



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

REDES ROADM COMO FUTURO DE LAS REDES DWDM EN GUATEMALA

Manolo Estuardo Chajon Mayén

Asesorado por la Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota

Guatemala, marzo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

REDES ROADM COMO FUTURO DE LAS REDES DWDM EN GUATEMALA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MANOLO ESTUARDO CHAJON MAYÉN

ASESORADO POR LA INGA. INGRID RODRÍGUEZ DE LOUKOTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, MARZO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino Gonzalez
EXAMINADOR	Ing. Helmut Federico Chicol Cabrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

REDES ROADM COMO FUTURO DE LAS REDES DWDM EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 4 de noviembre de 2013.



Manolo Estuardo Chajon Mayén

Guatemala 21 de octubre de 2014

Ingeniero
Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.


Estimado Ingeniero Guzmán.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **Redes ROADM como futuro de las redes DWDM en Guatemala**, del señor **Manolo Estuardo Chajon Mayén**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesora, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,


Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota
Colegiada 5,356
Asesora

Ingrid Rodríguez de Loukota
Ingeniera en Electrónica
colegiado 5356



Ref. EIME 53.2014
Guatemala, 28 de OCTUBRE 2014.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
REDES ROADM COMO FUTURO DE LAS REDES DWDM EN
GUATEMALA, del estudiante Manolo Estuardo Chajón Mayén,
que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. **Carlos Eduardo Guzmán Salazar**
Coordinador Área Electrónica



STO

Por este medio extendiendo constancia a la Oficina de Lingüística que se ha realizado satisfactoriamente la revisión y corrección de estilo de la tesis titulada: **Redes ROADM como futuro de las redes DWDM en Guatemala** del estudiante: **Manolo Estuardo Chajon Mayén** de carné: **2008-18948**, carrera: **Ingeniería Electrónica**.

Para los requerimientos que la Oficina de Lingüística necesite. Adjunto copia de certificación de colegiado activo.

Observaciones:

Atentamente,

Nombre del Corrector de Estilo Externo: **Ivonne Elizabeth Román Cutzán**

Número de colegiado activo: **12,707**



Firma


Ivonne Elizabeth Román Cutzán
Licda. En Ciencias de la Comunicación
Colegiado No. 12707

Sello



REF. EIME 53. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; MANOLO ESTUARDO CHAJÓN MAYÉN titulado: REDES ROADM COMO FUTURO DE LAS REDES DWDM EN GUATEMALA, procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 12 DE NOVIEMBRE 2,014.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **REDES ROADM COMO FUTURO DE LA REDES DWDM EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Manolo Estuardo Chajon Mayén** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, marzo de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la guía y el centro de mi vida. Sin Él nada de esto fuera posible.
- Mis padres** Manuel Chajon y Ana Rebeca Mayén, por su ejemplo y apoyo incondicional en todo momento.
- Mi familia** Por ser apoyo en todo momento de mi vida. A mis hermanos en especial por motivarme a lograrlo.
- Mis amigos** Por toda la ayuda, esfuerzo y momentos compartidos a lo largo de toda la carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de
San Carlos de Guatemala**

Por darme la oportunidad de formarme
como profesional en sus aulas.

Facultad de Ingeniería

Por todas las enseñanzas impartidas.

Catedráticos de la Facultad

Por su esfuerzo, tiempo y dedicación en
transmitirnos los conocimientos
necesarios para poder culminar los
estudios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
Hipótesis	XXVI
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. TELECOMUNICACIONES ÓPTICAS	1
1.1. Transmisión sobre fibra óptica.....	1
1.1.1. Fibra óptica.....	1
1.1.2. Tipos de fibra óptica	5
1.1.2.1. Monomodo.....	5
1.1.2.2. Multimodo	7
1.1.3. Dispersión.....	11
1.1.3.1. Dispersión modal	13
1.1.3.2. Dispersión cromática	14
1.1.4. Componentes del sistema	15
1.1.5. Sistemas de transmisión.....	19
1.1.5.1. Estructura de un enlace digital.....	20
1.1.5.2. Categorías de un enlace digital	24
1.2. Red jerárquica	32
1.2.1. Redes de larga distancia o capa núcleo	34
1.2.2. Redes de área metropolitana o capa de distribución.....	35
1.2.3. Redes de acceso o capa de acceso	36

1.3.	Tecnologías para aumentar la capacidad	38
1.3.1.	Multiplexación por división de tiempo	38
1.3.2.	Multiplexación por división de longitud de onda	41
1.3.3.	Evolución de la red.....	43
2.	MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA.....	45
2.1.	WDM	45
2.1.1.	Conceptos generales	45
2.1.1.1.	Multiplexación y demultiplexación	47
2.1.1.2.	Transmisión y amplificación	50
2.1.1.3.	Interconexiones	52
2.1.2.	Variedades de WDM	56
2.1.2.1.	CWDM.....	56
2.1.2.2.	DWDM.....	59
2.2.	DWMD Multiplexación por división de longitudes de ondas densas.....	60
2.2.1.	Definición del sistema	60
2.2.2.	Espectro de luz sobre la fibra óptica	63
2.2.3.	Componentes del sistema	65
2.2.3.1.	Fuentes y detectores de luz	66
2.2.3.2.	Multiplexores y demultiplexores	68
2.2.3.3.	Amplificadores ópticos	70
2.3.	OADM	73
3.	SISTEMAS ROADM	77
3.1.	ROADM en las redes de nueva generación	77
3.1.1.	Primera generación	79
3.1.2.	Segunda generación	82
3.1.3.	Tercera generación	85

3.2.	Conmutador selectivo de longitudes de onda	87
3.3.	Arquitecturas	91
3.3.1.	Filtro de canal y filtro de banda.....	91
3.3.2.	Bloqueador de onda	94
3.3.3.	PLC ROADM	95
3.3.4.	Demultiplexor WSS.....	96
3.3.5.	Multiplexor y demultiplexor WSS	97
3.3.6.	Demultiplexor WSS multigrado	98
3.3.7.	Multiplexor WSS multigrado.....	99
3.3.8.	Multiplexor y demultiplexor WSS multigrado.....	100
3.4.	Aplicaciones de conmutación	101
4.	DISEÑO DE UN SISTEMA ROADM	105
4.1.	Topología de un sistema ROADM	105
4.2.	Explicación del sistema	110
4.3.	Configuración y parámetros necesarios	115
4.4.	Explicación de los resultados obtenidos	119
	CONCLUSIONES	121
	RECOMENDACIONES.....	123
	BIBLIOGRAFÍA.....	125

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura de la fibra óptica.....	2
2.	Tipos de fibra óptica.	4
3.	Fibra óptica monomodo.....	6
4.	Fibra óptica multimodo.	8
5.	Fibra multimodo índice escalonado.....	9
6.	Dispersión en los distintos tipos de fibra óptica.	12
7.	Dispersión intermodal o modal en la fibra óptica.....	13
8.	Efectos de la dispersión cromática.....	14
9.	Sistema de transmisión por fibra óptica.....	15
10.	Luz emitida por láser viajando a través de fibra óptica.....	16
11.	Acoplamiento fibra óptica y fotodiodo.....	17
12.	Estructura de un sistema de transmisión coherente.....	23
13.	Categorías de líneas digitales sobre fibra óptica.....	25
14.	Enlaces con amplificación óptica.....	27
15.	Red jerárquica.	33
16.	Distribución de equipos en redes jerárquicas.....	37
17.	Transmisión mediante TDM.	39
18.	Multiplexación por división de longitud de onda.	42
19.	Rango de frecuencias <i>versus</i> atenuación en fibra óptica.	46
20.	Multiplexación, demultiplexación.	47
21.	Demultiplexación por medio de prisma.....	48
22.	Demultiplexación por medio de difracción.....	49
23.	Rangos de frecuencia amplificadores dopados con erbio.	51

24.	Topología de interconexión por enrutador pasivo.	53
25.	Topología de interconexión por conmutador de división de espacio.	54
26.	Topología de interconexión por medio de conmutador activo.	55
27.	Sistema de comunicación con CWDM.	58
28.	Distribución de canales ópticos en CWDM.	59
29.	Canales ópticos en DWDM y CWDM.	61
30.	Distribución del espectro electromagnético en comunicaciones ópticas. ..	64
31.	Componentes de un sistema DWDM.	65
32.	Multiplexación y demultiplexación en DWDM.	68
33.	Sistema utilizando EDFA.	71
34.	Topología de amplificación en un sistema DWDM.	73
35.	Diagrama de bloques de un OADM.	74
36.	Configuración general de un ROADM.	78
37.	ROADM basado en PLC.	80
38.	Arquitectura detallada de un dispositivo de bloqueo ROADM.	82
39.	Dispositivo de bloqueo ROADM alternativo con conmutador m-z.	84
40.	Estructura de un dispositivo WSS en ROADM.	86
41.	Funcionamiento de ROADM con WSS.	91
42.	Tipos de ROADM a base de filtros.	92
43.	Arquitectura de filtro de canal ajustable.	92
44.	Arquitectura de filtro de banda ajustable.	93
45.	Arquitectura de bloqueador de onda.	94
46.	Arquitectura de PLC ROADM.	95
47.	Diagrama de bloques de PLC ROADM.	96
48.	Arquitectura con demultiplexor WSS.	97
49.	Multiplexor y demultiplexor WSS.	98
50.	Arquitectura con demultiplexor WSS multigrado.	99
51.	Arquitectura con multiplexor WSS multigrado.	100
52.	Arquitectura con multiplexor y demultiplexor WSS multigrado.	101

53.	Tipos de topología en redes de telecomunicaciones.....	105
54.	Anillo ROADM con nodos de 2 grados.	106
55.	Anillo troncal ROADM con nodos de distintos grados.	107
56.	Topología de malla ROADM.....	108
57.	Topología aludiendo un cubo.	109
58.	Topología aludiendo a un rombo o diamante.	110
59.	Solución capa 3 sobre ROADM.....	112
60.	Solución capa 3 sobre ROADM, conmutación de trayecto.....	114
61.	Topología ROADM de tres anillos.	118

TABLAS

I.	Ventajas y desventajas de la fibra óptica.	3
II.	Dimensiones fibra monomodo.....	6
III.	Características de fibra multimodo índice escalonado.	9
IV.	Características de fibra óptica multimodo índice gradual.	11

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
dB	Decibelio
TFF	Filtro de película delgada
Hz	Hertz
Km	Kilómetro
KV	Kilovoltio
MHz	MegaHertz
um	Micrómetro
nm	Nanómetro
s	Segundo
dB/Km	Tasa de atenuación decibelios sobre 1 kilómetro
Gbit/s	Tasa de transferencia Gigabit sobre 1 segundo

GLOSARIO

Access-list	Forma de determinar los permisos de acceso apropiados a un determinado objeto, dependiendo de ciertos aspectos del proceso que hace el pedido.
Ancho de banda	Longitud, medida en Hz, del rango de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la potencia de una señal.
Anchura espectral	Longitud de onda de intervalo en el que la magnitud de todos los componentes espectrales es igual o mayor que una fracción especificada de la magnitud del componente que tiene el valor máximo.
Ángulo de reflexión	Ángulo formado por una trayectoria que se aleja de un medio con el que ha chocado y la normal a la superficie de ese medio en el punto de encuentro.
Atenuación	Pérdida de potencia sufrida por una señal al transitar por algún medio de transmisión.
Broadcast	Es una forma de transmisión de información donde un emisor envía información a una multitud de receptores de manera simultánea.

CATV	Televisión por cable (del inglés, Community Antenna Television).
Codificar	Enuncia mensajes mediante un código determinado de palabras, letras, números o signos.
Conexión en cascada	Conexión en la cual la salida de una etapa del circuito se conecta a la entrada de la segunda etapa del mismo.
CWDM	Multiplexación por división de longitudes de ondas ligeras (del inglés Coarse Wavelength Division Multiplexing).
Decodificar	Descifrar un mensaje que viene en un código determinado.
Demodulación	Conjunto de técnicas utilizadas para recuperar la información sobre una onda portadora.
Densidad	Magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia.
Diodo de avalancha	Dispositivo semiconductor diseñado especialmente para trabajar en tensión inversa.
Dispersión	Fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material.

Dispersión de Rayleigh	Dispersión de la luz visible o cualquier otra radiación electromagnética por partículas cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de onda de los fotones dispersados.
Dispositivos pasivos	Dispositivos o aparatos que no producen amplificación y sirven para controlar la electricidad colaborando al mejor funcionamiento de los elementos activos (los cuales son llamados generalmente semiconductores).
DWDM	Multiplexación por división de longitudes de onda densas (del inglés Dense Wavelength Division Multiplexing).
Eficiencia cuántica	Medida precisa de la sensibilidad del dispositivo.
Escalabilidad	Capacidad del sistema informático de cambiar su tamaño o configuración para adaptarse a las circunstancias cambiantes.
Ethernet 802.3	Estándar implementado por la IEEE, el cual es un método de comunicación física en las redes de área local.
FiberChannel	Tecnología para transmitir datos entre computadoras a una tasa de transferencia mayor a los 4 Gbit/s.

Fibra monomodo	Tipo de fibra óptica, que debido a su construcción, solo permite que se propague un modo de luz.
Fibra multimodo	Tipo de fibra óptica en la que los haces de luz pueden circular por más de un modo o camino.
Fibra óptica	Medio de transmisión físico formado de un hilo muy fino de material transparente, utilizado para transportar pulsos de luz que representan los datos a transmitir.
Fluctuación	Diferencia entre el valor instantáneo de una cantidad y su valor normal.
Frecuencia	Magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.
GBase	A base de 10 Gigabit.
Gradiente	Intensidad de aumento o disminución de una magnitud variable y curva que lo representa.
Haz de luz	Línea imaginaria que representa la dirección por la que la luz se propaga.
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (del inglés Institute of Electrical and Electronics Engineer).

Índice de refracción	Medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo.
Interferencia intersímbolo	Distorsión de señal recibida, se manifiesta mediante ensanchamientos temporales y consecuente solapamiento de pulsos individuales hasta el punto de que el receptor no puede distinguir correctamente entre cambios de estado.
Interferencias electromagnéticas	Perturbación que ocurre en cualquier componente, circuito o sistema electrónico causada por una fuente de radiación electromagnética externa al mismo.
ITU-T	Unión internacional de telecomunicaciones (del inglés International Telecommunication Union).
Láser	Dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente tanto espacial como temporalmente.
LED	Diodo emisor de la luz (del inglés Light Emission Diode).
Ley de Snell	Ecuación utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación de la luz (o cualquier onda electromagnética) con índice de refracción distinto.

Linealidad	Sucesión ordenada o constante de algo que avanza o se desarrolla.
Longitud de onda	Distancia real que recorre una onda en un determinado intervalo de tiempo.
Luz coherente	Radiación de ancho de banda muy estrecho.
Modelo OSI	Modelo de red descriptivo, que fue creado por la Organización Internacional para la Estandarización.
Modulación	Conjunto de técnicas que se usan para transportar información sobre una onda portadora.
Multicast	Forma de transmitir información a un selecto grupo de repetidores.
Multiplexor	Circuitos combinacionales con varias entradas y una única salida de datos, están dotados de entradas de control capaces de seleccionar una, y solo una, de las entradas de datos para permitir su transmisión desde la entrada seleccionada hacia dicha salida.
OADM	Multiplexor óptico de inserción y extracción (del inglés Optical Add Drop Multiplexer).
Optoelectrónica	Rama de la electrónica que trata con la luz.

OXC	Conexión óptica cruzada (del inglés Optical Cross-Connect).
Par de cobre	Dos alambres de cobre aislados trenzados para anular interferencias externas, utilizados para transmitir pulsos eléctricos.
PLC	Circuito de ondas de luz planas (del inglés Planar Lighthouse Circuit).
Polarización electromagnética	Propiedad de las ondas que pueden oscilar con más de una orientación.
PON	Red óptica pasiva (del inglés Passive Optical Network).
Protocolo	Conjunto de reglas y estándares que controlan la secuencia de mensajes que ocurren durante una comunicación.
Pulsos de luz	Representación digital de una señal transmitida por fibra óptica.
Redes de datos	Infraestructura que se ha diseñado específicamente a la transmisión de información mediante el cambio de datos.
Refracción	Cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un material a otro.

Repetidor	Dispositivo electrónico que recibe una señal débil o de bajo nivel y la retransmite a una potencia o nivel más alto, de tal modo que se puedan cubrir distancias más largas sin degradación o con una degradación tolerable.
Retroalimentación	Mecanismo por el cual una cierta proporción de la salida de un sistema se redirige a la entrada, con el objetivo de controlar su comportamiento.
ROADM	Multiplexor óptico reconfigurable de inserción y extracción (del inglés Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer).
Ruteo intervlan	Proceso para reenviar el tráfico de la red desde una vlan a otra mediante un router.
Semiconductor	Elemento que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo, el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación o la temperatura del ambiente en el que se encuentre.
Señal análoga	Señal generada por algún tipo de fenómeno electromagnético y que es representable por una función matemática continua en la que es variable su amplitud y período (representado por un dato de información) en función del tiempo.

Señal portadora	Onda eléctrica modificada en alguno de sus parámetros por la señal de información (sonido, imagen o datos) y la cual se transporta por un canal de comunicaciones.
Señales parásitas	Perturbaciones eléctricas que interfieren sobre las señales transmitidas o procesadas.
Servidor	Proceso que entrega información o sirve a otro proceso.
Sistema digital	Conjunto de dispositivos destinados a la generación, transmisión, manejo, procesamiento o almacenamiento de señales digitales.
Streaming	Distribución de multimedia a través de una red de computadoras de manera que el usuario consume el producto, generalmente archivo de video o audio, en paralelo mientras se descarga.
Sublongitud de onda	Indica el uso de las dimensiones por debajo de la longitud de las ondas utilizadas.
Tolerancia	Indica el porcentaje que puede variar el valor del componente con respecto a su valor nominal o indicado.

Trama	Unidad de envío de datos. Serie sucesiva de bits, organizadas en forma cíclica, que transportan información y permiten en la recepción, extraer la misma.
Transmisión asíncrona	Utiliza una señal especial que se sitúa al principio de cada dígito binario para indicar su comienzo además de otra situada al final.
Transmisión síncrona	Técnica que consiste en el envío de una trama de datos que configura un bloque de información comenzando con un conjunto de bits de sincronismo y terminando con otro conjunto de bits de final de bloque.
Unión PN	Estructura fundamental de los componentes electrónicos comúnmente denominados semiconductores, principalmente diodos y transistores BJT.
Velocidad de bits	Define el número de bits que se transmiten por unidad de tiempo a través de un sistema de transmisión digital o entre dos dispositivos digitales.
Vlan	Método para crear redes lógicas independientes dentro de una misma red física.
WDM	Multiplexación por división de longitud de onda (del inglés Wavelength Division Multiplexing).

WSS

Conmutador selectivo de longitud de onda (del inglés wavelength selective switch).

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se da a conocer la solución que ofrecen las redes ROADM en las redes de transmisión óptica, en especial sobre las redes DWDM. En el primer capítulo se presentan los conceptos básicos y fundamentos de las telecomunicaciones ópticas, tipos de fibra óptica, dispersión y sistemas de transmisión. Se presenta el concepto de red jerárquica y los tipos de redes; tecnologías para aumentar la capacidad, como los distintos tipos de multiplexación. En el segundo capítulo se muestran los conceptos sobre multiplexación por división de longitud de onda, conceptos generales y tipos. Se presenta el concepto de multiplexación por división de longitudes de ondas densas, definición y componentes del sistema. Por último, en este capítulo se muestra el concepto general de un multiplexor óptico de inserción y extracción de longitudes de onda, el cual es la base para ROADM.

Más adelante en el tercer capítulo se presentan los sistemas ROADM, las distintas generaciones de redes que han ido surgiendo. Se muestra el concepto del conmutador selectivo de longitudes de onda, los distintos tipos de arquitecturas que se han desarrollado e implementado. Se muestran aplicaciones de conmutación para estos sistemas. Por último, en este trabajo de graduación, en el cuarto capítulo se presentan conceptos para implementar un diseño de un sistema ROADM. Dentro de estos conceptos presentados se muestran distintas topologías, algunos parámetros necesarios a tomar en consideración, funcionamientos del sistema. También se presentan comparaciones y ventajas que tienen estos sistemas sobre los implementados con DWDM.

OBJETIVOS

General

Realizar un estudio sobre las redes ROADM como futuro de las redes DWDM en Guatemala.

Específicos

1. Presentar los fundamentos teóricos de las telecomunicaciones ópticas.
2. Presentar los conceptos generales de multiplexación por división de longitud de onda.
3. Presentar los fundamentos de un sistema ROADM en las redes de nueva generación.
4. Presentar una propuesta de diseño de un sistema ROADM.

Hipótesis

ROADM permite a las redes ópticas tener un mejor desempeño sobre los sistemas implementados actualmente. Tiene la capacidad de cubrir las nuevas exigencias del tráfico de datos, que debido a las nuevas aplicaciones se torna cada vez más complejo. ROADM permite optimizar la infraestructura de fibra óptica existente, permite utilizar distintas longitudes de onda para reconfigurar los sistemas remotamente y no afectar el tráfico existente en la red ante posibles fallas.

INTRODUCCIÓN

Se llama telecomunicaciones ópticas a aquellas que utilizan como medio de transmisión fibras ópticas y haces de luz para transmitir las señales deseadas. Este tipo de telecomunicaciones ofrece muchas ventajas a sus usuarios, tales como: inmunidad a interferencias externas, tiempos de respuesta bajos, transmisiones a grandes distancias y un gran ancho de banda. Las fibras usadas en este campo son de plástico o de vidrio y algunas veces de los dos tipos. Por la baja atenuación que tienen, las fibras de vidrio son utilizadas en medios interurbanos.

DWDM es un método de multiplexación donde varias señales portadoras se transmiten por una única fibra óptica utilizando distintas longitudes de onda de un haz láser en cada una de ellas. Cada portadora óptica forma un canal óptico que podrá ser tratado independientemente del resto de canales que comparten el medio de transmisión y contener diferentes tipos de tráfico. De esta manera se puede multiplicar el ancho de banda efectivo de la fibra óptica, así como facilitar comunicaciones bidireccionales.

Sin embargo, el principal problema de estos sistemas es que su ancho de banda es fijo, es decir, la capacidad queda establecida en el momento de su instalación y cualquier cambio posterior resulta complicado y costoso. ROADM es un sistema que permite una arquitectura dinámica y reconfigurable. Permite gestionar el ancho de banda de las redes DWDM de una forma flexible y eficiente, suministrando y conmutando los diferentes canales DWDM o longitudes de onda en función de las necesidades del tráfico.

1. TELECOMUNICACIONES ÓPTICAS

1.1. Transmisión sobre fibra óptica

Con la invención de la fibra óptica la manera de enviar y recibir datos de un punto a otro cambio drásticamente. Las características de la fibra óptica hacen que sea preferida sobre el par de cobre, ya que es inmune a las interferencias electromagnéticas y baja atenuación ante largas distancias; permite transmitir grandes cantidades de datos sobre un medio de transmisión que utiliza pulsos de luz como señal portadora.

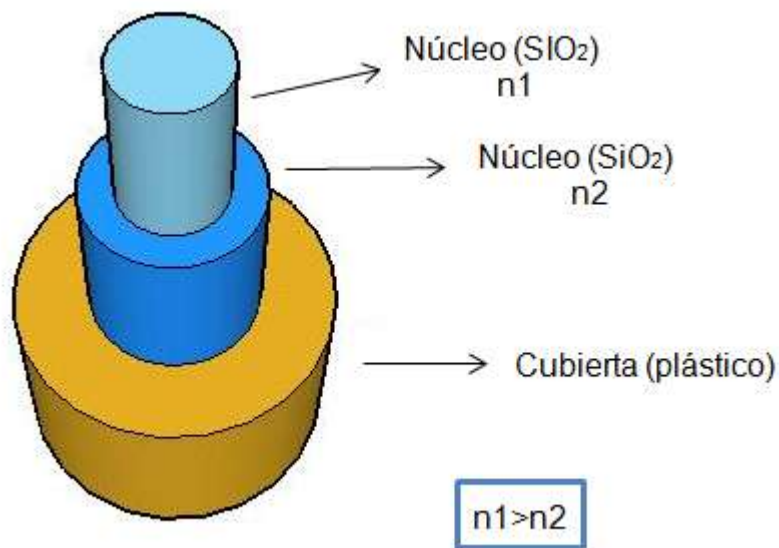
1.1.1. Fibra óptica

La fibra óptica es un filamento de vidrio de alta pureza extremadamente compacto, el grosor de una fibra es de dimensiones similares a las del cabello humano. Es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos; un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir. El haz de luz queda completamente confinado y se propaga por el interior de la fibra con un ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total, en función de la ley de reflexión y refracción de Snell. La fuente de luz puede ser láser o un led.

La fibra óptica está compuesta por una región cilíndrica denominada núcleo por donde se propaga el haz de luz. El revestimiento o cubierta es una zona externa y coaxial al núcleo, el revestimiento es necesario para producir el mecanismo de propagación de la luz.

Para la construcción de la fibra óptica se utilizan dos medios con diferente índice de refracción, siendo el núcleo el material con mayor índice de refracción que el revestimiento. La capacidad de transmisión que tiene la fibra óptica depende del diseño geométrico de la fibra, las propiedades de los materiales utilizados en su elaboración y la anchura espectral de la fuente de luz utilizada.

Figura 1. **Estructura de la fibra óptica**



Fuente: <http://nemesis.tel.uva.es/> - Fibra óptica
[Consulta: enero de 2014].

El funcionamiento de la fibra óptica se basa en transmitir por el núcleo un haz de luz que refleje por el revestimiento y se propague a través de toda su longitud, esto es posible con la condición que el núcleo posea un índice de refracción mayor al del revestimiento utilizando el ángulo correcto para la propagación. El empleo de fibras de vidrio como medio guía no tardó en resultar atractivo: tamaño, peso, facilidad de manejo, flexibilidad y costo. En concreto, las fibras de vidrio permitían guiar la luz mediante múltiples reflexiones internas de los rayos luminosos, sin embargo, en un principio presentaban elevadas atenuaciones. La utilización de la fibra óptica trae ventajas y desventajas, las cuales se explican en la tabla I.

Tabla I. **Ventajas y desventajas de la fibra óptica**

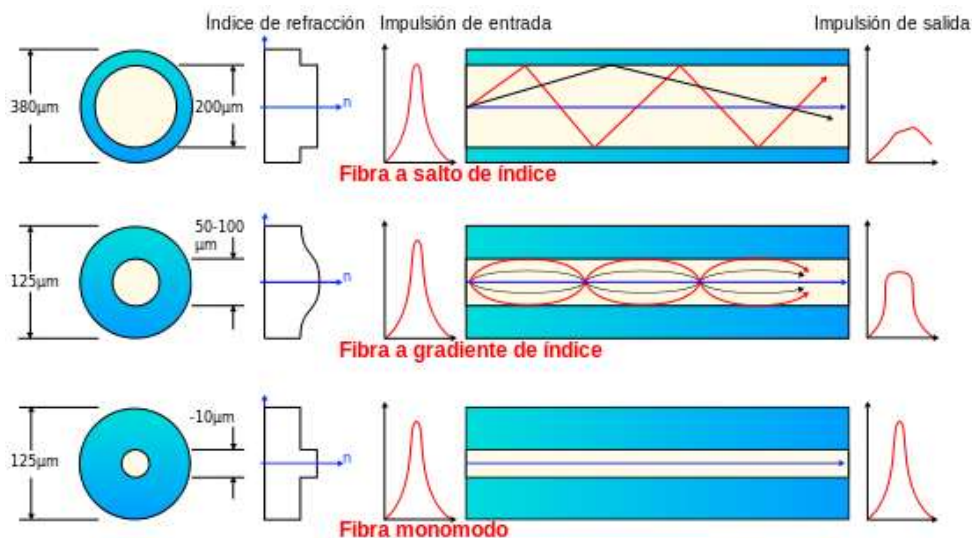
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor capacidad de transmisión, en el orden de GHz, debido al ancho de banda disponible en las frecuencias ópticas. • Inmunidad a inducción magnética o interferencia estática. • Resistencia a condiciones ambientales extremas. • Menor costo en comparación con el cobre. • Seguridad de instalación y mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta fragilidad. • Transductores especiales, por lo tanto costosos. • Dificultad para realizar empalmes o uniones. • No es posible transmitir energía eléctrica para alimentar repetidores. • Procesos de conversión eléctrico-óptica.

