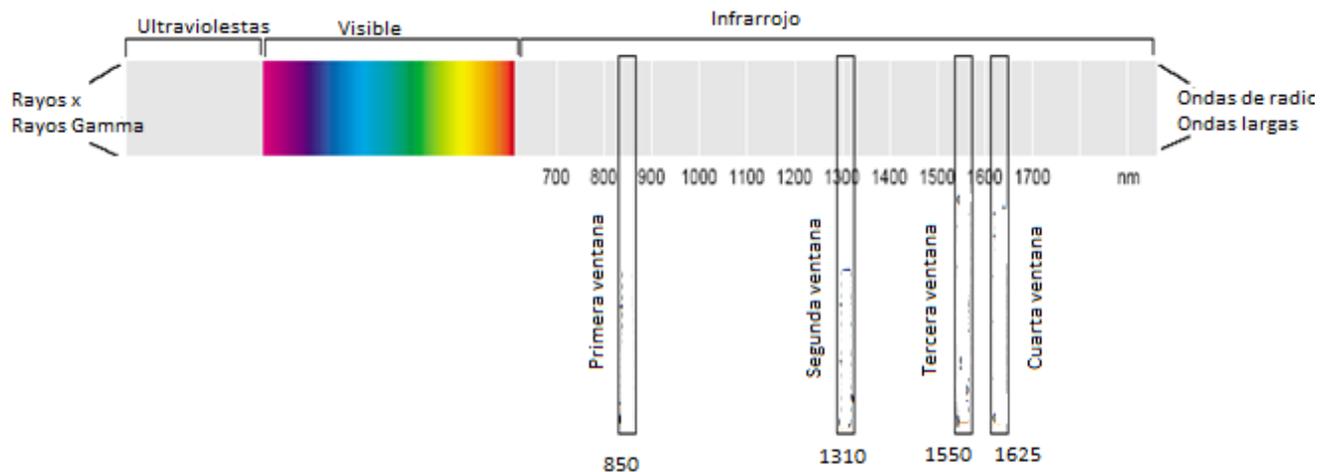


Figura 11 Regiones de las Longitudes de onda

Fuente: (Farcic, 2016)

2.2 Tecnologías de multiplexación

Para poder enviar varios tipos de datos a través de una solo medio transmisión es necesario un dispositivo llamado multiplexor. La Multiplexación además es la transmisión simultánea de varios canales de información separados en el mismo canal de comunicación sin interferencia mutua como muestra la Figura 12 (Fowler & Lewis, 2014).

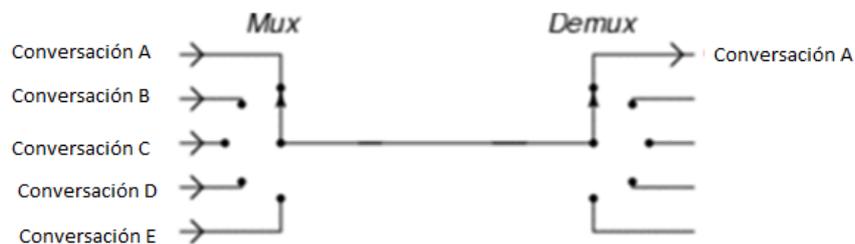


Figura 12 Multiplexación

Fuente: (Fowler & Lewis, 2014)

El proceso inverso se conoce como demultiplexación, un concepto muy conocido es enviar varios tipos de datos por un solo conductor. En otras palabras, se refiere a la capacidad de transmitir datos desde diferentes pares de dispositivos (transmisores y receptores), llamados canales de velocidad, en un medio físico (llamado canal de alta velocidad) (Newman, 2015).

En TI y electrónica, la multiplexación se refiere al mismo concepto cuando se trata de bases de datos que deben compartirse entre diferentes dispositivos (discos, memoria, etc.). La multiplexación en informática es un procesador en el que se le asigna a un proceso un tiempo cuántico durante el cual puede ejecutar sus instrucciones antes de dar paso a otro proceso (Khatri, 2015).

La multiplexación comparte el ancho de banda de la transmisión de datos en la misma línea de comunicación para aumentar la eficiencia, minimiza el número de líneas físicas requeridas y maximiza el uso del ancho de banda multimedia.

2.2.1 Tecnología de multiplexación por división por tiempo (TDM)

La multiplexación por división de tiempo (TDM) es un método que permite la transmisión de señales digitales y cuya idea es ocupar un canal de transmisión (generalmente con ancho de banda amplio) de diferentes fuentes, obteniendo así un mejor uso del medio de transmisión. Uno de los métodos TDM más populares es el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) (Kratzke, 2015).

TDM es el tipo de multiplexación más utilizado, en particular en los sistemas de transmisión digital. Es el más utilizado ya que cada canal durante una fracción del tiempo total o intervalo de tiempo es asignado del ancho de banda para la transmisión. En la multiplexación por división de tiempo (TDM), las señales de varios canales de baja velocidad se prueban y transmiten secuencialmente en un canal de alta velocidad asignando ancho de banda a cada canal, incluso si no tiene datos para transmitir.

El uso de este método es posible cuando la velocidad de datos del medio de transmisión excede la velocidad de transmisión de señales digitales. El multiplexor por división de tiempo selecciona o escanea cíclicamente las señales de entrada de diferentes usuarios y transmite las tramas a través de una sola línea de comunicación a alta velocidad (Tihomirovs & Grabis, 2016).

TDM funciona a nivel de bit o símbolo, en los mapas de bits TDM, cada cuadro contiene un bit de cada dispositivo analizado. La fuente TDM envía un carácter por canal de trama, el segundo es más eficiente porque requiere menos bits de control que el bit TDM. La operación de recuperación debe ser lo suficientemente rápida para que cada búfer se vacíe antes de la llegada de nuevos datos.

El ensamblaje del multiplexor-demultiplexor se presenta de una manera muy simple para ilustrar cómo se lleva a cabo la división del tiempo de multiplexación-demultiplexación. En el circuito las entradas de seis canales alcanzan los llamados interruptores de canal que están cerrados secuencialmente y controlados por una señal de reloj, de modo que cada canal

está conectado al medio de transmisión durante un tiempo determinado por la duración de los pulsos de reloj (Carneiro & Schmelmer, 2016).

2.2.2 Multiplexación por división de longitud de onda (WDM)

WDM es un método de multiplexación que abarca grandes flujos de datos que deben transmitirse simultáneamente a través de una sola fibra con una alta velocidad de transmisión. WDM aumenta el ancho de banda de las redes de jerarquía digital síncrona SDH (Synchronous Digital Hierachy) hasta 16 veces pudiendo recibir hasta 40 Gb/s en cada dirección a través de un par de fibras ópticas (Carneiro & Schmelmer, Microservices From Day One, 2016).

En WDM el flujo de luz láser dentro de una fibra se compone de muchas longitudes de onda, cada una de las cuales lleva canales de datos separados. En las fibras ópticas la propagación de la luz láser es mejor en las áreas centradas de 1300 a 1550nm y el espectro de longitud de onda utilizado en WDM es de entre 1200 y 1600nm (Richards, 2015). La tecnología WDM utiliza una composición de señales ópticas que transportan múltiples flujos de información, cada uno transmitido a diferentes longitudes de onda ópticas, lo que permite que coexistan múltiples canales WDM en la misma fibra óptica como se ilustra en la figura 13.

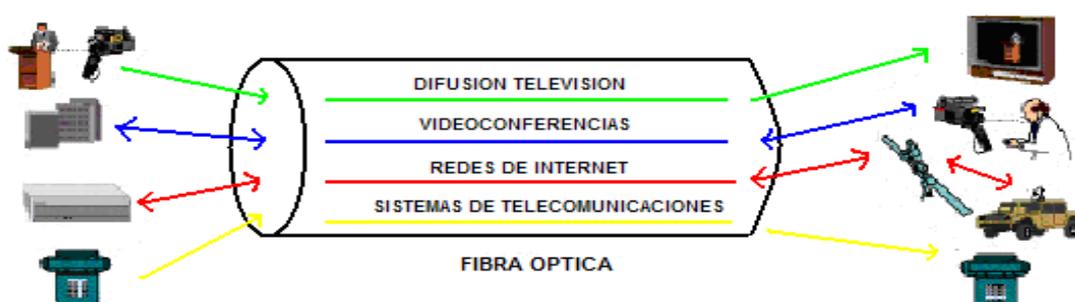


Figura 13 Coexistencia de múltiples canales WDM en la misma fibra óptica
Fuente: (Borčín, 2017)

Para una transmisión de 40 Gb/s a lo largo de 600 km utilizando un sistema tradicional, serían necesarios 16 pares de fibras separadas con regeneradores cada 35 km en los que se deberían colocar 272 regeneradores en total. Al mismo

tiempo el sistema WDM de 16 canales utiliza un par de fibras y 4 amplificadores ubicados cada 120 km a la misma distancia de 600 km (Richards, 2015).

La forma más común que WDM utiliza los pares de fibras es para transmisión y otra para recepción. Hay sistemas en los que solo se usa una fibra para el tráfico bidireccional pero dicha configuración debería sacrificar algo de ancho de banda de fibra para la separación necesaria y evitar la mezcla de canales.

2.2.3 Terminal Multiplexor Óptico (OTM)

OTM es el encargado de convertir las señales eléctricas a ópticas y ópticas a eléctricas, lo cual es importante al momento de retransmisión de dichas señales. OTM cuenta con componentes dentro de su estructura para las conversiones los cuales son: transmisores ópticos, amplificadores ópticos, unidad cruzada y canales de supervisión. Estas terminales ópticas nos ayudaran a que la información sea amplificada o que sea más clara en nuestras comunicaciones, una de sus grandes características es que al momento de transformar la información no se realizan cambios en los bytes transportados con lo que contara con información transparente.

2.2.4 Multiplexación por división de longitud de onda (CWDM)

CWDM evoluciono a partir de WDM al tener un funcionamiento similar ya que se pueden enviar varios tipos de señales, por medio de una fibra óptica mediante la multiplexación pero con mayor capacidad de transmisión. CWDM es una tecnología pasiva (no requiere energía para el equipo terminal), pero tiene dos inconvenientes principales: no permite el uso de amplificadores, por lo que está limitada por las distancias, en el mejor de los casos, 80 km y permite el número máximo de 18 canales de multiplexación, lo que también limita la velocidad añadida.

En principio, CWDM puede cumplir con la funcionalidad básica de DWDM, pero con menor ancho de banda y costos. CWDM permite a los operadores

responder con flexibilidad a las diferentes necesidades de los clientes en áreas metropolitanas donde las fibras pueden ser de gran valor. Sin embargo, no compite con DWDM, ya que ambos tienen roles diferentes, que en última instancia dependen en gran medida de las circunstancias y requisitos específicos del operador (Gamma, 2012).

El propósito de CWDM es la comunicación a corta distancia, utiliza una amplia gama de frecuencias y separa las longitudes de onda entre sí, el espaciado de canales estandarizado le permite desviar las longitudes de onda cuando los láseres se calientan y enfrían durante la operación. El diseño del equipo CWDM es compacto y económico en comparación con los diseños DWDM (Hunt & Thomas, 2015).

La tecnología CWDM no se extiende a largas distancias porque su señal de luz no se amplifica, lo que ayuda a mantener los costos bajos, pero también limita las distancias máximas de propagación. Los proveedores pueden mencionar rangos operativos de 50 a 80 kilómetros a distancias de hasta 160 kilómetros, que pueden usarse con amplificadores de señal (Khatri, 2015).

El CWDM admite varios canales adaptados a los operadores de metro que prefieren comenzar modestamente y luego desarrollarse a medida que aumenta la demanda. Los sistemas de alarma no amplificados incurren en bajos costos iniciales y pueden mantener una alta tolerancia a las fugas, cada vez que se utiliza una señal no amplificada, existe una compensación entre capacidad y distancia. Se crean redes extendidas con menos nodos o redes más cortas con más de un nodo.

2.2.5 Multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM)

DWDM es un método de transmisión de fibra óptica que utiliza la banda C (1550 nm). DWDM es una técnica de multiplexación muy similar a CWDM, pero con mayor alcance y velocidades de transmisión en sus canales. Muchas señales portadoras se transmiten a lo largo de una fibra óptica utilizando diferentes longitudes de onda del rayo láser en cada una de ellas (Nielsen, 2015).

Cada medio óptico forma un canal óptico, que puede procesarse independientemente de los otros canales que comparten el medio (fibra óptica) y contienen diferentes tipos de tráfico. La comunicación bidireccional es un método de transmisión muy interesante para los operadores de telecomunicaciones porque les permite aumentar su productividad sin tender a utilizar más cables y aprovechar el tamaño de la infraestructura (Kratzke, (2015).

DWDM está diseñado para transmitir a largas distancias donde se comprime la longitud de onda. Los proveedores han descubierto diferentes métodos de compresión para 32, 64 o 128 longitudes de onda en una sola fibra. Utilizando amplificadores de fibra óptica, un tipo de amplificador de rendimiento para comunicaciones de alta velocidad, estos sistemas pueden operar a lo largo de miles de kilómetros (Kratzke, (2015).

Los canales densamente poblados no están exentos de límites, primero, se necesitan filtros de alta precisión para separar una longitud de onda específica sin interferir, en segundo lugar, los láseres de precisión deben mantener los canales en el objetivo exacto. Esto casi siempre significa que estos láseres deben funcionar a una temperatura constante. Los láseres de alta precisión y estabilidad son muy caros, al igual que los sistemas de enfriamiento correspondientes (Tihomirovs & Grabis, 2016).

Se requieren dos dispositivos adicionales para la transmisión a través de DWDM: Un transmisor y receptor que puedan realizar la tarea de multiplexar y viceversa las comunicaciones entre usuarios o nodos. A diferencia de CWDM, en DWDM, se obtienen más canales ópticos al reducir la dispersión de color de cada canal utilizando un láser de mejor calidad, fibras de baja dispersión o utilizando módulos de compensación de dispersión (Wolff, 2016).

Por lo tanto, se pueden combinar múltiples canales, lo que reduce el espacio entre ellos. Actualmente, existen posibilidades de tener 160 canales que se pueden separar en una distancia de hasta 25 hasta 100 GHz. Lo cual se define para el rango de 1530-1610 nm, por lo que el espacio entre canales es de 0.8 nm y 1.6 nm (Raj & Singh, 2015).

3. CAPÍTULO II: TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN CWDM Y DWDM

3.1 CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*)

CWDM es uno de los métodos de multiplexación más utilizados actualmente porque aumenta la eficiencia del canal de transmisión en las comunicaciones al extender la longitud de onda de una fibra existente.

Los sistemas CWDM admiten distancias de transmisión de hasta 50 km y no utilizan amplificación óptica entre estas distancias. Esto se debe a que la tecnología CWDM puede soportar varias topologías como: nodos de anillo, punto a punto y redes ópticas pasivas (SilexFiber, S.F).

En cada longitud de onda se pueden usar láseres de transmisión electrónicos para transmitir datos dentro de los límites normales de las fibras ópticas. Los sistemas CWDM están limitados por la cantidad de longitudes de onda que se pueden combinar y separar de hasta 18 longitudes de onda como se aprecia en la figura 14.

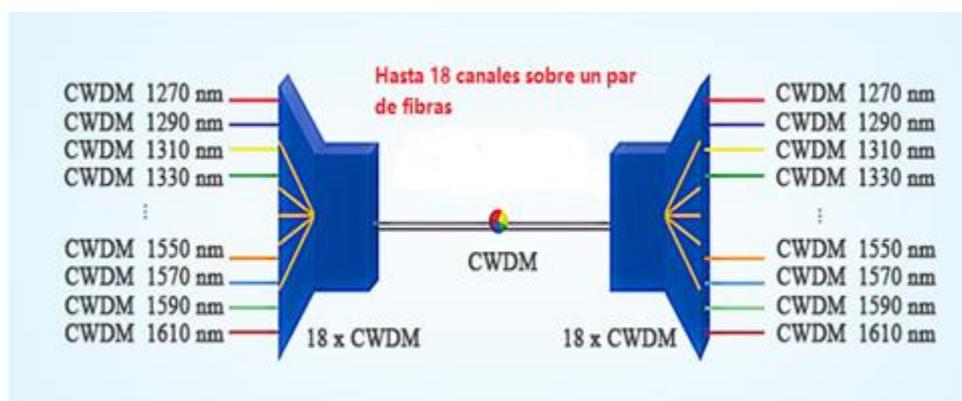


Figura 14 CDWM

Fuente: (Evans, 2013, pág. 56)

Este amplio espacio entre canales se basa en consideraciones relacionadas con los tipos de datos que se puede enviar en cada uno de ellos. Al utilizar los múltiples canales en cada fibra se necesitará un plano de longitud de onda normal que cubra la mayoría de las bandas de menos de 1300 nm a

más de 1600 nm del espectro necesario para el uso a través de una fibra óptica (Farcic, The DevOps 2.0 Toolkit. packtpub, 2016).

El desarrollo de CWDM es una tecnología intermedia en respuesta a la creciente demanda de una red óptica con capacidades mayores que WDM y menores que DWDM. CWDM opera en la región de 1550 nm llamada banda C la cual es el espectro que soporta rangos entre 3 a 7 GHz. (Evans, 2013).

CWDM ofrece aplicaciones de uso en la combinación de: láseres sin enfriadores, tolerancias de longitud de onda láser que son menos rígidas y filtros de paso de banda ancho. Puede usarse en redes metropolitanas por su gran alcance, en la cual se puede utilizar como una plataforma para el envío de información integrada en las redes, esto es posible gracias al uso de las repetidoras que aumentan el alcance en las comunicaciones.

Usando diferentes longitudes de onda, se puede transmitir información síncrona o asíncrona a través de la misma fibra. Gracias a la técnica CWDM es posible transmitir a través de fibra óptica a una velocidad de transmisión de hasta 20 Gbit/s para longitudes de gran capacidad para transmisiones digitales tipo banda base.

3.1.1 Evolución de CWDM

La técnica CWDM se utilizó por primera vez comercialmente a principios de la década de 1980 para transmitir señales de video digital a través de fibras multimodo. Se creó el sistema de cuatro longitudes de onda, en las cuales su desarrollo operativo lo hacía en una ventana de 800nm de cuatro canales, cada una de ellas opera a 140 Mbits/s. Principalmente, estos canales se usaron en conexiones CATV (Televisión por cable), con el avance de capacidad en sus ventanas, estos sistemas fueron aplicados principalmente en conexiones CATV (Televisión por cable). En la actualidad, CWDM es una de las técnicas más utilizadas por su gran capacidad y por el uso de varios protocolos en sus comunicaciones.

El entorno metropolitano de hoy requiere sistemas de transporte físicamente pequeños, eficientes en energía, de bajo costo y fáciles de usar que brinden suficiente ancho de banda para el uso actual de comunicaciones ópticas en todo el mundo (Nielsen, 2015). El rápido ritmo del desarrollo tecnológico se ha ralentizado considerablemente, lo que ha llevado a un sentido más común en las inversiones financieras. Es mejor utilizar sistemas económicos que recuperen las inversiones realizadas en el futuro cercano y que deberían reemplazarse después de 10 años, en comparación con los sistemas que proporcionarán demanda de capacidad en los próximos 10 años o más, pero esto tomará más de este tiempo pagar su inversión.

CWDM evoluciono hasta ser utilizado por tecnologías de acceso a la red tales como: *Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)*, *Hybrid Fiber Coax(HFC)*, *Local Multipoint Distribution Service (LMDS)*, *Provisión de líneas de cliente (PLC)*, *General Packet Radio Services (GPRS)*. (Richards, 2015).

Este panorama ha llevado a la búsqueda de tecnologías adaptadas al entorno tecnológico, que han podido ofrecer un alto rendimiento a un costo relativamente bajo. El resultado fue la aparición en los últimos años de los primeros sistemas comerciales basados en la tecnología CWDM para redes actuales.

3.1.1 Características CWDM

La UIT ha establecido un estándar global para redes metropolitanas de fibra que aumentará CWDM en el uso de redes metropolitanas. Se espera que, gracias a este estándar será necesario el cambio de equipos a CWDM por el creciente en servicios de datos, multimedia y telefonía y esencialmente para el uso de calidad de servicios en términos de soluciones de transporte cortas y económicas, los operadores de telecomunicaciones puedan obtener ahorros de los que los consumidores deberían beneficiarse. Según un informe publicado recientemente por *Gardner Attacks*, el mercado mundial de redes ópticas urbanas crecerá de \$ 1,1 mil millones en 2021 a \$ 4,3 mil millones en 2025 con

la adopción de este nuevo estándar, la tecnología de multiplexación CWDM está destinado a atrapar una parte importante de este mercado (Raj & Singh, 2015).

Las aplicaciones CWDM son particularmente efectivas para lograr una cobertura de hasta 50 kilómetros, para distancias más cortas y requisitos de capacidad más bajos, las aplicaciones CWDM permiten un espaciado de canales más amplio y equipos más baratos, proporcionando el mismo nivel de calidad que los sistemas de fibra óptica de largo alcance y soporta varios tipos de interfaces tal como se puede ver en la figura 15.



Figura 15 Varios interfaces utilizados para CWDM.

Fuente: (Fowler & Lewis, 2014, pág. 62)

3.1.2 Estructura en CWDM

El sistema CWDM consta de tres componentes principales: un multiplexor/demultiplexor (*Mux / Demux*), un módulo de caída de paso (*drop / Pass*) y un módulo de caída de inserción (*drop/insert*). (Raj & Singh, 2015).

Mux / Demux

El *Mux / Demux* es el componente más utilizado en el sistema CWDM. Combina diferentes canales en una sola salida de fibra (TX). En la figura 16 se puede observar que Tx / Rx recibe los mismos canales que una fibra entrante (RX), los divide en distintas longitudes de onda y los entrega a la interfaz local correspondiente, este proceso aumenta la capacidad de un cable de fibra óptica de red existente (Daya, y otros, 2015).

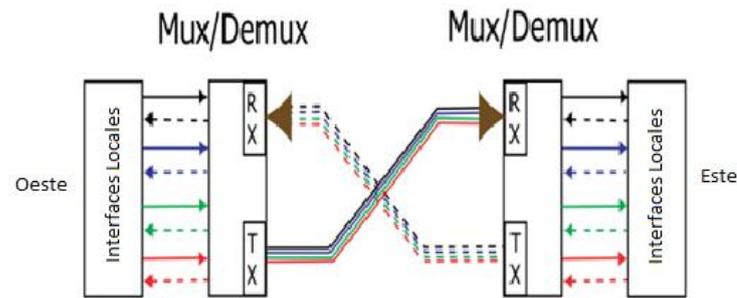


Figura 16 *Mux / Demux*

Fuente: (Daya, y otros, 2015)

Se pueden configurar cuatro canales *Mux/Demux* para admitir canales adicionales a través del puerto de expansión, la conexión secuencial de los módulos aumenta el número total de canales de red disponibles. Los canales que se conectan al puerto de expansión deben ser diferentes de los canales *Mux / Demux* a los que se conecta.

Módulo *Drop / Pass*

El *módulo drop/pass* elimina un canal de cierta longitud de onda de una fibra óptica conectada al este para permitir que los canales restantes pasen directamente a los otros nodos de toda la red, de tal forma que se agiliza la comunicación haciéndola mucho más rápida, efectiva y directa como se observa en la figura 17. Cuando el *módulo drop / pass* libera el canal de red y envía los datos a la interfaz local. También demuestra que la interfaz local devuelve el mismo canal al *módulo drop / pass* para la transmisión en dirección oeste, completando así la conexión punto a punto entre la interfaz local y otro dispositivo ubicado al oeste, este otro dispositivo puede ser un módulo *Mux / Demux*, *drop / pass* o *drop / insert* (Blatt, 2018).

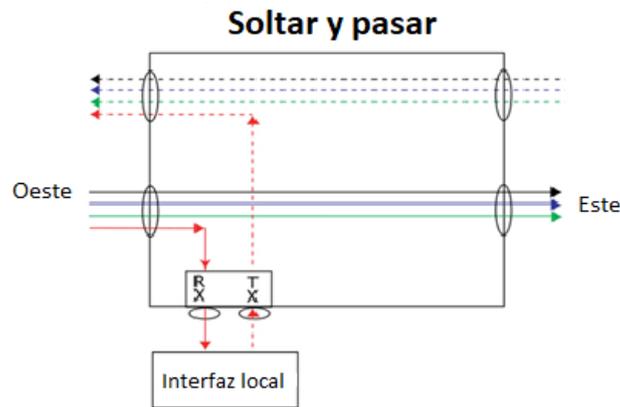


Figura 17 Soltar y pasar

Fuente: (Blatt, 2018)

Drop / Insertar módulo

La figura 18 indica el *módulo drop / insert* proporciona dos puertos de interfaz locales, un puerto elimina un canal de cierta longitud de onda de la fibra de la red en una dirección, y el otro puerto agrega el mismo canal a la fibra en la dirección opuesta, ya que admite dos rutas separadas que van en direcciones opuestas, la viabilidad de la red está garantizada en una topología de anillo, incluso si se produce un error de red (Raj & Singh, 2015).

En el lado oeste, el *módulo drop / insert* elimina un canal de una longitud de onda específica de la fibra en la dirección este y lo envía a la interfaz local al oeste el cual a modo de ejemplo se coloca el nombre (A). Para completar la conexión en la dirección oeste, el *módulo drop / insert* recibe el mismo canal en la red local interfaz A y lo inserta en la fibra hacia el oeste. Lo mismo ocurre con el lado este, excepto en la dirección opuesta. El *módulo drop / insert* elimina el canal de fibra óptica hacia el oeste y lo envía a la interfaz local B. Para completar la conexión hacia el este, el *módulo drop / insert* recibe el mismo canal del interfaz local al este, que a modo de ejemplo se coloca el nombre (B) y la inserta en la fibra óptica hacia el este. Interrumpe las conexiones punto a punto entre dos interfaces locales y otros dos dispositivos en el este y el oeste. El otro dispositivo puede ser un módulo Mux/ Demux, drop/pass o drop/insert (Fowler & Lewis, 2014).

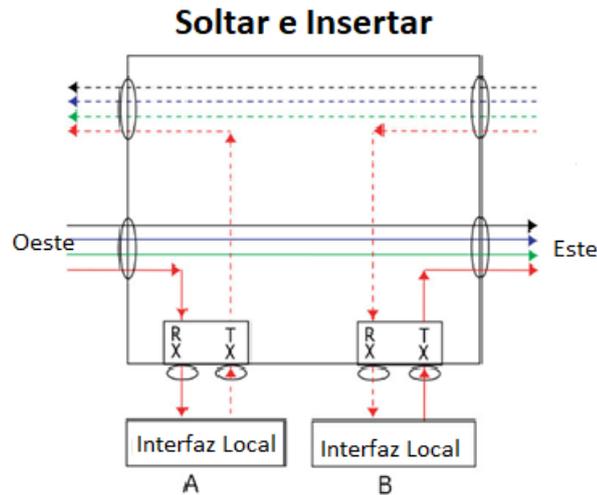


Figura 18 Soltar e Insertar módulo

Fuente: (Fowler & Lewis, 2014)

3.1.3 Canales CWDM

Como se puede observar figura 19 la separación de canales de las fuentes CWDM es de 20nm. Este espacio entre canales es un orden de magnitud mayor que el espacio entre canales DWDM de 1.6, 0.8, 0.4nm o menos. Este gran espacio entre canales de 20nm permite el uso de fuentes filtros de banda ancha menos costosos (Fowler & Lewis, 2014).

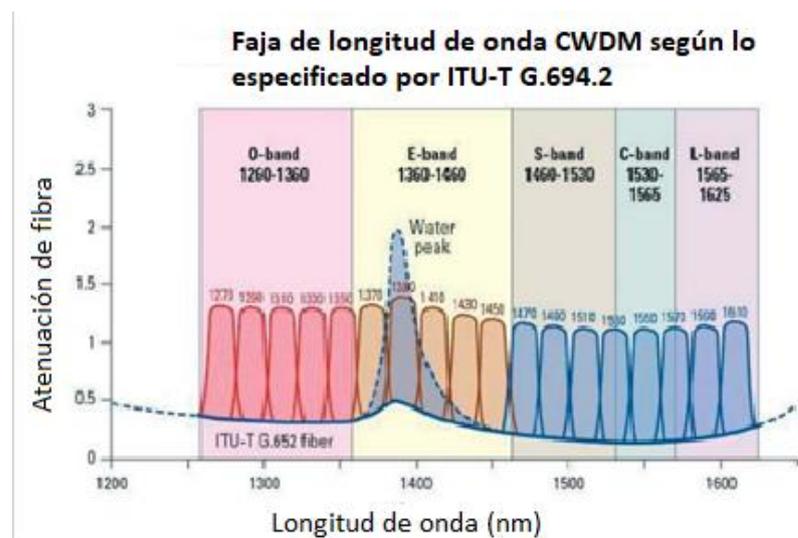


Figura 19 Rejilla de longitudes de onda en CWDM

Fuente: (Fowler & Lewis, 2014)

3.2 Tecnología DWDM (*Dense Wavelength División Multiplexing*)

Actualmente DWDM es utilizado para aumentar el rendimiento de una fibra óptica, esto se logra al transmitir diferentes señales de diferentes canales por medio de la fibra óptica. Cada señal recibe una longitud de onda o color único en el espectro cromático de la luz, todas las señales se transmiten juntas y se combinan en una sola señal (Daya, y otros, 2015).

El DWDM puede eliminar por completo la necesidad de equipos multifibra o *Add and Drop Multiplexers* (ADM), lo cual es muy importante para las empresas quienes tienen problemas con el consumo de fibra y la saturación de la red. DWDM puede coexistir perfectamente con las redes *Synchronous Digital Hierachy* (SDH). DWDM ha revolucionado la industria de las telecomunicaciones al proporcionar una infraestructura para transportar grandes redes ópticas (Kratzke, (2015).

DWDM combina 64 longitudes con varios tipos de datos en una sola fibra, En la figura 20 se observa la tecnología DWDM utiliza el estándar Plan de Frecuencias UIT-T G.692. con separación de longitud de onda de 100 GHz a 200 GHz, en el rango de 1500 a 1600 nm (Raj & Singh, 2015). Sin embargo, es mucho más grande en DWDM, porque se puede usar más longitudes de onda y se puede alcanzar una distancia mucho mayor que en CWDM, lo cual es una gran ventaja, porque las redes a implementar por lo general son de gran distancia.

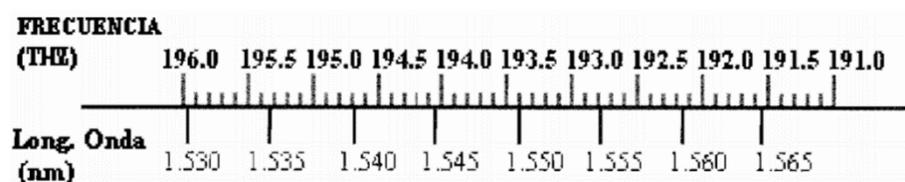


Figura 20 Plan de Frecuencias UIT-T G.692.

Fuente: (Fowler & Lewis, 2014)

DWDM es capaz de realizar de que cada fibra tenga una serie de canales ópticos paralelos, con una longitud de onda de luz ligeramente diferente, por ejemplo, los datos pueden transmitirse en forma de bits paralelos o caracteres consecutivos de tal forma que se puedan utilizar varias tecnologías o protocolos sincrónicamente.

3.2.1 Evolución DWDM

A principios de 1990 se creó una tecnología de multiplexación mejorada y con más capacidad que CWDM y creada a base de WDM, que utilizaba de 2 a 8 canales, los cuales podían estar aproximadamente a 400 Gigahercio (GHz) en una ventana a 1550nm. Con el pasar de los años las nuevas tecnologías de multiplexación tomaron el nombre de DWDM, el cual constaba de 16 a 40 canales y estaban separados de 100 a 200 GHz. A fines de la década de 1990, los sistemas DWDM se desarrollaron hasta el punto en que podían tener de 64 hasta 160 canales en paralelo y espaciados cada 50 o 25 GHz, tal como lo evidencia la figura 21.