Fuente: elaboración propia.

El haz de luz puede tomar distintas trayectorias en el interior de la fibra óptica, lo que se denomina modos de propagación. Según el modo de propagación la fibra óptica se puede clasificar en dos grupos: monomodo y multi-modo. En una fibra monomodo, el haz tiene un único modo de propagación que se logra reduciendo el diámetro del núcleo, la transmisión es paralela al eje de la fibra y permite alcanzar grandes distancias. En una fibra multimodo los haces de luz pueden circular en varios caminos, este tipo de fibra es utilizado comúnmente en aplicaciones de distancias pequeñas.

El núcleo de una fibra multimodo tiene un índice de refracción superior, pero del mismo orden de magnitud que el revestimiento. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, este es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

Figura 2. Tipos de fibra óptica



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_óptica. [Consulta: enero de 2014].

1.1.2. Tipos de fibra óptica

Las fibras ópticas utilizadas actualmente en el área de las telecomunicaciones se clasifican fundamentalmente en dos grupos según el modo de propagación: fibras multimodo y fibras monomodo.

1.1.2.1. Monomodo

La mayor ventaja de las fibras monomodo es el amplio ancho de banda que permite transmisiones sobre largas distancias, ya que no es susceptible a dispersión intermodal. También tienen aplicaciones de instrumentación, ya que mantienen la coherencia de la luz y su polarización para determinados tipos de fibras. La mayor limitante de este tipo de fibras es que debido al reducido tamaño del núcleo se requieren conectores de alta precisión, el uso de láser como fuente de luz eleva el costo de su implementación. El término monomodo se refiere a que cada longitud de onda se propaga de un solo modo.

Las fibras monomodo son muy aptas para multiplexación por división de longitud de onda, las diferentes longitudes de onda se superponen sin interferirse. Es de largo alcance pudiendo recorrer varios kilómetros sin necesidad de repetidores. Normalmente son usadas para unir diferentes localizaciones separadas entre sí y van por galerías de cable por debajo del suelo. Este tipo de fibras se utiliza en comunicaciones de media y larga distancia y en enlaces intercontinentales en los que existe una elevada transmisión de datos, lo que conlleva una justificada inversión.

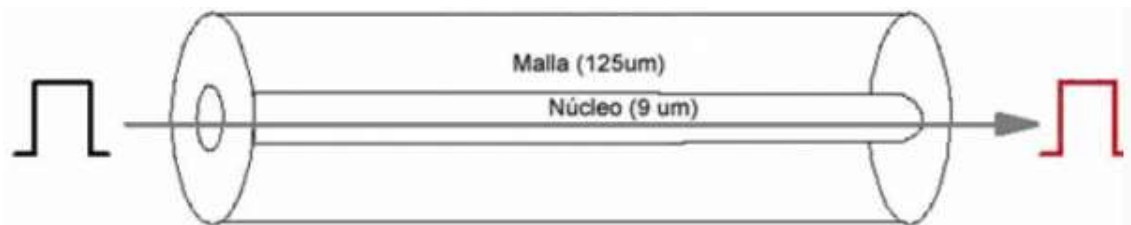
El hecho de que se elimine la dispersión modal tiene que ver con el ángulo de admisión de entrada que es tan estrecho que casi coincide con el eje horizontal de la fibra, entrando los rayos de luz en línea recta. En la tabla II se muestran las dimensiones típicas de las fibras monomodo.

Tabla II. **Dimensiones fibra monomodo**

Núcleo	Cubierta	Revestimiento
1a 10 μm	125 μm	250 o 900 μm

Fuente: elaboración propia, software Microsoft Excel.

Figura 3. **Fibra óptica monomodo**



Fuente: <http://serviojr.blogspot.es> – Fibra monomodo. [Consulta: enero de 2014].

La fibra monomodo tiene distintos estándares de transmisión dentro de los cuales se tiene: 10 GBase-LR y 10 GBase-ER. El estándar 10 GBase-LR *longe range*, permite transmisiones sobre distancias de hasta 10 kilómetros usando una fuente de luz de 1 310 nanómetros. El estándar 10 GBase-ER *extended range* permite transmitir sobre distancias de hasta 40 kilómetros usando fuentes de luz de 1 550 nanómetros, actualmente se han introducido interfaces que permiten transmitir sobre distancias de hasta 80 kilómetros.

Recientemente se ha desarrollado el estándar XGbEo10GbE el cual es el más rápido de los estándares IEEE 802.3ae. El estándar XGbE define una versión de Ethernet con una velocidad nominal de 10Gbit/s que es 10 veces más rápido que Gigabit Ethernet.

1.1.2.2. Multimodo

El término multimodo indica que pueden ser guiados muchos modos o rayos luminosos, cada uno de los cuales sigue un camino diferente dentro de la fibra óptica. Este efecto hace que su ancho de banda sea inferior al de las fibras monomodo. Por el contrario los dispositivos utilizados con las multimodo tienen un costo inferior (led). Este tipo de fibras son las preferidas para comunicaciones en pequeñas distancias.

En este tipo de fibra el diámetro del núcleo suele ser de 50 o 62,5 micrómetros y el diámetro del revestimiento de 125 micrómetros. Debido a que el tamaño del núcleo es grande, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión, es decir, que permite la utilización de electrónica de bajo costo.

Dependiendo del tipo de índice de refracción del núcleo, existen dos tipos de fibra multimodo: índice escalonado e índice gradual.

Figura 4. **Fibra óptica multimodo**



Fuente: <http://lafibraoptica.com/2012/07/06/clasificacion-basica-monomodo-y-multimodo>.

[Consulta: enero de 2014].

- Multimodo índice escalonado

Las fibras multimodo de índice escalonado están fabricadas a base de vidrio, con una atenuación de 30 decibelios por kilómetro o de plástico, con una atenuación de 100 decibelios por kilómetro. Tienen una banda de paso que llega hasta los 40 megahertz por kilómetro. En estas fibras, el núcleo está constituido por un material uniforme cuyo índice de refracción es claramente superior al de la cubierta que lo rodea. El paso desde el núcleo hasta la cubierta conlleva por tanto una variación abrupta del índice, de ahí su nombre de índice escalonado.

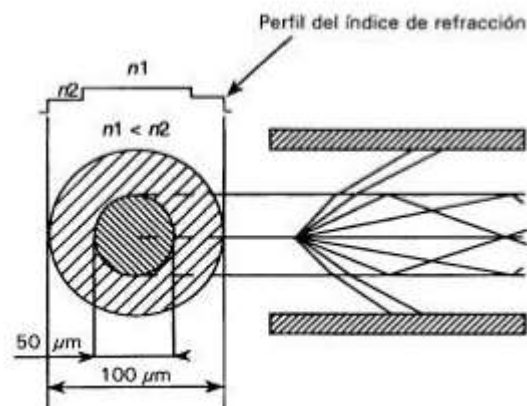
En este tipo de fibra viajan varios rayos ópticos, reflejándose a diferentes ángulos. Se debe tomar en cuenta que existe un ángulo crítico para la inserción de la luz en la fibra, si este ángulo es sobrepasado la luz no se reflejará sino que se refractará sobre el revestimiento.

Tabla III. **Características de fibra multimodo índice escalonado**

Parámetro	Valor
Ancho de banda	100 MHz/km
Pérdidas	5 a 20 dB/km
Diámetro de núcleo	200 a 1 000 μm
Fuente de luz	LED
Longitud de onda	660 – 1 060 nm

Fuente: www.virtual.unal.edu.co - tipos de fibras. [Consulta: enero de 2014].

Figura 5. **Fibra multimodo índice escalonado**



Fuente: <http://www2.udec.cl/~jdupre/fibra/tipos.html>. [Consulta: enero de 2014].

Si se considera un rayo luminoso que se propaga siguiendo el eje de la fibra y un rayo luminoso que debe avanzar por sucesivas reflexiones, esta segunda señal sufrirá un retardo que será tanto más apreciable cuanto más larga sea la fibra óptica. Esta dispersión es la principal limitación de las fibras multimodo de índice escalonado. Su utilización a menudo se limita a la transmisión de información a cortas distancias, algunas decenas de metros y flujos poco elevados. Su principal ventaja reside en el precio más económico.

- Multimodo índice gradual

Las fibras multimodo de índice de gradiente gradual poseen una banda de paso que llega hasta los 500 megahertz por kilómetro. Su principio se basa en que el índice de refracción en el interior del núcleo no es único y decrece cuando se desplaza del núcleo hacia la cubierta. Los rayos luminosos se encuentran enfocados hacia el eje de la fibra. Estas fibras permiten reducir la dispersión entre los diferentes modos de propagación a través del núcleo de la fibra. Si un rayo de luz se propaga de forma diagonal por el núcleo, continuamente está atravesando regiones de menor a mayor densidad y viceversa. Por consiguiente, los rayos de luz son refractados continuamente, lo que resulta en una continua reflexión de los rayos de luz.

En este tipo de fibras el índice de refracción es manipulado de manera radial parabólica de tal forma que actúa como un elemento de convergencia en los haces transmitidos de manera periódica. Sin embargo, los haces tardan más tiempo en atravesar este tipo de fibra a causa de las variaciones del mismo índice de refracción.

Como es de esperarse, las pérdidas en este tipo de fibra son mucho menores que en la fibra multimodo normal, compensando su alto costo de fabricación. Para este tipo de fibras es de vital importancia escoger un índice de apertura amplio para lograr transmisiones correctas y hacer un diseño muy a conciencia de los ángulos de refracción a utilizar, de tal manera que no se presente interferencia entre las ondas.

Tabla IV. **Características de fibra óptica multimodo índice gradual**

Parámetro	Valor
Ancho de banda	4 GHz/km
Pérdidas	0.3 a 0.5 dB/km
Diámetro del núcleo	8 a 10 μm
Fuente de luz	Emisores específicos
Longitud de onda	1 330 – 1 550 nm

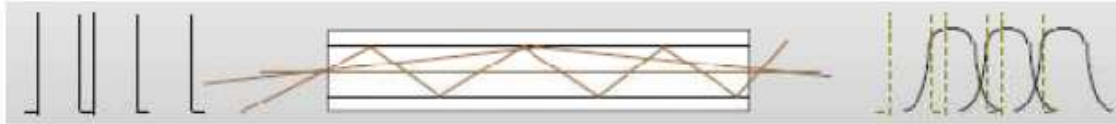
Fuente: www.virtual.unal.edu.co – tipos de fibra.[Consulta: enero de 2014].

1.1.3. Dispersión

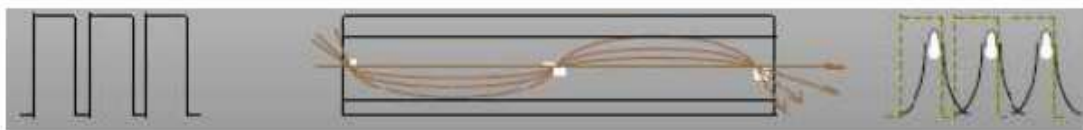
La dispersión se refleja como señales parásitas que distorsionan y hacen confusa una transmisión-recepción. La pérdidas por dispersión se manifiestan como reflexiones del material debido a las irregularidades submicroscópicas ocasionadas durante el proceso de fabricación de la fibra óptica y cuando un haz de luz se está propagando choca contra estas impurezas, se dispersa y refleja. Dentro de estas pérdidas se tiene: dispersión de Rayleigh, imperfecciones en la fibra, impurezas y burbujas en el núcleo, impurezas de materiales fluorescentes y pérdidas de radiación debido a microcurvaturas.

Figura 6. **Dispersión en los distintos tipos de fibra óptica**

Fibra multimodo de índice escalonado



Fibra multimodo de índice gradual



Fibra monomodo de índice



Fuente: FIUSAC. Fibra óptica – Documentos comunicaciones 3. p. 12.

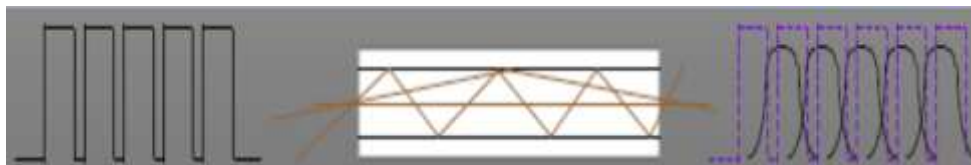
En fibras comerciales que operan entre longitudes de onda de 700 nanómetros y 1 600 nanómetros, la fuente principal de pérdida se llama dispersión de Rayleigh. La cual es el mecanismo principal de pérdida entre las regiones ultravioletas e infrarrojas. Ocurre cuando el tamaño de la fluctuación de densidad, defecto de la fibra, es menos de una décima de la longitud de onda de operación de la luz.

La pérdida causada por la dispersión de Rayleigh es inversamente proporcional a la longitud de onda elevada a la cuarta. Y disminuye a medida que aumenta la longitud de onda. Existen 2 tipos de dispersión: dispersión modal y dispersión cromática.

1.1.3.1. Dispersión modal

Conocida también como el esparcimiento del pulso, este tipo de dispersión es propio de las fibras multimodo. La dispersión modal es causada por la diferencia en los tiempos de propagación de los rayos de luz que toman distintas trayectorias por una fibra óptica. Este tipo de dispersión puede causar que un impulso de energía de luz se disperse conforme se propaga por una fibra, si el pulso que está esparciéndose es lo suficiente severo puede ocurrir la interferencia intersímbolo. La interferencia intersímbolo sucede cuando un pulso de energía de luz puede caer arriba del próximo pulso.

Figura 7. **Dispersión intermodal o modal en la fibra óptica**



Fuente: FIUSAC. Fibra óptica – Documentos comunicaciones 3. p. 12.

Un rayo de luz que choca a la interface de núcleo/cubierta en el ángulo crítico sufrirá el número más alto de reflexiones internas y en consecuencia, toma la mayor cantidad de tiempo para viajar a lo largo de la fibra. Este tipo de dispersión puede ser reducido utilizando fibras multimodo índice gradual y es casi eliminado al utilizar fibras monomodo. Al tener suficiente separación entre los pulsos, permite que estos puedan ser distinguidos en el otro extremo de la fibra óptica. Al aplicar más pulsos por unidad de tiempo (aumentar la velocidad de datos) se produce mezcla entre pulsos consecutivos e impide que estos puedan ser distinguidos unos de otros, ver figura 7.

1.1.3.2. Dispersión cromática

La dispersión cromática o intramodal depende principalmente de los materiales de la fibra óptica. Esta dispersión resulta porque a diferentes longitudes de onda de luz se propagan distintas velocidades de grupo a través del material de la fibra óptica. Debido a que las fuentes de luz no son perfectamente monocromáticas, se ocasiona un ensanchamiento del pulso recibido y esto se da en las fibras multimodo y monomodo.

La única manera de combatir los efectos negativos de la dispersión cromática es tratar de trabajar con una fuente de luz que sea lo más pura posible, por ejemplo, una fuente de luz monocromática tal como un diodo de inyección láser.

Figura 8. Efectos de la dispersión cromática



Fuente: http://www.atvc.org.ar/jornadas/2012/sahel_rodriguez.pdf. [Consulta: febrero de 2014].

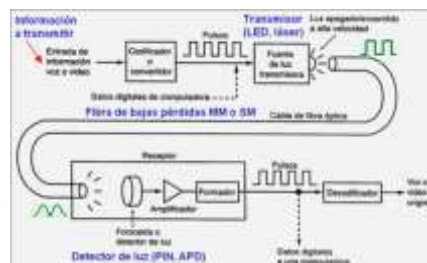
El efecto que causa la dispersión cromática en una fibra óptica es el aumento del ancho de los pulsos de luz, como se ilustra en la figura 9. Afecta al enlace en cuanto a cantidad de longitudes de onda y distancia. Si el enlace es de largo alcance, la dispersión será fundamental, siempre y cuando los dispositivos utilizados para la transmisión no contengan compensadores de dispersión cromática.

En caso que los dispositivos contengan compensadores de dispersión cromática, esta dispersión no se hace importante. La dispersión cromática difiere de la dispersión modal en que esta es causada por cambios en los modos de las longitudes de onda de la fuente más no en los modos de propagación de la fibra.

1.1.4. Componentes del sistema

En un sistema de transmisión por fibra óptica existe un transmisor que se encarga de transformar las ondas electromagnéticas en energía óptica o en luminosa, por ello se le considera el componente activo de este proceso. Una vez que es transmitida la señal luminosa por las minúsculas fibras, en otro extremo del circuito se encuentra un tercer componente al que se le denomina detector óptico o receptor, cuya misión consiste en transformar la señal luminosa en energía electromagnética, similar a la señal original. El sistema básico de transmisión se compone en este orden, de señal de entrada, amplificador, fuente de luz, corrector óptico, línea de fibra óptica, receptor, amplificador y señal de salida.

Figura 9. Sistema de transmisión por fibra óptica



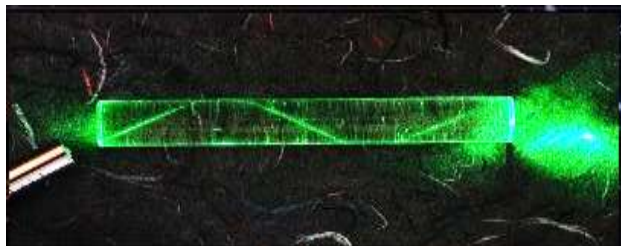
Fuente: <http://www.slideshare.net/edisoncoimbra/82-transmision-de-datos-por-fibra-ptica>.

[Consulta: febrero de 2014].

Para transmitir la señal en un sistema de comunicación por fibra óptica se necesita de dispositivos que realicen conversión de señales eléctricas a pulsos de luz, llamado fotoemisor. Dentro de los dispositivos fotoemisores que se pueden utilizar están: diodo láser y diodo emisor de luz. El diodo láser LD tiene potencia óptica de salida alta, reducida anchura espectral lo cual ayuda a reducir la dispersión cromática, de pobre linealidad, posee un tiempo de respuesta rápido a las señales eléctricas pero tiene el inconveniente que es de costo elevado. El diodo emisor de luz led posee una potencia óptica de salida baja, amplia anchura espectral, buena linealidad y de bajo costo.

Para que el dispositivo fotoemisor sea funcional dentro de un sistema de transmisión por fibra óptica debe cumplir con ciertas exigencias. Su espectro de emisión debe ser de acuerdo con alguna de las ventanas estipuladas, para reducir la dispersión cromática su anchura espectral debe ser lo más reducido posible y con un haz de luz lo más estrecho posible para mejorar el acoplamiento con la fibra óptica. Debe poseer una alta velocidad de respuesta y de conmutación para sistemas de gran capacidad, bajo consumo de corriente. Debe ser manejable en cuestión de peso y tamaño, ser estable frente a cambios bruscos de temperatura y altos tiempos de operación.

Figura 10. **Luz emitida por láser viajando a través de fibra óptica**

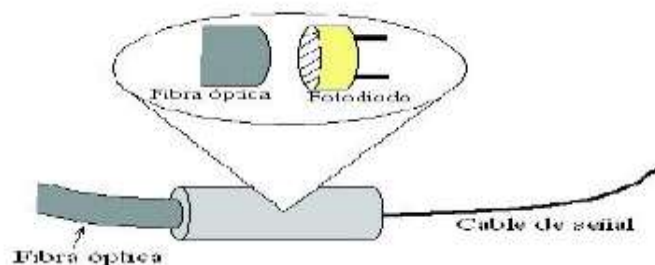


Fuente: <http://muybuenasnuevas.blogspot.com>. [Consulta: febrero de 2014].

Para recibir la señal transmitida en el otro extremo de la fibra óptica se necesitan dispositivos que puedan detectar pulsos de luz y realizar la conversión a señales eléctricas; este tipo de dispositivos son conocidos como fotodetector. El tipo más sencillo de detector corresponde a una unión semiconductor PN. Para los dispositivos fotodetectores están: fotodiodo y fotodiodo de avalancha. El fotodiodo tiene tiempo de respuesta rápido, baja sensibilidad a los cambios de luz y de costo accesible. El fotodiodo de avalancha tiene tiempo de respuesta rápida, buena sensibilidad a los cambios de luz pero tiene el inconveniente de ser de costo elevado.

Para que los dispositivos fotodetectores puedan ser utilizados en los sistemas de comunicación por fibra óptica, deben cumplir ciertas características de funcionamiento. La corriente inversa debe ser muy pequeña para que sea posible detectar pulsos ópticos débiles, en otras palabras, debe tener buena sensibilidad. Debe tener una respuesta rápida ante los cambios de luz y poseer un amplio ancho de banda para detectar pulsos ópticos de distintas longitudes de onda. Por último, el ruido generado por el propio fotodetector debe ser pequeño para no afectar el funcionamiento del sistema completo.

Figura 11. **Acoplamiento fibra óptica y fotodiodo**



Fuente: <http://www.mda.cinvestav.mx>. [Consulta: febrero de 2014].

La señal de entrada en un sistema de comunicaciones es generalmente una señal análoga y debido a la naturaleza de la señal análoga se torna complejo el poder transmitirla de un lugar a otro sin tener pérdidas o ruido en la señal. Para evitar este tipo de problemas es necesario convertir la señal a un sistema donde sea más fácil el transportarla de un lugar a otro, para esto se puede optar por convertir la señal a un sistema digital donde se tiene únicamente dos estados para la señal.

Para realizar la conversión se necesitan dispositivos que primero realicen una conversión de análogo a digital como un ADC (siglas en inglés de Analog-to-Digital Converter). Luego de codificar la señal, enviarla al transmisor y a través de la fibra al otro extremo del sistema. Luego de transmitir la señal al otro extremo de la fibra óptica y ser recibida por el dispositivo fotodetector se requiere decodificar el mensaje enviado y verificar que la información recibida sea verídica. Esto es posible realizarlo con un algoritmo decodificador que pueda detectar errores en el código recibido y poder corregirlo.

Una vez decodificado el código y realizadas las correcciones necesarias se tiene el código en el sistema digital. Para obtener la señal análoga de origen se utiliza un dispositivo DAC (siglas en inglés de Digital-to-Analog Converter), para que realice la conversión de la señal digital a análoga. Dependiendo de la distancia a la que se encuentren los extremos del sistema puede ser necesario utilizar amplificadores para no perder la señal debido a la atenuación y dispersión causada por la distancia.

1.1.5. Sistemas de transmisión

En el proceso de comunicación la fibra óptica funciona como medio de transporte de la señal luminosa, generado por el transmisor de ledes y láser. Los diodos emisores de luz y los diodos láser son fuentes adecuadas para la transmisión mediante fibra óptica, debido a que su salida se puede controlar rápidamente por medio de una corriente de polarización.

Los sensores de fibra óptica están formados por un amplificador que contiene el del emisor y el receptor y un cable de fibra óptica que transmite y recibe la luz reflejada por el objeto a detectar.

La mayoría de enlaces de fibra óptica son, naturalmente, enlaces digitales a pesar que para ciertas aplicaciones se sigue utilizando la transmisión analógica como en transmisiones de video, *streaming* o mediciones remotas. La baja atenuación de la fibra óptica, la inmunidad a la interferencia electromagnética y el amplio ancho de banda son características las cuales hacen que se aprovechen al máximo los enlaces digitales, lo cual se convirtió predominante en las redes de telecomunicaciones cuando los primeros sistemas de fibra óptica estaban siendo desarrollados.

Permitiendo desarrollar enlaces más estables y con tiempos de respuesta menores en comparación a los sistemas implementados con transmisiones sobre cables de cobre.

1.1.5.1. Estructura de un enlace digital

Los distintos sistemas de enlaces digitales pueden ser clasificados en varias categorías: redes de área extensa WAN (del Inglés *wide area network*), redes de área metropolitana MAN (del inglés *metropolitan area network*), redes locales de computadora y empresariales LAN (del inglés *wide area network*), redes de distribución y acceso.

Las redes WAN constituyen la infraestructura de transmisión de la red de transporte óptico, estas redes transportan el tráfico de distintos protocolos de red como SDH, ATM, IP y tramas distintas. Son administradas por empresas conocidas como *carriers*, es decir, proveen el transporte para el tráfico de la red en una región o área determinada.

Las redes MAN, generalmente con arquitecturas de anillo, son utilizadas para ciudades o instituciones grandes, por ejemplo, aeropuertos, zonas comerciales, etcétera. Los protocolos utilizados son SDH o Ethernet de 1 o 10 gigabit por segundo dependiendo la capacidad de la red.

Estas redes se encuentran con constante expansión debido a la demanda de usuarios donde particularmente las arquitecturas se tornan de alta complejidad. Esta red tiene alta demanda por dispositivos ópticos pasivos: aisladores, divisores, filtros y multiplexores. La utilización de componentes pasivos reduce considerablemente los costos y son utilizados en las redes FTTH, fibra hasta la casa.

Las redes LAN pueden estar compuestas por enlaces punto a punto conectados por nodos eléctricos, así como de componentes ópticos pasivos.

Generalmente el protocolo que predomina en las redes LAN es el protocolo *Ethernet* 802.3, aunque otros protocolos como *FiberChannel*, *fiberbus*, IEEE1394 han comenzado a surgir para este tipo de redes. Las redes de distribución y acceso en algún momento fueron diseñadas en una topología de anillo con fibra óptica y más comúnmente diseñadas por FTTH, utilizando un punto intermedio donde la fibra convergen distintas variaciones. Para estas redes es importante tener en cuenta que el costo de instalación y equipo sea reducido para competir contra la tecnología en pares de cobre ADSL.

En las transmisiones ópticas son usados códigos binarios para representar los mensajes a transmitir. Como en las transmisiones digitales el nivel digital cero o bajo representa la ausencia de señal en el medio, para las transmisiones ópticas la ausencia de luz representa el nivel digital cero. Para representar el nivel digital uno en las transmisiones digitales se utiliza un valor de voltaje establecido, en las transmisiones ópticas el valor digital uno se representa por medio de un pulso de luz a través de la fibra óptica. Los códigos de línea siguen siendo implementados en las transmisiones ópticas con el fin de tener una comunicación eficiente, y cada uno es aplicado según la tasa de transferencia y la distancia que cubre el sistema de transmisión.

En transmisiones con velocidades de bit muy bajas son utilizados los códigos *manchester*, el código bifase y el código *manchester* diferencial para transmisiones sobre el protocolo Ethernet a 10 megabit por segundo o bien para transmisiones con velocidades de bit arriba de los 34 megabit por segundo se utiliza el código de marca invertida CMI, una secuencia de dos bits se reemplaza por un solo bit. En velocidades de bit mayores, con el fin de limitar el ensanchamiento espectral se utilizan códigos de bloque *nBmB*.