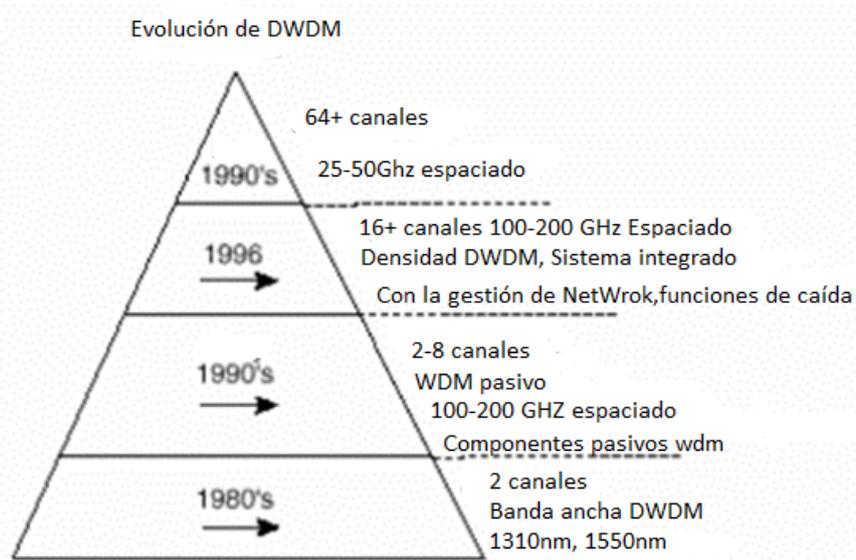


Figura 21 Evolución de DWDM

Fuente: (Carneiro & Schmelmer, 2016, pág. 37)

3.2.2 Características del DWDM

DWDM se basa en varios principios básicos: la capacidad de los diodos láser para emitir a una longitud de onda precisa y estable, con un ancho de espectro significativamente reducido. La figura 22 muestra la transparencia de amplificadores de fibra lineal y sus propiedades de amplificación uniformes de varios canales simultáneamente (Borčín, 2017). Un DWDM típico consiste en transmisores, receptores, un amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA), un multiplexor DWDM y un demultiplexor DWDM.

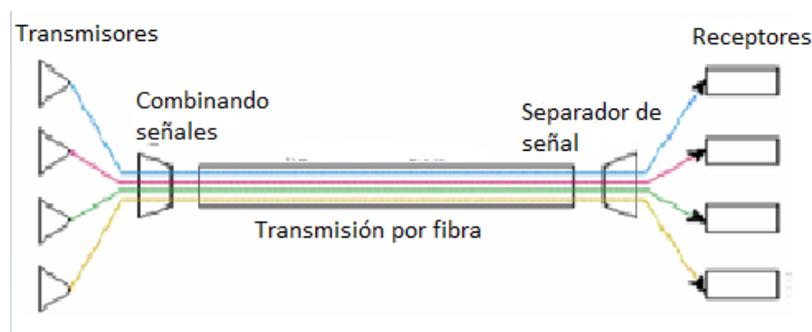


Figura 22 Transmisiones en DWDM

Fuente: (Fowler & Lewis, 2014)

DWDM proporcionan mejoras en transmisión más eficiente en señales digitales de alto ancho de banda (hasta 2.5 Gb/s, 10 Gb/s e incluso 40 Gb/s por canal) (Hunt & Thomas, 2015). Un sistema de transmisión típico basado en tecnología DWDM implica los siguientes pasos:

- **Generación de señal en DWDM:** La fuente de luz es un convertidor electroóptico, un láser de estado sólido, que suministra luz coherente a una longitud de onda específica con alta estabilidad proporcionada por el control de temperatura del láser el cual será el medio óptico que transporta datos digitales (Raj & Singh, 2015).
- **Combinación de señales en DWDM:** Los sistemas DWDM usan multiplexores para combinar señales. Hay algunas pérdidas asociadas con la multiplexación y demultiplexación, esta pérdida puede solucionarse

mediante el uso de amplificadores que amplifiquen la señal al receptor. (Richards, 2015).

- **Señal de transmisión en DWDM:** La atenuación y dispersión se consideran al igual que en las potencias para transmitir en fibra óptica, estos efectos se minimizan en función del espacio entre canales, la banda protectora, el soporte y la potencia del láser (Nielsen, 2015). También hay dispositivos que amplifican la señal para compensar la atenuación (amplificadores ópticos EDFA); dispositivos de compensación de dispersión (DCF) que evitan este fenómeno inherente a la fibra óptica, agravado por la distancia y la velocidad de transmisión de la señal digital transmitida; también hay regeneradores que reformatean el pulso digital y restauran la frecuencia del reloj de la señal mediante una conversión eléctrica (sistema 3R) y luego otra conversión óptica.
- **Receptores de las señales en DWDM:** En el lado del receptor las señales multiplexadas deben estar separadas por filtros ópticos utilizando tecnologías similares a los filtros multiplex, dependiendo de la cantidad de canales que se combinen o separen, los cuales se detallan a profundidad en la sección receptores en el capítulo 4 (Newman, 2015).
- **Señal de recepción en DWDM:** Para una señal correcta de recepción es necesario que la información que llega al receptor tenga el nivel de pérdida o sensibilidad requerida para tener calidad en la comunicación- (Richards, 2015). Además, para una mejor recepción se usa transpondedores en la infraestructura de una red DWDM el cual mejorara la señal que envió el transmisor.

3.2.3 Arquitectura DWDM

Las arquitecturas de red se basan en muchos factores, incluidos los tipos y protocolos de aplicaciones, las distancias, los modelos de uso y acceso y las topologías de red. Por ejemplo, en el mercado metropolitano, es posible utilizar topologías punto a punto para combinaciones de negocios, topologías de anillo para conectar oficinas y para acceder a locales residenciales y topologías de red

utilizado para conexiones entre oficinas y conexiones para conectar líneas a largas distancias (Borčín, 2017).

Las topologías más utilizadas en el mercado son las topologías punto a punto y anillo. Si hay canales de comunicación bidireccionales a través de DWDM entre grandes empresas en largas distancias en el cliente, solo se necesita un dispositivo para convertir el tráfico de la aplicación a longitudes de onda específicas y multiplexarlas. Las topologías lineales y de anillo pueden evolucionar hacia redes de anillo basadas en *Optical Add/Drop Multiplexer* (OADM). Con la configuración de OXC y *switches*, estas redes punto a punto y en anillo se conectarán en redes, transformando las redes ópticas metropolitanas en plataformas totalmente flexibles.

- **Topología punto a punto.**

En las topologías punto a punto pueden llegar a grandes velocidades de hasta 40 Gbps y sus conexiones son directas y puede llegar a varios kilómetros de recorrido tan solo usando pocos amplificadores tal como se muestra en la figura 23. Además, se observa que los equipos están en el nivel del sistema y los canales paralelos conectan los sistemas redundantes a cualquier punto final. Al guardar en la tarjeta, los canales paralelos conectan los sistemas a cualquier punto final que contenga transpondedores y multiplexores redundantes.

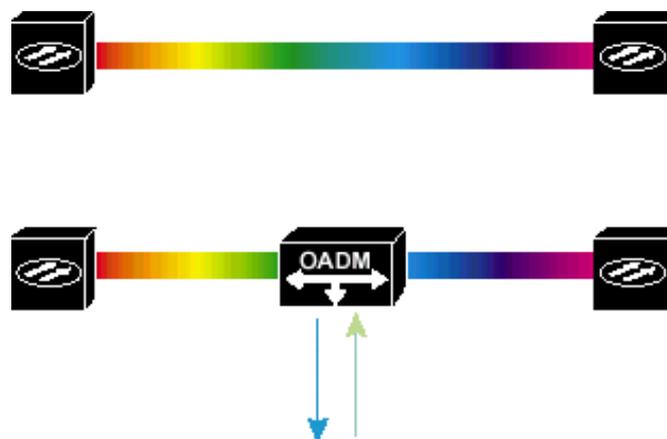


Figura 23 Topología punto-a-punto

Fuente: (Wolff, 2016, pág. 84)

- **Topología de anillo**

Esta arquitectura es la más utilizada en las megalópolis y les permiten viajar decenas de kilómetros de largo. Un anillo de fibra óptica puede contener cuatro canales con sus longitudes de onda, respectivamente. Como regla se recomienda menos nodos que los canales. Las velocidades de transferencia de datos varían de 622 Mbps a 10 Gbps por canal. Las configuraciones de anillo se pueden implementar con uno o más sistemas DWDM que admiten cualquier tráfico, o pueden tener un concentrador y uno o más nodos o satélites OADM, tal como se observa en la figura 24; se supervisa el tráfico del concentrador y se establece la comunicación con otras redes (Stern & Krishna, 2014).

En los nodos OADM, las longitudes de onda se seleccionan, recuperan y agregan y el resto es transparente. Por lo tanto, las arquitecturas en anillo permiten que los nodos en el anillo proporcionen acceso para conectarse a elementos de red, como enrutadores, conmutadores o servidores, agregando o eliminando los canales existentes. Mientras aumenta la cantidad de OADM, la señal se pierde y puede requerirse amplificación.

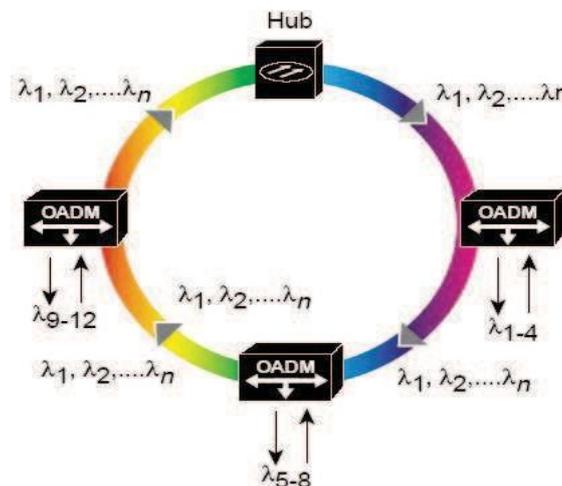


Figura 24 Topología anillo

Fuente: (Nielsen, 2015, pág. 85)

Otros esquemas, como los anillos conmutados de línea bidireccional (BLSR), que permiten que el tráfico viaje desde el nodo de origen al nodo de recepción a lo largo de la ruta más directa, proporcionan una protección muy confiable. En este sentido, BLSR es muy adecuado para la instalación de redes

SONET, en particular cuando se implementa con cuatro fibras, lo que garantiza una redundancia total (Nielsen, 2015).

- **Topología de malla**

Cuando las redes se han convertido en una red de malla, las topologías punto a punto y anillo continuarán siendo utilizadas para futuras extensiones, pero la arquitectura de malla promete ser una topología que combine las dos arquitecturas (Kartalopoulos, 2016).

Esto se logrará mediante la introducción de OXC (optical cross connect) y conmutadores personalizados, que en algunos casos reemplazan a otros dispositivos DWDM. La forma de conectar arquitecturas y mallas punto a punto es muy simple, a partir de las conexiones punto a punto proporcionadas por los nodos OADM salientes para proporcionar flexibilidad. La red puede funcionar tanto con la topología de anillo conectándose con topología de malla con conexiones punto a punto, esto lo podemos observar en la figura 25.

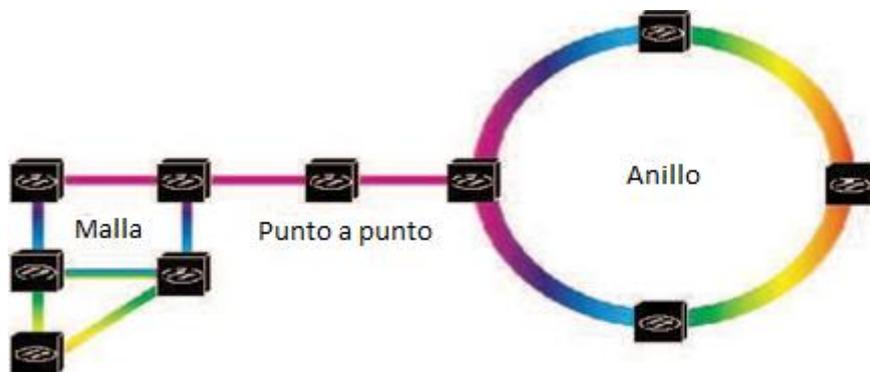


Figura 25 Topología de malla

Fuente: (Carneiro & Schmelmer, *Microservices From Day One*, 2016, pág. 37)

Las redes de malla DWDM consisten en conectar todos los nodos ópticos. Este tipo de conexión al nodo requerirá protección cuando los esquemas de seguridad anteriores tuvieran redundancia de sistema, tarjeta o fibra. La arquitectura de malla cambia la redundancia de la longitud de onda, esto significa, entre otras cosas, que una longitud de onda puede cambiar a través de la red debido al enrutador óptico en caso de mal funcionamiento de la longitud de onda (Richards, 2015).

Es importante tener en cuenta que las topologías de malla requieren el uso de pequeñas fibras lo cual hace más fácil la protección y un posible intercambio en cada anillo, y esto nos ayuda que pueda mejorarse la construcción de la malla. La protección y la recuperación pueden basarse en caminos comunes, de modo que varios pares de fibras no son necesarios para el mismo tráfico esto es debido a la gran escalabilidad de esta topología.

4. CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE MULTIPLEXACIÓN DWDM

4.1. Análisis de Componentes DWDM.

Para analizar un sistema DWDM se debe tener claro los componentes necesarios para su funcionamiento como son: amplificadores ópticos, multiplexores de entrada / salida (*Add and Drop Multiplexers ADM*) , enlaces cruzados ópticos (*Optical Cross Connect OXC*) y dispositivos como OTM, OADM, OLA (Hunt & Thomas, 2015).

El concepto de red de transporte óptico implica que un proveedor de servicios debe tener acceso óptico al tráfico en varios nodos de la red. Todos los componentes anteriores proporcionan este objetivo y también eliminan la necesidad de otros accesorios electrónicos.

4.1.1. Conexión óptica cruzada (OXC) en DWDM

OXC es un componente que proporciona la función de conectar N puertos de entrada a N puertos de salida, cada uno operando con una gran cantidad de longitudes de onda múltiples únicas, la administración flexible del ancho de banda se logra con la introducción de OXC (Borčín, 2017).

Proporciona la reconfiguración de la red porque permite a los proveedores de la red transportar y administrar eficientemente las longitudes de onda ópticamente. Estos atributos ayudan a OXC a conectar canales ópticos de diferentes velocidades (OC-12, OC-48 y OC-192) y en varios formatos, como SONET / SDH y ATM (Borčín, 2017).

4.1.2. Convertidores de longitud de onda DWDM

La función de este componente es que la señal de onda que salió del transmisor sea similar a la onda de salida en el ancho de banda del sistema, se utiliza en enrutadores cuando la longitud de onda necesita ser cambiada. Un convertidor ideal DWDM debe ser transparente con diferentes velocidades de bits y formatos de señal (Farcic, 2016).

La conversión de longitud de onda puede ser optoelectrónica o totalmente óptica. El uso de un circuito en particular depende de los requisitos del sistema. Sin embargo, la conversión óptica completa es más rentable y está orientada hacia futuras redes totalmente ópticas.

4.1.3. Multiplexor

Para un enlace DWDM se puede multiplexar y demultiplexar diversas longitudes de onda (λ) las cuales pueden expresar cada uno de los canales en sus diferentes frecuencias, cada λ se encuentra modulada a partir de la información de la interfaz que consta del lado de una de las interfaces, cabe señalar que cada canal está compuesto por dos λ en el sentido de transmisión y recepción. La figura 26 muestra la multiplexación/demultiplexación modular de las longitudes de onda de tal forma que se pueda multiplexar / demultiplexar todos los canales del agregado óptico al menos en grupos de 4 canales.

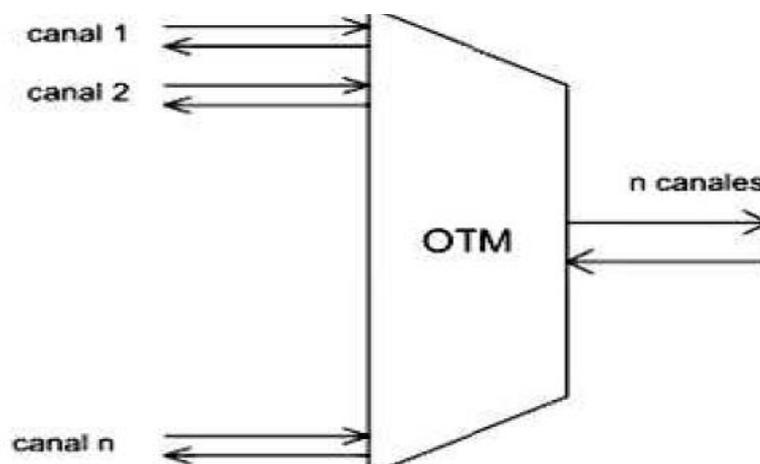


Figura 26 Elemento de red OTM

Fuente: (Dutta, Dutta, & Fujiwara, 2013, pág. 215)

4.1.4. Multiplexor de inserción / extracción óptica (OADM)

Es un subsistema que pasa de una red óptica de punto a punto de longitud de onda única a una red DWDM de longitud de onda múltiple. Como su nombre lo indica, OADM inserta o emite selectivamente longitudes de onda sin la necesidad de un terminal SONET / SDH, los mismos que son responsables de administrar el tráfico de fibra óptica WDM (Nielsen, 2015).

Para poder tener un nivel de escalabilidad en DWDM es necesario tener en nuestra red un OADM, que nos ayudará a aumentar la infraestructura como son los canales en los nodos necesarios. Esto es posible porque cada OADM puede multiplexar o demultiplexar las longitudes de onda del agregado óptico en grupos de al menos 4 canales, sin afectar los canales restantes presentes en la fibra, lo cual nos ayuda a agregar más canales ópticos intermediarios como se observa en a la figura 27.

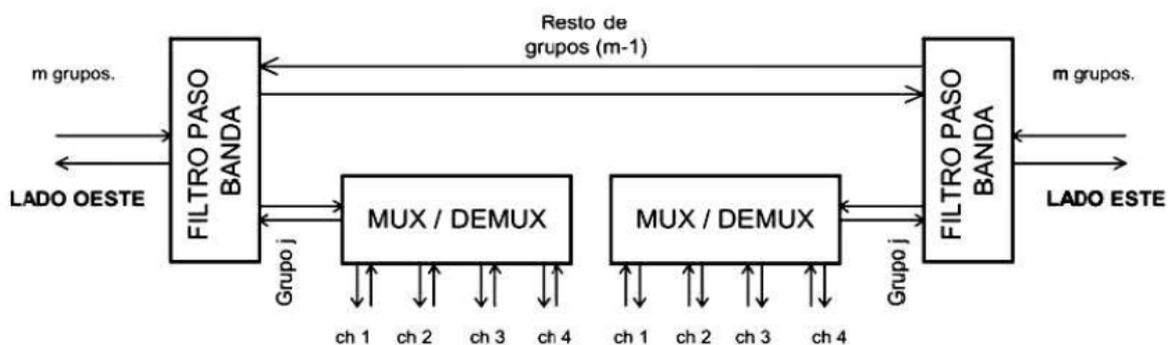


Figura 27 Diagrama funcional de OADM

Fuente: (Newman, 2015, pág. 63)

4.1.5. Amplificador óptico de línea (OLA)

Para que exista una conexión de extremo a extremo entre terminales en una arquitectura DWDM es necesario el amplificador OLA, las características principales son:

- En una red DWDM trabajara para amplificar señales de hasta 30dB.

- Es bidireccional ya que trabaja tanto en la entrada como en la salida de la señal.
- Ayuda a mantener la ganancia en las comunicaciones ópticas al momento de ser multiplexadas

Para poder analizar cada uno de los parámetros en uno de los nodos en la red DWDM se utilizó los siguientes datos como se puede observar en la tabla 1.

4.2. Análisis de simulación de DWDM.

El modelo de simulación desarrollado incorpora un transmisor DWDM el cual posee 10 canales de frecuencia de 1550 nm, así como canales de modulación NRZ, también posee una fibra óptica multimodo para la transmisión de 10 km incorporando 2 amplificadores uno destinado a la salida del transmisor y otro a la entrada del receptor con el objetivo de compensar las pérdidas que puedan derivarse de la transmisión. De ahí que en el lado receptor se conecte un demultiplexor de DWDM al cual se enlazan los receptores ópticos.

4.2.1. Transmisor DWDM

Mediante el software Optisystem se diseñó un modelo de simulación a partir de un transmisor DWDM el cual posee 10 canales de modulación NRZ con frecuencia de 1550 nm, así como una separación de 100 Ghz, que transmitirá señales a ser receptadas por un multiplexor con el objetivo que sean consolidadas y transmitidas, ilustrándose en la figura 28 el transmisor DWDM.

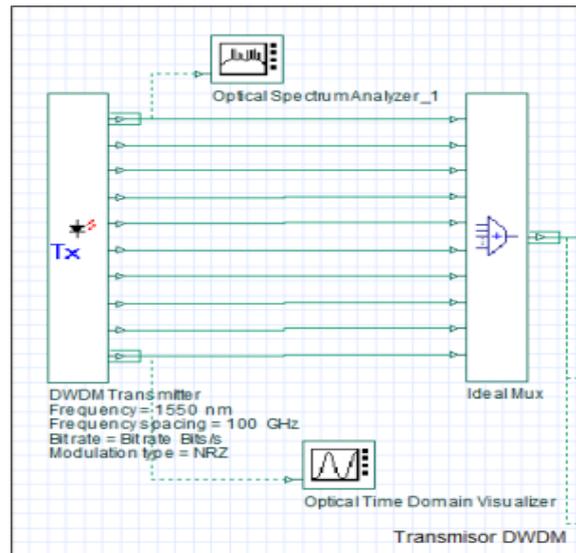


Figura 28 Transmisor DWDM

4.2.2. Propiedades del transmisor DWDM

Para establecer las propiedades del transmisor es necesario determinar el número de puertos, la frecuencia, el espacio de la frecuencia, el grosor de línea y el radio de extinción tal como lo muestra la figura 29, en el cual ya se establecen los 10 canales.

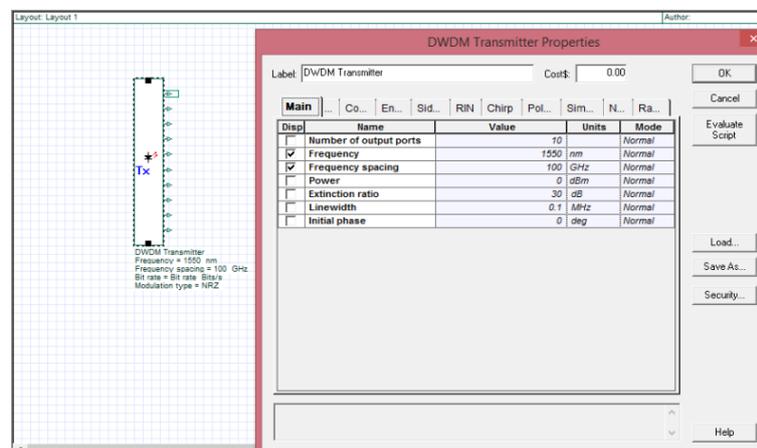


Figura 29 Propiedades del Transmisor DWDM

Posteriormente se colocará el multiplexor que permitirá consolidar las señales que sean emitidas por el transmisor. Una vez que se encuentren establecidos el transmisor y multiplexor se procede a establecer las conexiones entre los mismos, tal como lo muestra la figura 30.

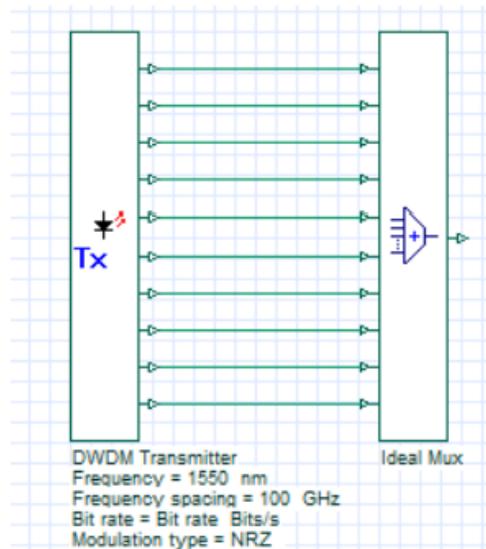


Figura 30 Conexiones entre el transmisor y multiplexor

4.2.3. Amplificador óptico

Una vez establecidas las conexiones se procede a colocar el amplificador óptico a la salida del multiplexor configurándolo con una ganancia de 5 db dada la distancia de la red, cabe señalar que dicha ganancia es variable en dependencia de la longitud de la red.

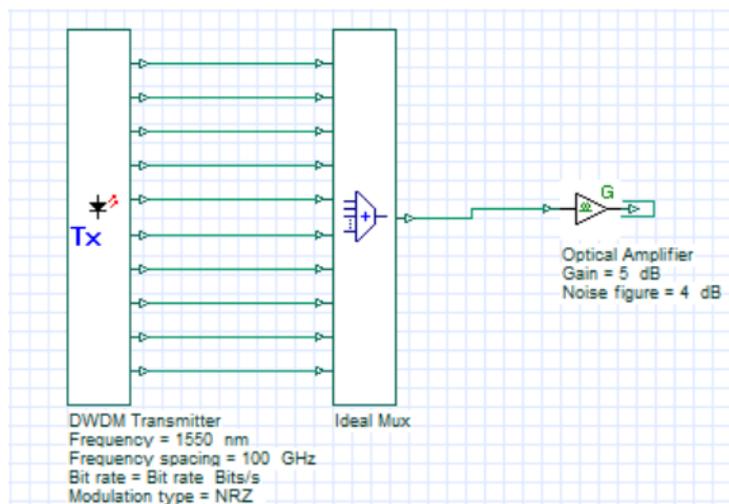


Figura 31 Medio de transmisión

4.2.4. Medio de transmisión

El medio de transmisión utilizado se enfoca en una fibra óptica multimodo de 10 Km de longitud a la que se integraron 2 amplificadores a la entrada y salida

con la finalidad de compensar las posibles pérdidas en la señal tal y como se ilustra en la figura 32.

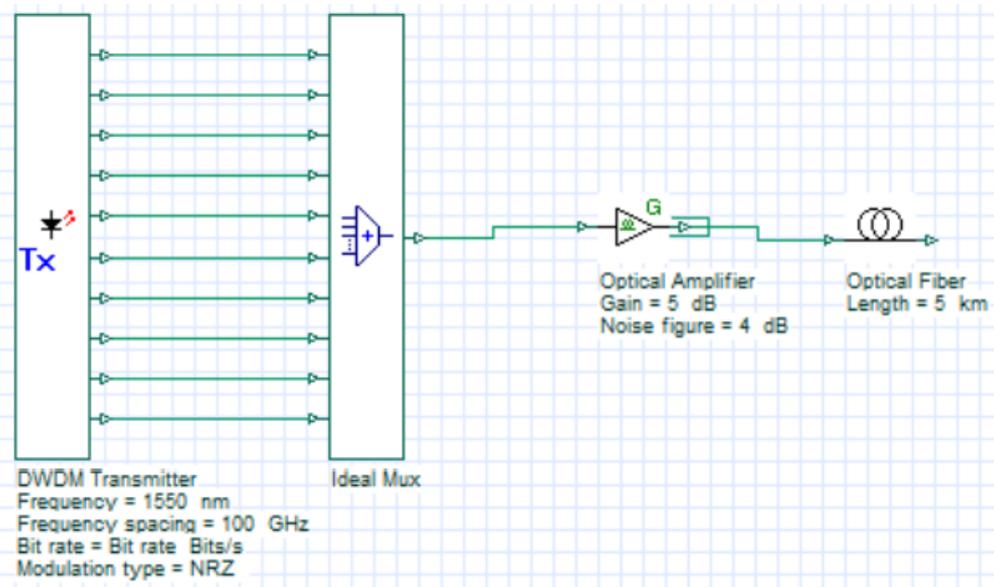


Figura 32 Medio de transmisión fibra multimodo.

Una vez establecido el primer amplificador óptico se coloca un segundo amplificador óptico del lado del receptor con una ganancia de 0,2 db/km de tal manera que se compensen las pérdidas por la distancia como lo indica la figura 33.

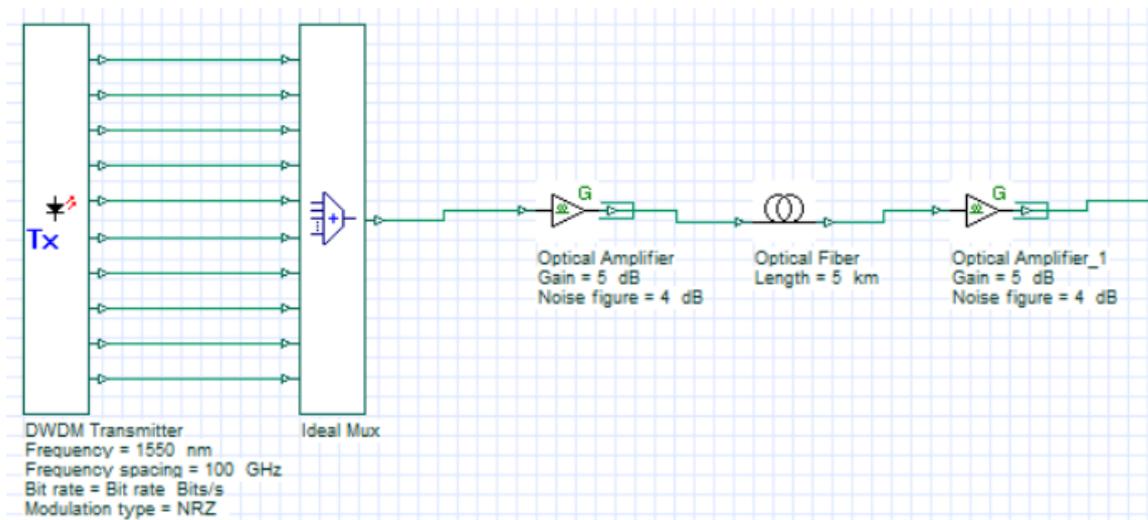


Figura 33 Amplificador óptico en el receptor

4.2.5. Demultiplexor DWDM

Una vez que la señal fue amplificada se procede a demultiplexa en el lado del receptor al colocar un *DEMUX DWDM* el mismo que es configurado con las mismas características que el transmisor, lo que se puede evidenciar en la figura 34.

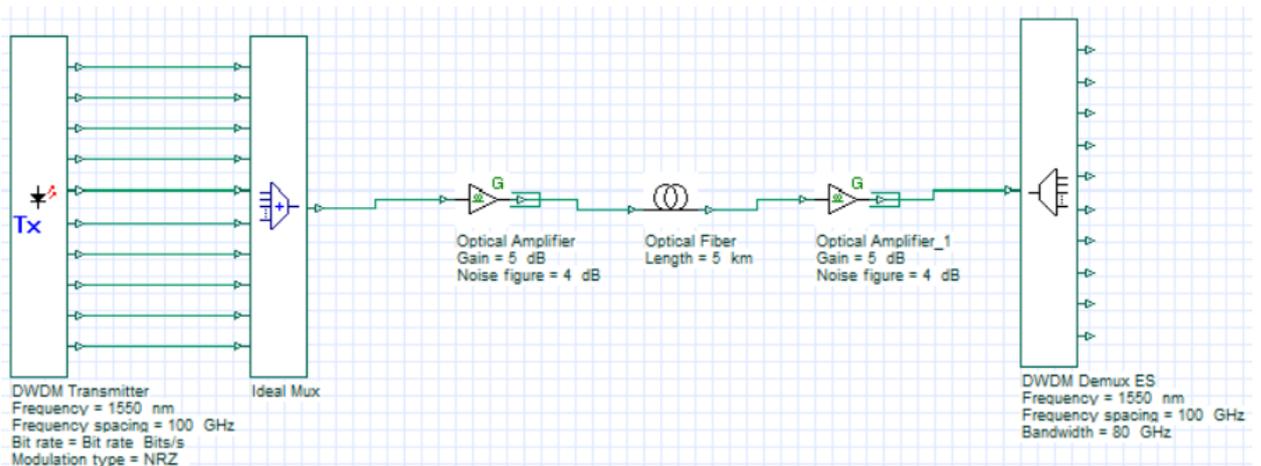


Figura 34 Demultiplexor

4.2.6. Receptor DWDM

El receptor se iniciará a partir del demultiplexor DWDM que posee 10 canales en concordancia con el transmisor utilizando la misma frecuencia y un ancho de banda de 70 GHz, en las pruebas se colocaron receptores ópticos en los canales 1,3,8 y 10 con sus respectivos analizadores de tasa de error de bit tal y como se plasma en la figura 35.