Este código reemplaza un bloque de n bits por m bits que contienen la máxima transición, por ejemplo los códigos 4B5B o 8B9B son usados. El reloj de línea contiene una frecuencia que es multiplicada por un factor de m/n , este código de bloque es utilizado en sistemas que tienen velocidades de bit alta por ejemplo, en Ethernet con velocidades de 100 megabit por segundo o más, *FiberChannel*, FDDI.

El código retorno a cero RZ (inglés *return zero*), se utiliza en enlaces de largo recorrido con altas velocidades de bit, especialmente en enlaces submarinos. Este código permite empujar levemente hacia atrás el límite de dispersión, mientras los pulsos son más angostos en la fuente, toleran ligeramente una mayor ampliación. Estos enlaces están comenzando a ser utilizados los códigos bipolares, en los cuales el nivel lógico 1 se alterna entre los valores ± 1 de amplitud.

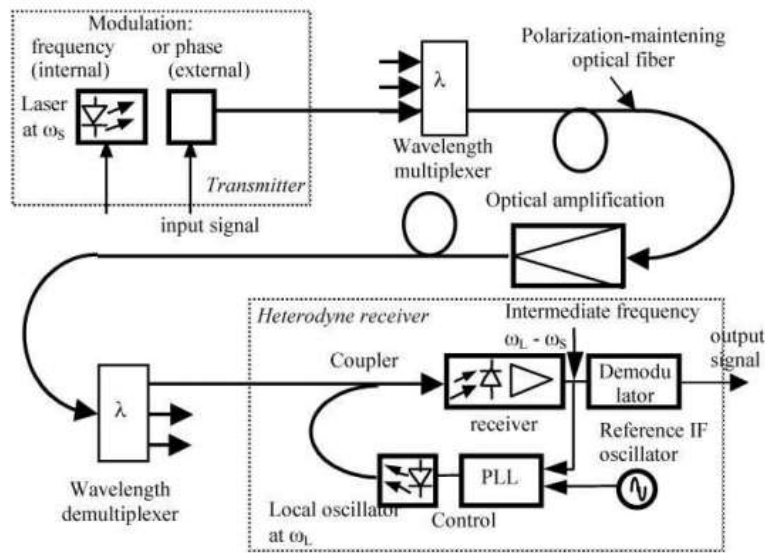
Lo que quiere decir que con estos códigos se da inversión de fase, lo cual se obtiene con un modulador electro-óptico. Los sistemas aplicados con este código no necesitan detección coherente debido a que el valor absoluto de la amplitud sigue siendo 1, representación digital de señal en el medio.

En los sistemas operacionales, la información modula intensidad de luz de una fuente sin utilizar coherencia de la portadora óptica. Sin embargo, estas señales pueden ser transmitidas por modulación de frecuencia o fase de una portadora óptica coherente y en el punto final la señal es demodulada con la ayuda de un receptor heterodino.

Este proceso de transmisión es similar al proceso que se utiliza para la transmisión de información por señales de radio, con la diferencia que se utiliza un medio guiado como es la fibra óptica y se utilizan frecuencias ópticas.

Un sistema de transmisión coherente se compone de los elementos mostrados en la figura 12. El transmisor está compuesto por un diodo láser con una alta pureza espectral con un ancho espectral menor que $3 \cdot 10^{-6}$ nanómetros. La señal enviada por el transmisor puede ser modulada en frecuencia *frequency shift keying* o más a menudo por modulación de fase *phase shift keying*, esto es realizado por un modulador externo. El receptor funciona bajo el principio de detección heterodina, el láser actuando como oscilador local es controlado para transponer la señal modulada a una frecuencia controlada como referencia. Luego que esta señal es transpuesta, amplificada ya su amplitud está multiplicada por la amplitud del oscilador local.

Figura 12. Estructura de un sistema de transmisión coherente



Fuente: Lecoy, Pierre. Fiber-opticcommunications. p. 208.

El método de detección con receptor heterodino es complicado de ejecutar ya que el oscilador local por láser debe ser perfectamente estable y la polarización de la señal recibida debe estar controlada. Preamplificando la señal por medio de fibra óptica dopada, una ventaja potencial de los sistemas con transmisión coherente es también su gran selectividad, las portadoras pueden tener una separación de menos que 0,08 nanómetros o 10 GHz o bien puede ser una frecuencia intermedia.

1.1.5.2. Categorías de un enlace digital

Un enlace de datos es el medio de conexión entre dos lugares con el propósito de transmitir y recibir información. Se componen de un dispositivo transmisor y receptor, y el circuito de telecomunicaciones de datos de interconexión; se rigen por un protocolo de enlace que permite que los enlaces digitales puedan ser transferidos desde una fuente de datos a un receptor de datos.

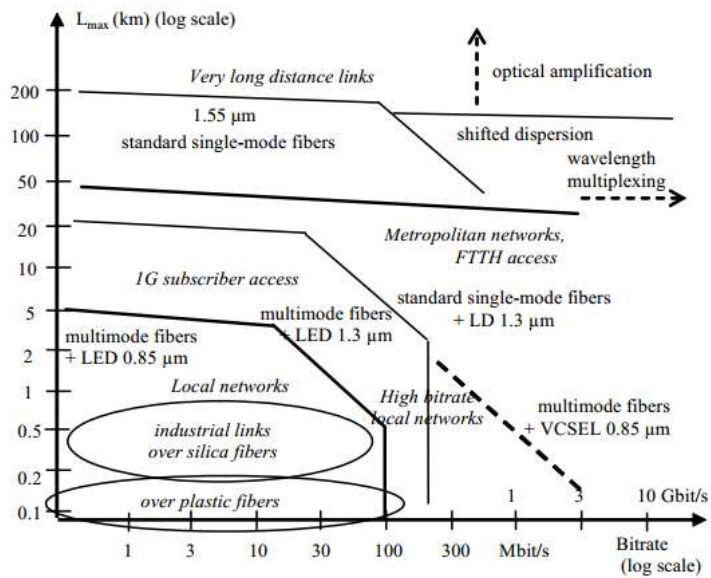
- Punto a punto, líneas no amplificadas

Este tipo de enlaces se dividen en distintas categorías. En la primera categoría está la transmisión sobre fibras de plástico a 0,67 micrómetros en distancias muy cortas para aplicaciones de la industria local, por ejemplo, cableado para talleres, enlaces de computadoras, cableado interno en máquinas.

Esta categoría también se utiliza para enlaces de 100 a 200 megabit por segundo de velocidades de bit principalmente por razones de seguridad eléctrica.

Los enlaces de esta primera categoría están siendo fuertemente desarrollados en los campos de domótica, multimedia y en equipos de automatización.

Figura 13. **Categorías de líneas digitales sobre fibra óptica**



Fuente: Lecoy, Pierre. Fiber-opticcommunications. p. 216.

Los enlaces de la segunda categoría operan a 0,85 micrómetros con diodos emisores de luz led y fotodiodos PIN sobre fibras multimodo. Estos sistemas son relativamente baratos y son ampliamente utilizados en las áreas de enlaces de computadoras e industriales para distancias en el rango de los kilómetros: transmisiones de distancias cortas, redes de área local, distribución local y principalmente transmisión digital, así como transmisiones de video o mediciones remotas análogas.

Las ventajas decisivas de los enlaces de esta categoría son nuevamente la seguridad eléctrica e insensibilidad a agentes externos, pero también se tienen las ventajas de ahorros en peso y tamaño con cableado de fibra óptica.

La tercer categoría opera a 1,3 micrómetros principalmente con diodos láser y fibras monomodo. La baja atenuación a 1,3 micrómetros permite enlaces metropolitanos y de larga distancia con altas velocidades de bit a una distancia aproximada de 50 kilómetros sin la necesidad de utilizar repetidores. El enfoque para esta categoría ha sido en redes de área metropolitana y para redes de área local con velocidades de bit muy altas de 1 o 10 gigabit por segundo. La ventana de 1,3 micrómetros es también usada sobre fibras multimodo con fuentes de luz led para redes de área local con altas velocidades de bit en el rango de 100 megabit por segundo, también puede operar con sistemas multiplexados con dos longitudes de onda sobre una sola fibra óptica.

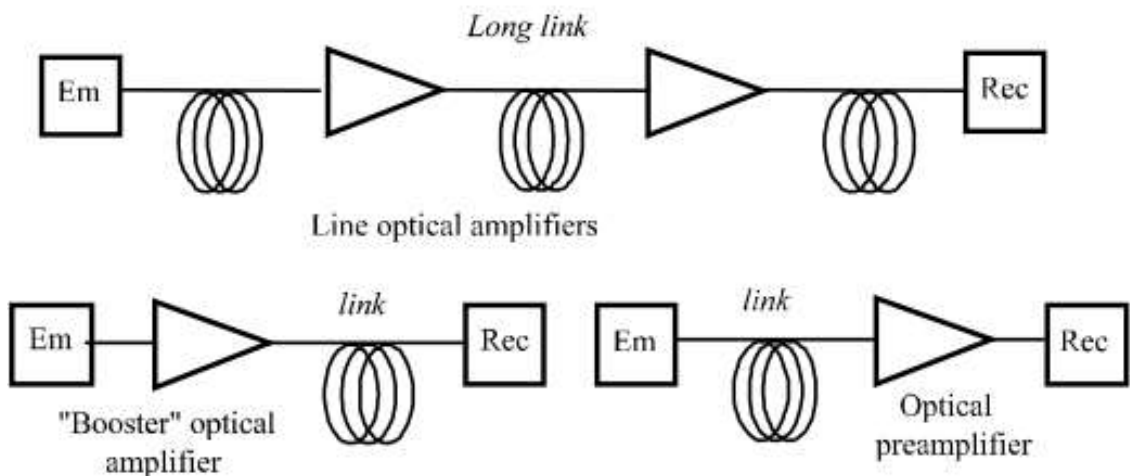
La cuarta categoría comprende los enlaces de larga distancia a 1,55 micrómetros, donde es necesario utilizar diodos láser monocromático. Al no utilizar amplificación, la distancia es limitada por la atenuación del medio de transmisión y puede alcanzar una distancia de hasta 150 kilómetros en los enlaces de varios gigabit por segundo. Fibras monomodo estándar posiblemente pueden ser utilizadas con compensación de dispersión monocromática. Para redes de área amplia, terrestres como submarinas, se deben utilizar repetidores de amplificación óptica y fibras monomodo de dispersión desplazada. El acceso a suscriptores, usualmente sobre fibras multimodo en la primera generación, ahora implementado sobre fibras monomodo en arquitecturas de componentes pasivos multiplexando en la segunda y tercera ventana.

- Enlaces con amplificación óptica

En los años 90 el avance de la tecnología hizo posible introducir amplificación óptica en sistemas de transmisión de larga distancia y reemplazar completamente repetidores-regeneradores eléctricos.

Una de las ventajas principales de los amplificadores de fibra óptica dopados es que operan independientemente de la velocidad de bit soportada por la señal óptica y pueden amplificar un gran número de longitudes de onda y aumentar fácilmente la velocidad de bits en un enlace ya instalado. Por lo tanto, los rendimientos de las redes han tenido un gran crecimiento pasando de los 280 a los 640 megabit por segundo en menos de 10 años. La figura 14 muestra ejemplos de transmisión óptica punto a punto utilizando amplificación óptica.

Figura 14. **Enlaces con amplificación óptica**



Fuente: Lecoy, Pierre. Fiber-opticcommunications. p. 218.

La amplificación óptica puede ser usada como un amplificador de línea, el ruido total recibido debe ser minimizado, así como el consumo del amplificador, porque tienen que ser alimentados remotamente.

La amplificación también puede ser utilizada como un preamplificador, justo antes de la detección; la meta es alcanzar el menor exceso de ruido con el fin de estar más cerca del límite cuántico. También puede ser utilizada como amplificación de potencia justo después de la fuente de luz, la potencia de saturación y la eficiencia cuántica deben ser máximas. Es entonces donde el amplificador debe ser utilizado a saturación, lo cual estabiliza la potencia de salida. Combinando amplificador de potencia en la transmisión y preamplificador en el receptor, es posible tener enlaces que superen los 350 kilómetros sin amplificadores intermedios.

- Enlaces por multiplexación de división de longitud de onda

Aunque los sistemas de 40 gigabit por segundo son operacionales, las redes de 10 gigabit por segundo por longitud de onda son generalmente las más utilizadas. Incrementar el rendimiento de una red es fácilmente logrado utilizando multiplexación por división de longitud de onda, incluso permite alcanzar velocidades de hasta cientos de gigabit por segundo. Enlaces de 4 hasta 64 longitudes de onda multiplexadas, cada una modulada a 10 gigabit por segundo es operable en redes WAN y ahora están siendo utilizadas en redes MAN que requieren rendimientos cada vez más altos. En las pruebas realizadas en laboratorios suficientemente equipados, utilizando cientos de portadoras ópticas se han podido alcanzar velocidades de bit mayores de 10 terabit por segundo por cada fibra.

La tabla de frecuencias establecida por la ITU establece valores de espaciamiento entre las longitudes de onda desde 100 gigahertz, o aproximadamente 0,8 nanómetros a 1,55 micrómetros, entre 1 528,8 y 1 560,6 nanómetros. Actualmente desde 190 a 198 terahertz.

El uso de multiplexación por división de longitud de onda obviamente requiere diodos láser de gran pureza y estabilidad espectral de ser posible que el dispositivo sea ajustable. La selectividad del multiplexor es reforzada por el uso de filtros integrados en la fibra óptica. En orden de incrementar capacidades aún más, el uso de banda ampliado a longitudes de onda superiores e inferiores es considerado, a pesar de que los amplificadores dopados con erbio no son tan eficientes en estas bandas.

Obtener altas velocidades de bit en transmisión es más sencillo que utilizando multiplicación por división de tiempo, multiplicación por división de longitud de onda permite progresivamente incrementar la capacidad de los enlaces previamente instalados. Multiplicación por división de longitud de onda densa ha ayudado a mantener la respuesta a la explosión del tráfico internacional y a adaptarse a esta tendencia de manera flexible. Esta técnica también ayuda a construir redes multiterminal, lo cual explica su creciente interés por la evolución de la arquitectura.

Aunque la multiplicación por división de longitud de onda ha sido posible desde hace mucho tiempo, la amplificación óptica ha hecho que esto se haya vuelto interesante y aplicado en el campo de las telecomunicaciones.

El hecho que los amplificadores de fibra dopados con erbio puedan amplificar simultáneamente varias longitudes de onda multiplexada en la tercera ventana ha hecho posible desarrollar fácilmente la multiplexación por división de longitud de onda. Las grandes distancias en las cuales la señal no sufre alternaciones, puede exceder los 10 000 kilómetros, hace que la dispersión cromática y dispersión por polarización se torne un problema crítico.

Esto limita la velocidad de bit por canal a valores aproximados de 10 gigabit por segundo o incluso de 2,5 gigabit por segundo dependiendo de las características de la fibra. Por lo que la multiplexación por división de longitud de onda es actualmente la mejor solución con el fin de incrementar la velocidad de bits en los enlaces de transmisión.

- Enlaces submarinos por fibra óptica

Actualmente las velocidades de bit para estos enlaces se encuentran por los cientos de gigabit por segundo por fibra, con 3 o 4 fibras por cable. Los cables submarinos son colocados en el fondo del océano por un barco de cableado y enterrados solo cerca de las costas. La reparación de estos cables es posible pero es difícil y costosa, algunas veces es necesario utilizar robots para estas labores. Otro punto de dificultad es la alimentación remota de los equipos, ya que el voltaje puede alcanzar valores de 12 a 25 kilovoltios en los extremos de las líneas.

En adición a las líneas transoceánicas, existen varios enlaces costeros sin repetidores, alcanzando distancias por encima de los 300 kilómetros usando amplificadores ópticos en las terminales de los enlaces.

Los enlaces costeros pueden conectar islas o cruzar océanos estrechos por ejemplo el mar báltico, mar mediterráneo. Muchos países conectan sus mayores ciudades con enlaces submarinos a lo largo de la costa.

Por lo tanto, la mayoría de continentes están rodeados por cables submarinos. Las redes submarinas se están volviendo cada vez más frecuentes, con varios puntos de destino vinculados al cable de fibra por unidades de ramificación.

Existen enlaces que conectan más de 30 países con el mismo cable, utilización extracción e inserción de longitudes de onda para multiplexar los diferentes destinos.

El crecimiento en el tráfico internacional derivado recientemente por el internet implica un crecimiento en las capacidades ya instaladas, superando los satélites sin lugar a dudas, cada vez con el menor costo. Estos enlaces tienen el mejor desempeño en términos de seguridad y en tiempo de propagación, pero los satélites permanecen indispensables para conectar directamente una gran cantidad de usuarios, especialmente si son móviles o se encuentran aislados. Por lo tanto, existe un mayor complemento entre cada una de las redes más que una competencia.

1.2. Red jerárquica

Una red jerárquica divide la red en niveles o capas con funciones específicas que permiten dividir la red en secciones de fácil crecimiento y mantenimiento. Entre los beneficios que se obtienen de una red jerárquica están: capacidad de mantenimiento, facilidad de administración, seguridad, rendimiento, redundancia y escalabilidad.

- Capacidad de mantenimiento: debido a la segmentación física que tienen las redes jerárquicas, permiten aislar y encontrar la causa de problemas en la comunicación fácilmente.
- Facilidad de administración: debido a que cada capa de la red cumple con funciones específicas, es sencillo determinar en dónde se deben llevar a cabo las modificaciones o qué configuraciones implementar en un nuevo equipo.
- Seguridad: la jerarquía de la red permite aplicar políticas de acceso entre segmentos de la red, para que solo puedan tener acceso a un determinado segmento de la red o implementar restricciones basadas en protocolos de ciertas áreas.
- Rendimiento: se ve incrementado al emplear *switch* o conmutador de alto rendimiento en secciones donde el flujo de datos es más intenso. Además de que las mismas restricciones o políticas de seguridad permiten controlar los flujos de datos.

- Redundancia: se pueden emplear enlaces redundantes a través de *switch* o conmutadores alternos o de respaldo que permitan mantener la comunicación en caso de algún fallo y de esta forma asegurar el funcionamiento de la red.
 - Escalabilidad: al ser una estructura modular es fácil agregar nuevos nodos a la red o nuevos segmentos a través de los *switch* o conmutadores; o incluso en caso de un incremento en el tráfico es fácil descargarlo añadiendo *switch* o conmutadores de mayor rendimiento.
- Las capas de la red jerárquica se dividen en 3: redes de larga distancia o capa de núcleo, redes de área metropolitana o capa de distribución y redes de acceso o capa de acceso. El diseño de una red depende de las necesidades que se tengan y de la cantidad de tráfico que transitará la red. En la figura 16 se muestra un esquema de topologías de una red jerárquica.

Figura 15. Red jerárquica



Fuente: Alcatel-Lucent. Transmission networks, WDM Technology Fundamentals. p. 8.

1.2.1. Redes de larga distancia o capa núcleo

Las redes de larga distancia son el núcleo de la red global. Su aplicación es el transporte, por lo que su principal preocupación es capacidad. Conmutar tráfico tan rápido como sea posible y se encarga de llevar grandes cantidades del mismo de manera confiable y veloz, por lo que la latencia y velocidad son factores importantes en esta capa.

En caso de falla se afecta a todos los usuarios, por lo que la tolerancia es tan importante. Además, dada la importancia de la velocidad, no hace funciones que puedan aumentar la latencia, como *access-list*, ruteo *intervlan*, filtrado de paquetes. Se debe evitar a toda costa aumentar el número de dispositivos en el núcleo (no agregar *routers*), si la capacidad del núcleo es insuficiente, se considerarán aumentos a la plataforma actual (actualizaciones) antes que expansiones con equipo nuevo.

Se diseña el núcleo, por ejemplo con tecnologías de *Data link*(capa 2) que faciliten redundancia y velocidad, como FDDI, FastEthernet (con enlaces redundantes), ATM (de las siglas en inglés Asynchronous Transfer Mode) y se selecciona todo el diseño con la velocidad en mente, procurando la latencia más baja y considerando protocolos con tiempos de convergencia más bajos. La capa núcleo es esencial para la interconectividad entre los dispositivos de la capa de distribución, por lo tanto, es importante que el núcleo sea sumamente disponible y redundante. La administración de estas redes es dominada por un pequeño grupo de empresas globales o transnacionales denominados *carriers* o proveedores de internet.

1.2.2. Redes de área metropolitana o capa de distribución

Estas redes conducen el tráfico dentro del dominio metropolitano y entre los POP's (puntos de presencia) de la capa núcleo. Proporciona un punto de conexión para redes independientes y controla el flujo de información entre las redes. Las funciones de esta capa son proveer ruteo, filtrado de paquetes, acceso a la red WAN y determinar qué paquetes deben llegar al núcleo. Además, determina cuál es la manera más rápida de responder a los requerimientos de red, por ejemplo, cómo traer un archivo desde un servidor.

El concepto de red de área metropolitana representa una evolución del concepto de red de área local a un ámbito más amplio, cubriendo áreas mayores que en algunos casos no se limitan a un entorno metropolitano.

En esta capa además se implementan las políticas de red, por ejemplo: ruteo, *access-list*, filtrado de paquetes, cola de espera, se implementa la seguridad y políticas de red, ruteo entre *vlands* y otras funciones de grupo de trabajo, se definen dominios de *broadcast* y *multicast*.

Los dispositivos de la capa de distribución controlan el tipo y la cantidad de tráfico que circula desde la capa de acceso hasta la capa núcleo. Las redes metropolitanas tradicionalmente han sido basadas en tecnología SDH/SONET, usando topologías de punto a punto o anillo con multiplexores de inserción o extracción ADM (de su traducción del inglés Add Drop Multiplexer).

Una red de área metropolitana puede ser pública o privada. Un ejemplo de MAN privada sería un gran departamento o administración con edificios distribuidos por la ciudad, transportando todo el tráfico de voz y datos entre edificios por medio de su propia MAN y encaminando la información externa por medio de los operadores públicos. Los datos podrían ser transportados entre los diferentes edificios.

Aplicaciones de vídeo pueden enlazar los edificios para reuniones, simulaciones o colaboración de proyectos. Un ejemplo de MAN pública es la infraestructura que un operador de telecomunicaciones instala en una ciudad con el fin de ofrecer servicios de banda ancha a sus clientes localizados en esta área geográfica.

Las redes de área metropolitana garantizan unos tiempos de acceso a la red mínimos, lo cual permite la inclusión de servicios síncronos necesarios para aplicaciones en tiempo real, donde es importante que ciertos mensajes atraviesen la red sin retraso incluso cuando la carga de red es elevada. Los servicios síncronos requieren una reserva de ancho de banda, tal es el caso del tráfico de voz y vídeo. Por este motivo las redes de área metropolitana son redes óptimas para entornos de tráfico multimedia, si bien no todas las redes metropolitanas soportan tráficos isócronos (transmisión de información a intervalos constantes).

1.2.3. Redes de acceso o capa de acceso

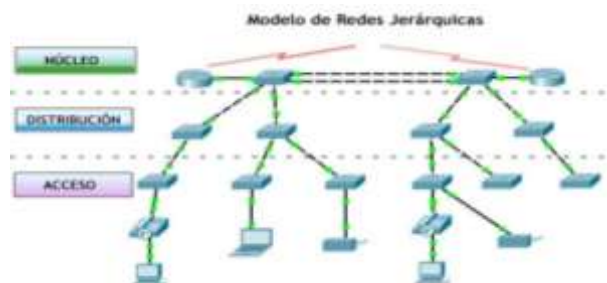
Estas redes están cerca del usuario final, al borde de las redes metropolitanas. Se caracterizan por diversos protocolos e infraestructuras y abarcan un amplio espectro de tasas de transferencia.

La gama de usuarios puede variar desde internet residencial hasta corporaciones e instituciones grandes. La finalidad de esta capa es la de permitir la conexión entre los dispositivos finales (computadoras, laptop, impresoras, teléfonos inteligentes) proporcionando un medio de conexión a través de conmutadores, enrutadores o *routers*, puentes y *accesspoint*.

El predominio del tráfico IP, con su naturaleza asimétrica e impredecible presenta muchos retos, especialmente con nuevas aplicaciones en tiempo real. Al mismo tiempo estas redes son requeridas para continuar soportando el tráfico heredado y protocolos distintos. Normalmente, la porción de red de la dirección IP será la misma para todos los dispositivos de una misma capa de acceso.

En general, la red de acceso acabaría en el lugar en que el tráfico de los usuarios individuales se trata, se agrega o se discrimina para ser encaminado mediante la red de transporte a su destino. En ciertas infraestructuras, una parte de la red de acceso no es individual sino común para un conjunto de usuarios. La figura 16 ilustra la topología de una red jerárquica.

Figura 16. **Distribución de equipos en redes jerárquicas**



Fuente: eltallerdelbit.com – redes jerárquicas. [Consulta: febrero de 2014].

1.3. Tecnologías para aumentar la capacidad

Debido a la alta demanda de redes con amplias capacidades y de costos limitados, los proveedores de servicios tienen dos opciones: instalar nueva infraestructura de red para soportar esta demanda o incrementar el ancho de banda efectivo en la infraestructura disponible.

Instalar nueva infraestructura, es el medio tradicional para ampliar la red, sin embargo, esta es una propuesta que genera costos muy elevados. La propuesta tiene sentido cuando se requiere expandir las bases de la red. Por otro lado, incrementar el ancho de banda efectivo resulta más rentable ya que es posible aprovechar los medios físicos que previamente se tienen instalados.

Para incrementar el ancho de banda efectivo se puede recurrir a las siguientes técnicas: multiplexación por división de tiempo y multiplexación por división de longitud de onda.

1.3.1. Multiplexación por división de tiempo

Usando la técnica de multiplexación por división de tiempo TDM (de las siglas en inglés Time Division Multiplexing), se puede enviar información por un solo canal varias comunicaciones simultáneas. A cada transmisor se le asigna una cantidad de espacios o slots de tiempo de la totalidad del ancho de banda disponible. Esto se logra organizando el mensaje de salida en unidades de información llamadas tramas y asignando intervalos de tiempo fijos dentro de la trama a cada canal de entrada.

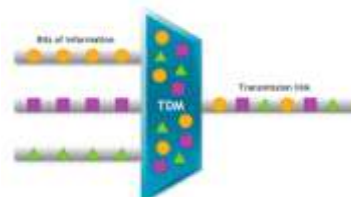
De esta forma, el primer canal de la trama corresponde a la primera comunicación, el segundo a la segunda y así sucesivamente, hasta que el n-ésimo más uno vuelva a corresponder a la primera.

Las señales de los diferentes canales de baja velocidad son probadas y transmitidas sucesivamente en el canal de alta velocidad, al asignarles a cada uno de los canales un ancho de banda, incluso hasta cuando este no tiene datos para transmitir.

El uso de esta técnica es posible cuando la tasa de los datos del medio de transmisión (ancho de banda) excede de la tasa de las señales digitales a transmitir. El multiplexor por división en el tiempo muestrea o explora cíclicamente las señales de entrada (datos de entrada) de los diferentes usuarios y transmite las tramas a través de una única línea de comunicación de alta velocidad.

Los multiplexores de división de tiempo son dispositivos de señal discreta y no pueden aceptar datos analógicos directamente, sino demodulados mediante un módem.

Figura 17. **Transmisión mediante TDM**



Fuente: Alcatel-Lucent. Transmission networks, WDM Technology Fundamentals. p. 11.

La técnica de TDM fue inventada con el fin de maximizar la cantidad de tráfico de voz que puede ser transportado sobre un medio. En las redes telefónicas antes que la multiplexación fuera implementada, cada llamada telefónica requería un enlace físico propio. Esto resultaba costoso y no era una solución escalable, usando multiplexación más de una llamada telefónica puede ser transportada por un mismo enlace físico.