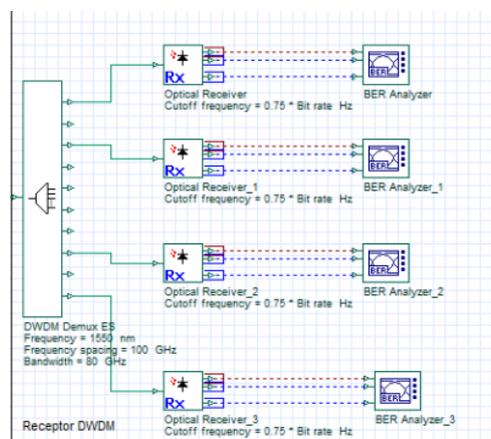


Figura 35 Receptor DWDM

4.2.7. Simulación Completa red óptica DWDM

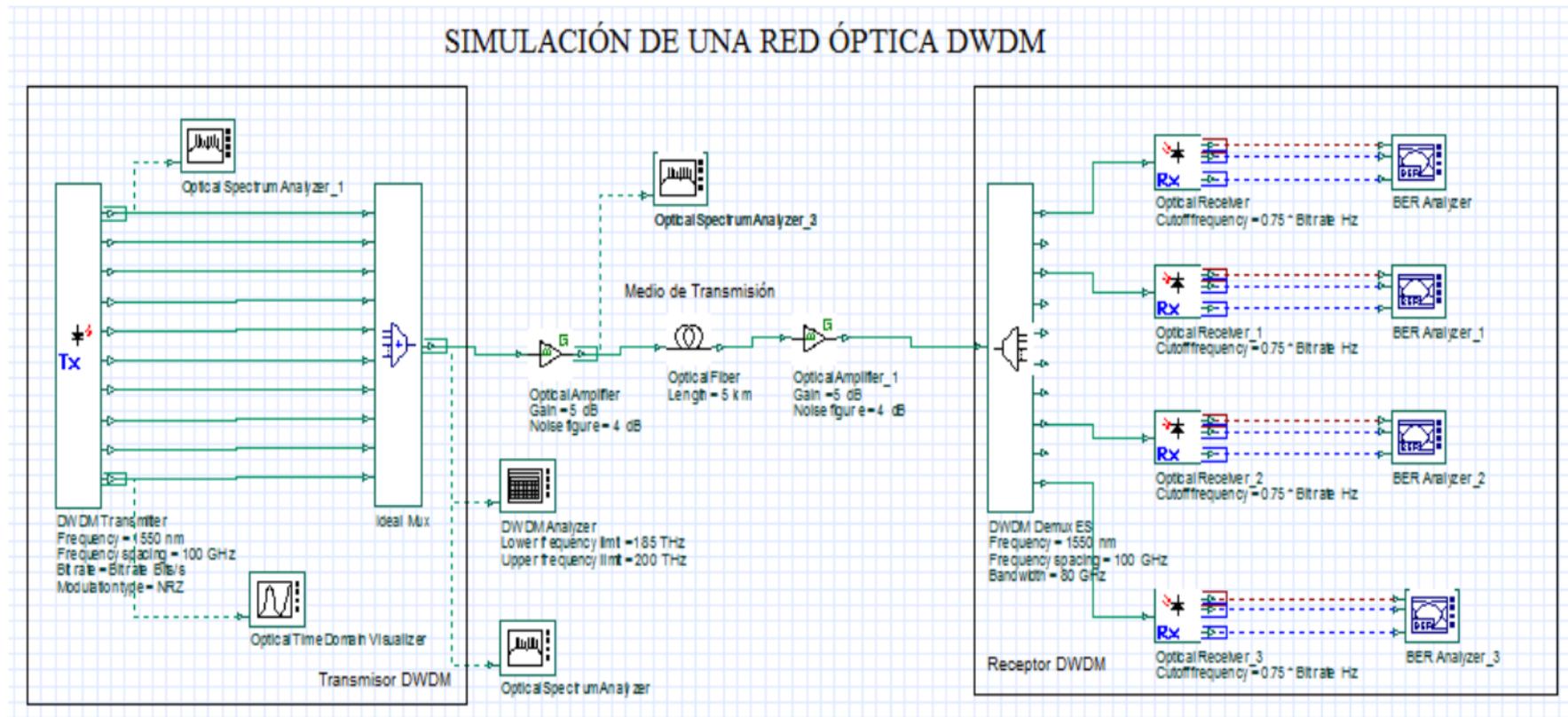


Figura 36 Diagrama de red DWDM

4.3. Análisis de cálculos de simulación DWDM.

4.3.1. Cálculo de la dispersión

Con la finalidad de calcular la dispersión se utiliza la fórmula expuesta a continuación:

$$\text{Límite de dispersión} = \frac{\text{Tolerancia de dispersión}}{\text{Coeficiente de dispersión}} (\text{Km})$$

Ecuación 1 Límite de dispersión.

Dónde:

Reemplazando los valores

Tolerancia a la dispersión = 12600 ps/nm

Coeficiente de dispersión = 14 ps/nm * Km

Obteniendo el siguiente resultado:

$$\text{Límite de dispersión} = \frac{12800 \left(\frac{\text{ps}}{\text{nm}}\right)}{14 \left(\frac{\text{ps}}{\text{nm} * \text{Km}}\right)}$$

$$\text{Límite de dispersión} = 900 \text{ km}$$

4.3.2. Cálculo del presupuesto de potencia para el cable de fibra óptica

Para proporcionar suficiente energía en las conexiones de fibra óptica y que brinde un funcionamiento adecuado, es necesario calcular el presupuesto de suministro de energía de la conexión, que es la cantidad máxima de energía que puede transmitir. Cuando se calcula el presupuesto de energía se utiliza el análisis del peor de los casos para garantizar el margen de error, incluso si todas las partes del sistema real no funcionan en el peor de los casos. Para calcular la peor potencia

(PB), suponga que la potencia mínima del transmisor (T) y la sensibilidad mínima del receptor (PR):

$$PB = PT - PR$$

Reemplazando la fórmula:

$$PB = -15dBm - 8(-28 dBm)$$

$$**PB = 13 dB**$$

Ecuación 2 Limite de dispersión

Una vez calculada la potencia de conexión es necesario calcular el margen de potencia (PM) que representa la cantidad de potencia disponible, después de restar la atenuación de la señal o la pérdida de la conexión de potencia (PB). El cálculo de PM en el peor de los escenarios supone un LL máximo:

$$PM = PB - LL$$

Si PM es mayor que cero significa que el presupuesto de potencia es suficiente para operar el receptor. Para la simulación con una conexión multimodal de 10 km con un ancho de banda (PB) de 18 dB, los valores estimados de longitud de onda se usan para calcular la pérdida de conexión (LL) como la suma de la atenuación de señal en fibra óptica (10 km a 1 dB/km o 2 dB) y la pérdida de cinco conectores (0.5 dB o 2.5 dB por conector) y dos uniones (0.5 dB o 1dB por conexión), así como una pérdida de modo orden superior (0.5dB), el margen de potencia (PM) se calcula de la siguiente manera:

$$PM = 18 dB - 10km (1 dB/km) - 5 (0,5 dB) - 2 (0,5 dB) - 0,5 dB$$

$$PM = 18 dB - 10 dB - 2,5 dB - 1 dB - 0,5 dB$$

$$PM = 4 dB$$

Ecuación 3 Margen de Potencia

4.3.3. Cálculo de la pérdida permisible máxima en la fibra

La atenuación es una medida de la pérdida de señal o potencia de luz que ocurre cuando los pulsos de luz se propagan a través de una fibra óptica multimodo o monomodo. Las medidas generalmente se indican en decibelios o dB/km. Se puede usar la potencia de 1550 nm para evitar la necesidad de repetidores. Para calcular la pérdida máxima es necesario considerar los parámetros establecidos por la recomendación ITU-T G.694.1. cómo se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1 Valores para longitud de onda de 1550 nm

	Atenuación/kilómetro (dB/km)	Atenuación/conector óptico (dB)	Atenuación/junta (dB)	
Min	0,17	0,2	0,01	Las mejores condiciones
Promedio	0,22	0,35	0,05	Normal
Max	0,4	0,7	0,01	El peor escenario

Fuente: Recomendación ITU-T G.694.1.

Estimación de la atenuación del enlace óptico

Con la finalidad de calcular la atenuación total (TA) de una sección se utiliza la siguiente fórmula:

$$TA = n * C + c + J + L * a + M$$

Dónde:

n: cantidad de conectores

C: atenuación de un conector óptico (dB)

c: cantidad de empalmes en sección de cable básica

J: atenuación de un empalme (dB)

M: margen del sistema (los cables de conexión, las curvas de los cables, los eventos de atenuación óptica impredecibles y las cosas por el estilo representan alrededor de 3 dB)

a: atenuación de cable óptico (dB/km)

L: longitud total del cable óptico

Reemplazando:

$$TA = 2 \times 0,7 \text{ dB} + 4 \times 0,1 \text{ dB} + 10 \text{ km} \times 0,4 \text{ dB/km} + 3 \text{ dB}$$

$$TA = 1,4 \text{ dB} + 0,4 \text{ dB} + 4 \text{ dB/km} + 3 \text{ dB}$$

$$TA = 8,8 \text{ dB}$$

Ecuación 4 Atenuación total

Resultados de la simulación

La simulación realizada para una red óptica con tecnología DWDM consiste en un multiplexor de 10 canales y un receptor enviando 10 señales diferentes, con la finalidad de medir el diseño propuesto se tomaron en cuenta los canales 1, 3, 8 y 10, en los cuales con el diagrama del ojo se pudo demostrar el correcto funcionamiento del sistema, como se muestra en la figura 37.

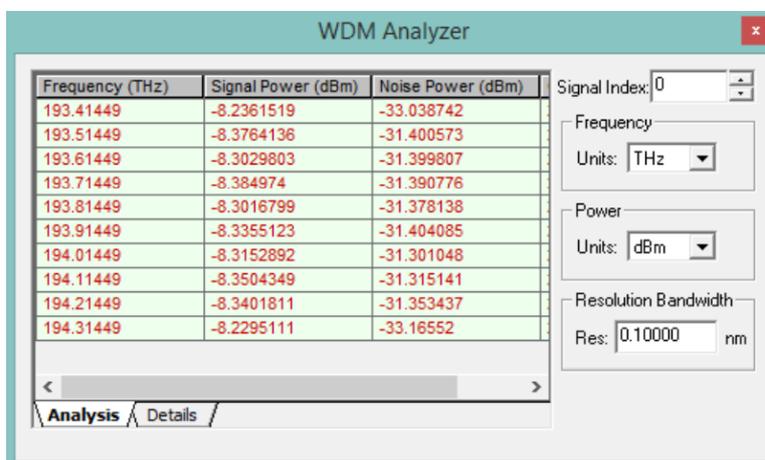


Figura 37 Señales generadas

El método que se utiliza en este proyecto es un diagrama de ojo que detecta los análisis de errores de bits ubicados en los receptores ópticos de los canales 1, 3, 8 y 10, donde es posible estimar varios parámetros, como el ruido. En la señal, en el tiempo de subida y en el jitter, estas características son necesarias para garantizar o perder una comunicación óptima en la red. En la figura 38 podemos notar que tiene una sobretensión superior al superar el máximo y sin riesgo a existir jitter por el cruce de amplitudes. En la figura 39 existe un periodo de bit normal lo cual se nota por el cruce de amplitudes normal, pero existirá un intervalo unitario alto. En la figura 40 se muestra una sobretensión superior y según el cruce de amplitudes existirá jitter periódico. En la figura 41 se observa que existe un corto intervalo de tiempo bajo sin problemas de jitter exuberantes. Los resultados obtenidos en el analizador de errores de bits se presentan en las siguientes figuras:

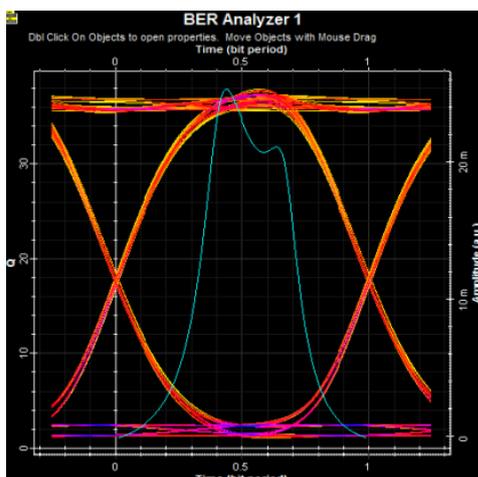


Figura 38 Diagrama de Ojo Canal 1

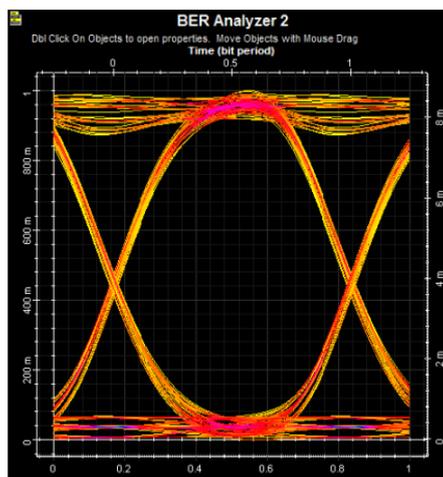


Figura 39 Diagrama de Ojo Canal 3

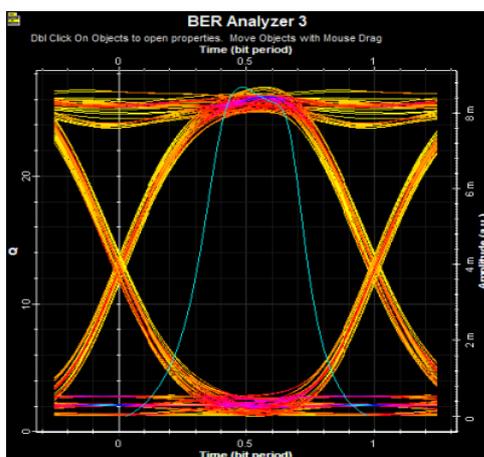


Figura 40 Diagrama de Ojo Canal 8

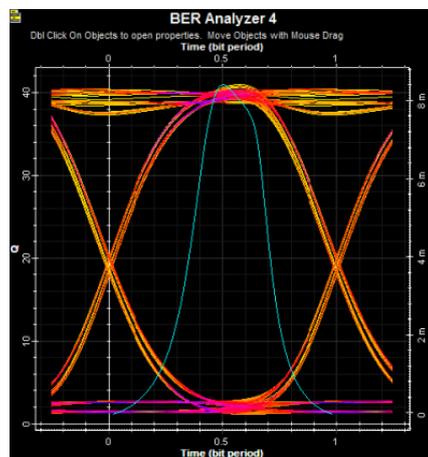


Figura 41 Diagrama de Ojo Canal 10

Se puede observar que los resultados obtenidos por el modelo de simulación propuesto son óptimos para una transmisión exitosa y con un bajo nivel de errores. El ruido y la fluctuación son un poco más altos en los analizadores de los canales 3 y 8, pero la transmisión de información óptima aún puede garantizarse.

5. CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA MIGRACIÓN DE LA TÉCNICA CWDM A DWDM

La migración de CWDM a DWDM depende de varios aspectos, entre los cuales se debe analizar el tipo de topología, conexiones, amplificadores, módulos ópticos, y distancias de longitudes de la red, que permitirá que sea posible la migración de CWDM a DWDM. Estos parámetros han sido determinados para poder tener un funcionamiento y capacidades óptimas en las comunicaciones ópticas.

5.1 Migración de Arquitecturas CWDM a DWDM

El límite en CWDM tiene capacidades de dieciséis longitudes de onda debido a que los servicios solo son posibles para dieciséis nodos en topologías de anillo como se explicó en el capítulo 2. Sin embargo, con la escalabilidad mediante la migración con tecnología DWDM. Es factible tener mayor capacidad incluso hasta más de sesenta y cuatro longitudes de onda y por ende brindan un servicio a para mejor calidad en el servicio a los usuarios y una mayor expansión en las tasas de bits de los canales que se tenía en CWDM.

Para poder lograr una migración de arquitecturas de CWDM a DWDM tenemos que analizar las formas de agregar componentes DWDM a una red simple CWDM, que se explicara en las figuras 42 y 43.

En La figura 42 se puede observar una topología normal CWDM, en la cual se indica la forma de multiplexar longitudes de onda CWDM en un canal de fibra óptica. Consta de tipos de redes como SONET, *routers* y almacenamiento de datos en

cada uno de los canales que van conectados a un multiplexor tipo CWDM, que demultiplexa la información directo al internet.

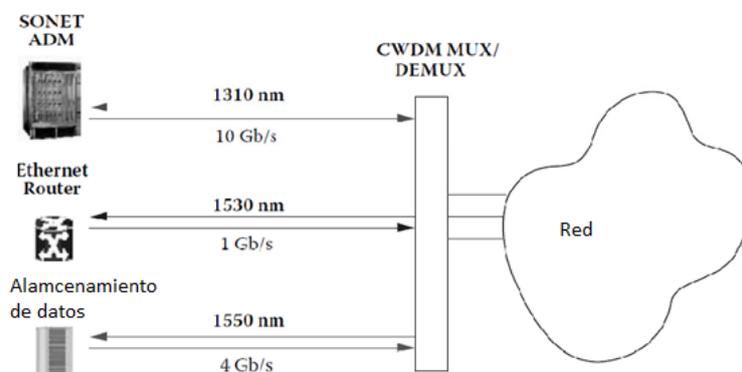


Figura 42 Multiplexor CWDM.

Fuente: (Kratzke, 2015, p. 165)

En la figura 43 se evidencia la incorporación de DWDM *MUX/DEMUX* a una arquitectura ya establecida CWDM, esto es posible al agregar nuevos canales al multiplexor CWDM que estarán conectados a un multiplexor CWDM. El resultado será más canales de conexión para más servidores o tipos de redes.

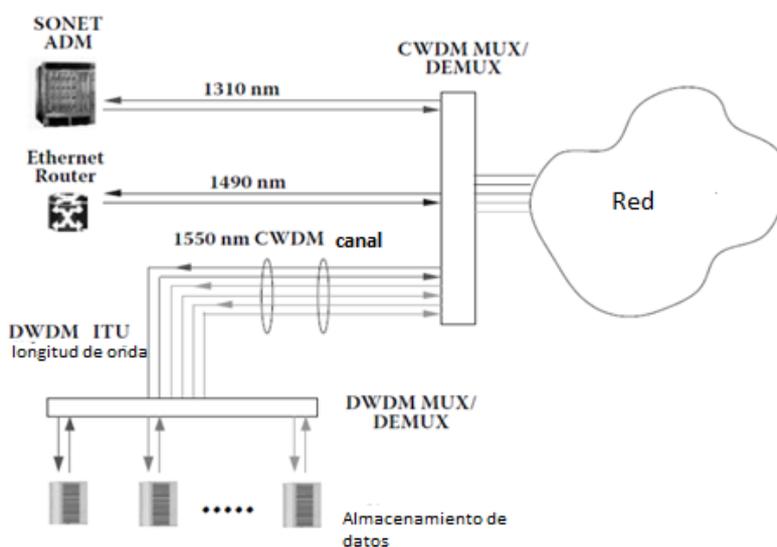


Figura 43 Migración a DWDM en una arquitectura CWDM ya establecida

Fuente: (Kratzke, 2015, p. 167)

Para poder realizar esta implementación los canales DWDM corresponden a espacios de 0.4 o 0.8 nm, mientras que en CWDM los canales deben estar

espaciadas a 20nm. Existe 20nm entre los canales de CWDM con lo que se tendrá capacidades de 12nm para el ancho de banda. Como consecuencia, es posible conectar en los canales CWDM ocho a diez longitudes DWDM. Si DWDM requiere mayor capacidad de ancho de banda en sus conexiones ya instaladas, se puede utilizar el canal de 1550 nm de un multiplexador DWDM conectado a un canal en CWDM.

Debido al espacio reducido y al uso espectral de todo el ancho de banda de los elementos del filtro, los canales DWDM necesitan de fuentes láser estabilizadas térmicamente para evadir el desvío de la longitud de onda, lo que conduce a la diafonía en el canal cuando cae la señal.

5.1.1 Migración de CWDM a DWDM en topología punto a punto

La figura 44 muestra una topología punto a punto que al enfrentar un OTM a otro OTM multiplexación/demultiplexación de longitudes de onda hacia una sola interfaz de agregado en los equipos CWDM, existe un regenerador, el cual debe ser sustituido por un amplificador de línea, dado que al migrar a DWDM se necesita una mayor potencia para que soporte mayor cantidad de canales.

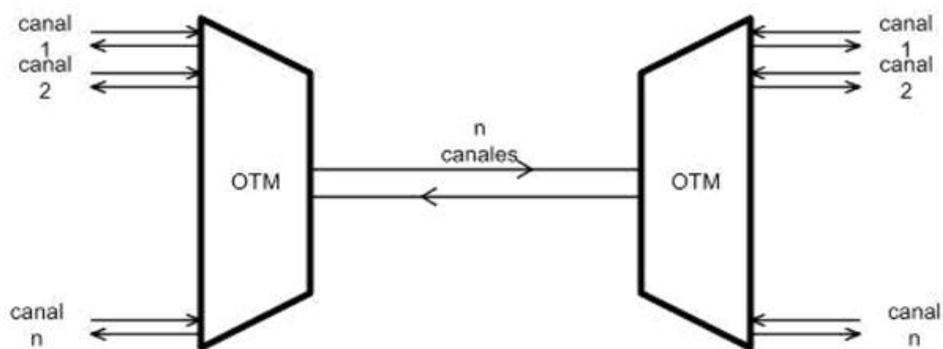


Figura 44 Migración topología punto a punto

Fuente: (Hunt & Thomas, 2015)

5.1.2 Migración de CWDM a DWDM en topologías anillos y estrella.

En este tipo de topologías se combinan las dos técnicas CWDM y DWDM bajo la misma estructura mecánica, de tal manera que se minimice el coste en cada segmento en la red que se requiera una menor capacidad de agregado. Esto es posible al unir dos topologías de tipo anillos. Cada uno de los multiplexores tiene una estación (CWDW) que envía información de forma de token, este token se asegura de recoger toda la información de cada una de las estaciones de servicios convergentes de una red WAN o LAN a la estación principal. En este caso la estación principal es el multiplexor que se añadirá (DWDM). La estación principal se encargará de la conexión con la otra topología y será capaz de codificar las dos tecnologías, pero en este caso de una topología de anillos DWDM. Al ser de tipo anillo bidireccional los datos se pueden enviar en dos direcciones con lo que se evitara que se pierdan paquetes. Esta topología nos servirá para migrar a componentes DWDM sin la necesidad de perder los componentes CWDM ya establecidos como se muestra en la figura 45.

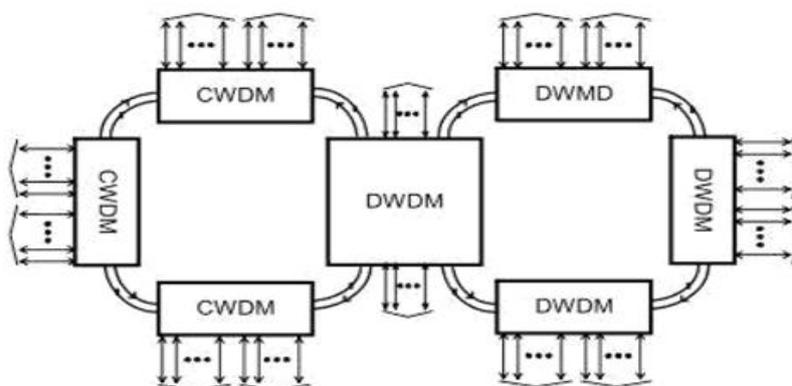


Figura 45 Anillos DWDM/CWDM combinados

Fuente: (Hunt & Thomas, 2015)

La figura 46 muestra la creación de una red compuesta por anillos bidireccional DWDM y una topología tipo estrella CWDM. En la topología tipo estrella las conexiones CWDM serán conectadas directamente al módulo DWDM. Estas conexiones existen cuando hay redes independientes (CWDM) y se quieren agregar a redes de gran tamaño como topologías de anillo en este caso (DWDM). Como resultado migraremos a una red DWDM sobre una red CWDM.

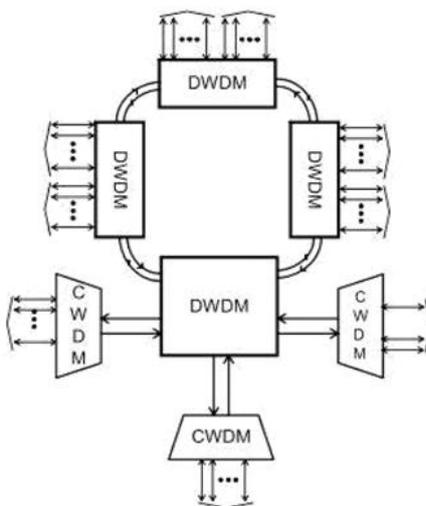


Figura 46 Anillos DWDM estrella CWDM

Fuente: (Hunt & Thomas, 2015)

5.2 Análisis de conexiones posibles en la migración de CWDM a DWDM.

Las conexiones en CWDM se realiza usualmente mediante transportadores, los cuales convierten la señal del lado del cliente al multiplexor, tal como se observa en la figura 47. Mientras que para migrar a DWDM es necesario utilizar uno de los canales a conectores que posean matrices de conexiones (E/O) que asigne el tráfico del cliente a una longitud de onda y viceversa. Cabe señalar que las conexiones pueden realizarse entre el tráfico del cliente y cualquier longitud de onda de los dos agregadores ópticos, tal como lo muestra la figura 48.

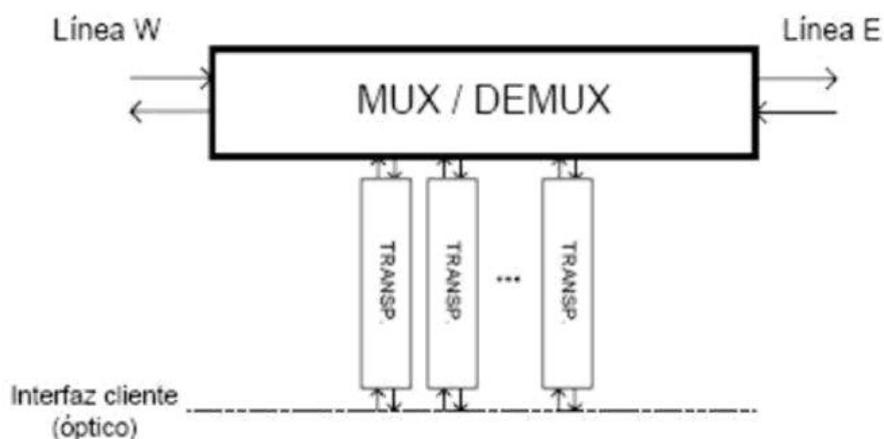


Figura 47 Arquitectura y esquema funcional de OAM en CWDM

Fuente: (Hunt & Thomas, 2015)

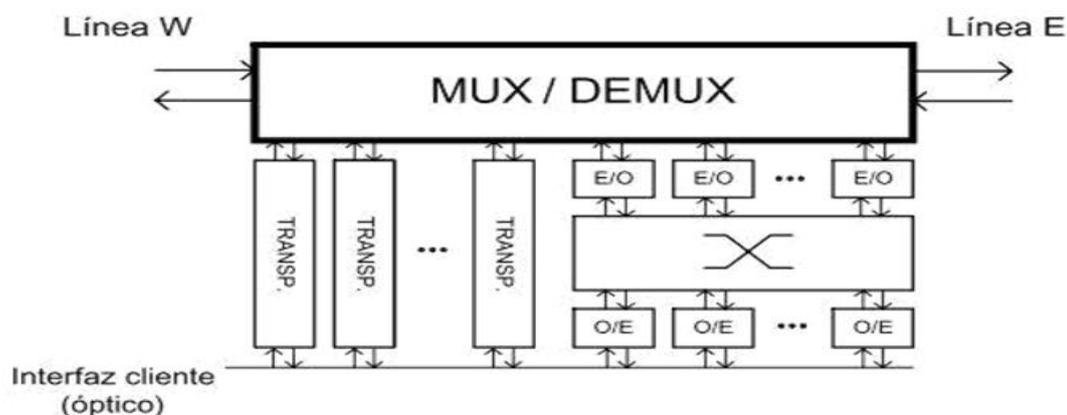


Figura 48 Arquitectura y esquema funcional de OAM en DWDM.

Fuente: (Hunt & Thomas, 2015)

La figura 49 indica que al implementar DWDM con una matriz de conexiones cruzadas que permite un esquema de protección 1+1 de tal forma que una matriz o transpondedor esté activa y el otro transpondedor se activara en caso de que exista algún fallo en la otra conexión. En una topología CWDM funcionará con regeneración de interfaces por transpondedor y en topología DWDM funcionará con regeneración por los (E/O). Debe indicarse que la regeneración incluirá amplificación, confirmación y resincronización de la señal, siendo aplicado para todas las unidades de servicio del equipo independientemente de la tasa binaria en el lado de la línea.

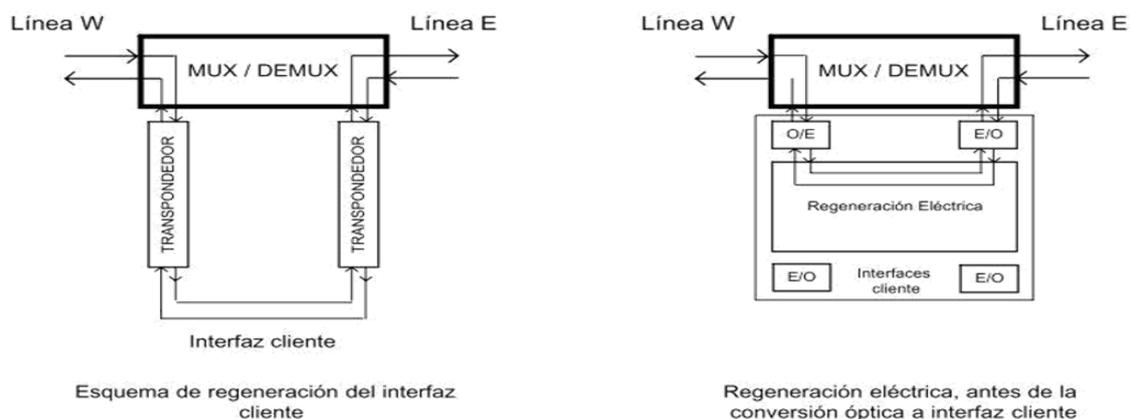


Figura 49 Esquemas de regeneración

Fuente: (Hunt & Thomas, 2015)

La figura 50 muestra que, al usar matrices de conexiones para conectar dos topologías de anillo entre el tráfico del cliente y diferentes agregados ópticos, que se encuentren en anillos DWDM o CWDM distintos. Aunque es necesario que se indique la capacidad de puertos que posee la matriz de conexiones, el ancho de banda de los puertos, así como el número de agregados ópticos de cada equipo.

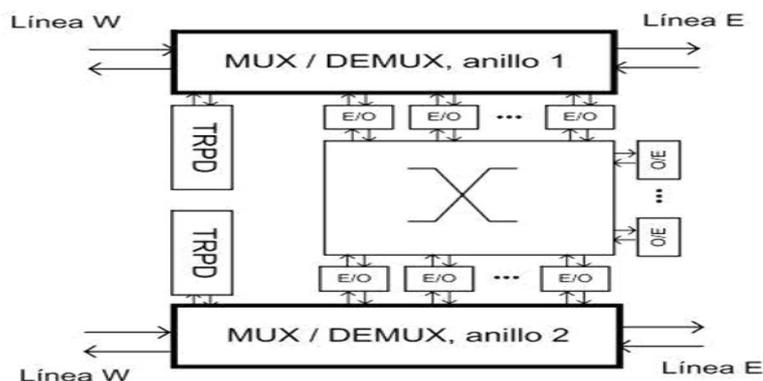


Figura 50 Arquitectura OAM con matriz de conexión cruzada

Fuente: (Hunt & Thomas, 2015)

5.3 Migración de las tasas binarias de CWDM a DWDM.

Las tasas binarias en los canales son muy bajas por lo que la dispersión cromática debe ser mayor para las distancias de transmisión. Las unidades de servicio transparentes de CWDM utilizan las siguientes tasas binarias del lado del usuario para su transmisión:

- 2Mb/s (E1)
- 10-300 Mb/s (16 puertos STM-1 por longitud de onda ESCON, *Fast Ethernet*)
- 622-1250 (ATM OC-3, STM-4, Gb, Ethernet)
- 1250 Mb/s – 2500 Mb/s (STM-16, TDM, 2x Gb Ethernet)

Para migrar a DWDM es necesario reemplazar las tasas binarias por:

- 10-300 Mb/s (STM-1 por longitud de onda ESCON, *Fast Ethernet*)
- 622-1250 (ATM OC-3, STM-4, Gb, Ethernet)
- 1250 Mb/s – 10 Gb/s (STM-16, STM-64, OC-192, 10 Gb)

Siendo necesario valorar la presencia de la unidad de servicio transparente a 40 Gb/s dado que se incrementan los canales y por ende se requiere una mayor capacidad.

5.4 Migración de Módulo óptico de CWDM a DWDM.

El módulo óptico CWDM típico admite velocidades de transporte de datos de hasta 2.5G, mientras que el módulo óptico DWDM admite velocidades de transporte de datos de gran capacidad de hasta 200G. Para que el costo no sea tan elevado se puede combinar las dos tecnologías a través de la implementación del equipo LGX CWDM/DWDM *Multiplexers*, el cual permite transportar desde 2M hasta 100G de servicios y datos.

El mapeo de canales DWDM dentro del espectro de longitud de onda CWDM como se ilustra en la figura 51 logra una capacidad de transporte de datos mucho mayor en el mismo cable de fibra óptica sin la necesidad de cambiar la infraestructura de fibra existente entre los sitios de red. La separación longitudes de onda en CWDM son grandes mientras que en DWDM los espacio entre longitudes de onda son más pequeños como se habló en el capítulo 2.