TDM puede ser explicado haciendo analogía de una autopista, para transportar todo el tráfico de 4 afluentes hacia otra ciudad. El tráfico puede ser enviado sobre un carril, si los 4 afluentes están sincronizados entre sí para evitar colisiones en el camino.

Si cada uno de los afluentes coloca un carro en la autopista cada 4 segundos, la autopista tendría un carro a una tasa de 1 carro cada segundo. Siempre y cuando se sincronice la velocidad de todos los carros, no existirán colisiones. En el destino, los carros pueden ser retirados de la autopista y ser distribuidos a cada uno de los afluentes por el mismo mecanismo sincrónico, en reversa. Este es el principio utilizado en multiplexación por división TDM de tiempo al enviar datos sobre un enlace. TDM incrementa la capacidad del enlace dividiendo el tiempo en intervalos de tiempo menor para que los bits de múltiples señales de entrada puedan ser transportados por el enlace aumentando el número de bits transmitidos por segundo.

A pesar de las ventajas este método resulta ineficiente, debido a que cada intervalo de tiempo está reservado aun cuando no existen datos a transmitir. Este problema es solventado por multiplexación estadística utilizada en modo de transferencia asíncrona ATM.

Aunque ATM ofrece mejor utilización del ancho de banda, existen límites prácticos para la velocidad que puede ser alcanzada debido a requerimientos los equipos que transportan paquetes en las celdas ATM. La industria de las telecomunicaciones adopto la red óptica sincrónica SONET o estándar jerarquía sincrónica digital SDH(de las siglas en inglés Synchronous Digital Hierarchy) para transportar datos de la red TDM.

1.3.2. Multiplexación por división de longitud de onda

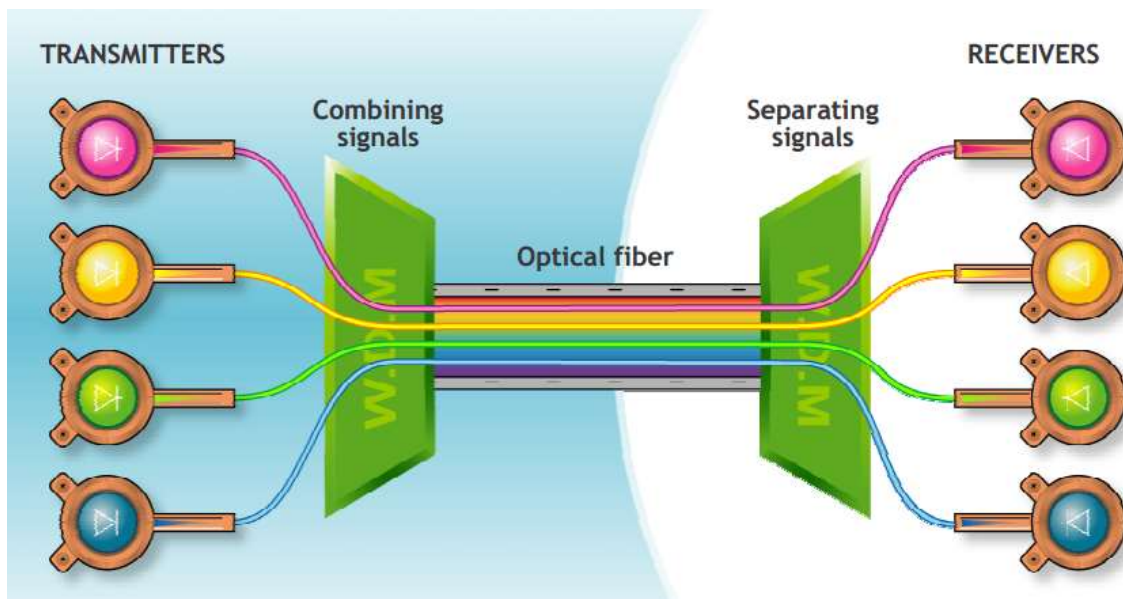
Usando multiplexación por división de longitud de onda se incrementa la capacidad del medio físico utilizando un método completamente diferente que TDM.WDM asigna señales ópticas entrantes a específicas frecuencias de luz, longitudes de luz o lambdas, dentro de una cierta banda de frecuencias.

Este tipo de multiplexación se asemeja estrechamente a la manera en que las estaciones de radio transmiten en diferentes longitudes de onda sin interferirse entre sí. Debido a que cada canal es transmitido a diferente frecuencia, se pueden separar o filtrar utilizando un sintonizador. Otra manera en la que se puede explicar WDM es que cada canal es un color diferente de luz, varios canales forman un arcoíris.

En los sistemas WDM, cada una de las longitudes de onda es transmitida sobre la fibra óptica y las señales son demultiplexadas en el punto final. Como en el caso de TDM, la capacidad resultante es un total de las señales de entrada, pero la diferencia es que WDM transporta cada señal independientemente una de otra.

Esto significa que cada canal tiene su propio ancho de banda dedicado y todas las señales llegan al mismo tiempo, en lugar de ser divididas y transportadas en intervalos de tiempo. Una diferencia fundamental entre TDM SDH y WDM es que WDM puede transportar múltiples protocolos sin un formato de señal común.

Figura 18. **Multiplexación por división de longitud de onda**



Fuente: Alcatel-Lucent. Transmission networks, WDM Technology Fundamentals. p. 13.

1.3.3. Evolución de la red

SDHTDM toma señales síncronas y asíncronas y las multiplexa a una señal con una velocidad de bit mayor para transmitirla a una sola longitud de onda sobre fibra óptica. Puede ser necesario convertir las señales de entrada de eléctricas a ópticas o viceversa antes de ser multiplexadas.

WDM toma múltiples señales ópticas, las asigna a longitudes de onda individuales y multiplexa las longitudes de onda sobre una sola fibra óptica. Desde los puntos de vista técnico y económico, la habilidad de proveer una capacidad de transmisión potencialmente ilimitada es la mayor ventaja de la tecnología WDM.

Al utilizar WDM se aprovecha la infraestructura de fibra óptica previamente instalada pero no es posible optimizarla por un factor de al menos 32. Dependiendo de la demanda de la red, se puede agregar mayor capacidad, ya sea realizando actualizaciones a los equipos o incrementando el número de lambdas sobre la fibra óptica, sin costosas actualizaciones. Se puede obtener capacidad costeadando equipos mientras que la inversión realizada previamente en la fibra óptica es conservada. Haciendo a un lado el ancho de banda, las ventajas técnicas más convincentes de WDM pueden resumirse en transparencia, escalabilidad y aprovisionamiento dinámico.

- Es transparente debido a que WDM se ubica en la capa física y puede soportar formato TDM, ATM, Gigabit Ethernet, ESCON y *FiberChannel* con interfaces abiertas sobre una capa física común sin necesidad de realizar cambios.

- WDM es escalable porque con la abundancia de fibras oscuras en redes MAN y empresariales puede satisfacer rápidamente la demanda de capacidad en enlaces punto a punto o en tramos de anillos existentes para SDH/SONET.
- WDM es de aprovisionamiento dinámico debido a la facilidad, rapidez y simplicidad que brinda en las conexiones de red a los proveedores de redes para entregar servicios de banda ancha en días en lugar de meses.

2. MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA

2.1. WDM

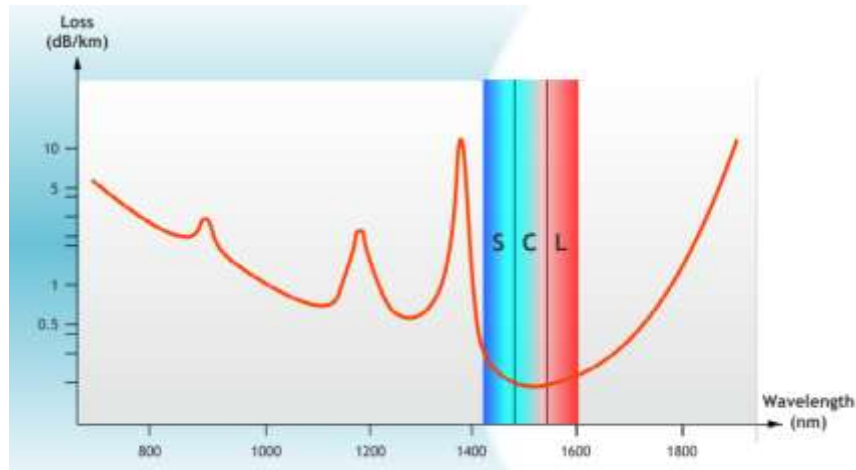
La multiplexación por división de longitud de onda es una tecnología que multiplexa varias señales ópticas sobre un solo medio de transmisión, fibra óptica, mediante distintas portadoras ópticas o lambdas de diferente longitud de onda. Se utiliza como fuente de luz un diodo emisor de luz o láser.

2.1.1. Conceptos generales

En WDM las señales eléctricas son convertidas a señales ópticas mediante diodos láser cuya longitud de onda se encuentra dentro de un rango permitido para realizar la multiplexación. ITU-T 692 estandariza longitudes de onda para WDM que van desde 1 310 hasta los 1 550 nanómetros donde la distancia entre los distintos canales que ocupan la misma fibra óptica es de 0,8 y 1,6 nanómetros o bien 100 y 200 gigahertz.

Este rango de frecuencias fue establecido debido a que dentro de este rango las pérdidas en la fibra óptica son mínimas, exceptuando pérdidas a los 1 400 nanómetros debido a las cualidades físicas del material. En el rango de frecuencias establecido, la atenuación media es de entre 0,2 y 0,5 decibelios por kilómetro. La figura 19 muestra la relación entre longitud de onda y atenuación en una fibra óptica.

Figura 19. **Rango de frecuencias *versus* atenuación en fibra óptica**



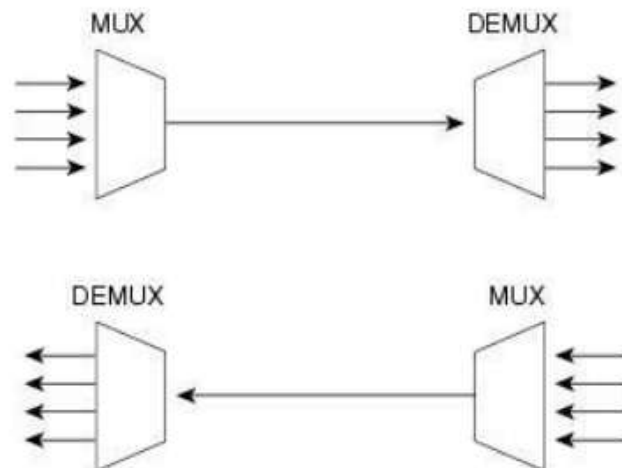
Fuente: Alcatel-Lucent. Transmission networks, WDM Technology Fundamentals. p. 20.

Debido al espaciamiento entre canales en WDM, se pueden encontrar sistemas con 4, 8, 16, 32 e incluso 80 canales ópticos. Esto permite alcanzar capacidades de 10, 20, 40, 80 y 200 gigabit por segundo, esto es equivalente a tener capacidades de 2,5 gigabit por segundo por canal. Los láser utilizados en WDM son iguales a los que se utilizan en comunicaciones de larga distancia, el ancho espectral necesario depende del número de canales usados en cada uno de los sistemas a implementar y de la tolerancia de sus componentes. Cuanto más estrecho es el ancho espectral, mejor es el láser, pero esto implica un dispositivo de un costo más elevado.

2.1.1.1. Multiplexación y demultiplexación

Las señales de los sistemas WDM provienen de varias fuentes y utilizan un único medio de transmisión. Esta función es cumplida por un multiplexor, quien toma las señales ópticas de distintas fuentes y las une en una sola señal. En el lado del receptor, el sistema debe ser capaz de descomponer la señal en sus componentes originales para que cada señal inicial pueda ser detectada. El proceso contrario a la multiplexación se denomina demultiplexación; el demultiplexor debe realizar esta función antes que la señal sea detectada ya que el dispositivo fotodetector es de banda ancha y no son capaces de seleccionar una longitud específica de una señal multiplexada. La figura 21 muestra los esquemas de multiplexación y demultiplexación.

Figura 20. Multiplexación, demultiplexación

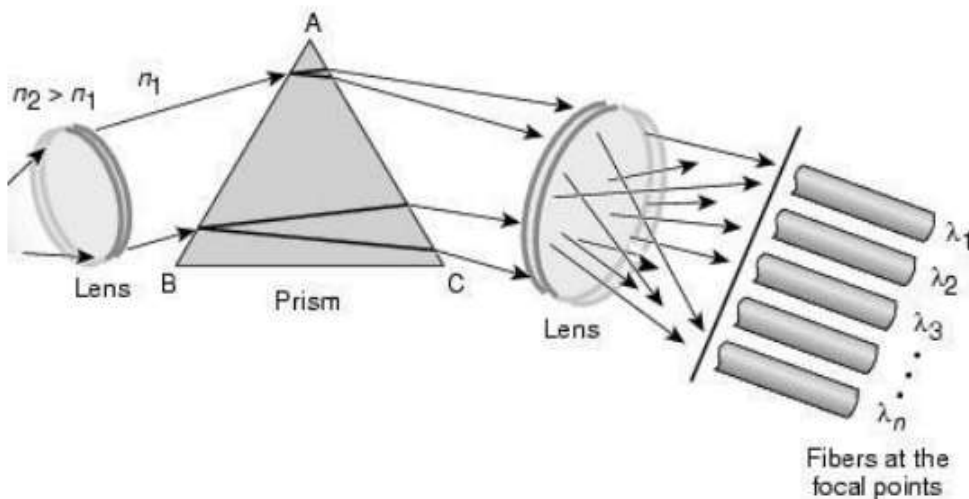


Fuente: Chavarria, Gerson; Ramirez, Cristian. *Trabajo de redes de telecomunicaciones tecnología WDM*, Universidad de Santiago de Chile. p. 9.

- Demultiplexación por medio de prisma

Para multiplexar y demultiplexar señales ópticas se utilizan bastantes técnicas entre las cuales se pueden utilizar prismas, por difracción o por filtrado. Cuando se utiliza el prisma para demultiplexar se hace pasar un rayo de luz policromático por este y las longitudes de onda son refractadas en ángulos diferentes. Estos rayos luego son enfocados por un lente hasta la conexión con el punto de entrada a la fibra óptica que transportará la señal. El mismo principio es aplicado cuando se quieren multiplexar señales ópticas únicamente que a la inversa, las longitudes de onda son enfocadas por el lente hacia el prisma donde se convierten en una sola señal. La figura 21 muestra el proceso de demultiplexación de luz por medio de un prisma.

Figura 21. **Demultiplexación por medio de prisma**

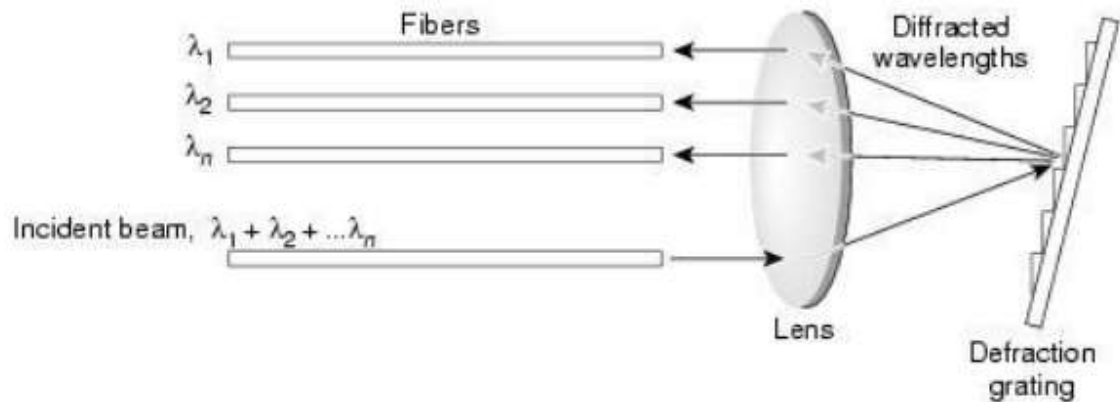


Fuente: Chavarria, Gerson; Ramirez, Cristian. *Trabajo de redes de telecomunicaciones tecnología WDM*, Universidad de Santiago de Chile. p. 10.

- Demultiplexación por medio de difracción

La multiplexación por difracción se basa en el principio de difracción de la luz, se hace incidir un rayo policromático de luz sobre un arreglo de finas líneas que reflejan o transmiten la luz, cada longitud de onda se difracta de manera diferente en la rejilla lo que hace que se dispersen hacia sitios diferentes en el espacio para luego ser enfocados con un lente hacia la fibra óptica correspondiente. La multiplexación por medio de filtros es una técnica sencilla y consiste en sobreponer filtros en cascada hasta que solo una longitud de onda pase. Su uso no es muy práctico cuando se trabaja con un sistema con muchas longitudes de onda ya que se requieren muchos filtros colocados en cascada. La figura 22 muestra un esquema de demultiplexación por medio de difracción.

Figura 22. **Demultiplexación por medio de difracción**



Fuente: Chavarria, Gerson; Ramirez, Cristian. *Trabajo de redes de telecomunicaciones tecnología WDM*, Universidad de Santiago de Chile. p. 10.

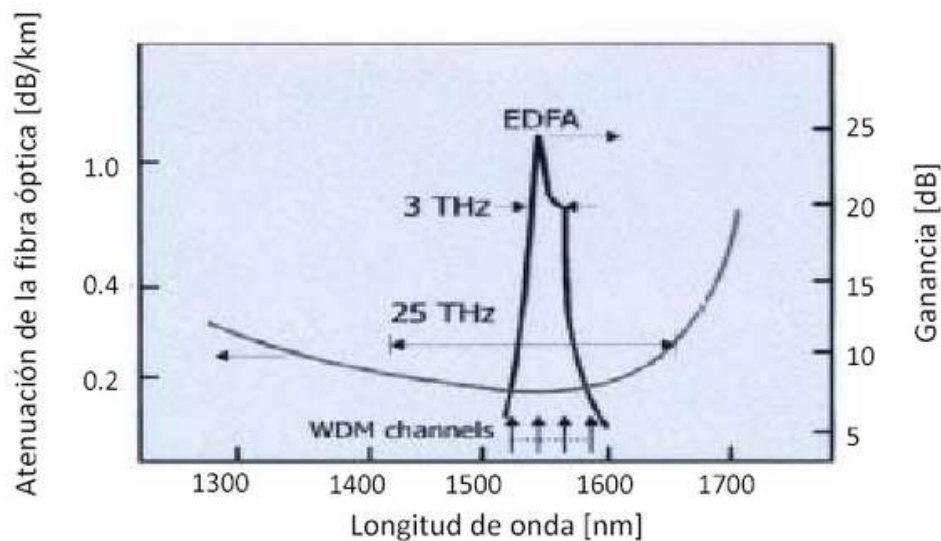
2.1.1.2. Transmisión y amplificación

La tecnología WDM permite transmitir información en un amplio rango de distancias entre el punto emisor y receptor. En distancias cortas la atenuación de la fibra y la dispersión no presentan gran problema, para una longitud de onda de 1 500 nanómetros la atenuación es mínima y para la longitud de onda de 1 300 nanómetros la dispersión es mínima. Sin embargo, cuando se trabaja con grandes distancias, la atenuación y dispersión son factores a tomar en cuenta y se requiere el uso de amplificadores y repetidores. Estos transforman la señal de óptica a eléctrica, amplificando esta última y por medio de un diodo laser la transforman a óptica nuevamente para inyectarla a la fibra óptica con mayor potencia que con la que fue recibida.

Este proceso de amplificación descrito es complejo e introduce retardos debido a los dispositivos electrónicos que son necesarios para ellos. Este problema puede ser solucionado si todo el camino es óptico y utilizando repetidores y amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio es posible, se evita el proceso de conversión eléctrico-óptico y viceversa. El funcionamiento se basa en la posibilidad de amplificar una señal óptica de una longitud de onda de 1 500 nanómetros, según la prueba realizada por la Universidad de Southampton. La señal se pasa por una fibra de 3 metros de longitud dopada con iones de erbio e inyectando luz láser de 650 micrómetros, fenómeno conocido como bombeo o *pumping*, consiguiendo de esta manera hasta 125 decibelios de ganancia.

En la actualidad, los repetidores y amplificadores ópticos comerciales utilizan un láser con una longitud de onda de 980 o 1 480 micrómetros en lugar de los 650 micrómetros originales. Al realizar conexiones de amplificadores en cascada se debe tomar en cuenta la aparición de varios efectos que pueden distorsionar la señal: ganancia no lineal dinámica de los amplificadores, generación de fluctuación de potencia, ruido introducido por los amplificadores y dependencia de efectos de polarización. Los amplificadores dopados con erbio tienen un rango de funcionamiento limitado en cuanto a la longitud de onda de las señales que procesa y debe ser tomado en cuenta al momento de diseñar los sistemas.

Figura 23. **Rangos de frecuencia amplificadores dopados con erbio**



Fuente: <http://es.convdocs.org/docs/index-71769.html>. [Consulta: marzo de 2014].

2.1.1.3. Interconexiones

Para crear redes generales basadas en WDM se quiere algún tipo de elemento que permita realizar interconexiones para crear estas redes. Se puede considerar los elementos de interconexión: estrella pasiva, *router* pasivo, *switch* de división de espacio, *switch* activo y multiplexores *add-drop*. La estrella pasiva es un elemento utilizado para generar *broadcast*, la señal es introducida en una determinada longitud de onda desde un punto de entrada y su potencia es dividida entre todos los puntos de salida de la estrella. Las señales de salida en todos los puntos tendrán la misma longitud de onda y forma que la señal de entrada, con la única diferencia en que la potencia será menor debido a la división que se realiza en la entrada.

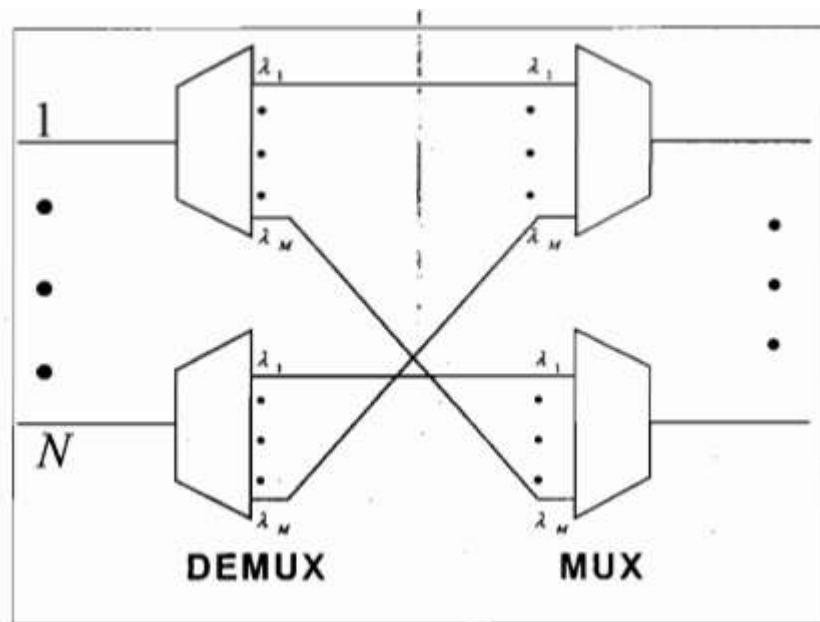
- Interconexión por estrella pasiva

Una estrella pasiva $N \times N$, de N longitudes de onda y N puertos de fibra óptica, puede direccionar hasta N conexiones simultáneas a través de sí. Se tendrá lugar a colisiones con las señales cuando dos o más señales de igual longitud de onda sean introducidas en la entrada de la estrella. La diferencia de una estrella pasiva con un *router* pasivo es que este último puede encaminar de forma independiente varias señales de entrada a distinta longitud de onda hacia varios puertos de salida. Para realizar esto el dispositivo debe ser capaz de demultiplexar las distintas longitudes de onda recibidas para luego multiplexarlas a cada uno de los puertos de salida deseados. La manera más sencilla de construir estos dispositivos es con multiplexores y demultiplexores.

- Interconexión por enrutador pasivo

La forma en la que se enrutan o encaminan las señales de entrada a los distintos puertos de salida se realiza de forma pasiva, es decir, se establecen las conexiones internamente y estas no pueden modificarse dinámicamente. Para un *router* pasivo con N entradas y N longitudes de onda, pueden direccionarse hasta $N \times N$ conexiones simultáneas a través del dispositivo. Sin embargo, este tipo de dispositivos no soportan realizar transmisiones tipo *broadcast* de las señales de entrada. Las conexiones entre los multiplexores y demultiplexores realizadas para crear este tipo de *routers* son realizadas dependiendo de la conveniencia para el sistema que se esté implementando.

Figura 24. **Topología de interconexión por enrutador pasivo**

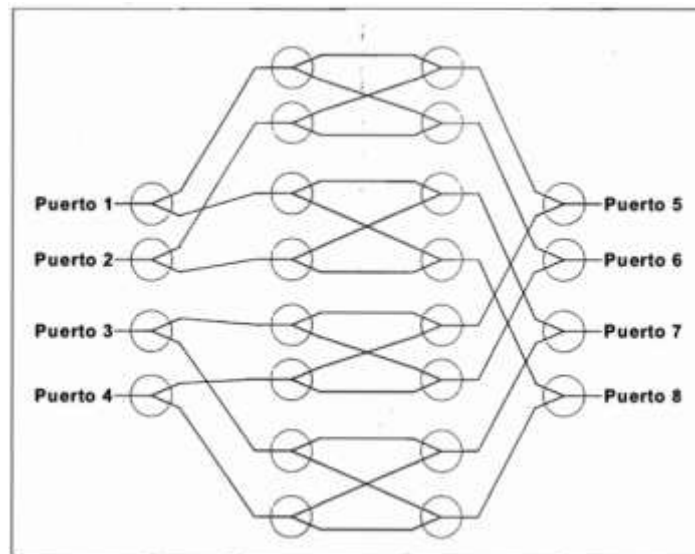


Fuente: Rivera, Cheryl. Multiplexación por división de longitud de onda, Universidad Francisco Marroquín. p. 110.

- Interconexión por conmutador de división de espacio

Este dispositivo fue diseñado para permitir que cualquier puerto de entrada pueda ser interconectado hacia cualquier puerto de salida. Son fabricados por interruptores ópticos digitales. Solamente una longitud de onda puede estar presente en cualquiera de las fibras ópticas de entrada, la diferencia es que esta señal debe ser multiplexada antes de ingresar al sistema. Este dispositivo puede funcionar de manera bidireccional de manera que los puertos que están conectados pueden ser utilizados en ambas direcciones. Estos elementos no son sensibles a la longitud de onda por lo que cambian de un puerto a otro sin que esto altere el funcionamiento del dispositivo.

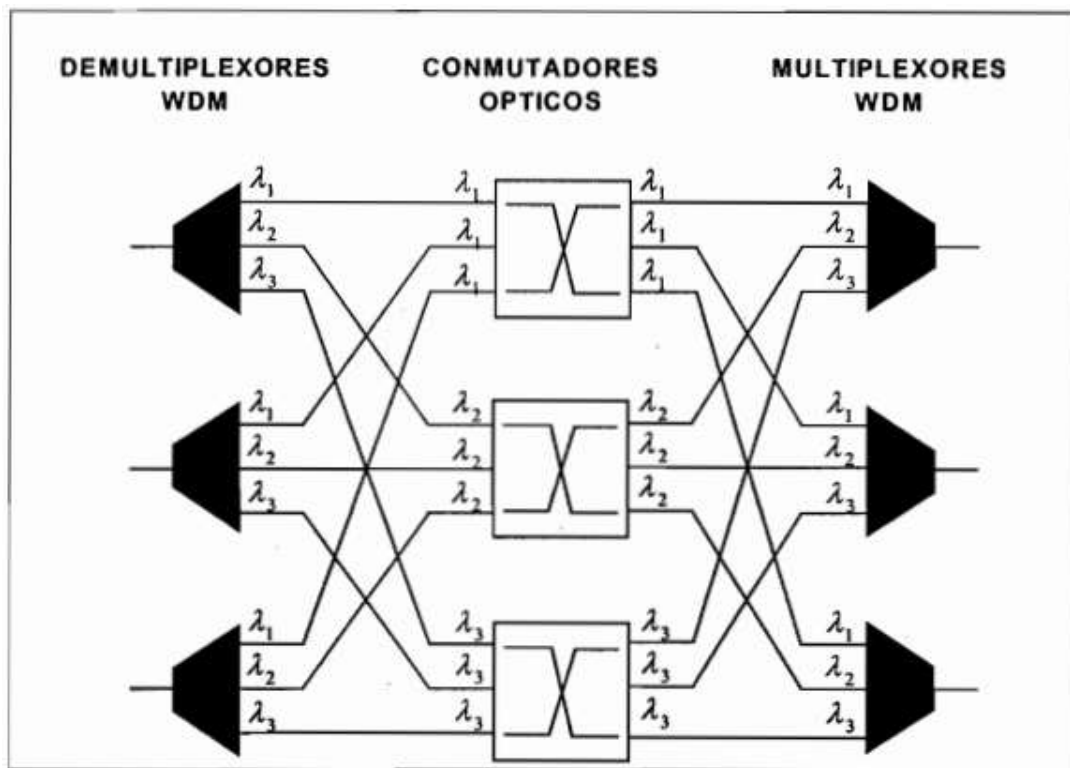
Figura 25. **Topología de interconexión por conmutador de división de espacio**



Fuente: Rivera, Cheryl. Multiplexación por división de longitud de onda, Universidad Francisco Marroquín. p. 111.

El *switch* activo se forma combinando a un *router* pasivo con una serie de *switch* de división espacial, con esto se consigue que las interconexiones entre los puertos de entrada y salida puedan ser reconfigurados electrónicamente. Dependiendo del tipo de conectores que se utilicen, la reconfiguración de los puertos de entrada y de salida puede llevarse a cabo por una computadora. Los dispositivos multiplexores *add-drop* permiten añadir o retirar un canal de una multiplexación de canales WDM sin interferir sobre dichos canales.

Figura 26. **Topología de interconexión por medio de conmutador activo**



Fuente: Rivera, Cheryl. Multiplexación por división de longitud de onda, Universidad Francisco Marroquín. p. 112.

2.1.2. Variedades de WDM

En WDM se distinguen típicamente cuatro familias de sistemas: DWDM de ultra larga distancia, DWDM de larga distancia, DWDM metropolitano, y CWDM. Las cuatro familias de sistemas WDM utilizan componentes ópticos distintos, siendo más complejos y caros los que soportan mayores capacidades por canal y agregadas, y los que soportan mayores distancias de transmisión.

2.1.2.1. CWDM

CWDM significa multiplexación por división en longitudes de onda ligeras, (de su traducción del inglés *coarse wavelength division multiplexing*). Se utilizó a principio de los 80 para transportar señales de video CATV en conductores de fibra mutil-modo, fue estandarizado por la ITU-T en recomendación de la norma G.694.2 en el 2 002.

Se basa en una separación de longitudes de onda de 20 nanómetros o 2 500 gigahertz en el rango de 1 270 a 1 600 nanómetros pudiendo así transportar hasta 18 longitudes de onda en una única fibra óptica monomodo. Estos sistemas tienen dos características importantes, y es que permiten emplear componentes más sencillos y por lo tanto resultan más baratos que en otros sistemas ópticos y mayor espaciamiento de longitudes de onda.

Debido al espaciamiento entre las longitudes de onda se pueden utilizar láser con mayor ancho de banda espectral y no necesariamente que sean dispositivos estabilizados, es decir, que la longitud de onda central puede desplazarse debido a imperfecciones de fabricación o cambios de temperatura a la que el láser está sometido y, aun así, estar en banda.

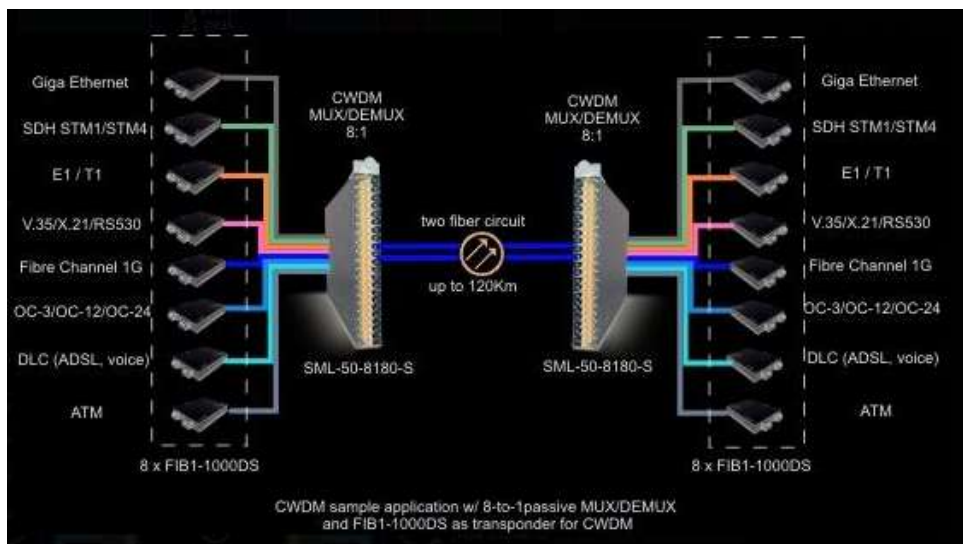
Esto permite fabricar dispositivos láser siguiendo procesos menos críticos y que dichos láser no tengan sofisticados circuitos de refrigeración para corregir posibles desviaciones de la longitud de onda debido a cambios de temperatura a la que está sometido el chip; lo que reduce el espacio, potencia y coste de fabricación.

Normalmente en CWDM se utilizan dispositivos láser de retroalimentación distribuida, modulados directamente y soportando velocidades de canal de hasta 2,5 gigabit por segundo sobre distancias de hasta 80 kilómetros. CWDM utiliza filtros ópticos, multiplexores y demultiplexores basados en la tecnología de película delgada TFF donde el número de capas del filtro se incrementa cuando el espaciamiento entre canales es menor. Esto supone una mayor capacidad de integración y reducción de costos. Estos filtros CWDM de banda ancha admiten variaciones en la longitud de onda nominal de la fuente de hasta ± 7 nanómetros y están disponibles generalmente como filtros de uno o dos canales.

Se cuenta con un mayor espectro óptico y permite que el número de canales susceptibles de ser utilizados no se vea radicalmente disminuido a pesar de aumentar la separación entre ellos. Esto es posible porque en CWDM no se utilizan amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio como ocurre en otros sistemas para distancias mayores a 80 kilómetros. Cuando es necesario, los sistemas CWDM utilizan regeneración para cubrir las grandes distancias o número de nodos en cascada a atravesar, es decir, que cada uno de los canales sufre una conversión óptico-eléctrico-óptico de forma totalmente independiente al resto para ser amplificado. El costo de la optoelectrónica en CWDM es tal, que es más simple y de menor costo regenerar que realizar la amplificación.

Los regeneradores realizan por completo las funciones de amplificación, reconstrucción de la forma de la señal y temporización de la señal de salida, los cuales compensan toda la dispersión acumulada. Esto no sucede en la amplificación óptica, a no ser que se utilicen fibras con compensación de dispersión de un alto costo de adquisición, y además, suelen requerir de una etapa de preamplificación debido la alta atenuación que introducen al sistema. CWDM es sencillo en cuanto a diseños de red, implementación y operación, trabaja con pocos parámetros que necesiten la optimización por parte del usuario. CWDM puede admitir topologías de anillo punto a punto y redes ópticas pasivas. Puede transportar cualquier servicio de corto alcance como: SDH, CATV, ATM, FTTH – PON, 10 Gigabit por segundo, entre otros.

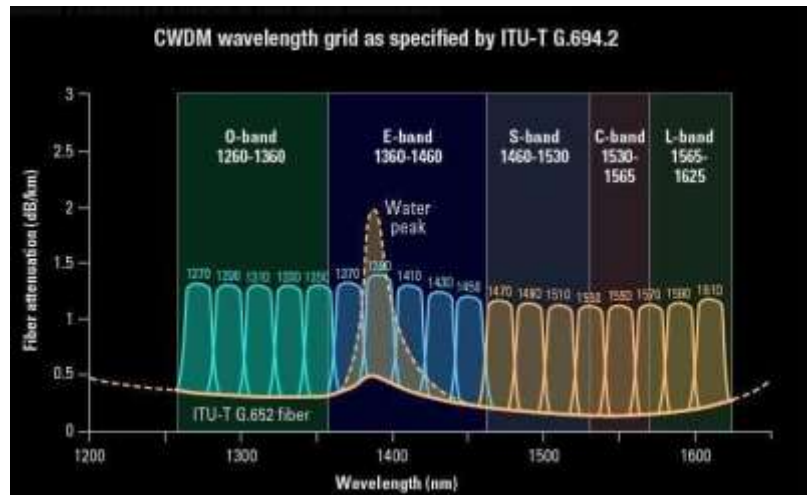
Figura 27. Sistema de comunicación con CWDM



Fuente: <http://optica.conocimientos.com.ve/2011/09/tecnologias-dwdm-cwdm.html>.

[Consulta: marzo de 2014].

Figura 28. **Distribución de canales ópticos en CWDM**



Fuente: <http://optica.conocimientos.com.ve/2011/09/tecnologias-dwdm-cwdm.html>.

[Consulta: marzo de 2014].

2.1.2.2. DWDM

DWDM significa multiplexación por división en longitudes de onda densas (de su traducción del inglés Dense Wavelength Multiplexing). Es una técnica para transmisión de señales a través de fibra óptica usando la banda C de 1 500 nanómetros. Varias portadoras ópticas se transmiten por una única fibra óptica utilizando distintas longitudes de onda de un haz láser cada una de ellas. Cada portadora óptica forma un canal óptico que puede ser tratado independientemente del resto de canales que comparten el medio y así mismo contener distinto tráfico.

2.2. DWMD Multiplexación por división de longitudes de ondas densas

Es una técnica de transmisión de señales a través de fibra óptica usando la banda C (1 550 nanómetros), se encarga de transportar múltiples señales de luz en un solo cable, utilizando portadoras ópticas de diferente longitud de onda, usando luz procedente de un láser o un led.

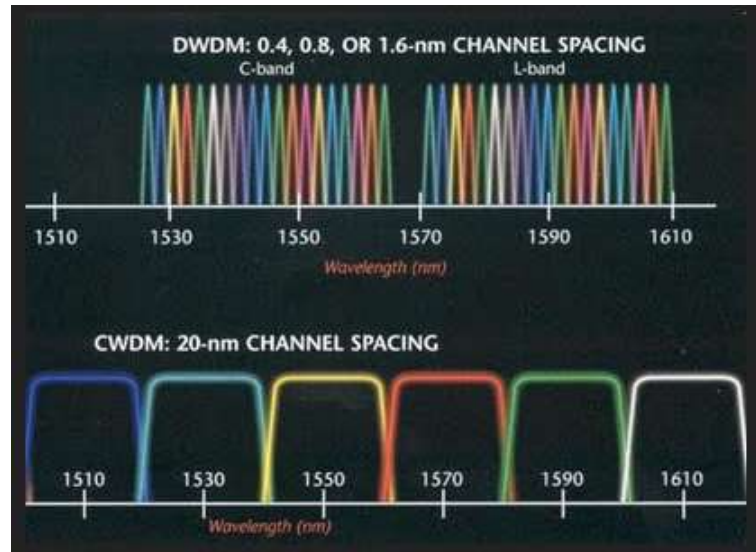
2.2.1. Definición del sistema

Cada portadora óptica es un canal óptico distinto, transportan distinto tráfico y comparten el mismo medio. De esta manera se puede multiplicar el ancho de banda efectivo de la fibra óptica, así como facilitar comunicaciones bidireccionales, permite aumentar su capacidad sin tender más cables ni abrir zanjas.

Para transmitir mediante DWDM es necesario dos dispositivos complementarios: un multiplexor en lado transmisor y un demultiplexor en el lado receptor. A diferencia del CWDM, en DWDM se consigue mayor número de canales ópticos reduciendo la dispersión cromática de cada canal mediante el uso de láser de mayor calidad, fibras de baja dispersión o mediante el uso de módulos que compensen la dispersión.

De esta manera es posible combinar más canales reduciendo el espacio entre ellos. Actualmente se pueden conseguir 40, 80 o 160 canales ópticos separados entre sí 100, 50 o 25 gigahertz respectivamente.

Figura 29. **Canales ópticos en DWDM y CWDM**



Fuente: <http://optica.conocimientos.com.ve/2011/09/tecnologias-dwdm-cwdm.html>.

[Consulta: marzo de 2014].

El campo de aplicación de DWDM se encuentra en redes de larga distancia de banda ultra-ancha, así como en redes metropolitanas o interurbanas de muy alta velocidad. A medida que crece la implantación de DWDM su costo va decreciendo progresivamente, debido básicamente a la gran cantidad de componentes ópticos que se fabrican. Consecuentemente, se espera que DWDM se convierta en una tecnología de bajo costo que permita su implantación en muchos tipos de redes. La tecnología DWDM requiere dispositivos ópticos especializados basados en las propiedades de la luz y en las propiedades ópticas, eléctricas y mecánicas de los semiconductores. Entre estos dispositivos ópticos se incluyen transmisores ópticos, ADC y OXC.

Mediante los sistemas DWDM se transmite una gran cantidad de servicios simultáneamente como por ejemplo: voz, video y multimedia. Los formatos en los cuales trabajan pueden ser SONET, SDH, ATM, *Internet Protocol* (IP), *Packet Over SONET/SDH* (PoS) o Gigabit Ethernet (GigE). Emplean los últimos avances en la tecnología óptica para generar un gran número de longitudes de onda en el rango cercano a 1 550 nanómetros.

La ITU-T en su recomendación G,692 define 43 canales en el rango de 1 530 a 1 565 nanómetros con un espaciamiento de 100 gigahertz, cada canal transportará tráfico a 10 gigabit por segundo.

Los sistemas comerciales DWDM presentan 16, 40 y 80 canales y se prevé el desarrollo de sistemas de 128 canales. Los sistemas con 40 canales presentan un espaciado entre canales de 100 gigahertz, los que tienen 80 canales tienen un espaciado de 50 gigahertz. Este espaciado en frecuencia indica la proximidad de los canales entre sí.

Un canal no utiliza solamente una única longitud de onda, cada canal tiene un determinado ancho de banda alrededor de la longitud de onda central, cada banda se separa de la siguiente por una banda de guarda de varios gigahertz, de esta manera se busca evitar posibles traslapes o interferencias entre canales adyacentes. Un sistema DWDM de 40 canales a 10 gigabit por segundo por canal proporciona una velocidad agregada de 400 gigabit por segundo.

Estos problemas se deben a derivas en los emisores láser por la temperatura o el tiempo, a que los amplificadores ópticos no presentan una ganancia constante para todas las longitudes de onda y a los posibles efectos de dispersión, entre otros. El número de canales depende también del tipo de fibra óptica empleada. Un único filamento de fibra monomodo puede transmitir datos a una distancia aproximada de 80 kilómetros sin necesidad de amplificación. Colocando 8 amplificadores ópticos en cascada, la distancia puede aumentar a 640 kilómetros.

2.2.2. Espectro de luz sobre la fibra óptica

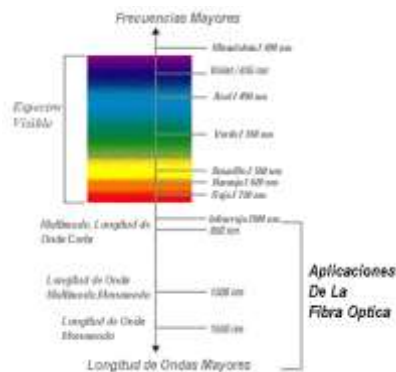
La radiación electromagnética puede ordenarse en un espectro que va desde las ondas de frecuencia sumamente alta y longitud de onda corta a frecuencia sumamente baja y longitud de onda larga. La diferencia de las radiaciones en las diferentes partes del espectro electromagnético es una cantidad que puede ser medida de varias maneras: como una longitud de onda, como la energía de un fotón o como la frecuencia de oscilación de un campo electromagnético. En el campo de la óptica es común hablar de longitud de onda. La luz es una onda electromagnética y por ende dicha onda puede oscilar en diferentes frecuencias, precisamente esta define el color.

La luz blanca está compuesta por todas las longitudes de onda, la cual al pasar por un prisma (medio óptico) se difracta en diferentes ángulos según su longitud de onda descomponiéndose así en colores. La región óptica, donde la fibra óptica y los elementos ópticos trabajan incluye la luz visible al ojo humano que va desde las longitudes de ondas de los 400 a 700 nanómetros que están cercanos a la zona infrarroja y ultravioleta, que tienen propiedades similares.

En líneas generales se está hablando de longitudes de onda que van desde los 200 a 20 000 nanómetros (0,2-20 milímetros). Las longitudes de onda normalmente usadas en comunicaciones en las fibras están entre los 700 – 1 600 nanómetros.

Las fibras de sílica y vidrio pueden transmitir la luz visible sobre distancias cortas y ciertas clases de fibra llamadas de cuarzo fundido pueden transmitir luz cercana a la luz ultravioleta sobre distancias cortas. Las fibras plásticas típicas transmiten mejor una longitud de onda visible que al infrarrojo cercano, por lo que las comunicaciones sobre las fibras de plástico típica es con luz visible. Sin embargo, la fibra de plástico no es tan transparente como el vidrio de sílica. Las fibras pueden ser fabricadas con otros materiales diferentes a la sílica de tal manera que pueden transmitir longitudes de ondas mayores que el infrarrojo.

Figura 30. **Distribución del espectro electromagnético en comunicaciones ópticas**



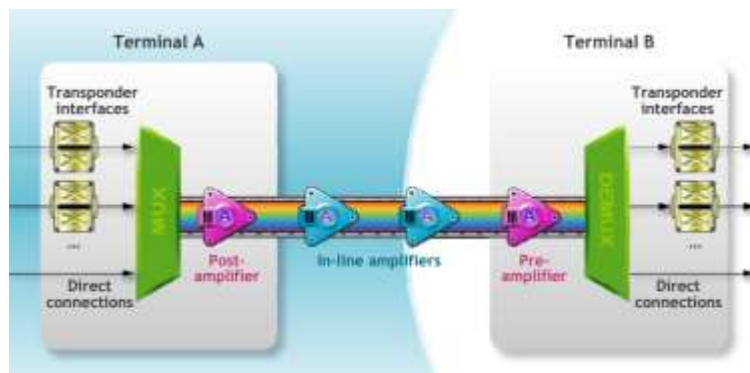
Fuente: <http://fortiz.8k.com/ConceptosBasicos/tema03-EspectroElectromagnetico.html>.

[Consulta: marzo de 2014].

2.2.3. Componentes del sistema

Una red óptica basada en la técnica de multiplexación DWDM se compone de 5 elementos principales: el transmisor o fuente de luz, multiplexor y demultiplexor, amplificadores, fibra óptica y el receptor o detector de luz. Al aplicar el modelo OSI en DWDM, se puede definir que trabaja a nivel de la capa 1 o capa física, es decir que, permite el intercambio de las unidades básicas de información bits sobre canales de transmisión, además es importante señalar que la capa 1 define las conexiones mecánicas requeridas para la activación, mantención o desarticulación.

Figura 31. Componentes de un sistema DWDM



Fuente: Alcatel-Lucent. Transmission networks, WDM Technology Fundamentals. p. 26.

2.2.3.1. Fuentes y detectores de luz

Son los dispositivos que representan los puntos finales de un sistema de telecomunicaciones basado en tecnología óptica. Los emisores o fuentes de luz son los transponedores de transmisión y son los encargados de convertir las señales eléctricas a pulsos ópticos a una frecuencia determinada (longitud de onda), a diferencia de los detectores de luz o transponedores de recepción que reciben las señales ópticas y las convierten en señales eléctricas. Dentro de los emisores existen dos categorías de dispositivos que son los diodos emisores de luz o led y los diodos láser.

Los ledes se utilizan frecuentemente en fibras multimodo y su ancho de banda es relativamente bajo, por sobre el orden de los gigabit por segundo. Además la luz que viaja a lo largo de la fibra es bastante ancha en el espectro, para ser utilizada por la tecnología DWDM. El diodo láser funciona mejor con las fibras monomodo, el haz de luz que emiten estos diodos es monocromático, lo que implica que su espectro es ancho y así su ancho de banda sea mayor. El láser se comporta de mejor manera que el led, el láser *distributed feedback* presenta mejores características para ser implementado en DWDM. Emite una luz con características muy cercanas a la luz monocromática por lo que presenta un mayor ancho de banda y una favorable relación señal a ruido.

Los detectores de luz, deben recuperar la señal transmitida a diferentes longitudes de onda. Debido a que los fotodetectores, son dispositivos de banda ancha, las señales de carácter óptico deben ser demultiplexadas antes de llegar al detector.

Tal como en el caso del emisor de luz tipo láser, también existen clases de detectores de luz, que principalmente son dos, los fotodiodo positivo intrínseco negativo PIN (de su traducción del inglés Positive -Intrinsic-Negative) y foto diodo de avalancha APD (de su traducción del inglés Avalanche Photodiode).

Los PIN funcionan como los led pero con funciones inversas, la luz es absorbida en vez de ser emitida y los fotones se convierten a electrones con una relación 1:1.

Los APD son dispositivos similares a los fotodiodos PIN pero con la diferencia de que tienen una ganancia de potencia debido a un proceso de amplificación. Los fotodiodos PIN son baratos y confiables mientras que los APD son más sensibles y precisos pero su funcionamiento se ve afectado por la temperatura.

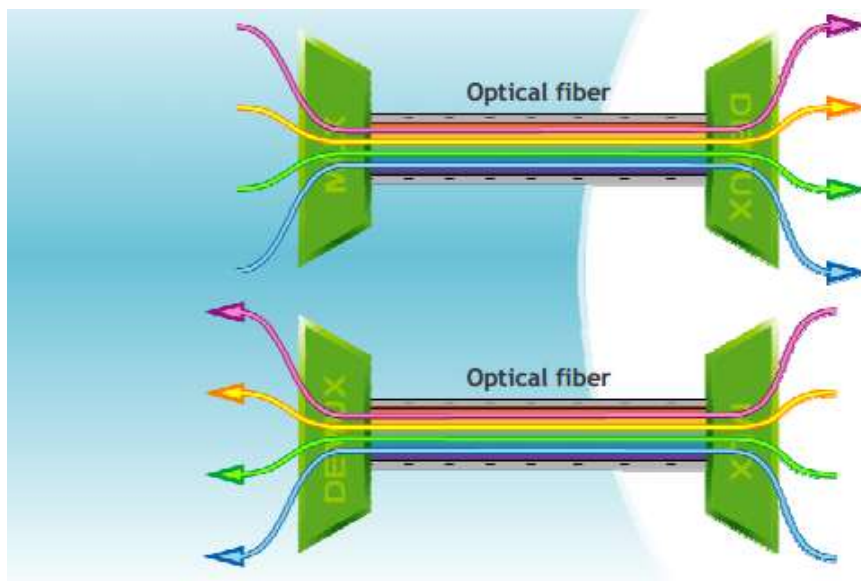
Sin embargo, estos últimos pueden encontrar uso en sistemas con requerimientos especiales. Se trata de una unión PN polarizada fuertemente en inversa cerca de la región de ruptura lo que origina un efecto multiplicativo de la corriente generada. Su utilización es escasa debido a las elevadas tensiones de polarización, centenares de voltios, que lo hacen desaconsejable.

2.2.3.2. Multiplexores y demultiplexores

Debido a que los sistemas DWDM envían señales de distintas fuentes ópticas sobre una sola fibra óptica, por lo que deben incluir algún dispositivo que se encargue de combinar las señales entrantes. Esto es realizado por un multiplexor, el cual toma las distintas longitudes de onda de múltiples fibras y las converge en un solo haz de luz.

En el extremo receptor, el sistema debe ser capaz de separar los componentes de la luz para que puedan ser detectados discretamente. Los demultiplexores realizan esta función de separar el haz de luz recibido en las longitudes de onda que la componen y guiarlos a fibras ópticas individuales.

Figura 32. Multiplexación y demultiplexación en DWDM



Fuente: Alcatel-Lucent. Transmission networks, WDM Technology Fundamentals. p. 28.

La demultiplexación se debe realizar antes que la luz sea detectada ya que los fotodetectores son de banda ancha y no pueden detectar longitudes de onda por separado. En un sistema unidireccional, se coloca un multiplexor en el punto transmisor y un demultiplexor en el punto receptor. Para tener una comunicación en ambos sentidos utilizando este sistema, se necesitan dos sistemas colocados en antiparalelo y dos tramos de fibra óptica separados.

En un sistema bidireccional, se coloca un dispositivo multiplexor-demultiplexor en cada punto. La comunicación se da sobre la misma fibra óptica, utilizando diferentes longitudes de onda para cada dirección.

Los dispositivos multiplexores y demultiplexores pueden ser diseñados como dispositivos activos o dispositivos pasivos. Los dispositivos diseñados como pasivos están basados en prismas, rejillas difractoras o filtros, mientras que los dispositivos activos combinan dispositivos pasivos con filtros ajustables o sintonizables. El primer desafío en estos dispositivos es el minimizar la interferencia y maximizar la separación de los canales. La interferencia es una medida de que también los canales están separados entre sí, la separación de canales se refiere a la habilidad de distinguir cada longitud de onda sin tener interferencias con otra.

2.2.3.3. Amplificadores ópticos

Debido a la atenuación que sufre la señal cuando viaja por la fibra, la distancia que puede alcanzar la señal con potencia suficiente para ser detectada correctamente del lado del receptor está limitada. Antes de la llegada de los amplificadores ópticos había que tener un amplificador por cada señal transmitida. Los amplificadores ópticos hicieron posible amplificar todas las señales de una sola vez sin tener que hacer conversiones óptico -eléctrica-óptica.

Se tienen básicamente 3 tipos de amplificadores en los sistemas DWDM: los preamplificadores, postamplificadores y los amplificadores de línea.

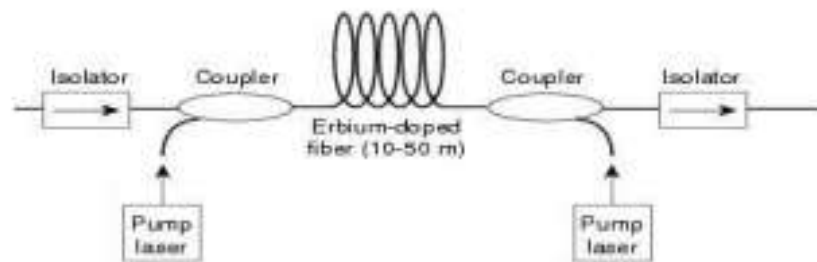
Los amplificadores de fibra dopada con erbio EDFA (del inglés Erbium Doped Fiber Amplifier) fue una tecnología clave en el desarrollo de los sistemas DWDM. El erbio es un elemento terrestre que no es muy común que cuando es excitado emite luz alrededor de los 1 540 nanómetros, longitud de onda de que refleja pérdidas mínimas usada en DWDM.