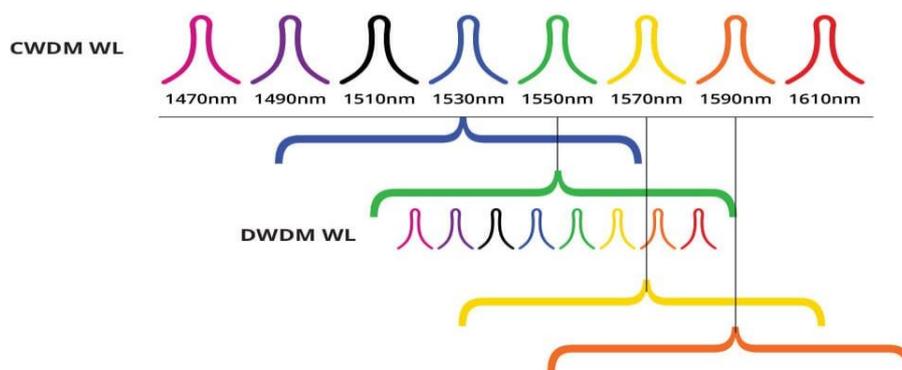


Figura 51 Mapeo de canales DWDM dentro del espectro de longitud de onda CWDM

Fuente: (Farcic, 2016)

Como se ve en la Figura 52, se muestra usa una única longitud de onda entrante y saliente en una infraestructura CWDM existente para 8 canales DWDM multiplexando en la longitud de onda CWDM original. La expansión se logra sin

interrumpir los servicios o datos de la red, y sin la necesidad de cambiar o reemplazar ninguna de las infraestructuras de CWDM en funcionamiento dado que la misma puede soportar un incremento en la multiplexación. Que será multiplexada, amplificada con *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) y enviando por cada uno de los canales con su respectivo transceptor (SFP) a los servicios necesarios.

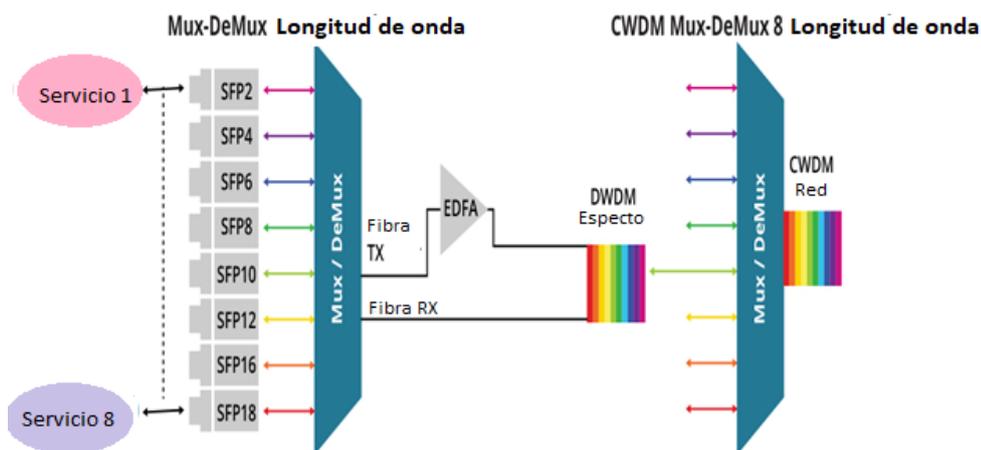


Figura 52 Capacidades de expansión a través del espectro DWDM

Fuente: (Farcic, 2016)

5.5 Amplificación de señal de CWDM a DWDM

Una forma de implementación de DWDM puede ser como se muestra en la figura 53, la cual explica que, para amplificar este tipo de señal, debe usar el amplificador MUL-EDFA-V-X-Y-WDM – High Power 1550nm EDFA para separar diferentes longitudes de onda y luego convertir las señales ópticas en señales eléctricas para amplificar varios canales esto sucede entre la comunicación de transmisor a multiplexor y demultiplexor.

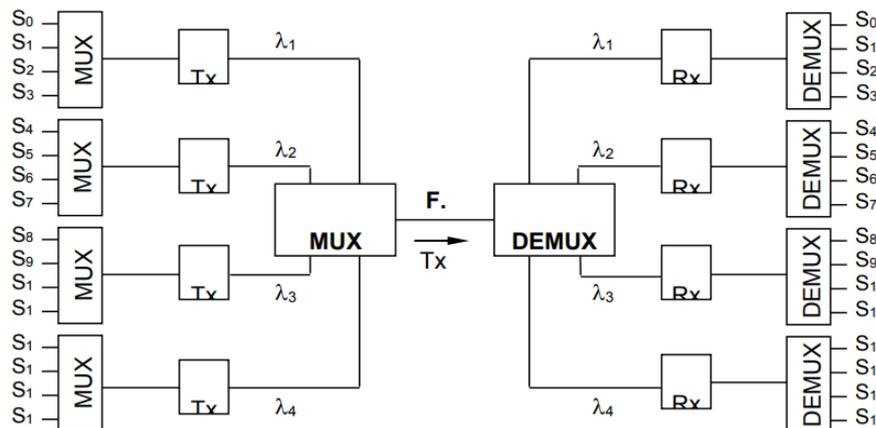


Figura 53 Topología aplicada a la transmisión unidireccional de 16 señales eléctricas distintas

Fuente: (Hunt & Thomas, 2015)

La propiedad de amplificación se obtiene al dopar una pieza de fibra con Erblio, lo que resulta en la formación de un dispositivo activo llamado EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*). Por lo tanto, estos tipos de fibras activas eliminan el uso de regeneradores y hacen que la red DWDM sea económicamente viable. Los EDFA tienen un ancho de banda de alrededor de 30 nm (1530-1560 nm).

La necesidad de colocar tantos canales como sea posible (longitudes de onda) en la misma fibra óptica usando EDFA puede conducir a un alto nivel de interferencia entre los canales. Los amplificadores de fibra óptica de banda doble (Dual-Band Fiber Optical DBFA) tienen dos sub-bandas, la primera es EDFA y la segunda es el amplificador de fibra óptica mejorado (EBFA).

Los DBFA tienen ganancia uniforme, bajo nivel de ruido y baja saturación en toda la banda, lo que los convierte en componentes importantes para implementar sistemas DWDM.

5.6 Migración de interfaces ópticas de CWDM a DWDM.

En la figura 54 se muestra que la técnica CWDM utiliza dos fibras, siendo necesaria una en cada sentido de la transmisión con una rejilla de 8 lambda por fibra, mientras que DWDM utiliza una rejilla de 32 lambda por fibra como mínimo.

Cabe señalar que los equipos existentes en el mercado actualmente son plenamente escalables por lo que no se deberá cambiar de equipo, con el escalamiento a DWDM se puede extraer por separado cada 4 grupos lambda bilaterales, función que se realizaría mediante un filtro paso banda que separa el grupo de longitudes de onda en el agregado en línea, mientras que el multiplexor/demultiplexor ofrecerá a la salida las interfaces ópticas con las 4 longitudes de onda separadas.

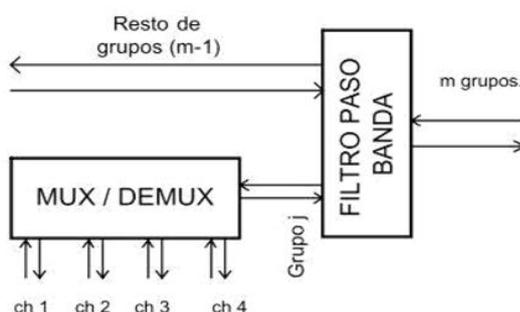


Figura 54 Migración de interfaces óptica

Fuente: (Hunt & Thomas, 2015)

5.7 Análisis de la migración de interfaces de CWDM a DWDM.

Interfaz Q: Con la finalidad de comunicarse con los sistemas de gestión de red todos los equipos se comercializan actualmente en el mercado están dotados con interfaces Q que cumplen la recomendación ITU-TI G. 773, así como el correspondiente de comunicación, aunque debe destacarse que al migrar de CWDM a DWDM se eliminaría la protección de DCN a través de una IP externa ya que DWDM permite realizarla directamente.

Entradas y salidas de alarmas externas: En CWDM es opcional que los equipos dispongan de entradas y salidas para la conexión de contactos de relé libres de potencial procedentes de señales externas, mientras que el DWDM es imperativo que los mismos existan. Las necesidades existentes en los cuartos de comunicaciones son como mínimo de 6 entradas todo/nada y 2 salidas de relé todo/nada, pudiéndose catalogar a cada alarma como urgen o no urgente.

5.8 Migración de láser de CWDM A DWDM

Los tipos comunes de láseres semiconductores son: láseres monolíticos *Fabry-Perot* y láseres de retroalimentación distribuida (DFB). El segundo tipo es adecuado para aplicaciones DWDM que emiten luz casi monocromática, que es capaz de operar a altas velocidades, tiene una relación señal/ruido favorable y tiene una excelente linealidad.

Los sistemas CWDM utilizan un tipo de láser que no utiliza refrigeración, por lo que son menos precisos. Para una correcta implementación del DWDM, se requiere una gama de diodos láser controlables y precisos para lo cual se pueden usar el láser *Fabry-Perot* o el láser DFB.

La fuente láser NY13D Series - 1310nm *Microwave DFB Laser Module* debe usarse sobre líneas largas para minimizar la distorsión de pulso causada por la dispersión cromática en la fibra óptica y para mantener la estabilidad del sistema. Los requisitos del láser incluyen la longitud de onda precisa, ancho espectral estrecho, potencia suficiente de tiempo en una señal con la frecuencia.

5.9 Diferencias de equipos CWDM Y DWDM

CWDM es más pequeño y con un menor consumo de energía que los componentes de DWDM dando como resultado un multiplexor CWDM más pequeño, un consumo de energía más bajo, equipos térmicos reducidos para enfriar transmisores y fuentes de alimentación. Estas diferencias se ilustran en la siguiente figura utilizando equipos que representan 16 longitudes de onda de DWDM y CWDM.

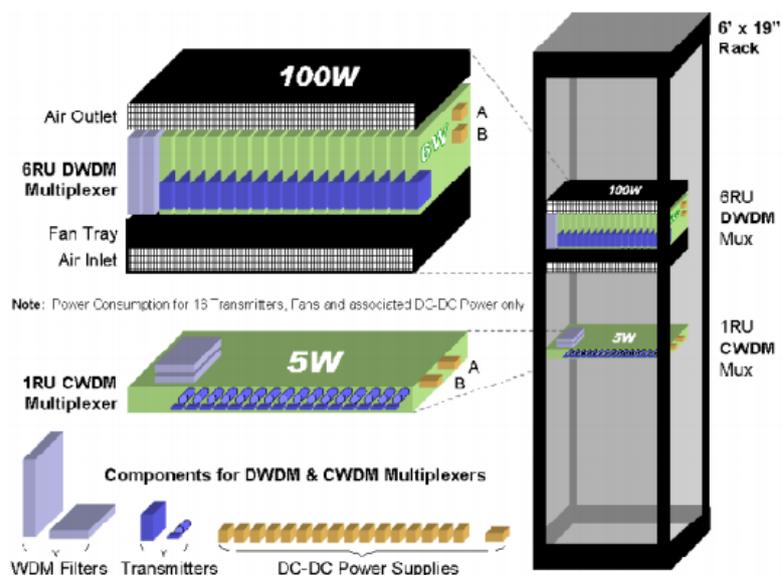


Figura 55 Comparativo CWDM y DWDM

Fuente: (Tomsu & Schmutzer, 2016)

Las arquitecturas del multiplexor ilustradas en la figura se basan solo en las diferencias más importantes entre las tecnologías DWDM y CWDM a 200 GHz, que son filtros de película fina y transmisores de modulación directa de un láser DFB. Como muestra la figura 55, la combinación de fibras y calor que impulsa los productos DWDM en un chasis grande con diversas tarjetas verticales. Por el contrario, la baja disipación de calor de las tecnologías CWDM permite el uso de un chasis discreto con pocos tipos de módulos o incluso con una placa base.

El espacio adicional requerido para los productos DWDM resulta en costos adicionales significativos, especialmente en situaciones en las que otro proveedor alquila el espacio. También se requiere espacio adicional para fuentes de alimentación de corriente alterna (CA) y corriente continua (CC) más grandes y/o baterías de respaldo, que son una consideración importante cuando se utilizan equipos de telecomunicaciones. Además de la fuente de alimentación, también se debe aumentar, así como el equipo de aire acondicionado utilizado por DWDM. Debido a todas estas consideraciones, el costo del ciclo de vida de una solución DWDM es más alto que una solución CWDM en comparación con los componentes básicos.

Para analizar el uso de energía en CWDM y DWDM es importante tener en cuenta el rendimiento y las especificaciones en cada una de las tecnologías. Es importante notar que en tecnologías DWDM el gasto energético será significativamente más alto. Esto en consecuencia que, al tener más capacidad de transmisión, longitudes de onda y láseres en su transmisión se necesitara más refrigeración en sus equipos al tener un consumo aproximado de 3 a 5 W de energía en cada longitud de onda. Para CWDM al tener capacidades de canales y de transmisiones menores el gasto energético será más bajo de hasta máximo 1 W y no necesitará tanta refrigeración para poder funcionar. Es importante señalar que al trabajar CWDM con las mismas longitudes de onda de transmisión que DWDM generara de igual forma menos costo esto debido a los equipos de bajo consumo, la limitante seria únicamente en el aspecto de capacidades de trasmisión. Como se pudo apreciar en la figura 55 el uso máximo que se usará en un equipo CWDM será de 5W mientras que para DWDM será de 80 a 100W, esto debido a que existe el equipo DWDM y el aire acondicionado debido a su alto funcionamiento (Cadena, 2005).

5.10 Comparación económica entre CWDM y DWDM

Los sistemas CWDM pueden realizar actividades similares que los sistemas de longitud de onda densa DWDM, con un costo inicial más bajo. A pesar de la transferencia de datos más débil a través del sistema CWDM, quedan opciones válidas para la transmisión de datos a través de fibra. Los sistemas CWDM transmiten menos datos, pero los cables utilizados para administrarlos son menos costosos y complejos. El sistema de cable DWDM es mucho más denso y puede transportar muchos más datos, pero puede ser demasiado costoso, especialmente cuando se requieren muchos cables en la aplicación.

CWDM no puede viajar largas distancias debido a las longitudes de onda no se amplifican, y por lo tanto CWDM está limitada en su funcionalidad en distancias más largas. Típicamente, CWDM puede viajar en cualquier lugar hasta cerca de 100 millas (160 km), mientras que un sistema de longitud de onda densa amplificado puede ir mucho más lejos que la intensidad de la señal se refuerza periódicamente a lo largo de la carrera. Como resultado del coste adicional

requerido para proporcionar la amplificación de la señal, la solución CWDM es mejor para tiradas cortas que no tienen datos de misión crítica.

Si bien el costo por sí solo podría favorecer a CWDM, otro beneficio del uso de DWDM es que la banda del canal ocupa una parte del espectro que puede amplificarse, donde CWDM no puede. Los proveedores deben decidir si el costo adicional de DWDM y los láseres se compensa con el beneficio de una ventaja de capacidad del 150 por ciento y la capacidad de amplificación.

Al evidenciar una diferencia de los costos no sorprende que aproximadamente el 60 por ciento de los operadores elijan CWDM, mientras que el 40 por ciento opta por DWDM. En la figura 56 se observa la variación de precios de CWDM y DWDM.

Precios		
Equipo	Precio CWDM	Precio DWDM
Rack	\$ 600,00 	\$ 900,00 
Mux/Demux	\$ 58,00 	\$ 62,00 
Fibra óptica	\$ 4,00 	\$ 8,00 
Amplificador óptico	\$ 150,00 	\$ 209,99 
TOTAL	\$ 812,00	\$ 1.179,99

Figura 56 Comparativo precios CWDM y DWDM

5.10.1 Comparación de hardware CWDM y DWDM

Se analizará los costos operativos y de hardware de las tecnologías CWDM y DWDM. Aunque los láseres DWDM son más caros que los láseres CWDM, los láseres de retroalimentación distribuida enfriada (DFB) ofrecen soluciones completas para el transporte de largas distancias y grandes anillos urbanos que requieren mayores capacidades.