Una señal débil entra en la fibra dopada con erbio, allí un láser inyecta una luz a 980 o 1 480 nanómetros. Esta luz estimula los átomos de erbio que liberan su energía almacenada como luz adicional a 1 550 nanómetros. Este proceso continúa a lo largo de toda la fibra haciendo que la señal se vuelve más fuerte. Este proceso también añade ruido a la señal.

Los parámetros de importancia de un amplificador son la ganancia, uniformidad de la ganancia, el nivel de ruido y la potencia de salida. Los *EDFA* típicos producen ganancias de 30 decibelios o más y tienen potencia de salida de +17 decibelios o incluso más. De estos parámetros nombrados los más importantes son el nivel de ruido, que debe ser bajo y el *gain flatness* ya que todas las señales deben ser amplificadas uniformemente. La amplificación hecha por los EDFA es dependiente de la longitud de onda pero puede ser corregida con filtros. El nivel de ruido debe ser bajo ya que el ruido, al igual que la señal, es amplificado. Es un efecto acumulativo y no puede ser filtrado.

La relación señal/ruido es un factor limitante en el número de amplificadores que pueden ser concatenados. La figura 33 muestra un diagrama a bloques de un sistema utilizando fibra dopada.

Figura 33. **Sistema utilizando EDFA**



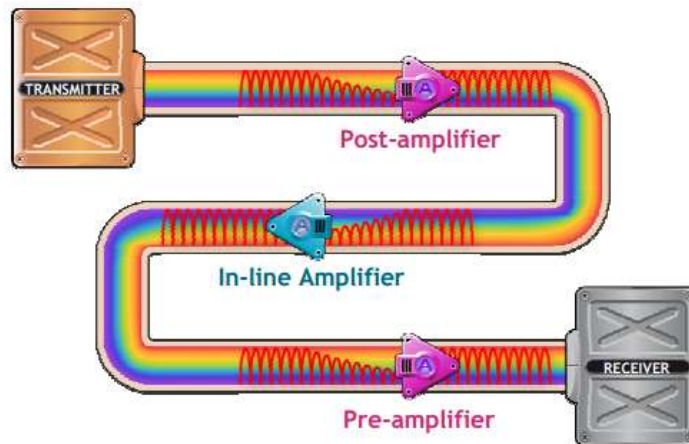
Fuente: Chavarria, Gerson; Ramirez, Cristian. *Trabajo de redes de telecomunicaciones tecnología WDM*, Universidad de Santiago de Chile. p. 12.

Los postamplificadores se ubican directamente después del transmisor óptico. Esta aplicación requiere que la EDFA tome una gran señal de entrada y proporcione la máxima potencia de salida. La respuesta a baja señal no es tan importante debido a que el transmisor de salida está usualmente a -10 decibelios o más alto. El ruido agregado por el amplificador en este punto tampoco es tan crítico ya que la señal de entrada tiene una gran relación de señal a ruido. Los postamplificadores también se refieren a amplificadores de potencia, reforzador de potencia, reforzadores y amplificadores de refuerzo.

Los amplificadores de línea, llamados también repetidores, modifican una pequeña señal de entrada y la refuerzan para su retransmisión en la fibra óptica. Controlando el desarrollo de la pequeña señal y el ruido agregado por la EDFA se reduce el riesgo de limitar la distancia que puede cubrir el sistema debido al ruido producido por los componentes amplificadores. Los preamplificadores se instalan en el punto de recepción y refuerzan la señal para que llegue acorde a los requerimientos de sensibilidad y potencia del fotodetector. La aplicación del preamplificador requiere mucho cuidado debido al ruido agregado por la EDFA.

El ruido agregado por el preamplificador debe ser mínimo para maximizar la relación de señal a ruido. La figura 34 muestra los componentes de un esquema de transmisión DWDM.

Figura 34. Topología de amplificación en un sistema DWDM



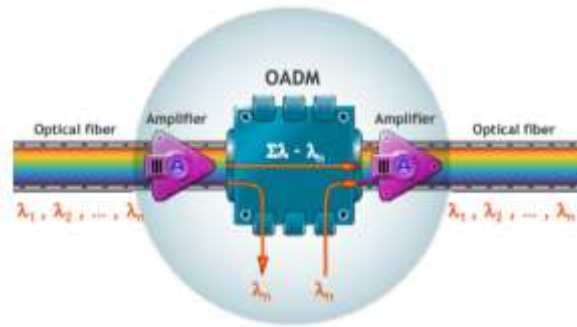
Fuente: Alcatel-Lucent. Transmission networks, WDM Technology Fundamentals. p. 29.

2.3. OADM

Un dispositivo OADM es un multiplexor óptico de extracción e inserción de longitudes de onda (de su traducción del inglés Optical Add/Drop Multiplexer). Utilizado en los sistemas WDM para multiplexación y enrutamiento de diferentes canales ópticos dentro o fuera de fibras ópticas monomodo. Es un tipo de nodo óptico el cual generalmente es utilizado para la construcción de redes ópticas de telecomunicaciones.

Extracción e inserción se refieren a la capacidad del dispositivo de insertar uno o más canales de longitudes de onda a una señal WDM existente, extraer uno o más canales pasando esas señales a otro camino de la red óptica. Un OADM puede ser considerado como un dispositivo específico para realizar conexiones ópticas.

Figura 35. Diagrama de bloques de un OADM



Fuente: Alcatel-Lucent. Transmission networks, WDM Technology Fundamentals. p. 33.

Un OADM típico en su construcción se compone de 3 etapas: un demultiplexor óptico, un multiplexor óptico y entre ambos una etapa que permite realizar reconfiguración de las conexiones entre el multiplexor óptico, demultiplexor óptico y un conjunto de puertos para insertar o extraer señales. El demultiplexor óptico separa las longitudes de onda hacia la conexión con la fibra óptica y los puertos. Es posible realizar reconfiguraciones por medio de un panel de conexión de fibra óptica o por un *switch* óptico el cual dirige las longitudes de onda al multiplexor óptico o a los puertos de extracción.

El multiplexor óptico combina los canales de longitudes de onda que continuarán de los puertos del demultiplexor con los puertos de inserción, en una sola fibra óptica de salida. Un OADM que permite realizar reconfiguración remota de los *switch* ópticos en la etapa intermedia se denomina OADM reconfigurable, ROADM (del Inglés Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer). Los que no disponen de esta característica son denominados OADM fijos o estáticos.

Las funciones de conmutación o reconfiguración van desde el panel de conexiones de fibra manual para una variedad de tecnologías, incluyendo los sistemas microelectromecánicos MEMS (del Inglés Micro Electromechanical Systems), de cristal líquido e interruptores termo-óptico en circuitos de guía de ondas planas de conmutación.

3. SISTEMAS ROADM

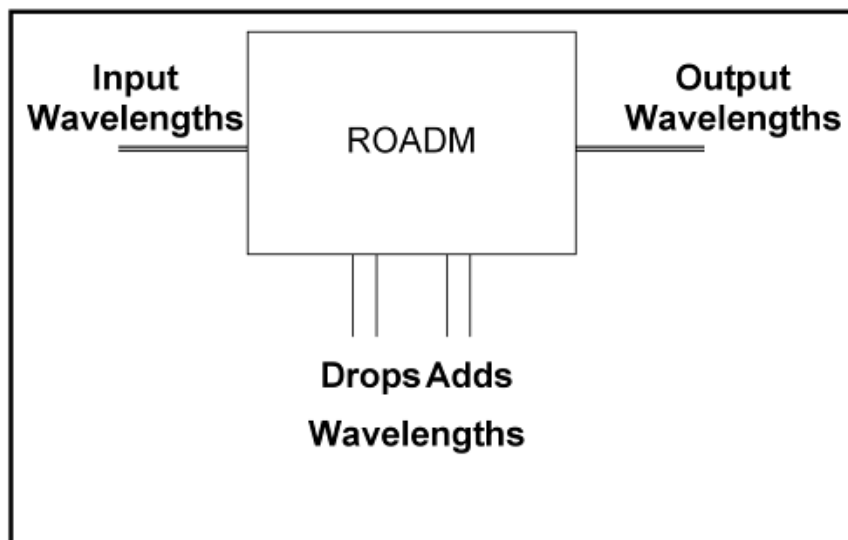
3.1. ROADM en las redes de nueva generación

ROADM es un subsistema que permite una configuración dinámica de cómo se extraen, se insertan o se dejan pasar las longitudes de onda que componen la luz que se transmite por la fibra óptica. Cada longitud de onda llevará una información diferente, siendo canales de información lógicos que se transportan simultáneamente por el mismo portador físico, una fibra óptica. Permiten gestionar el ancho de banda de las redes DWDM de una forma flexible y eficiente, suministrando y conmutando los diferentes canales DWDM en función de las necesidades de tráfico. Algunos operadores de red ya han desplegado ROADM en sus redes de larga distancia y más recientemente, lo están haciendo en el entorno metropolitano.

Los proveedores de redes se enfrentan al desafío de mantener el seguimiento de todas las longitudes de onda, controlar su correcto funcionamiento y desplegar nuevas longitudes de onda fácilmente mientras se reduce el costo de operación de la red. En las redes que no utilizan ROADM, si no fue planeado con anterioridad, al momento de diseñar la red y realizar la instalación de la misma, agregar o implementar nuevos servicios, requiere realizar un rediseño o cambios mayores, lo cual repercute en tiempo, recursos y riesgos importantes de interrupciones de tráfico.

Por lo general, requiere manipulación manual en los sistemas no ROADM, es el equilibrio de potencia de las longitudes de onda de derivación en lugar de las longitudes de onda de agregación localmente en cualquier nodo en particular. Es necesario balancear la potencia óptica de estas longitudes de onda en el punto de entrada de una EDFA. De lo contrario, en un enlace con muchas EDFA y múltiples canales, algunos canales se pueden perder debido a la falta de potencia óptica si no es balanceada a lo largo del camino.

Figura 36. **Configuración general de un ROADM**



Fuente: IGI Consulting Inc. ROADMs-From the Core to the Edge. p. 24.

ROADM añade la flexibilidad necesaria para que la adición o administración de las longitudes de onda se vuelva un proceso fácil y controlado de forma remota. Proporciona monitoreo y control total sobre toda la infraestructura de alta capacidad.

El mercado de los ROADM puede dividirse en dos grandes campos de aplicación. Por una parte se tienen los ROADM troncales, empleados en el núcleo de red y que se caracterizan por un alto precio, así como prestaciones superiores a las que se requieren habitualmente. Por el contrario, algunos fabricantes se centran en el diseño de ROADM para aplicaciones metropolitanas, que últimamente están experimentando un creciente interés. Evidentemente, los ROADM diseñados para el entorno metropolitano deben ser más compactos y baratos que aquellos que se han optimizado para sistemas de larga distancia. Luego la tecnología empleada en cada tipo de aplicación o entorno de red será distinta.

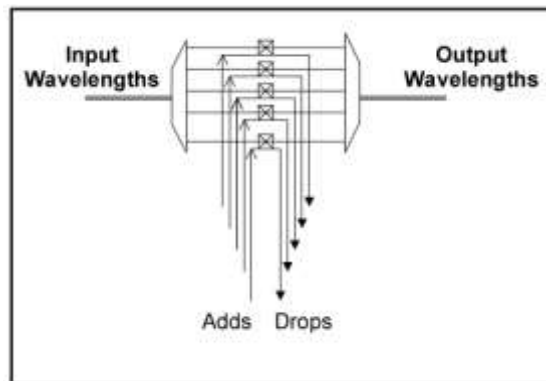
3.1.1. Primera generación

Este tipo de redes ROADM están basadas en un dispositivo conocido como circuito de onda de luz plana PLC (del inglés Planar Light Wavecircuit). El diseño está basado en introducir pequeños *switch*, normalmente de 2 x 2, en el trayecto de las longitudes de onda entre la unión del multiplexor con el demultiplexor.

Estos *switch* permiten tener un control sobre cada longitud de onda; seleccionando si son insertadas, extraídas o bien de tránsito. Para reducir el costo total de estas unidades, un dispositivo matriz de guías de onda AWD (del Inglés Array Wavelength Device) es utilizado para llevar a cabo la función de multiplexación y demultiplexación. Esto permite la separación y recombinación de las longitudes de onda componentes de una señal DWDM.

Utilizando el AWD se evita el uso de *transponders* de elevado costo y lo más importante, ya no se realiza la conversión óptico-eléctrico-óptico. Esta estructura completa es implementada dentro del circuito de onda de luz plana PLC, por lo que es relativamente barato y altamente reproducible. El pequeño *switch* utilizado en este enfoque puede basarse en distintas tecnologías en adición al enfoque descrito anteriormente para el PLC. Puede utilizar pequeños *switch* discretos, puede usar varios tipos de *microswitch* electromecánicos MEM, puede utilizar dispositivos de cristal líquido o bien puede utilizar semiconductores basados en *switch* y amplificadores.

Figura 37. **ROADM basado en PLC**



Fuente: IGI Consulting Inc. ROADMs-Fromthe Core to theEdge. p. 28.

Si la versión del circuito PLC se está implementando con acceso completo para todas las longitudes de onda entrantes y salientes, se dice que los puertos de extracción/inserción no tienen color o bien *colorless*. En una implementación utilizando *colorless*, cualquier puerto de extracción/inserción puede ser asignado a cualquier longitud de onda. Esto ofrece una flexibilidad completa cuando es necesario realizar una reorganización de la red.

Esto no es usualmente implementado en ROADM basado en PLC debido a la complejidad, costo y degradaciones de la transmisión debido a la combinación de muchos *switch* para cada longitud de onda entrante.

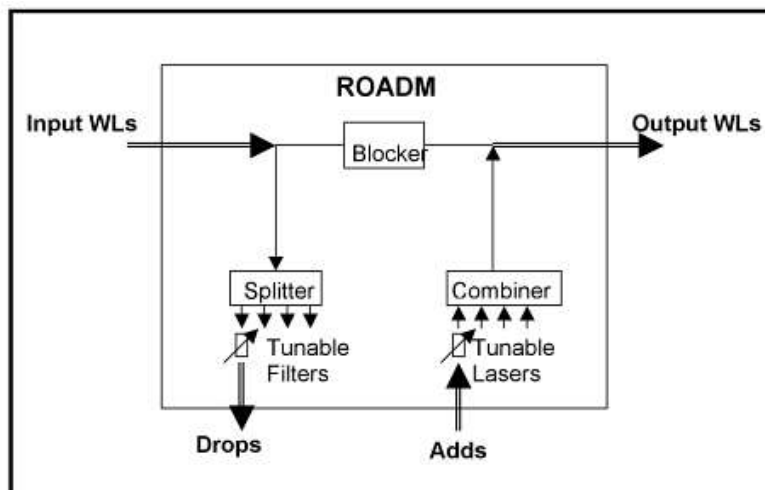
Si los puertos de extracción/inserción están predefinidos con acceso a una cantidad limitada de longitudes de onda entrantes, los puertos son denominados como puertos coloreados o bien *colored*. En este caso, se dice que los puertos están únicamente configurados en banda, esto quiere decir que solo una banda de longitudes de onda está disponible para la extracción/inserción. Este es el diseño normal de ROADM cuando se utilizan como base los circuitos PLC. Este tipo de implementaciones de las redes ROADM es también conocida como *demux-switch-mux*, DSM, 2-D ROADM o bien de segundo grado y iPLC ROADM o circuito PLC integrado.

Los dispositivos PLC ofrecen una mejora sobre las redes ROADM basadas en *switch* OXC en que son baratos de construir y en algunos casos económicos para implementar. Sin embargo, generalmente no ofrecen una completa flexibilidad en términos de poder seleccionar longitudes de onda para realizar las funciones de extracción o inserción y las extracciones son usualmente bajo puertos *colored*. Pero aunque sean baratos, continúan relativamente costosos y presentan alta pérdida de inserción óptica. PLC ROADM no están diseñados, excepto con una gran complejidad, para nodos de múltiples grados.

3.1.2. Segunda generación

Las redes ROADM de segunda generación están basadas en dispositivos de bloqueo. Como en otras implementaciones, existen muchas maneras para alcanzar esta definición general. Un dispositivo de bloqueo es insertado para selectivamente poder bloquear las longitudes de onda de extracción/inserción. Todas las longitudes de onda que ingresan al nodo sobre la fibra de entrada, son transmitidas sin ser demultiplexadas hacia el punto de salida. Todas las longitudes de onda entrantes son también transmitidas hacia un separador y una serie de filtros ajustables que permiten la selección de las longitudes de onda que se desean extraer. Para insertar longitudes de onda se utilizan láser ajustables que permiten la reinserción de la longitud de onda seleccionada.

Figura 38. **Arquitectura detallada de un dispositivo de bloqueo ROADM**



Fuente: IGI Consulting Inc. ROADMs-From the Core to the Edge. p. 30.

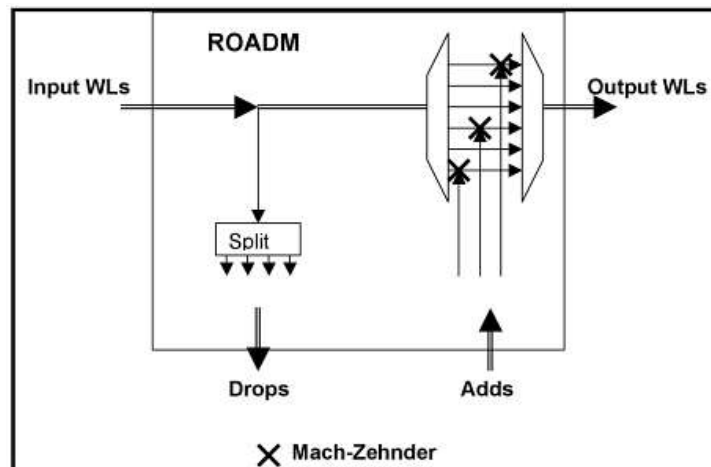
El dispositivo completo aún continúa siendo de 4 puertos, se utiliza un dispositivo de bloqueo para bloquear cualquier longitud de onda que hayan sido seleccionadas para ser extraídas. El flujo de la señal DWDM es separado y reenviado al dispositivo de bloqueo y al separador o *splitter*. Las longitudes de onda que serán extraídas son seleccionadas ajustando el filtro apropiado para seleccionarla del flujo de señal DWDM. En la otra parte del dispositivo, láser ajustables para seleccionar las longitudes de onda a insertar y estas combinarlas con la parte del flujo de la señal DWDM que ha pasado a través del dispositivo de bloqueo para formar el flujo de la señal DWDM de salida.

En este tipo de implementación, existe una pequeña afectación en el flujo de señal DWDM que ha pasado por el dispositivo. Únicamente las longitudes de onda seleccionadas para la extracción/inserción son afectadas. Existen al menos dos maneras de realizar la arquitectura de bloqueo, la primera es utilizando acopladores pasivos y filtros ajustables. Mientras que este tipo de implementaciones provee flexibilidad para seleccionar las distintas longitudes de onda y bajo costo, la colocación de los filtros en cascada da como resultado un aproximado de 20 decibelios en pérdidas de inserción. Esto normalmente requiere el uso de elementos amplificadores, lo que agrega costos y complejidad al sistema.

La otra implementación utiliza AWG para realizar las funciones de multiplexación y demultiplexación, un dispositivo de bloqueo y un *switch* Mach-Zehnder que se compone de diodos como dispositivo selector de longitudes de onda en el lado de inserción. Este dispositivo puede ser altamente integrado y elimina los filtros en cascada de la implementación anterior. La pérdida de inserción de este diseño es de aproximadamente 12 decibelios.

Además de la reducción en pérdidas de inserción que ofrece este diseño también puede ser implementado en silicón lo que hace que sea más fácil de producir. La desventaja es que los diodos del *switch March-Zehnder* tienden a consumir alta potencia y esto puede causar limitaciones por temperatura.

Figura 39. **Dispositivo de bloqueo ROADM alternativo con conmutador m-z**



Fuente: IGI Consulting Inc. ROADMs-From the Core to the Edge. p. 32.

Con este diseño existen mejoras sobre ROADM basado en circuitos PLC y es que generalmente ofrecen una completa selección sobre que longitud de onda será extraída en un nodo determinado y son baratos para ser fabricados. En la versión que utiliza M-Z *switch* ofrecen menor pérdida. Este tipo de ROADM basados en dispositivos de bloqueo son conocidos como *broadcast ROADM*, *broadcast and select* y *2-D ROADM*.

Los dispositivos ROADM basados en bloqueo no son adecuados para nodos de múltiples grados, excepto con una gran complejidad.

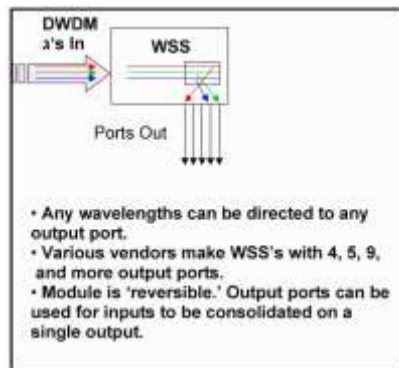
3.1.3. Tercera generación

La tercera generación de la tecnología ROADM está basada en el dispositivo llamado conmutador selectivo de longitud de onda WSS (del inglés Wavelength Selective Switch). Los WSS rápidamente se convirtieron en el mejor estándar de ROADM, son capaces de conmutar longitudes de onda entrantes sobre una fibra óptica hacia múltiples fibras ópticas de salidas.

Una de las mayores ventajas es la capacidad de interconectar rutas de fibra o anillos de fibra fácilmente. Los nodos son enumerados por la cantidad de rutas de fibra óptica incidentes, por lo tanto, una intersección de dos rutas de fibra óptica se convierten en un nodo de cuarto grado con ramificaciones al este, oeste, norte y sur.

Un nodo típico de extracción/inserción en un anillo de fibra óptica es un nodo de segundo grado, con una sola ruta de fibra óptica con ramificaciones este y oeste. Muchos nodos en redes de larga distancia y en redes metropolitanas son mucho mayores de dos grados, típicamente son de 4 grados. Por lo tanto, la capacidad de las redes ROADM basadas en WSS en acomodar estos nodos de grados mayores es muy importante. Los dispositivos WSS pueden ser construidos utilizando diferentes tecnologías, todos emplean tecnología de separación de longitud de onda y función de conmutación. La figura 40 muestra el diagrama a bloques de un WSS.

Figura 40. **Estructura de un dispositivo WSS en ROADM**



Fuente: IGI Consulting Inc. ROADMs-From the Core to the Edge. p. 33.

Para la función de conmutación, se emplean algunas versiones de MEMS, usualmente en un arreglo de una dimensión. Sin embargo, implementaciones con dispositivos de cristal líquido y termo-ópticos pueden ser utilizadas. Una de las mayores ventajas tecnológicas de los dispositivos WSS es la capacidad para adaptarse a nodos multigrados. Las interconexiones realizadas en los nodos multigrados por los dispositivos WSS son completamente ópticas, no existe una etapa de conversión óptico-eléctrico-óptico para realizar las interconexiones.

Para servicios de sublongitud de onda, es posible utilizar las facilidades locales de extraer e insertar para impulsar longitudes de onda hacia una etapa de conversión óptico-eléctrico-óptico. También es posible agregar un módulo WSS a un dispositivo ROADM basado en bloqueo para tener la capacidad de conmutación. Se pueden utilizar varias topologías para poder alcanzar la capacidad de conmutación utilizando un WSS en un ROADM basado en dispositivos de bloqueo.

Utilizando ROADM con dispositivos WSS se solventa el problema de multigrado, puede ser proporcionado para adaptarse a nodos con muchos grados.

Existe una cuarta generación de ROADM conocida como *edge ROADM* o bien ROADM de borde. Este se encuentra localizado entre el anillo de orden más bajo en una red metropolitana y la línea de acceso hacia los equipos suscriptores o de acceso. Estos dispositivos no dan acceso completo a todas las longitudes de onda, sino, vienen con un acceso limitado a cierta cantidad de longitudes de onda, pero en el borde, rara vez cambian las longitudes de onda, por lo que acceso limitado es todo lo que se necesita. Los ROADM de borde son económicos ya que se han eliminado algunas características del núcleo y de las redes de área metropolitana.

3.2. Conmutador selectivo de longitudes de onda

Un WSS comprende un arreglo de conmutadores que operan sobre luz que ha sido dispersada en longitudes de onda sin el requerimiento que la luz dispersada sea físicamente demultiplexada hacia puertos separados. Y esto es denominado como configuración dispersa y conmuta. Los varios canales entrantes de un puerto común son continuamente dispersados sobre un elemento de conmutación el cual, direcciona y atenúa cada uno de estos canales independientemente a los N puertos del *switch*.

La operación puede ser bidireccional para que las longitudes de onda puedan ser multiplexadas juntas desde diferentes puertos hacia un solo puerto común. A la fecha, la mayoría de implementaciones utilizan anchos de banda de 50 o 100 gigahertz.

El WSS es realmente el corazón de los nuevos ROADMs. Actualmente, se implementan con elementos de cristal líquido sobre silicio LCOS (del inglés Liquid Cristal On Silicon) o bien como MEMS, que dirigen o atenúan cada longitud de onda. Los MEMS aportan velocidades de conmutación realmente elevadas, del orden de los milisegundos, pero generan elevadas pérdidas de inserción. LCOS proporciona gran estabilidad pero aumenta los tiempos de conmutación, especialmente a bajas temperaturas.

La función principal de un WSS es conmutar de manera independiente cada una de las M longitudes de onda entre un puerto común y uno de los N puertos de conmutación, controlando la atenuación para cada una de ellas. Los WSS más comunes son aquellos con $N = 2, 4, 5, 8$ o 9 puertos de conmutación, aunque se pueden empezar a encontrar de hasta 23 puertos de conmutación.

La mayoría actúan sobre la tabla ITU de 100 o 50 gigahertz, en la banda C o L. Algunos WSS tienen integrados los aisladores y filtros de paso en una sola dirección, en otros casos los dispositivos son bidireccionales, con lo que los puertos de entrada y salida dependerán de la aplicación en concreto.

Con algunos WSS es posible dividir la intensidad de una longitud de onda dada y enrutarla hacia más de un puerto de conmutación simultáneamente. Pero dividir la luz en el WSS para conseguir un *multicast* óptico complica el sistema que gestiona la potencia.

Teniendo en cuenta que en la mayoría de las arquitecturas en las que se puede incluir los WSS, se disponen de manera inherente de un *multicast* óptico, el realizarlo dentro del propio WSS aporta poco valor. Los WSS pueden tener sus puertos de acceso coloreados o no coloreados.

Un puerto coloreado implica que el puerto de acceso físico (de extracción o inserción) se asigna a una longitud de onda específica, es decir, cada puerto de acceso deja pasar solo un color.

Esto significa que una vez que se ha establecido la conexión física entre un transceptor y un puerto de acceso de un ROADM, la longitud de onda asignada al transceptor no se puede modificar de manera dinámica o remota. Los puertos no coloreados dejan pasar cualquier longitud de onda, permitiendo el enrutamiento de dichas longitudes de onda a un transceptor que puede ser modificado dinámicamente y remotamente. Para puertos de inserción, esto significa que los transmisores deben ser completamente sintonizables.