En las dos tecnologías, se deben estimar costos que se amortizaran por gran demanda de usuarios que utilizaran estos sistemas. Hay que tener en cuenta que las redes de acceso solicitan sistemas de bajo costo y bajo ancho de banda para cumplir con las condiciones del mercado que se basan en gran medida en la disposición del cliente a pagar por los servicios de banda ancha.

La diferencia de costo entre MUX / DMUX DWDM y CWDM, basada en la tecnología de película fina, también ayuda a reducir los costos generales a favor de CWDM. Los filtros CWDM con 20 nm de separación entre canales son inherentemente más baratos de producir debido a la menor cantidad de hasta 20 capas en su infraestructura. Mientras que DWDM proporcionan 150 capas para diseñar un filtro de cien GHz. Por otro lado, los filtros CWDM cuestan alrededor de un 50% menos que los filtros DWDM. Para tener una idea más clara de las especificaciones de hardware, se detalla a continuación equipos esenciales de CWDM y DWDM, esto nos ayudara a tener a poder de la diferenciar características entre las dos tecnologías como se muestra en la en la figura 57.

Arquitectura			
	Características	CWDM	DWDM
Rack	Tipo	Multiplexor de fibra óptica	Caja de distribución de fibra óptica
	Dispositivos de cableado	Fibra óptica DDF	Fibra óptica ODF
	Certificación	CE, ISO, RoHS	CE, ISO, RoHS
	Modelo	LW-18CWDM-MD	LW-40CH DWDM
	Canal	18 canales	48 Canales
	Longitud de onda de funcionamiento		Itu 100GHz Grid
	Especificación	483x250x44mm	120x75x12mm
Mux/Demux	Tipo	Multiplexor de fibra óptica	Fibra Optica
	Dispositivos de cableado	CWDM óptico	DWDM óptico
	Certificación	CE, RoHS	CE, ISO, RoHS
	Modelo	4+1CH ABS Box Mux/Demux Fiber Optic CWDM	4+1CH Mux/Demux Optic DWDM
	Canal	4 canales	4 Canales
	Longitud de onda de funciona	1270/1610 at Random;1271-1611 at Random	1270/1610 at Random;1271-1611 at Random
	Especificación	100x80x10mm	100x80x10mm
Fibra óptica	Tipo	Fibra monomodo	Divisor y acoplador de fibra óptica
	Dispositivos de cableado	CWDM óptico	DWDM óptico
	Certificación	CE, ISO, RoHS	CE, ISO, RoHS, GS
	Modelo	LC-LC Sm Duplex 9/125 Optical Fibre Patch cord	1550nm/1310nm Fiber Optic DWDM
	Longitud de onda de funciona	1270/1610 at Random	1271-1611 at Random
	Especificación	0.5m/1m/1.5m	0.5m/1m/1.5m
Amplificador óptico	Tipo	Multiplexor de fibra óptica	Fibra Optica
	Dispositivos de cableado	ODF	Fibra óptica ODF
	Certificación	CE, RoHS	CE, ISO, RoHS, GS
	Modelo	LC/PC ABS CWDM	TK-ABS-DWDM
	Canal	4 canales	18 Canales
	Longitud de onda de funciona	ITU-T ±6.5	ITU 100 GHz Grid
	Especificación	100x80x10mm	100x80x10mm

Figura 57 Comparativo arquitecturas CWDM y DWDM

5.10.2 Estudio Económico de tecnologías CWDM y DWDM

Es importante realizar un estudio económico para determinar el costo total de inversión de CWDM y DWDM. Cuando este proyecto comienza a obtener ganancias y las inversiones comienzan a recuperarse, los inversores deben asegurarse la rentabilidad del proyecto y tener los parámetros necesarios para la toma de decisiones.

Para realizar dicho análisis económico se calculará gastos referenciales de WAAC o Costo promedio ponderado de capital, el mismo que se expresa de forma porcentual siendo su fórmula la siguiente:

$$WACC = \%E * K_o + \%D * I * (1 - T)$$

Dónde:

$\%E$ = porción de capital propio

$\%D$ = porción de deuda

$$\%E + \%D = 100\%$$

K_o = Costo del patrimonio de accionistas:

$$K_o = r_f + B * m + C$$

Dónde

- r_f = tasa libre de riesgo = 8%
- β = 1,15 (infraestructura en CWDM).
- m = En TI 7.0%
- C = tasa riesgo país 8,12%
- I = Interés 8.71%
- T = Escudos fiscales 35%.

Mediante la fórmula se obtienen los siguientes resultados:

$$(CWDM)K_o = 8\% + 1,15 * 7.0\% + 8,12\%$$

$$K_o = 24,17\%$$

Ecuación 5 Costo Patrimonio CWDM

- Para la infraestructura DWDM cambiamos el valor Beta a un valor referencial del 2.60, el valor es más alto por tema de refrigeración y energía en los equipos. Como resultado cambiara el valor KO.

$$(DWDM) K_o = 8\% + 1,80 * 7.0\% + 8,12\%$$

$$K_o = 24,82\%$$

Ecuación 6 Costo Patrimonio DWDM

- Reemplazando del valor de Ko y sabiendo el costo de inversión en Ecuador para un proyecto de telecomunicaciones se debe contar con capital del 30% (%E) en negocios y del 70% (%D) en deuda con menor riesgo en inversión, se procede a realizar el siguiente cálculo:

$$(CWDM)WACC = 30\% * 24,17\% + \%70 * 8,71\% * (1 - 35\%)$$

$$WACC = 11,2140\%$$

$$(DWDM)WACC = 30\% * 24.82\% + \%70 * 8,71\% * (1 - 35\%)$$

$$WACC = 11,8554\%$$

Ecuación 7 Calculo de WACC.

- Lo que demuestra (WACC) está dentro de los rangos de menos 20% lo que nos determina que a pesar de ser una inversión considerable se proyecta una recuperación a mediano plazo en los dos sistemas, sin embargo, DWDM se necesitara más inversión por el tema de costos más elevados en temas de rendimiento y hardware.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Al analizar el impacto de dos de las técnicas más conocidas y efectivas que existen en la actualidad como son CWDM y DWDM en donde se debe analizar cada uno de los factores que influyen para migrar de CWDM a DWDM y entender los cambios para la implementación deseada.

Se estudio las características de CWDM y DWDM. Mediante esto, se pudo observar la evolución de cada una de estas técnicas en el paso del tiempo para llegar a conclusiones básicas de los multiplexores. Los módulos DWDM aumentan aún más el ancho de banda y la capacidad del sistema al usar longitudes de onda estrechamente espaciadas para transportar múltiples señales en el mismo cable.

Se analizó el impacto de la migración de CWDM a DWDM en donde se identificó que es necesario tener diferentes tipos de componentes en la infraestructura de cada tecnología como lo son: DWDM que utiliza estandarizaciones de frecuencias, para abordar cada canal transmitido a través de fibra, estas frecuencias son mucho más densas y están más estrechamente espaciadas que CWDM. CWDM usa lambdas para referirse a sus guías de transmisión, además de que las distancias que pueden recorrer no son tan extensas.

CWDM admite hasta 18 canales de longitud de onda transmitidos a través de una fibra al mismo tiempo. Para lograr esto, las diferentes longitudes de onda de cada canal están separadas por 20 nm. DWDM admite hasta 80 canales de longitud de onda simultáneos, con cada uno de los canales a solo 0.8 nm de distancia. La tecnología CWDM ofrece una solución conveniente y rentable para distancias más cortas de hasta 70 kilómetros. Para distancias entre 40 y 70 kilómetros, CWDM tiende a limitarse a soportar ocho canales. A diferencia de CWDM, las conexiones DWDM pueden amplificarse y, por lo tanto, pueden usarse para transmitir datos a distancias mucho más largas.

La velocidad máxima en CWDM es hasta 10 Gigabit Ethernet y 16G *Fibre Channel*. y es poco probable que las capacidades aumenten más allá de esto en el futuro. Sin embargo, DWDM es capaz de manejar protocolos de mayor velocidad de hasta 100 Gbps por canal, lo que lo convierte en una tecnología más adecuada para protocolos de mayor velocidad.

En redes de gran dimensión (MAN) es recomendable utilizar redes de topología tipo anillo, ya que son de gran capacidad y tiene una gran facilidad para poder migrar ambos sistemas CWDM y DWDM.

El sistema DWDM puede alcanzar distancias de miles de kilómetros con la combinación del amplificador de fibra dopada con erbio y los amplificadores en fibras monomodo. Las distancias de CWDM son de hasta decenas de kilómetros sin el uso de amplificadores ópticos que pueden ser adecuados para los operadores de telecomunicaciones que prefieren comenzar con infraestructuras pequeñas y expandirse conforme a medida que aumenta la demanda, con lo que se contara con un buen nivel de escalabilidad.

Actualmente la mayoría de las empresas locales utilizan CWDM en sus redes de trabajo por su eficiencia y costos bajos, ya que al migrar a un sistema DWDM es muy costoso de implementar, pero nos ayudara con respuestas más rápidas en las comunicaciones de nuestras redes al tener una multiplexación con más alcance y con más canales de comunicación del transmisor al receptor.

Para poder migrar a una topología con componentes DWDM, no es necesario reemplazar una infraestructura ya establecida, esto es posible con las topologías tipo anillo y tipo estrella habladas en el capítulo 4, en donde se detalla que a partir de una red CWDM se puede migrar a una red DWDM a través del nodo principal reemplazando por multiplexores que puedan entender los dos tipos de comunicaciones.

Al momento de migrar de CWDM a DWDM es importante tener en cuenta que los equipos DWDM necesitaran más refrigeración en sus instalaciones, esto en

consecuencia que al tener más capacidad de canales ópticos y procesamiento en sus longitudes de onda.

Los sistemas de multiplexación DWDM están diseñados para tiempos de transmisión más largos, ofreciendo un embalaje perfecto para longitudes de onda. Pueden transmitir más datos a través de un cable mucho más largo con menos interferencia que un sistema CWDM comparable.

Al analizar la simulación en DWDM realizada en el capítulo 3 se observó que, al tener valores negativos de potencia recibida en los receptores, no es un impedimento para que exista una buena comunicación, mientras que los valores obtenidos en las potencias estén dentro o no sean menores de los rangos de sensibilidad del receptor.

Al realizar el análisis de migración de topologías en una red establecida CWDM se puede utilizar sus canales para poder conectarlo a un multiplexor DWDM a un multiplexor CWDM con lo cual aumentarían los canales y velocidades de transmisión.

En el tema velocidades de transmisión se deduce que en redes CWDM se puede llegar a velocidades promedias de 2.5 GB, mientras que migrando a una red DWDM puede llegar a velocidades de 200 hasta 400 GB.

Para la migración de conexiones de CWDM a DWDM a través de una interfaz óptica a nivel de cliente con un multiplexor óptico, es necesario reemplazar los transpondedores de CWDM a conexiones (E/O) para DWDM.

6.2. Recomendaciones

Para redes de gran dimensión es recomendable usar la topología de anillo para realizar una migración de CWDM a DWDM ya que aumentaría el alcance de conexiones y velocidades y adicional se podrán juntar varias redes tipo (MAN) a través de una estación principal.

Se recomienda tener el control en los equipos de las redes a través de herramientas como PRTG para un monitoreo ideal de los enlaces de una infraestructura, con lo cual solucionaremos con exactitud problemas que se puedan presentar.

Se recomienda no cambiar la infraestructura del tipo de fibra al momento de migrar de CWDM a DWDM, esto ya a que se puede reutilizar la misma fibra, ya que DWDM con el espacio de solo una longitud de onda de CWDM puede establecer hasta 8 longitudes de onda.

El monitoreo de la longitud de onda es necesario en las redes urbanas porque el ancho de banda puede cambiar repentinamente al ser dinámico. Las funciones de estos programas incluyen la capacidad de reasignar individualmente las longitudes de onda, la administración de energía y sus configuraciones remotas, así como el descubrimiento de la topología de nivel óptico, que proporciona aislamiento de fallas para ciertas secciones de la red.

Es necesario simular una red de datos par a poder estudiar resultados y analizar las ventajas y desventajas de hacer algún cambio en la infraestructura. Se recomienda usar simuladores como Optisystem, Matlab entre otro.

Referencias

- Babar, M., Brown, A., & Mistrík, I. (2013). *Agile Software Architecture: Aligning Agile Processes and Software Architectures*. Oxford: Newnes.
- Blatt, F. (2018). *Fundamentos de Física*. México D.F.: Editorial Prentice Hall.
- Borčín, T. (2017). *Service activity monitoring for SilverWare*. Brno: Masaryk University.
- Cadena, R. (Abril de 2005). *Bibdigital*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5063/1/T2373.pdf>
- Carneiro, C., & Schmelmer, T. (2016). *Microservices From Day One*. New York: Apress Berkeley.
- Carneiro, C., & Schmelmer, T. (2016). *Microservices From Day One*. New York: Apress Berkeley.
- Catañón, G. (2015). *Preferred WDM packet switches router architecture and method for generating the same*. Monterrey: Tecnológico de Monterrey.
- Cerón, M. T. (09 de 01 de 2018). *Teoría de las telecomunicaciones*. Obtenido de Wordpress: <https://teoriadelastelecomunicaciones.files.wordpress.com/2011/11/multiplexacion.pdf>
- Clearfield. (2017). *Multiplexación por división de ondas*. Recuperado el 01 de 2020, de Seeclearfield: <https://www.seeclearfield.com/es/products/category/optical-components/wdms.html?locale=es>
- Daya, S., Van Duy, N., Eati, K., Ferreira, C., Glozic, D., Gucer, V., & Vennam, R. (2015). *Microservices from Theory to Practice IBM Corporation*. New York: Redbooks.
- De la O, Y. (03 de 12 de 2016). *Telecomunicaciones*. Recuperado el 01 de 2020, de yuricodelaotelecomunicaciones: <http://yuricodelaotelecomunicaciones.blogspot.com/2012/03/2-multiplexacion-por-division-en-tiempo.html>
- Dutta, A., Dutta, N., & Fujiwara, M. (2013). *WDM Technology*. New York: Academic Press.
- Evans, E. (2013). *Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software*. Massachusetts: Addison-Wesley Educational Publishers Inc Reading.
- Farcic, V. (2016). *The DevOps 2.0 Toolkit*. packtpub. New York: Packt offers eBook.

- Farcic, V. (2016). *The DevOps 2.0 Toolkit*. packtpub. New York: Packt offers eBook.
- Fowler, M., & Lewis, J. (2014). *Microservices*. Helsinki: Viittattu.
- Gamma, E. (2012). *Patrones de diseño*. Salamanca: Grupo Anaya Publicaciones Generales.
- Grébol, R. P. (2018). *Análisis de espectro óptico en las comunicaciones por fibra óptica*. Obtenido de www.promax.es:
https://www.promax.es/downloads/products/esp/historiaFO_e.pdf
- Hunt, A., & Thomas, D. (2015). *The Pragmatic Programmer: From Journeyman to Master*. Massachusetts: Addison Wesley Reading.
- Kartalopoulos, S. V. (2016). *leeexplore*. Recuperado el 01 de 2020, de leeexplore digital library: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5311679>
- Khatri, F. (2015). *Novel architectures for long haul DWDM systems*. (IEEE, Ed.). Copper Mountain, CO, USA. Recuperado el 2020
- Kratzke, N. ((2015). *About microservices, containers and their underestimated impact on network performance*. *Proceedings of Cloud Computing*. Ubeck: Ubeck University.
- Kratzke, N. (2015). *About microservices, containers and their underestimated impact on network performance*. *Proceedings of Cloud Computing*. Ubeck: Ubeck University.
- Newman, S. (2015). *Building Microservices*. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc.
- Nielsen, D. (2015). *Investigate availability and maintainability within a microservice architecture*. *Master's thesis*. Aarhus: Aarhus University.
- Ortiz, Adriana Et al. (S.f). *Multiplexación*. Recuperado el 01 de 2020, de Networkingsignora: <http://networkingsignora.pbworks.com/f/Articulo-multiplexacion.pdf>
- Raj, P., & Singh, V. (2015). *Learning Docker: Optimize the power of Docker to run your applications quickly and easily*. . Mumbai: Birmingham Mumbai: Packt Publishing.
- Richards, M. (2015). *Software Architecture Patterns*. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc.
- Sánchez, J. (2019). *El físico loco*. Obtenido de Blogspot:
<http://elfisicoloco.blogspot.com/2012/11/espectros-atomicos-emision-y-absorcion.html>
- Sexton, M., & Reid, A. (2015). *Broadband Networking: ATM, SDH, and SONET*. London: Artech House Publishers.
- SilexFiber. (S.F). *SilexFiber*. Obtenido de
<https://silexfiber.com/producto/multiplexor-optico-cwdm-sm-ventanas->