Los ROADM con puertos no coloreados se llaman no coloreados, o *colorless*. Pero existen muchas arquitecturas mediante las que se pueden conseguir ROADM *colorless*, a base de reemplazar demultiplexores por 1:NWSS o conectando un divisor pasivo a un conjunto de filtros sintonizables y el multiplexor reemplazado con un combinador pasivo que se conecte a un transmisor sintonizable.

Cada una de estas arquitecturas tienen sus ventajas e inconvenientes y debe ser el operador que despliega los ROADM el que analice cuál es la arquitectura que optimiza sus funcionalidades. Uno de los aspectos que varía de una a otra son las pérdidas de inserción, que afectan al presupuesto óptico total y por lo tanto a los alcances de la señal.

Otro aspecto a tener en cuenta son los grados del ROADM. Un ROADM de dos grados posee dos direcciones, este y oeste, y se usan normalmente en topologías de anillo.

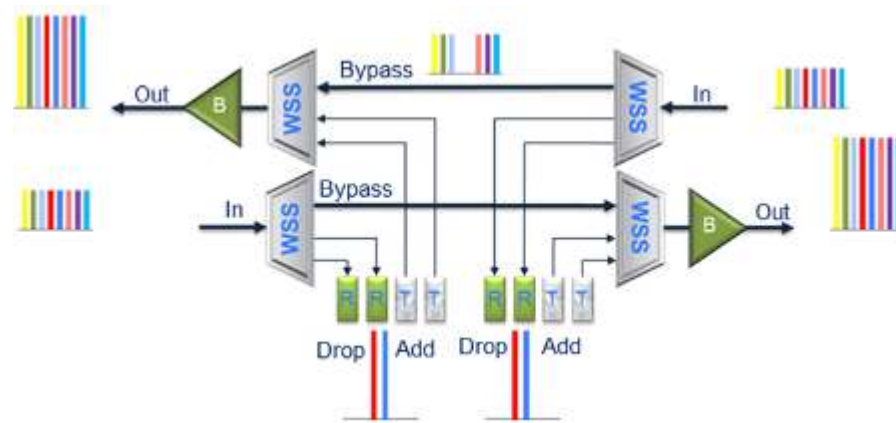
Los ROADM que poseen más de dos grados se denominan de manera genérica multigrado y son ideales para topologías de malla. Actualmente se manejan cifras de 9+1 y subiendo. De manera general, un ROADM de grado N puede implementarse usando $N \times N \times 1$ WSS con cada WSS sirviendo a un grado dado, mientras que adicionalmente se pueden usar WSS para las funciones de puertos de acceso no coloreados.

Los puertos de los WSS también pueden ser sin dirección, es decir, se puede acceder a todos los puertos de salida desde el puerto de entrada sin que haya ningún tipo de bloqueo. Si no disponen de esta funcionalidad, una longitud de onda concreta sólo podría conmutarse hacia un único puerto de salida.

Los ROADM también pueden tener puertos sin contención, es decir, se permite que varias señales de entrada estén sintonizadas a la misma longitud de onda siempre que salgan por diferentes puertos. Cuando un ROADM dispone de puertos no coloreados, sin dirección y sin contención se denominan CDC ROADM (Contentionless, Directionless, Colorless). Conseguir ROADM no coloreados, sin dirección y sin contención requiere múltiples WSS, multiplexores, demultiplexores, divisores y conmutadores ópticos.

El coste y tamaño de estas soluciones puede hacerlas prohibitivas para la mayoría de las redes. Para realizar un CDC ROADM, cada puerto debería asumir el papel de puerto de acceso (extracción o inserción) o puerto de enlace (entrada o salida). La figura 41 muestra el funcionamiento de un ROADM con WSS.

Figura 41. **Funcionamiento de ROADM con WSS**



Fuente: <http://www.packetlight.com/technology/roadm>. [Consulta: marzo de 2014].

3.3. Arquitecturas

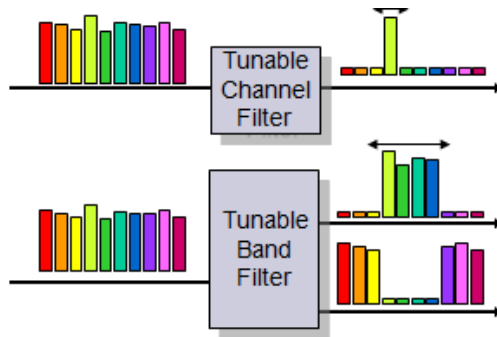
La evolución de ROADM ha permitido mejorar su desempeño dentro de las redes de transmisión óptica. Se han desarrollado distintos dispositivos los cuales han funcionado como filtros o bloqueadores de lambdas.

3.3.1. Filtro de canal y filtro de banda

Utilizando la arquitectura basada en un filtro de canal ajustable se tiene acceso independiente a todos los canales de longitud de onda, el número de puertos de extracción e inserción es menor que el conteo máximo de longitudes de onda. Los puertos de transmisión y recepción son de longitud de onda provisionable, es decir, son puertos sin color. La figura 42 muestra el funcionamiento de un dispositivo ROADM a base de filtros.

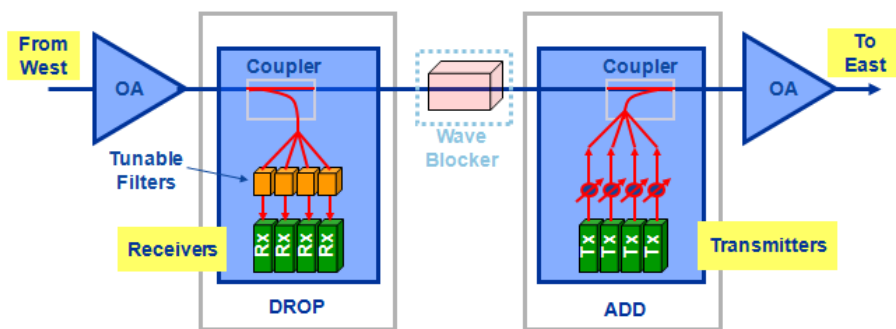
Soporta las funciones de extracciones y dar continuidad, pero requiere el uso bloqueador de onda para la reutilización de longitudes de onda. Añade potencia ecualizada a los canales; canales rápidos son ecualizados si se incluye un bloqueador de onda. Esta arquitectura tiene la particularidad que soporta un nodo de dos grados. Ver figura 42.

Figura 42. **Tipos de ROADM a base de filtros**



Fuente: Collings, Brandon. Roadm Networks Elements. p. 18.

Figura 43. **Arquitectura de filtro de canal ajustable**

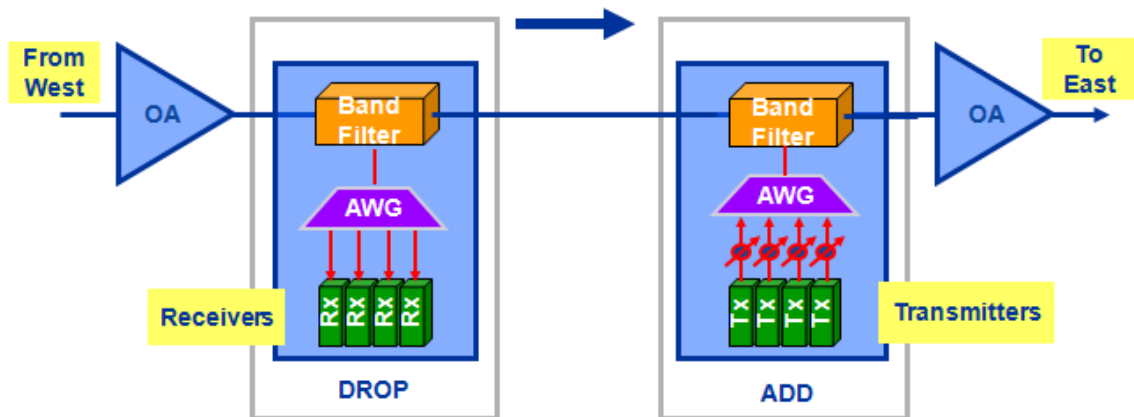


Fuente: Collings, Brandon. Roadm Networks Elements . p. 19.

La arquitectura de filtro ajustable de banda permite que los canales sean extraídos o insertados en bandas, el ancho de la banda puede ser de un valor fijo o también se tiene la posibilidad de ser ajustable, la banda es ajustable en longitudes de onda. Los puertos de transmisión y recepción son hechos para una longitud de onda específica, es decir, son puertos coloreados.

Las longitudes de onda pueden ser reutilizadas; en este caso no es necesario utilizar un bloqueador de onda como en el filtro por canal. Se añade potencia ecualizada a los canales en general sin utilizar otros dispositivos, el inconveniente con esta tecnología es que no soporta las funciones de extraer y dar continuidad. Esta arquitectura soporta nodos de dos grados. Ver figura 44.

Figura 44. **Arquitectura de filtro de banda ajustable**



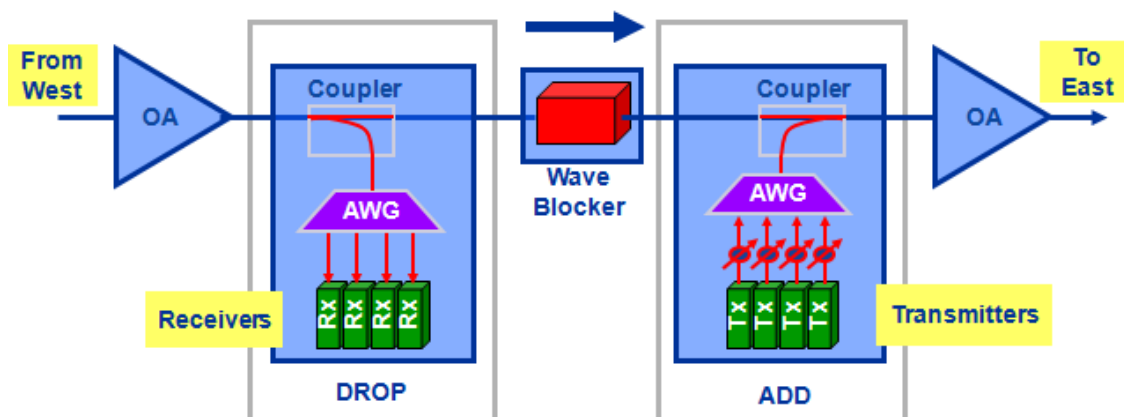
Fuente: Collings, Brandon. Roadm Networks Elements. p. 20.

3.3.2. Bloqueador de onda

Utilizando esta arquitectura se tiene un acceso independiente a todos los canales de longitudes de onda. Los puertos para transmisión y recepción son diseñados para longitudes de onda específicas y no pueden ser modificados, es decir que los puertos son coloreados.

Los canales que son añadidos, insertados y los canales de transición rápida son ecualizados en potencia. Con esta arquitectura se tiene la ventaja que soporta las funciones de extraer longitudes de onda o bien dar continuidad a las longitudes de onda que así lo requieran. Esta arquitectura tiene la particularidad de soportar nodos de dos grados. Ver figura 45.

Figura 45. **Arquitectura de bloqueador de onda**



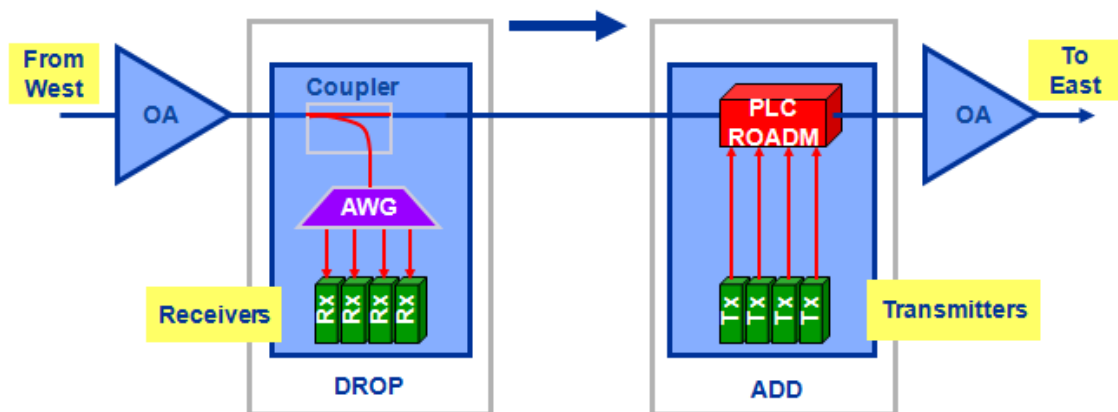
Fuente: Collings, Brandon. Roadm Networks Elements. p. 21.

3.3.3. PLC ROADM

Esta arquitectura brinda acceso independiente a todos los canales de longitudes de onda. Los puertos de transmisión y recepción están diseñados para longitudes de onda específicas y no se pueden modificar, es decir, los puertos son coloreados.

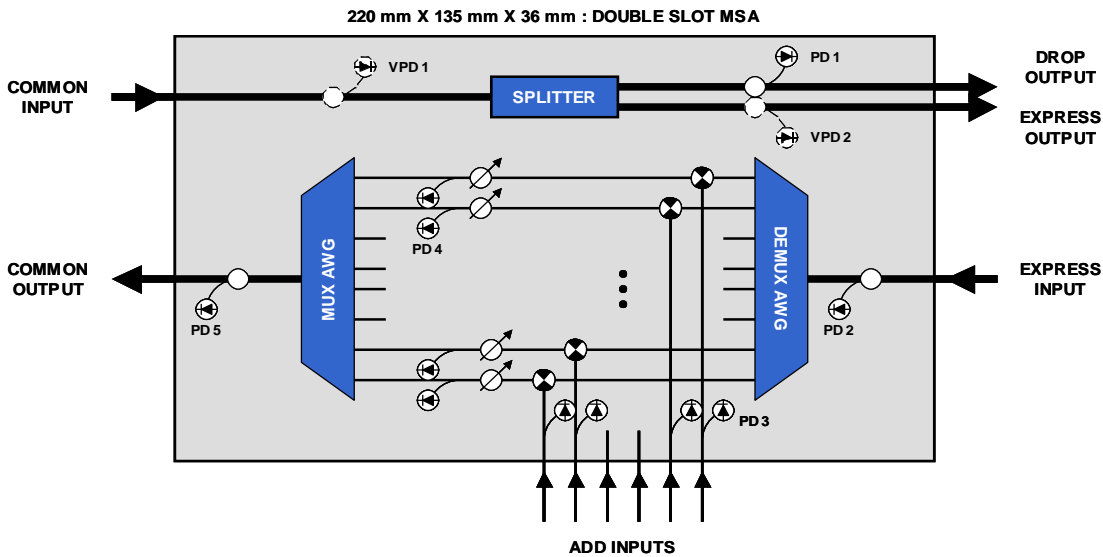
Posee un alto nivel de integración: agrega dirección a la multiplexación de longitud de onda, monitoreo de potencia por canal ya sea en canales insertados o de transición rápida. Los canales insertados y de transición rápida son ecualizados en potencia, permite seleccionar entre canales insertados o de transición rápida. Esta arquitectura soporta nodos de dos grados. Las figuras 47 y 48 muestran los diagramas a bloques para un PLCROADM.

Figura 46. Arquitectura de PLC ROADM



Fuente: Collings, Brandon. Roadm Networks Elements. p. 22.

Figura 47. Diagrama de bloques de PLC ROADM



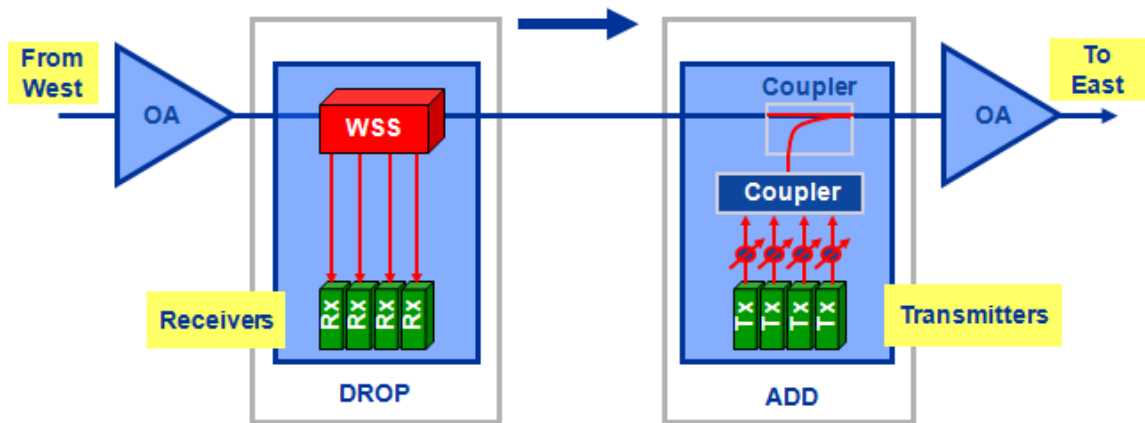
Fuente: Collings, Brandon. Roadm Networks Elements. p. 23.

3.3.4. Demultiplexor WSS

Esta arquitectura brinda acceso independiente a todos los canales de longitudes de onda. El número de puertos de adición/extracción es menor que el conteo máximo de longitudes de onda, es posible conectar un demultiplexor en cascada (serie) del demultiplexor primario para obtener puertos adicionales.

Los puertos de transmisión y recepción son de longitud de onda provisionable, es decir, que son puertos sin color o *colorless*. Todos los canales son ecualizados en potencia, esta arquitectura no soporta las funciones de extracción y dar continuidad. Únicamente soporta nodos de dos grados. Ver figura 48.

Figura 48. **Arquitectura con demultiplexor WSS**



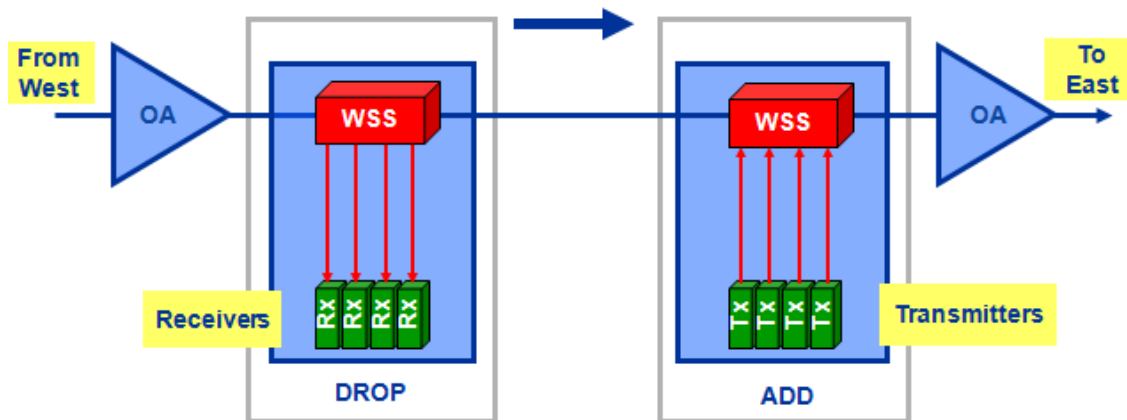
Fuente: Collings, Brandon. Roadm Networks Elements. p. 25.

3.3.5. Multiplexor y demultiplexor WSS

Se utiliza un multiplexor y demultiplexor para las señales de adición y extracción. Brinda acceso independiente a todos los canales de longitudes de onda. Los puertos de adición/extracción son menores que el conteo máximo de longitudes de onda. Se pueden realizar conexiones en cascada de WSS para tener puertos adicionales.

Los puertos de transmisión y recepción son de longitud de onda provisionable, es decir, que son *colorless*. Los canales de adición, extracción y de transición rápida son ecualizados en potencia. No soporta las funciones de extracción y dar continuidad, soporta nodos de dos grados. Ver figura 49.

Figura 49. **Multiplexor y demultiplexor WSS**



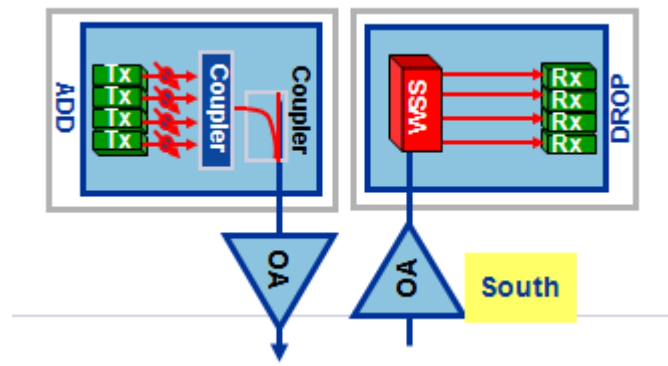
Fuente: Collings, Brandon. Roadm Networks Elements. p. 24.

3.3.6. Demultiplexor WSS multigrado

Soporta cualquier longitud de onda, tanto como de recepción así como para transmisión. Los puertos de extracción cuentan con limitantes debidas al compartir puertos con conexiones intergrado. Los puertos de inserción y extracción son puertos coloreados, diseñados para un rango definido de longitudes de onda.

Sin agregar filtrado de puertos de inserción, rechaza las longitudes de onda deshonestas o ruido. No soporta las funciones de extraer y dar continuidad. Los canales de transición rápida y de extracción son ecualizados por el WSS. Ver figura 50.

Figura 50. **Arquitectura con demultiplexor WSS multigrado**



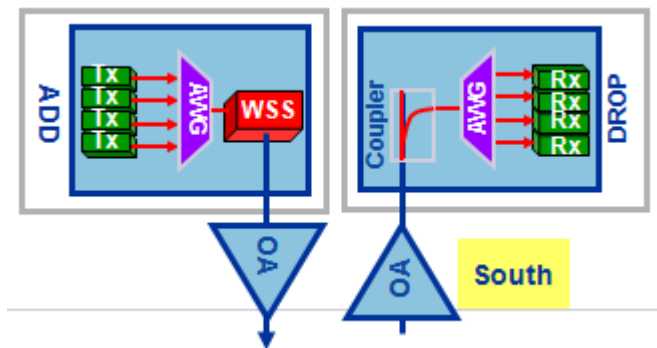
Fuente: Collings, Brandon. Roadm Networks Elements. p. 28.

3.3.7. **Multiplexor WSS multigrado**

Soporta cualquier longitud de onda, tanto como de recepción, así como para transmisión. Los puertos de adición y extracción están presentes para todos los canales soportados. Los puertos de adición y extracción son coloreados, definidos para un rango específico de longitudes de onda.

Agregando filtrado de puertos, rechaza longitudes de onda deshonestas. Soporta las funciones de extraer y dar continuidad. Los puertos de inserción y de transición rápida son ecualizados y esta es provista por el WSS. No se cuenta con un control de potencia por canal en puertos de extracción. Ver figura 51.

Figura 51. **Arquitectura con multiplexor WSS multigrado**



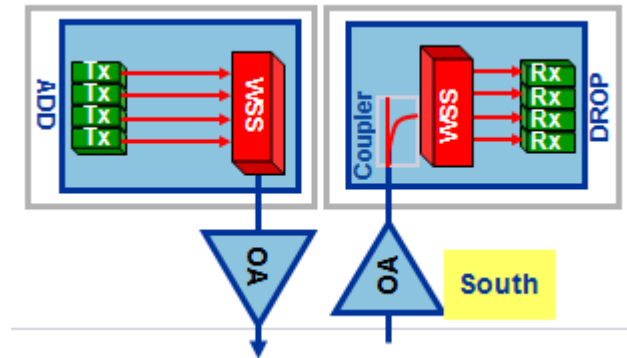
Fuente: Collings, Brandon. Roadm Networks Elements. p. 30.

3.3.8. **Multiplexor y demultiplexor WSS multigrado**

Soporta cualquier longitud de onda, tanto como de recepción, así como para transmisión. Los puertos de extracción cuentan con limitantes debidas al compartir puertos con conexiones intergrado. Los puertos de adición y extracción son puertos coloreados.

Agregando filtrado en los puertos de adición, se rechazan las longitudes de onda deshonestas y el ruido. Esta configuración soporta las funciones de extracción y dar continuidad. La ecualización de los canales de adición y de transición rápida es provista por el multiplexor WSS. El control de potencia para los canales de extracción es provisto por el demultiplexor WSS. Ver figura 52.

Figura 52. **Arquitectura con multiplexor y demultiplexor WSS multigrado**



Fuente: Collings, Brandon. Roadm Networks Elements. p. 32.

3.4. Aplicaciones de conmutación

El principal beneficio de transmitir y seleccionar del ROADM coloreado es que permitiendo la asignación de ruta por canal, la necesidad de previsión del tráfico específico WDM es mitigado. La potencia manualmente intensiva y la ingeniería de conexión en puntos intermedarios de la red pueden ser automatizadas.

La asignación completa de la ruta para una longitud de onda puede ser lograda extendiendo la capacidad de conmutación para incluir la asignación de longitud de onda y dirección del nodo de adición e inserción. En las redes ópticas de mallas estas extensiones de conmutación serán especialmente importantes, habilitando las siguientes aplicaciones:

- Restauración y protección: los sistemas *colorless* y *directionless*, permite a la capa óptica conmutar por cortes de fibra óptica y fallas de equipos sin la participación de TDM o conmutadores de paquetes.
- Conmutador de mantenimiento automatizado: los operadores de redes necesitan periódicamente redireccionar el tráfico lejos de la línea que necesita ser puesta en mantenimiento o una actualización de equipo. Las arquitecturas ROADM capaces de realizar conmutación *colorless* y *directionless* permiten la automatización de conmutación de mantenimiento, minimizando efectivamente la interrupción del servicio y reduciendo los costos asociados por cortes.
- Conmutadores regeneradores: en las redes ópticas de larga distancia es necesario una conversión óptico-eléctrico-óptico para conversión de longitudes de onda o regeneración de señales. Utilizando conmutación ROADM *colorless* los regeneradores pueden ser preimplementados y conmutados hacia la ruta requerida sin la necesidad de realizar cableados hacia el sitio del regenerador. Utilizando ROADM *directionless* un conjunto de regeneradores es accesible a todas las rutas a través de un nodo.
- Longitud de onda de puerto a puerto de conmutador según demanda: en las implementaciones de redes ópticas de la actualidad, los canales pueden ser enrutados de extremo a extremo a través de la red; sin embargo, los *transceiver* deben ser conectados manualmente al equipo deseado.

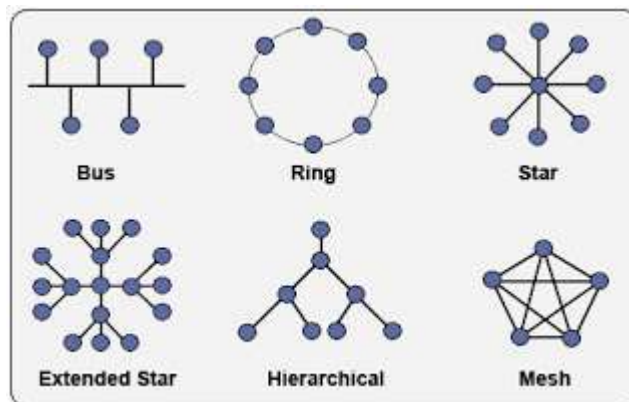
Utilizando arquitecturas *colorless* y *directionless*, los *transceiver* preconectados pueden ser enrutados hacia cualquier camino o longitud de onda desde el nodo. Esto habilita una verdadera automatización puerto a puerto que puede ser usado para entregar nuevos servicios o capacidad extra.

4. DISEÑO DE UN SISTEMA ROADM

4.1. Topología de un sistema ROADM

La topología dependerá de cada proveedor de servicios y de las soluciones que sean necesarias implementar. En la figura 53 se tienen distintos tipos de topologías que se implementan en las redes de telecomunicaciones. Cada esquema ofrece diferentes beneficios para cada solución. Las topologías más utilizadas para redes metropolitanas son las topologías de anillo y de malla o *full mesh*, esto es por la protección que brindan ante eventos en la red.

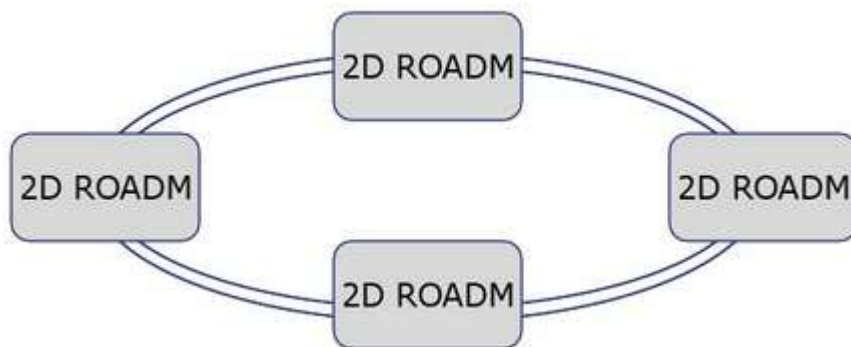
Figura 53. Tipos de topología en redes de telecomunicaciones



Fuente: <http://justmine-bazila.blogspot.com/>. [Consulta: junio de 2014].

Para poder implementar una red metropolitana ROADM se necesitan tomar en cuenta las conexiones que tendrá cada nodo, es decir el grado de cada equipo. Si se implementara solo un anillo será suficiente utilizar equipos que soporten 2 grados de conexión, como se muestra en la figura 545.

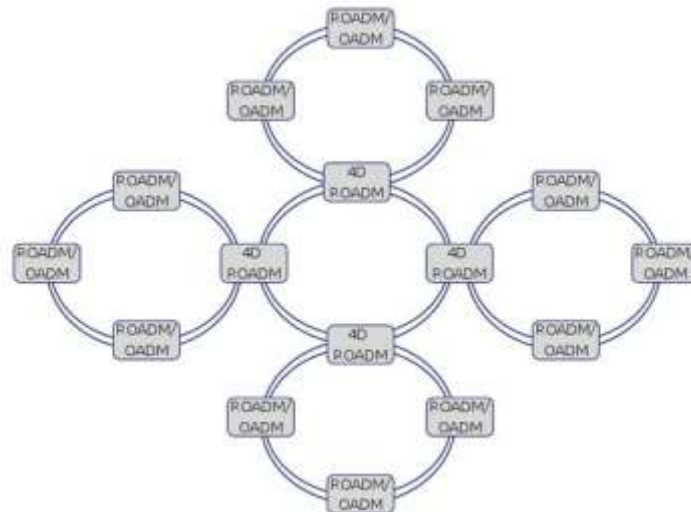
Figura 54. **Anillo ROADM con nodos de 2 grados**



Fuente: wssroadm configuration – adva optical networking. [Consulta: junio de 2014].

Si por los requerimientos de la red es necesario interconectar dos anillos ROADM es posible realizarlo, pero el equipo que interconectará ambos anillos deberá ser multigrado y soportar al menos 4 grados de conexión. Es posible tener interconexiones de varios anillos ROADM pero siempre teniendo en consideración que los equipos de interconexión entre dos anillos deben ser multigrado y soportar al menos 4 grados de conexión, como se muestra en la figura 56 de un anillo troncal.

Figura 55. **Anillo troncal ROADM con nodos de distintos grados**



Fuente: wssroadm configuration – adva optical networking. [Consulta: junio de 2014].

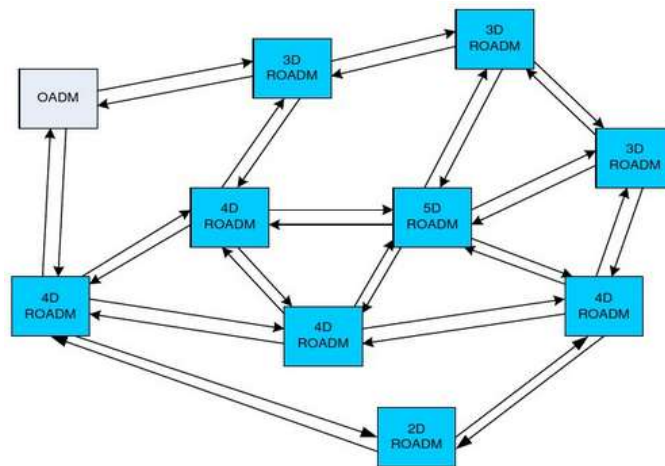
Una de las ventajas de utilizar topologías de anillo es que ofrecen protección contra un evento en la red de transmisión o que se tenga falla en un equipo. En este caso lo que sucede es que se apertura el anillo, la topología quedando en forma de “u” y el tráfico afectado se redistribuye de manera que la red siga funcionando sin problemas.

Si se da el caso en que existiera otro evento en la red de transmisión se tendría afectación de tráfico de datos, lo que causaría pérdida de tráfico de datos y puede repercutir en pérdidas monetarias para la operación del proveedor de datos y para sus clientes. En estos casos puede ser necesario contemplar otro tipo de topología para el sistema ROADM.

Un esquema que ofrece mayor protección es una red malla ROADM o *full mesh* ROADM. Tomando de base el esquema de la figura 57, todos los nodos del sistema tienen conexión entre sí. Esto quiere decir que para que un equipo se quede aislado y se tenga afectación de tráfico de datos es necesario que sucedan al menos 4 eventos en la red de transmisión lo cual es poco probable.

El inconveniente que se tiene con un esquema de red malla es que si el número de equipos en el sistema es muy alto, la cantidad de conexiones también será alta y esto implica costos elevados en la infraestructura de transmisión y son necesarios equipos más complejos y de costo más elevado. Por ejemplo, se tiene una red de 10 equipos, cada equipo de ser multigrado y soportar al menos 9 grados de conexión y esto implica que la cantidad de conexiones a ser implementadas será alrededor de 90.

Figura 56. **Topología de malla ROADM**



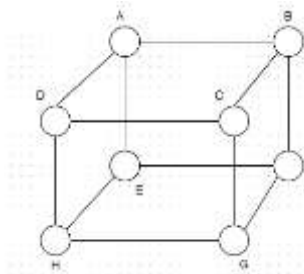
Fuente: wssroadm configuration – adva optical networking. [Consulta: junio de 2014].

En la figura 56 se tiene un sistema ROADM utilizando una topología de malla, en la cual se tienen equipos con distintos grados de conexión. Esto con el fin de proveer protección contra eventos en la red en la parte central de la topología, donde se pueden tener los equipos centrales y en los extremos se tiene equipo con menor cantidad de grados de conexión. Y así se protege la red minimizando las conexiones entre cada uno de los equipos.

En cada una de las topologías los equipos cuentan con puertos de adición y extracción, ya sea que se encuentren disponibles 2, 4 u 8 y sean individuales, que ofrecen alternativas rentables en costos tanto en el acceso como en las redes metro. Dando la facilidad de manejar las distintas longitudes de onda en cada uno de los equipos del sistema.

La topología de la figura 57 muestra una topología aludiendo un cubo para una red ROADM, donde todos los nodos tienen la misma prioridad dentro de la red. En este tipo de topología se tienen 3 trayectos para alcanzar cualquiera de los nodos, brinda mayor protección al momento de existir eventos de transmisión en la red.

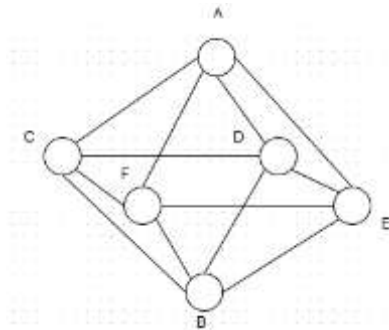
Figura 57. **Topología aludiendo un cubo**



Fuente: elaboración propia, con herramienta draw.io.

Para que uno de los sitios quede aislado deben existir 3 eventos en la red de transmisión, lo cual es poco probable que suceda. En la figura 59 se tiene el ejemplo de una topología que alude a un diamante, en este caso se pueden priorizar los nodos A y B que podrían ser conexiones a centrales telefónicas o conexiones a equipos de la capa *core* sobre una red jerárquica.

Figura 58. **Topología aludiendo a un rombo o diamante**



Fuente: elaboración propia, con herramienta draw.io.

4.2. Explicación del sistema

Los sistemas ROADM permiten configuración dinámica de cómo se extraen, se insertan o se dejan pasar las longitudes de onda. Cada longitud de onda llevará información diferente, siendo canales de información lógicos que se transportan simultáneamente por el mismo transporte físico. Tienen la capacidad de poder conectarse de distintas maneras con el fin de cubrir las necesidades de los servicios, así como las necesidades del proveedor para brindarle un servicio de buena calidad.

El desafío para las redes ROADM es brindar una calidad de servicio y a su vez ser una red robusta la cual pueda proveer protección para el tráfico de datos, protección para las rutas y protección para que los equipos no queden aislados ante algún evento en la red de transmisión.

Para proporcionar mejores esquemas de protección, los sistemas ROADM se han implementado bajo el protocolo GMPLS (del inglés General Multiprotocol Label Swtiching), que es la versión extendida de conmutación multi-protocolo mediante etiquetas MPLS (del inglés Multiprotocol Label Switching).

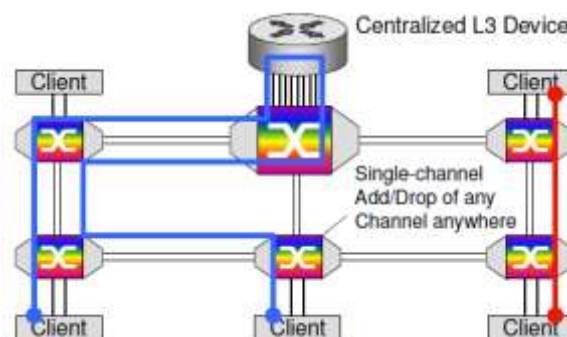
GMPLS combina los beneficios de una red óptica diseñada correctamente y de tecnologías basadas en paquetes IP. Se puede considerar como un conjunto de protocolos para marcar y proteger de forma dinámica las conexiones, rutas o circuitos, de una red de transporte óptico.

Este protocolo tiene la característica que puede funcionar en un entorno donde se tengan equipos que provengan de distintos proveedores y tecnologías. Por lo que lo hace versátil de implementar a los proveedores de servicios de telecomunicaciones, soporta los protocolos: IP, ATM, *ethernet*, SDH, DWDM, OTN (del inglés Optical Transport Network y su traducción redes de transmisión óptica).

GMPLS brinda una arquitectura de servicios y componentes para los proveedores de equipos de cros-conexiones ópticas para construir servicios avanzados en una estructura que minimiza los esfuerzos de desarrollo. El funcionamiento consiste en que todos los equipos de la red ROADM conocen, de manera lógica, un mapa de la red y establecen conexiones primarias y de protección de acuerdo con ubicación de cada equipo en la red.

Esto permite que al darse un evento en la red de transmisión, los equipos del sistema ya conozcan el camino o trayecto de protección para llegar al destino y únicamente deba reemplazar este nuevo trayecto que no tenga afectación y así restablecer la comunicación de manera automática y rápidamente. En la figura 59 se muestra una solución implementada donde se tiene conexión a un servicio capa 3 centralizado y se tienen conexiones por medio de una red ROADM a distintos puntos o nodos. Para esta solución ya se tienen establecidos trayectos para la conectividad hacia los distintos puntos.

Figura 59. **Solución capa 3 sobre ROADM**



Fuente: Schneider, Thomas. Roadms& control plane for research & educational networks, Adva Optical Networking. p. 12.

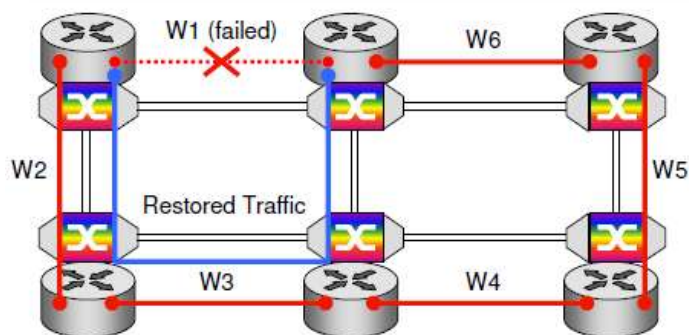
La ventaja que brinda la solución implementada por ROADM es que un sistema se puede reconfigurar y adaptar a las necesidades de la red y las necesidades de los clientes. Brinda una rápida protección y restauración de los trayectos hacia los distintos equipos en una red *full mesh*, es decir, en una red de malla donde todos los equipos están interconectados entre sí. Acceso a cualquier canal, lambda, en cualquier punto; permite servicios capa 3 centralizados y equalizaciones de los niveles de potencia.

A través del protocolo GMPLS como plano de control se tiene un descubrimiento de la topología, señalización y cálculos de rutas. Gestión de conexiones entre los distintos nodos GMPLS. Gracias a la supervisión de canal óptico OSC (del inglés Optical Supervisory Channel) que interconecta todos los dispositivos ópticos a través de la trayectoria de la luz como una IP dedicada fuera de banda de la red.

El plano de control de GMPLS es una solución para los servicios avanzados como: descubrimientos de los recursos físicos, procedimientos de correlación para evitar errores de configuración, configuración de canales extremo a extremo, procedimientos automáticos de restauración en caso de fallo a través de los nodos previamente señalizados, interfaz de usuario para la red óptica que permite la construcción de la red de transporte en su capa de servicios para los enrutadores de paquetes.

La figura 60 muestra para la solución en capa 3 diseñada con ROADM, un evento en la red que afecta la comunicación entre 2 nodos que era el camino previamente señalado. A través de GMPLS cada uno de los equipos de la red conoce la topología lógica del sistema y los trayectos alternos para cada uno de los equipos, ya se tiene determinado el camino de protección necesario este es utilizado para restablecer la comunicación entre los puntos afectados y el trayecto afectado es reemplazado.

Figura 60. **Solución capa 3 sobre ROADM, conmutación de trayecto**



Fuente: Schneider, Thomas. Roadms & control plane for research & educational networks, Adva Optical Networking. p. 13.

En este caso el sistema ROADM el cual permite la restauración de un trayecto a través de la red y en caso fuera necesario se realiza una conversión de longitud de onda. Esto quiere decir que si la longitud de onda previamente establecida se encuentra en uso en el nuevo trayecto, el sistema es capaz de insertar una longitud de onda que no esté utilizada para establecer la comunicación entre los puntos afectados.

La principal ventaja de GMPLS es que gran parte de su funcionamiento se basa en tecnología que ya está en funcionamiento, con lo que implementarlo físicamente no tiene un alto coste. De la misma forma, permite la agregación de enlaces, lo que va a permitir que se puedan manejar distintos tipos de tráfico simultáneamente, proporcionando así enlaces con una mayor eficiencia.

Otra de sus ventajas, es que permite el uso de intercambio de rutas por etiqueta LSP bidireccionales, cosa que no ocurría sobre los LSP de MPLS, ya que estaban definidos de forma unidireccional. De esta manera, se va a conseguir que se vean notablemente disminuidos la cantidad de recursos debidos a la señalización utilizados por la red, así como el tiempo que se tarda en establecer una conexión.

4.3. Configuración y parámetros necesarios

Para el diseño de una red, es necesario realizar gran parte del trabajo por adelantado, como seleccionar qué nodos serán incluidos en la red, trazar la topología para interconectar los nodos, seleccionar el tipo de sistema de transmisión y conmutación a implementar y qué equipo implementar en un nodo en particular. El planeamiento de la red está más enfocado en los detalles de cómo acomodar el tráfico que será transportado por la red.

Al realizar el planeamiento de una red se puede incluir lo siguiente: seleccionar como una demanda de tráfico particular se debe direccionar, proteger, tratar y qué longitudes de onda en el espectro del sistema deben ser asignadas para transportarlo. El planeamiento de una red es llevado en 2 escalas de tiempo: planificación de la red a largo plazo y planificación de la red en tiempo real.

Al realizar la planificación de la red a largo plazo, típicamente ocurre después que la red es implementada, generalmente hay un gran conjunto de demandas en la red a ser procesadas una a la vez. Se tiene suficiente tiempo entre los procesos de planificación y aprovisionamiento de tal manera que todo equipo adicional en el plan se puede implementar.

En este caso el énfasis del planeamiento es en determinar la estrategia óptima para acomodar el conjunto de demandas de la red.

Luego que la red se encuentra en operación, la planificación a largo plazo es realizada para el tráfico en incremento que se suma a la red, asumiendo que este tráfico no necesita ser aprovisionado inmediatamente. El objetivo es determinar las estrategias óptimas, ya que existe suficiente tiempo para implementar equipos que ayudarán a acomodar el diseño.

Al realizar el planeamiento de la red en tiempo real, existe un corto plazo entre el planeamiento y el aprovisionamiento y las demandas son procesadas generalmente una a la vez. Es asumido que el tráfico debe ser acomodado o distribuido utilizando cualquier equipo que ya se encuentre implementado en la red. Por lo tanto, el proceso de planificación debe tener en cuenta todas las limitaciones que plantea la situación actual de los equipos instalados, el cual, por ejemplo, puede forzar una demanda de tráfico a ser enrutada a través de una ruta subóptima y afectar el estado de dicho tráfico. Aplicar ingeniería de tráfico, resuelve este problema.

Uno de los parámetros necesarios al implementar una red metropolitana basándose en WDM y sus aplicaciones más avanzadas: CWDM, DWDM, ROADM, es la cantidad de longitudes de onda o lambdas que son necesarias para transportar todo el tráfico que debe llevar la red. También deben tomarse en cuenta lambdas extras para tener protección de las rutas y tener contingencia ante eventos en la red. Dentro del planeamiento de red también se debe prever el crecimiento de la red en un intervalo prudente, para que la red soporte el tráfico sin necesidad de hacer una reingeniería de la misma.

De los parámetros anteriores, dependerá la capacidad de los equipos a ser y la infraestructura de fibra óptica a ser implementada. Para la infraestructura de fibra óptica se debe tomar en cuenta que para las rutas de protección es necesario tener rutas geográficamente distintas, con el fin de no depender solo de un cable de fibra óptica.

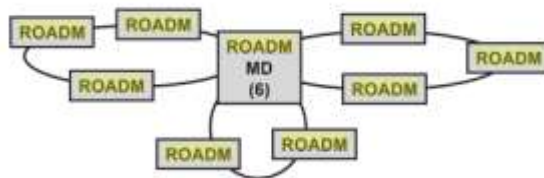
El elemento de red ROADM fue pensado para proveer derivaciones ópticas en los nodos de grado dos. Mientras todos los nodos en una arquitectura de anillo tienen grado dos, un pequeño número de nodos en topologías de malla e interconexión de anillos tienen un grado mayor a dos. Esto trae la pregunta sobre qué tipo de equipos implementar en los nodos de grado 3 o superior. Una de las soluciones es continuar utilizando las terminales basadas en conversión óptica-eléctrica-óptica, mientras se continúa con el uso de ROADM de grado dos. Debido a que todo el tráfico debe ser regenerado en esta conversión, brinda la facilidad de realizar monitoreo en las uniones de la red lo cual es ventajoso para la detección de fallas.

Sin embargo, esto también presenta problemas de escalabilidad debidos a la tecnología de conversión óptico-eléctrico-óptico, ya que existiría en un gran porcentaje de los nodos y la cantidad de transpondedores sería elevada. La solución a esto se tiene utilizando ROADM *multidegree* (ROADM multigrado), el cual extiende la funcionalidad de los elementos de red ROADM a nodos de grados mayores. Con ROADM multigrado se soportan derivaciones ópticas en todas las direcciones a través del nodo para maximizar la cantidad de transpondedores que pueden ser eliminados y serán necesarios únicamente para la funcionalidad de insertar o extraer longitudes de onda.

Para brindar mayor versatilidad a las redes, se pueden realizar combinaciones de ROADM y ROADM multigrado. Con esto se pueden proveer derivaciones ópticas para cualquier topología de red, estará sujeto al grado máximo soportado por el ROADM multigrado.

Para la red de la figura 61, se tiene implementado un nodo de grado 6 en la unión de los tres anillos. Lo que permite que el tráfico pueda transitar hacia cualquier punto de la red en cualquiera de los tres anillos. En las topologías de malla la combinación de ROADM multigrado de 3 y 4 grados se utiliza para proveer derivaciones ópticas en cualquier dirección a través de los nodos.

Figura 61. **Topología ROADM de tres anillos**



Fuente: Simmons, Jane M. Optical Network Design and Planning. p. 43.

4.4. Explicación de los resultados obtenidos

Al tener una red basada en DWDM es necesario que desde el planeamiento de la red se haya considerado que la capacidad de la red soporte el crecimiento del tráfico que cursará por la misma.

Ya que de ser necesario aumentar la capacidad en la red, los equipos DWDM son construidos con capacidades específicas, será necesario realizar cambios en los equipos o de los equipos. Lo que conlleva a realizar una inversión elevada para adaptar la red a los nuevos requerimientos del tráfico cursante.

Si una red metropolitana o *backhaul* fue implementada utilizando ROADM, esta red tiene la ventaja sobre las redes DWDM que esta red se puede adaptar fácilmente a los requerimientos del tráfico, además de brindar mayor protección ante fallas en la red. Si en una red ROADM se necesita implementar mayor capacidad para soportar el tráfico, únicamente será necesario insertar una nueva lambda o longitud de onda a la red sobre los equipos por los cuales es necesario que el nuevo tráfico transite. Esto se realiza sin la necesidad de intervenir el equipo físicamente o bien implementar nueva infraestructura de fibra óptica.

ROADM multigradocolorless, *directionless* y *contentionless* ha traído una capacidad de conmutación valiosa a la capa inferior de la óptica de transporte, capa física del modelo OSI. Esta capacidad de conmutación trae ahora la flexibilidad en la parte de la red que antes era estática y configurado anual sobre el campo.

Esta flexibilidad es aún más interesante si se puede controlar a través de funciones lógicas distribuidas, llamado plano de control que transforma este tipo de redes ópticas en verdaderas dirigidas a los servicios de redes.

A través del protocolo GMPLS, el cual es el plano de control para la red ROADM, cada equipo instalará en su procesador o tarjeta controladora la topología de la red.

Cada equipo conoce varias rutas para alcanzar los distintos equipos en la red, esto facilita la conmutación del tráfico de la red al momento de existir un evento en la red que afecte el trayecto del tráfico cursante. Para esto, GMPLS lo realiza en cuatro etapas: detección, localización, notificación y mitigación. La gestión de estos errores es posible haciendo uso del protocolo de gestión de enlace el cual es conocido como P&R (protección y restauración).

La detección de fallos depende de la tecnología implementada. En general, los fallos son detectados por las capas más bajas. Cuando un equipo detecta un fallo, este notifica al plano de control GMPLS, que tomará las medidas adecuadas. La localización de fallos se puede hacer con ayuda de GMPLS, utilizando el protocolo de gestión de enlace para la localización de la falla. Una vez localizada la falla, el protocolo de gestión de enlace activa los mecanismos de P&R, activando otros LSP, ya calculados con anterioridad, con el fin de solventar el problema.

CONCLUSIONES

1. La transmisión de datos sobre fibra óptica ha dado como resultado que las telecomunicaciones de hoy en día puedan seguir innovando y ofreciendo cada vez más confiabilidad a los usuarios de la red.
2. Las técnicas de multiplexación como DWDM permiten transportar cualquier tipo de paquetes sin importar el protocolo o tipo de encapsulación que estén manejando, lo que da versatilidad a la red.
3. La implementación de sistemas ROADM en redes de telecomunicaciones permiten tener un control eficiente del tráfico, facilitando la gestión y solución de fallas.
4. GMPLS como plano de control de ROADM permite que los equipos tengan conocimiento de topología y señalización de la red.
5. ROADM brinda la capacidad de controlar la red de forma remota, permitiendo la configuración de canales ópticos sin necesidad de realizar cambios físicos en la red.

RECOMENDACIONES

1. Tomar en cuenta que la infraestructura de fibra óptica instalada para las redes de telecomunicaciones es una parte fundamental. Para mantenerla en óptimas condiciones es importante que se realicen mantenimientos constantes en la misma.
2. Considerar, conjuntamente con el planeamiento de la red, un estudio sobre qué tipo de equipos y qué proveedor brinda la mejor solución y respaldo para el diseño requerido.
3. Considere que con el fin de mantenerse a la vanguardia de la tecnología, es importante que se lleven a cabo actualizaciones de forma periódica en los equipos.
4. Para brindar un soporte óptimo a la red, es importante que el personal a cargo del monitoreo y solución de fallas se encuentre capacitado adecuadamente.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Conmutador selectivo de longitud de onda.* [en línea]. <http://www.jdsu.com/productliterature/roadm_and_wavelength_selective_switches.pdf> [Consulta: 7 de mayo de 2014].
2. *Evolución del multiplexor óptico reconfigurable de inserción y extracción.* [en línea]. <<http://www.jdsu.com/ProductLiterature/ROADM-evolution.pdf>> [Consulta: 27 de mayo de 2014].
3. INC, Igi Consulting. *ROADMS – From the core to the edge.* Estados Unidos de America: Information Gatekeepers Inc, 2008. 201 p.
4. LECOY, Pierre. *Fiber-Optic Communications.* 3a ed. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2008. 333 p. ISBN: 978-84821-049-3
5. *Multiplexación de longitud de ondas densas.* [en línea]. <<http://www.cienaargentina.com.ar/technology/dwdm-vs-cwdm/>> [Consulta: 3 de febrero de 2014].
6. *Multiplexores de inserción y extracción.* [en línea]. <<http://www.conelectronica.com/FTTx-y-FTTh/Multiplexores-add/drop-reconfigurables-ROADMs.html>> [Consulta: 1 de junio de 2014].

7. *Multiprotocolo de conmutación de etiquetas generalizado*. [en línea]. <http://es.wikipedia.org/wiki/General_Multiprotocol_Label_Switching> [Consulta: 5 de junio de 2014].
8. *Redes de nueva generación*. [en línea]. <<http://filotecnologa.wordpress.com/2011/08/24/roadm-en-las-redes-de-nueva-generacion/>> [Consulta: 15 de mayo de 2014].
9. *Redes ópticas flexibles*. [en línea]. <<http://www.transmode.com/en/technologies/flexible-optical-networks/roadm>> [Consulta: 2 de junio de 2014].
10. *Redes ROADM*. [en línea]. <<http://www.mrv.com/next-generation-roadm-networking/>> [Consulta: 25 de mayo de 2014].
11. RIVERA ARANA, Cheryl Yocelyn. *Multiplexación por división de longitud de onda (wdm, wavelength division multiplexing)*. Universidad Francisco Marroquín, Facultad de Ingeniería de Sistemas, Informática y Ciencias de la Computación, Guatemala 2002.
12. SIMMONS, Jane M. *Optical Network Design and Planning*. 2a ed. Suiza: Springer International Publishing, 2014. 516 p. ISBN: 978-3-319-05226-7
13. *Tecnología ROADM*. [en línea]. <<http://www.packetlight.com/technology/roadm>> [Consulta: 2 de mayo de 2014].